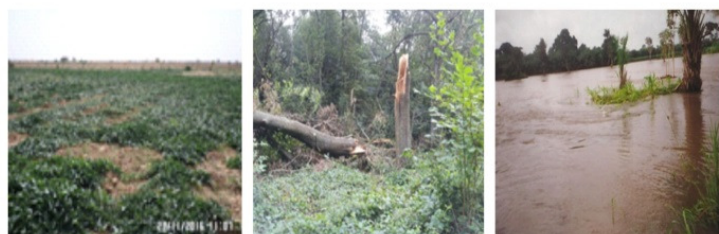


Climat, ville et environnement

Actes du colloque



**3-6 juillet 2017
Sfax (Tunisie)**



Editeurs scientifiques
Salem DAHECH et Sami CHARFI

Colloque de l'AIC organisé par l'université de Sfax (FLSH, lab SYFACTE) en collaboration avec l'Association Tunisienne de Climatologie

Climat, ville et environnement

**XXX^e COLLOQUE DE L'ASSOCIATION INTERNATIONALE
DE CLIMATOLOGIE**



Climat, ville et environnement

Actes du colloque de Sfax

Hôtel BorjDhiafa

3-6 juillet 2017

Éditeurs scientifiques

Salem DAHECH et Sami CHARFI

**Colloque organisé par l'Université de Sfax (FLSHS et lab SYFACTE)
en collaboration avec l'Association Tunisienne de Climatologie**

Participation à la finalisation de l'ouvrage :

Mounir Jarraya, Riadh Bouaziz, Mohamed Féki et Abdelkarim Boujelben

Photos de la couverture :

Auteurs d'articles tirés de cet ouvrage

*Les opinions défendues dans cet ouvrage
n'engagent que les auteurs ;
elles ne sauraient être imputées
aux institutions auxquelles ils appartiennent
ou qui ont financé leurs travaux*

SYFACTE, 2017

ISBN : 978-2-907696-23-4

Coordinateurs

Salem Dahech et Sami Charfi

Comité scientifique

Amoussou Ernest Université d'Abomey-Calavi, Bénin	Karrouk Mohammed-Saïd Université Hassan II, Maroc
Ben Boubaker Habib Université de La Manouba, Tunisie	Kastendeuch Pierre Université de Strasbourg, France
Bigot Sylvain Université de Grenoble-Alpes, France	Kermadi Saida Université de Lyon 2, France
Bonnardot Valérie Université Rennes 2, France	Madelin Malika Université Paris 7, France
Bridier Sébastien université d'Aix-Marseille, France	MaherasPanagiotis Université de Thessalonique, Grèce
Camberlin Pierre Université Bourgogne Franche-Comté, France	Marie José Alcoforado Université de Lisbonne, Portugal
Cantat Olivier Université de Caen Basse-Normandie, France	Martin Nicolas Université de Nice, France
Carrega Pierre Université de Nice, France	Medjerab Abderrahmen Houari Boumediene, Alger, Algérie.
ChkirNajiba Université de Sfax, Tunisie	Mendonça Francisco Université Fédérale de Parana, Brésil
Dahech Salem Université de Sfax, Tunisie	Morel Béatrice Université de La Réunion, France
Daoud Abdelkarim Université de Sfax, Tunisie	Norrandt Caroline Université Lille 1, France
Douguédroit Annick université d'Aix-Marseille, France	Paul Patrice Retraité Université de Strasbourg, France
Drogue Gilles Université de Lorraine, France	Planchon Olivier Université Rennes 2, France
Dubreuil Vincent Université Rennes 2, France	Quénol Hervé Université Rennes 2, France
El Melki Taoufik Université de La Manouba, Tunisie	Richard Yves Université Bourgogne Franche-Comté, France
Endlicher Wilfried Université de Berlin, Allemagne	Rome Sandra Université de Grenoble-Alpes, France
Erpicum Michel Université de Liège, Belgique	Sagna Pascal Université de Cheick Anta Diop, Sénégal
Fallot Jean-Michel Université de Lausanne, Suisse	Soubeyoux Jean-Michel Météo France Toulouse, France
Fortin Guillaume Université de Moncton, Canada	Traboulsi Myriam Université Libanaise, Liban
Fратиanni Simona Université de Turin, Italie	Ullman Albin Université Bourgogne Franche-Comté, France
Gammar Amor Université de La Manouba, Tunisie	VissinExpédit Université d'Abomey-Calavi, Bénin
Henia Latifa Université de Tunis, Tunisie	ZahariaLiliana Université de Bucarest, Roumanie
Joly Daniel Université Bourgogne Franche-Comté, France	

Comité d'organisation

Riadh BOUAZIZ, Mohamed FEKI

Mounir JARRAYA, Zouhair HELAOUI

Mohamed SOUISSI, Abdelkarim BOUJELBEN

Marwen GHRIBI Hamdi EUCHI

Introduction au XXX^e COLLOQUE DE L'ASSOCIATION INTERNATIONALE DE CLIMATOLOGIE

Ville, climat et environnement

Salem DAHECH

Enseignant-chercheur à l'Université de Sfax (département de géographie à la Faculté des Lettres et des Sciences Humaines)

Ce volume d'environ 600 pages est consacré en grande partie au thème du climat urbain. Le dernier colloque abordant cette thématique a eu lieu en 2005 à Gênes en Italie. Cette trentième édition prouve encore une fois que l'Association Internationale de Climatologie se porte bien et que les chercheurs francophones en climatologie sont au rendez-vous.

Les trois dernières décennies furent marquées par la rapidité de la croissance de la population urbaine, partout dans le monde. Cette croissance constitue l'un des enjeux majeurs du développement par son intensité, les transformations sociales, politiques et économiques que génère et surtout son impact sur des environnements, parfois fragiles, conduisant souvent à leur dégradation. L'urbanisation entraîne, en effet, de nombreuses conséquences, souvent négatives, qui peuvent concerner aussi bien les sols, l'eau que l'atmosphère.

La ville crée son propre climat, voire ses propres climats. Plusieurs ambiances bioclimatiques s'observent dans le même quartier. La ville est souvent plus chaude et plus polluée que la campagne voisine. On y trouve plusieurs activités polluantes (industrie, transport et dans certains cas également le stockage et les traitements des déchets), autant d'activités qui modifient la composition chimique de l'atmosphère en rejetant des quantités supplémentaires de gaz à effet de serre (GES) et de nombreuses autres substances liquides, solides ou gazeuses. Parmi ces polluants, les GES jouent un rôle essentiel dans l'augmentation de la quantité de chaleur absorbée par l'atmosphère et rayonnée vers la surface en phase nocturne.

La chaleur excédentaire engendrée par la ville, particulièrement en été, n'est pas sans incidences sur la santé humaine ou sur la consommation en énergie électrique dédiée à la climatisation. La compréhension des diverses ambiances bioclimatiques dans la ville est requise pour développer des stratégies d'adaptation et d'atténuation adéquates.

Pour cerner la mosaïque de microclimats qui se met en place dans une ville, des mesures spécifiques sont requises. En effet, les données horaires ou journalières des services météorologiques généralement enregistrées dans les aéroports restent globales et ne peuvent en aucun cas être représentatives du temps auquel est exposée la majeure partie de la population occupant les quartiers denses de la ville. Dans cet ouvrage certains auteurs montrent aussi l'apport de la télédétection et la modélisation dans les études climatiques à échelles fines.

Outre le climat de la ville, d'autres thèmes seront abordés :

- Topoclimatologie et agroclimatologie
- Variabilités et aléas climatiques
- Modélisation climatique
- Géomatique et climat
- Climat et ressources en eau

Cette manifestation se tiendra dans un cadre exceptionnel : l'hôtel Borj Dhiafa à Sfax en Tunisie. Le "*borj*", littéralement : forteresse, est une habitation que l'on peut qualifier de « semi-rurale ». Elle a été une habitation saisonnière de la banlieue de Sfax jusqu'au XIX^e siècle. L'architecture et les matériaux utilisés dans la construction de ce genre d'habitations offrirent plus de confort thermique durant la longue saison chaude que les constructions modernes. La ville de Sfax au centre-est tunisien constitue un vrai laboratoire pour mener des études en climatologie urbaine. Il s'agit d'une ville occupant une plaine littorale avec un tissu urbain varié en mutations continues. Il s'agit aussi d'une ville industrialisée avec un trafic routier dense dans sa partie centrale et où les conditions météorologiques favorables aux fortes concentrations des polluants dans l'air sont fréquentes.

Le dernier jour du colloque sera consacré à une excursion dans l'archipel des Kerkennah qui portera sur les changements environnementaux dans un milieu insulaire vulnérable. Durant la matinée une balade en mer à bord d'un petit navire nous permettra d'apprécier la richesse halieutique de l'archipel et découvrir les méthodes de pêche artisanale. Au début de l'après-midi nous découvrirons la vulnérabilité de l'archipel face aux changements environnementaux contemporains et comment l'homme s'expose davantage aux divers risques.

Avant de clôturer cette introduction je tiens à exprimer en premier lieu ma profonde gratitude au professeur Gérard Beltrando, un fidèle ami de Sfax, de la Tunisie et évidemment de l'AIC. Il m'a encouragé à prendre l'initiative de l'organisation. A ses côtés, à travers des expériences communes riches, j'ai eu la chance d'apprendre à gérer au mieux ce type de manifestation. Il a été derrière la réussite de plusieurs colloques de l'AIC tenus après le succès de 2006. Incontestablement, les empreintes de mon professeur seront faciles à déceler durant cette édition.

Mes remerciements s'adressent également aux membres du comité de lecture cités ci-dessus qui ont contribué à la sélection et l'amélioration des textes relus minutieusement dans la plupart des cas.

Je souligne les efforts fournis par mes collègues membres du comité d'organisation qui n'ont pas ménagé leur peine depuis presque une année.

Je remercie le bureau de l'AIC et les collègues qui nous ont fait confiance pour organiser ces journées ainsi que ceux qui ont fait l'effort pour nous partager cette manifestation à Sfax. Les 110 inscrits au colloque sont venus d'une vingtaine de pays pour écouter nos 83 communicants malgré les contraintes financières et les circonstances géopolitiques internationales.

Je ne peux pas finir sans souligner l'apport financier de nos partenaires. Je cite en particulier le laboratoire SYFACTE, la FLSHS, l'AUF et la fondation BNPPARIBAS. Une liste exhaustive des logos des différents partenaires suit.



SYFACTE



مجموعة بوليننا القابضة
POULINA GROUP HOLDING



INSTITUT
FRANÇAIS
TUNISIE



Conférences invitées

LE CLIMAT URBAIN DE NICE, DANS UN CONTEXTE MEDITERRANEEN

CARREGA P., MARTIN N.

Université de Nice-Sophia Antipolis, UMR ESPACE

Résumé : *En situation méditerranéenne, le climat de Nice obéit aux influences de la mer, du relief, et de la ville proprement dite, ce qui rend très complexe l'interprétation des données et la modélisation. Après un rappel des caractères de la ville et des modalités d'étude, l'attention est portée sur l'îlot de chaleur urbain (parfois négatif) puis sur sa modélisation (interpolation spatiale par régression environnementale). La ventilation de la ville est également traitée, avec en particulier ses implications sur la pollution de l'air, dont l'ozone est l'objet d'une attention spéciale.*

Mots-clés : *climat urbain, climat méditerranéen, îlot de chaleur, pollution de l'air, modélisation.*

Abstract : *Settled in a mediterranean environment, the climate of Nice is submitted to influences of sea, relief, and of town. The consequences are in in complexity of data interpretation, and for modelling. After town characteristics and study conditions explanation, we work on Urban Heat Island (sometimes Cold Heat Island) then on modelling (spatial interpolation with environmental regressions). Town ventilation and its consequences on air pollution and especially ozone are studied.*

Keywords : *urban climate, mediterranean climate, Heat Island, air pollution, modelling.*

Introduction

La croissance urbaine, continue dans l'absolu et relativement, confronte de plus en plus de gens à la vie dans un milieu très artificialisé, dont le climat s'éloigne de celui des campagnes environnantes.

Dans les régions méditerranéennes, le froid hivernal peut poser problème avec des habitations parfois mal chauffées, mais la chaleur et la durée de l'été constituent le problème thermique majeur en ville dans la mesure où la climatisation (production de froid) a un coût non négligeable, ce qui ne la rend pas accessible à tous, où seuls les locaux fermés peuvent en bénéficier (logements, bureaux, magasins) et donc pas la rue, et enfin où elle constitue une pratique discutable sur les plans énergétique et les bilans de carbone.

La circulation de l'air en ville peut être un remède au moins partiel à la surchauffe, et en même temps assurer un minimum de ventilation nécessaire pour éviter la stagnation des polluants atmosphériques. Elle dépend de l'architecture urbaine, du tracé des rues, mais aussi du climat et donc des conditions géographiques régionales et locales : Marseille est plus venté que Nice, Tunis ou Sfax, pour des raisons synoptiques et topographiques, inversement les régimes de brise thermique y sont plus rares.

Nice est une ville typiquement méditerranéenne : située en bord de mer, entourée de collines et de montagnes, elle subit des interférences physiques permanentes entre le cadre naturel et la ville, ce qui introduit des biais dans la recherche des causes de tel ou tel caractère climatique.

La modélisation apporte des solutions par les simulations qu'elle autorise, et nous y avons eu largement recours dans le domaine statistique.

1. Objectifs et méthodes de l'étude

1.1. Le cadre général

Ces travaux sur le climat niçois ont débuté à partir de 1982, en étapes inégales et multiples, nourris

par diverses opportunités (thèse de doctorat d'état, contrats de recherche divers, expériences à but pédagogique, etc) avec P. CARREGA ; et continuent avec l'apport plus récent de N. MARTIN.

Undouble objectif s'esttrès clairement dégagéde ces diverses études : apprécier l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU) de la ville de Nice, à divers moments de la journée et de l'année d'une part, et d'autre part caractériser la ventilation de la ville, dans la rue, là où vivent les gens, mais aussi au-dessus des toits, afin d'apprécier le niveau de confort surtout en été (circulation de l'air) pour les habitants, et le potentiel de diffusion ou d'accumulation des polluants atmosphériques dans cet espace fortement peuplé.

Les données climatologiques disponibles en milieu urbain montrent vite des limites par leur rareté et leur non-respect quasi systématique des normes requises (OMM), en particulier le manque chronique de dégagement à la périphérie d'un abri météorologique qui pousse parfois à utiliser les toits d'immeubles... C'est pourquoi le recours à la mesure thermique et hygrométrique a été largement utilisé, que ce soit par station temporaire (quelques mois) dans un site urbain, par campagnes de relèvements instantanés (ce qui nécessite des personnes qualifiées simultanément disponibles) ou enfin de manière itinérante, en auto ou à vélo. Les données radiométriques de température de surface ne seront pas évoquées ici. Le vent a également été mesuré mais pas de manière itinérante, évidemment. La station servant de référence est celle de l'aéroport de Nice, dans l'axe de drainage de la vallée du Var, et toute proche de la mer.

1.2. Une mer et un relief contraignants

La latitude (43°N) et la protection opérée par les massifs montagneux au nordmettent en position marginale Nice et la Côte d'Azur par rapport à beaucoup de perturbations zonales ou de nord-ouest (fig. 1). La relative rareté résultante du vent synoptique et des jours à forte nébulosité laissent se développer les brises thermiques, de terre la nuit se poursuivant en matinée l'hiver, et de mer en journée. Ces brises se doublent dans les deux vallées encadrant la ville d'une composante « montagne » la nuit, et « vallée » le jour, et constituent des axes majeur de drainage et de transport des polluants urbains qui sont recyclés avec les renverses du matin et du soir...

1.3. L'interpolation spatiale

Les températures ont été modélisées spatialement selon une logique inductive, par « régression environnementale » (Carrega, 1992, Martin et al, 2014). Une régression multiple est calculée à partir d'une matrice de données comprenant pour chaque observation sa température et les régresseurs, soit une série de variables descriptives de son environnement topographique (voire urbain). L'équation est de type : $Température = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n$, et comporte une constante a_0 représentant une sorte de « fond » régional qui va être modulé par l'influence de la topographie (a_1 = altitude, a_2 = distance à la mer, a_3 =encaissement, etc.), ce qui donne indirectement un sens physique à l'approche.

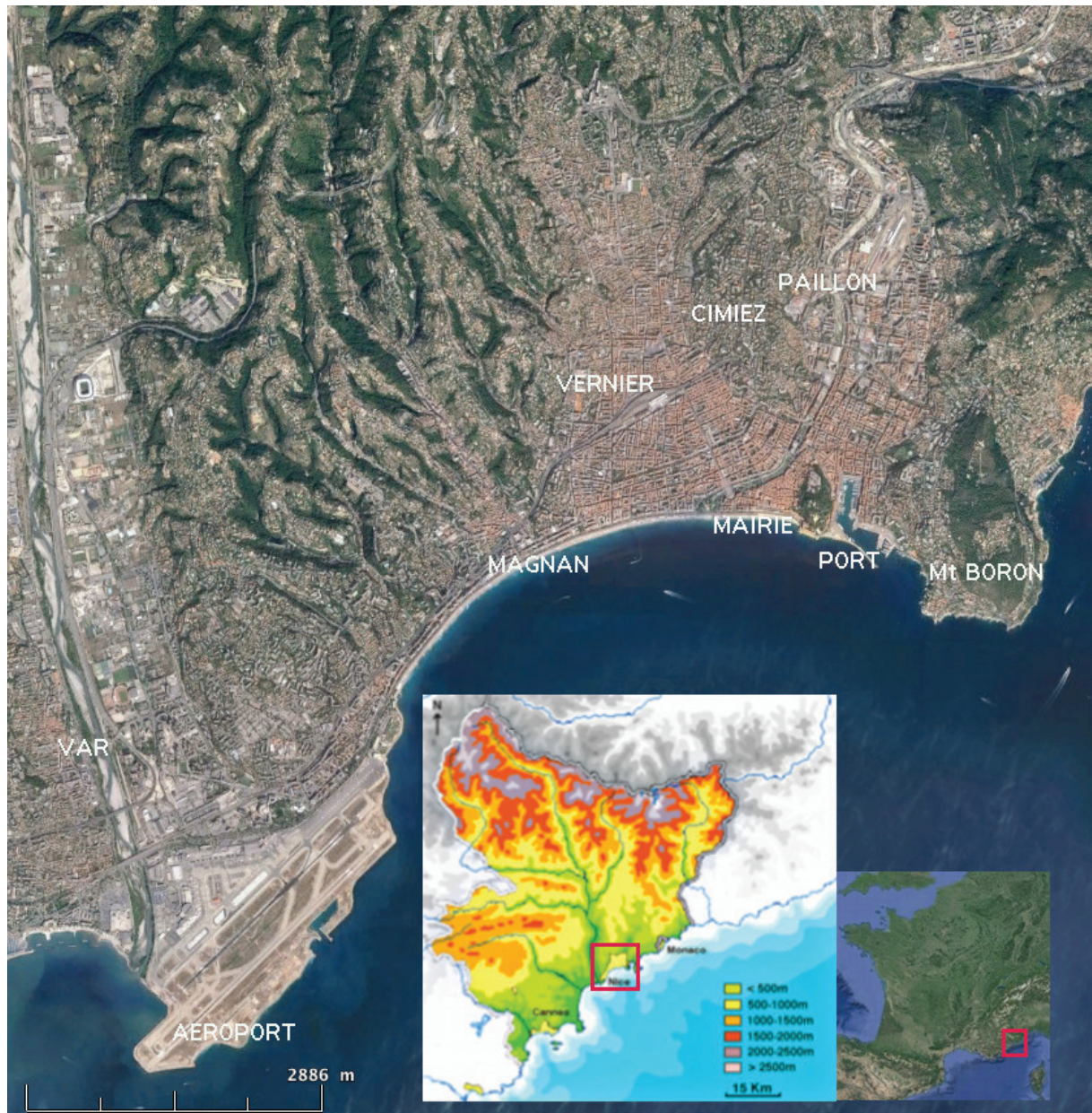


Figure 1. La ville de Nice et son environnement. Source : Google Earth.

2. Ilot de chaleur urbain ? Pas si simple...

2.1. Facteurs de différenciation thermiques

Trois facteurs principaux différencient le comportement temporel des températures en un lieu donné : la saison, la période de la journée (nuit ou jour), et le type de temps. Ainsi les écarts thermiques entre littoral et intérieur de la ville sont généralement positifs : en permanence l'hiver, et la nuit seulement en été. C'est du début mars jusqu'au début décembre environ que le continent, plus que la ville, devient plus chaud que la mer en journée, ce qui gouverne le régime de brises thermiques. Le type de temps intervient par ses conséquences radiatives et advectives : la nébulosité et le vent sont facteurs d'homogénéisation des températures et humidités relatives, puisque la première minimise les contrastes thermiques de nuit comme de jour, et le second favorise les mélanges par brassage.

2.2. La chaleur urbaine (et ... littorale en hiver)

Une station temporaire installée en pleine ville (rue Vernier, face exposée au nord, cf fig.1) y a montré une température supérieure de $0,86^{\circ}$ en moyenne, de janvier à juin 2001 par rapport à l'aéroport (Carrega, Rosa, 2005 ; Carrega, 2013). En janvier la ville est plus chaude de 1 à 2° la nuit et en matinée, puis l'écart se restreint et devient nul ou presque entre 11h et 16h avant d'augmenter en soirée. En été, l'excédent thermique urbain reste inférieur à 1° la nuit, puis s'inverse : de 6h à 12h la ville est un îlot de fraîcheur.

Par contre l'humidité -absolue et relative- est en principe plus basse en ville, particulièrement en été où la température du point de rosée est en moyenne de 1° à 2° inférieure en ville.

Plusieurs mesures effectuées en divers points simultanément ont permis d'ajouter un aspect spatial à l'étude du climat niçois. Par exemple durant les 12 jours d'une campagne de mesures sur 31 points, en janvier 1983, on constate une moyenne de 4°C d'écart entre le littoral urbain et la plaine du Var (considérée comme « rurale » à l'époque) en début de matinée (fig. 2).

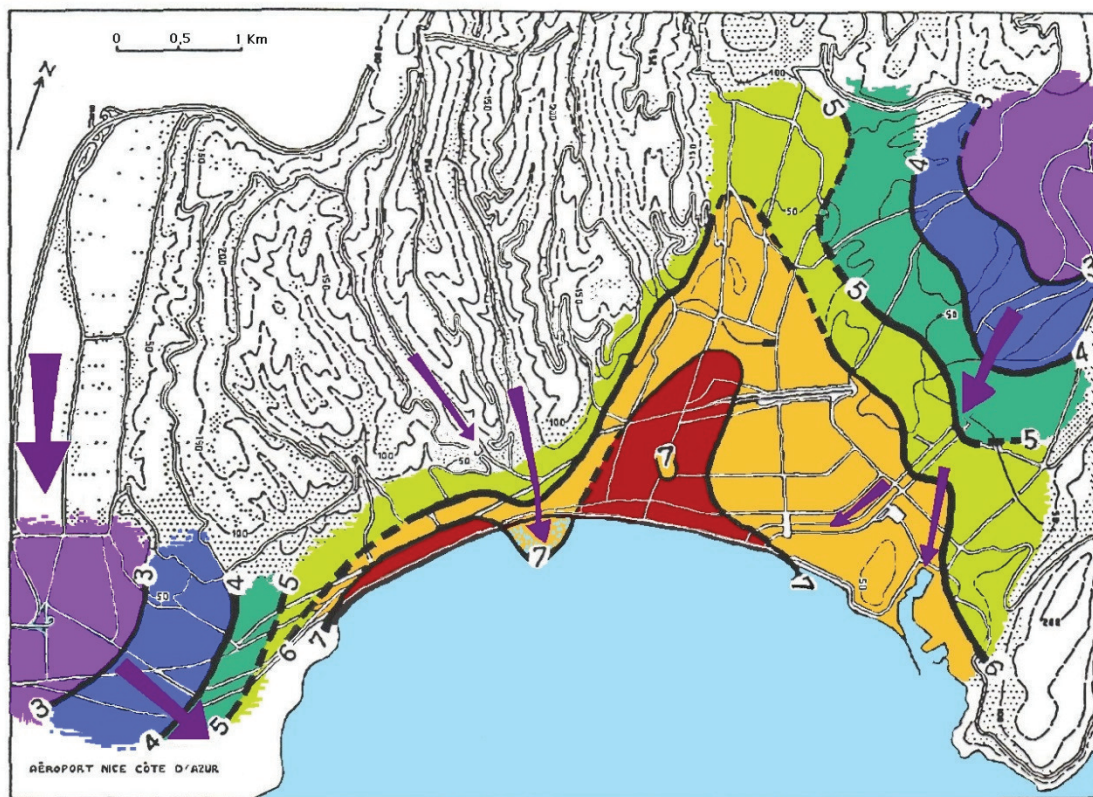


Figure 2. Moyenne des températures mesurées à 7h30 locales entre le 10 et le 21 janvier 1983. Les flèches indiquent les principales advections froides (brise de montagne). Interpolation manuelle (Carrega, 2013, in « Climatologie »).

Une petite partie de la ville est un peu plus chaude (excepté un jardin public $< 7^{\circ}$), mais la chaleur de la ville compte en fait moins que celle de la mer (environ $13-14^{\circ}$), et les advections froides de la brise de terre-montagne font nettement baisser la température au débouché des fleuves (Var à l'ouest et Paillon à l'est) mais aussi des petits vallons (tel le Magnan qui repousse en mer l'isotherme $+7^{\circ}\text{C}$). L'IC n'est pas urbain...

2.3. Complexité et interférences

Il ressort qu'une hiérarchie thermique complexe se dégage selon la saison, le moment de la journée,

et le type de localisation (et donc d'environnement), liée aux interférences entre mer, continent et ville, plus le site particulier de l'aéroport au débouché du Var, recevant de nuit une brise de montagne froide et sèche d'origine lointaine (fig. 3).

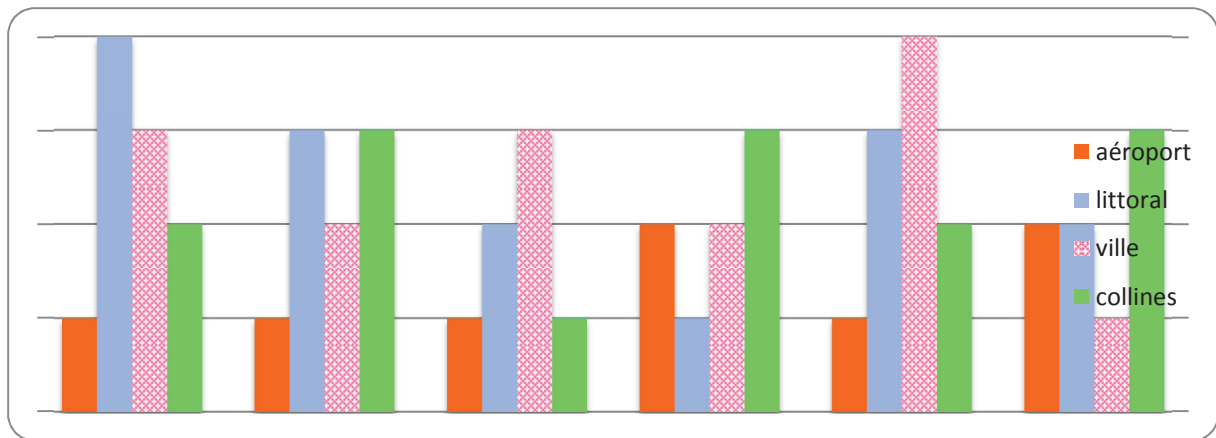


Figure 3. Modèle conceptuel comparant les températures de quatre principaux types de sites niçois, de 1 (plus froid) à 4 (plus chaud). Collines en exposition sud, centre-ville.

3. La modélisation statistique par régressions multiples « environnementales »

Procédant à une modélisation inductive (statistique) de la température, il est devenu classique de « reconstituer » un champ thermique par des descripteurs (« prédicteurs ») qui ont un sens physique (Carrega 1994).

3.1. Prise en compte de l'environnement topographique

Pour prendre en compte uniquement l'environnement topographique, on construit une équation de régression « environnementale » à partir des mesures piétonnes de janvier 1983 en fin de nuit :
 Température = $5,89^\circ - 0,0011 \text{ altitude} + 0,0237 \text{ encaissement} + 0,0048 \text{ exposition} - 0,0010 \text{ continentalité}$.

Où, pour chaque observation, altitude est en m ; encaissement en m (élévation relative par rapport à tous les points à 100m à la ronde, favorable aux inversions thermiques nocturnes) ; exposition en degrés (0° au N, 180° au sud, 90° à l'E et à l'W) ; continentalité en m à la puissance 0,5 (distance au trait de côte pour délinéariser le gradient thermique).

Le coefficient de corrélation multiple r est de 0,76 ($r^2=0,58$), et l'erreur-type (écart-type des résidus de régression) $1,08^\circ$ (l'écart-type de l'échantillon étant de $1,54^\circ$).

Des différences spatiales importantes existent donc sur le site de la ville de Nice, préalablement à l'installation de la ville, uniquement liées au contact terre-mer et à la topographie.

3.2. L'environnement urbain

Au lieu de cette approche « rurale » au sens où elle n'intègre que le relief, on peut à l'inverse ne considérer que l'aspect urbain, en n'utilisant que des descripteurs urbains. On obtient alors :

Température = $5,43^\circ + 0,0078 \text{ densité de population} - 0,0143 \text{ distance mur} - 0,0006 \text{ distance centre-ville}$.

Où : densité de population est calculée par district urbain ; distance mur, en m, est la distance séparant un point de la façade (d'une construction) la plus proche, plafonnée à 50 m : et centre-ville est la distance puissance 0,5, en mètres, entre un point et le centre le plus densément bâti. Le coefficient de corrélation multiple du modèle exclusivement urbain est 0,82 ($r^2 = 0,67$) et l'erreur-type 0,92°.

3.3. La synthèse relief-ville

Une ville étant à l'évidence installée dans un site donné, il est logique de combiner les deux approches, et l'on obtient : Température = $6,52^\circ - 0,007 \text{ altitude} + 0,04 \text{ encaissement} - 0,0005 \text{ continentalité} + 0,0049 \text{ densité population} - 0,0005 \text{ distance mur} - 0,0004 \text{ centre-ville}$. Cette fois r atteint 0,94, r^2 dépasse 0,88, et l'erreur-type a baissé à 0,58°.

Ces travaux datent de près de 25 ans. De nos jours les progrès permis par les Systèmes d'Information Géographiques (ici QGIS) permettent de simuler avec rapidité et souplesse.

Le 4 juin 2015, avec une dorsale anticyclonique sur l'Europe, un régime de brise de mer de SSE à 2-3m/s, une température maximale de l'ordre de 25° à l'aéroport est organisé un circuit comprenant 777 points de mesure à vélo dans et autour de Nice vers 14-15h, moment où l'évolution temporelle des températures est faible. Le modèle obtient un R^2 de 0.66 avec une erreur-type de 0.81°C sur les points 727 intégrés au modèle et une erreur-type de 0.72°C sur les 50 points utilisés pour la validation (non inclus dans la construction du modèle). Les valeurs mesurées oscillent entre 23 et 27°. 5 prédicteurs sont conservés :

- Modèle Numérique d'Élévation à 1m de précision (incluant le bâti) duquel découlent les autres prédicteurs,

- distance à la mer

- Exposition E/W (l'est étant « frais » car à l'ombre, et l'ouest chaud)

- Encaissement moyen à 40 m

- Encaissement moyen à 3000m.

Ici, ce n'est pas un champ thermique moyen qui est reconstitué, mais bien une situation unique, donc le poids respectif des variables « explicatives » (les prédicteurs) peut différer d'un jour à l'autre. Le 4 juin, ce sont surtout la distance à la mer et l'élévation qui comptent (fig. 4). La proximité de la mer ainsi que l'élévation sont facteurs de fraîcheur, et dans une moindre proportion l'absence d'encaissement topographique sur un large rayon (3000m), ainsi que l'encaissement à court rayon (40m) incluant donc les façades de certains bâtiments, et l'exposition vers l'ouest (à cette heure) moins activement toutefois.

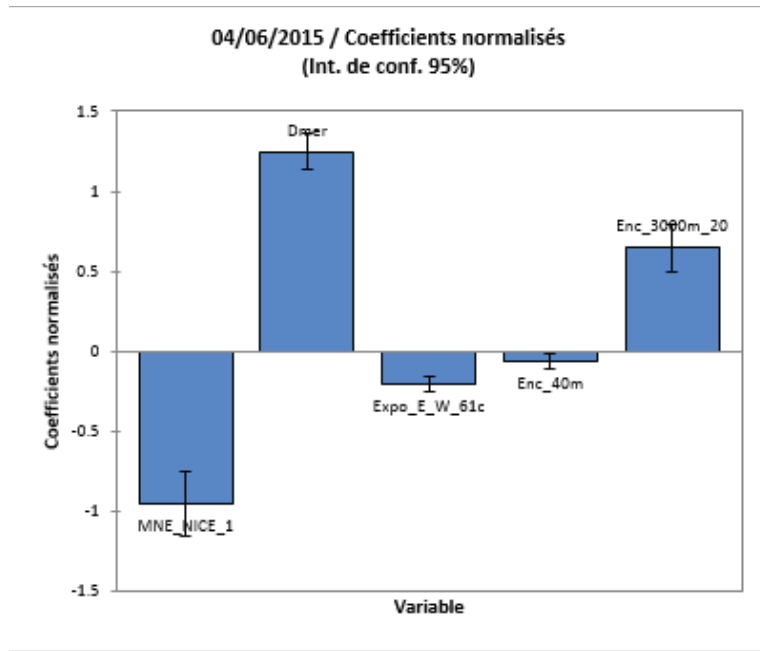


Figure 4. Poids relatif des variables dans la régression

La carte obtenue montre clairement la fraîcheur relative du littoral, surtout sur une exposition E (colline du « château » au port et surtout baie de Villefranche, à « l'ombre » du Mont Boron (E de la carte) ; la plus forte chaleur vers l'intérieur, surtout en exposition W, et l'absence attendue de net ICU (fig. 5).

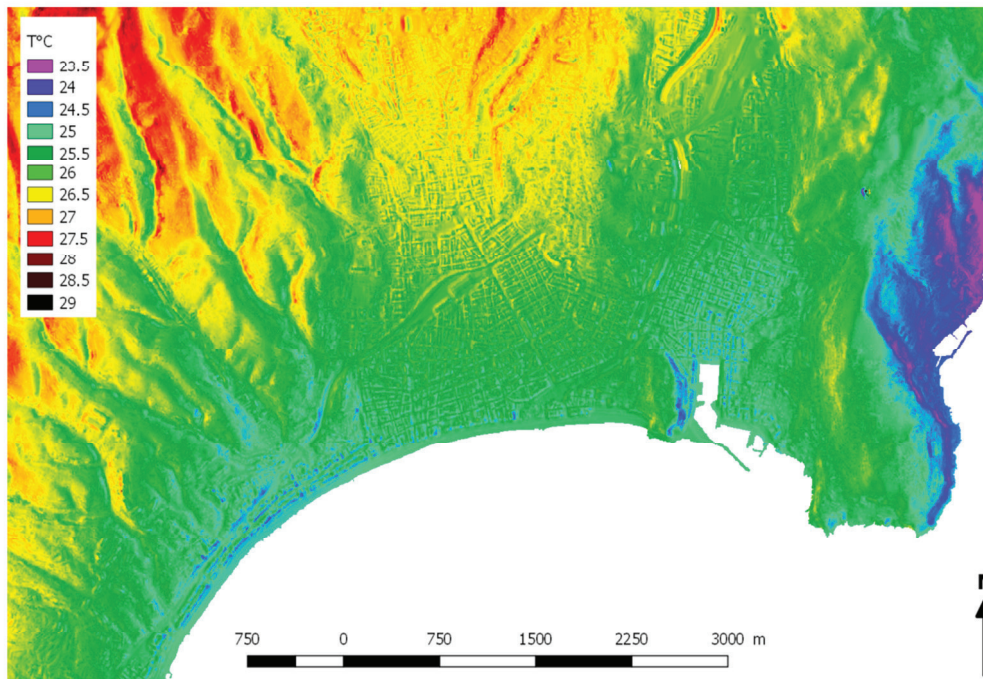


Figure 5. Carte des températures de Nice le 4 juin 2015 entre 14 et 15h, obtenue par régression environnementale (topographie et bâti).

4. Ventilation et pollution par l'ozone

4.1. Les vents dominants

Les données de vent enregistrées à l'aéroport, ainsi que celles issues de mesures ponctuelles en ville, de la station Vernier (voir plus haut), de l'anémo-girouette installé sur le toit de la mairie de Nice, et des nombreux suivis instrumentaux de trajectoires de CLB (Constant Level Ballon) prouvent que le régime dominant est largement d'origine thermique (fig. 6). Une étude approfondie (Carrega, 2000) montre qu'en 1998 à l'aéroport la brise de terre a soufflé durant 337 nuits (92%) et s'est prolongée 22 fois en journée (6%). La brise de mer diurne domine également, mais moins largement avec 187 jours (51%). Le vent synoptique principal vient de l'E (20%). Les vitesses de brise diurne sont modérées puisqu'à 98% inférieures à 4 m/s, ce qui pose le problème du recyclage des polluants : ceux-émis sur le littoral très peuplé avec une forte circulation automobile remontent les vallées jusqu'aux crêtes de la frontière italienne en un laps de temps compris entre 3 et 6 h, puis une partie redescend la nuit suivante en brise de montagne/brise de terre, et s'ajoute à ce qui a été émis sur le littoral. Il en est de même pour les précurseurs de l'ozone.

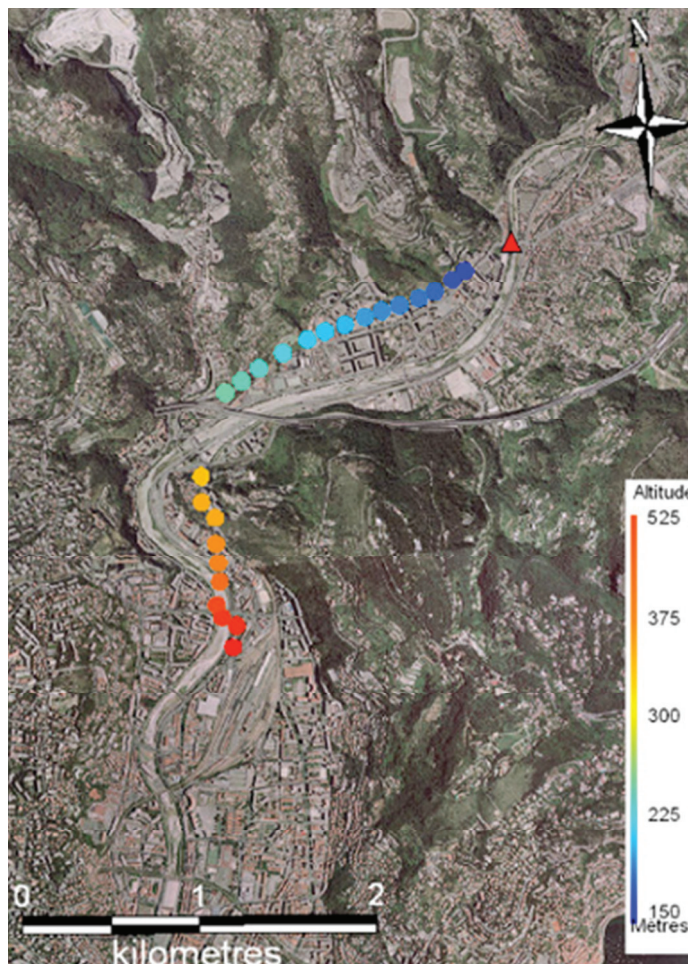
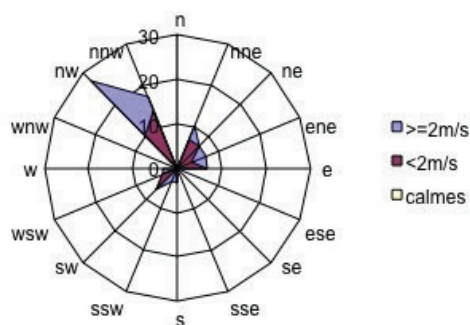


Figure 6. Trajectoire de CLB lâché depuis le pont A. France (Paillon), à 8h37, le 19 décembre 2008. Une mesure par télémètre et théodolite toutes les 30 secondes. Le ballon descend la vallée vers le sud, en brise de montagne. (Carrega, 2009).

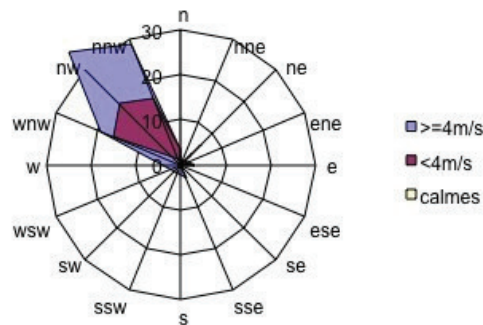
4.2. Différences entre aéroport et ville

La ville est soumise au même régime de brises thermiques que l'aéroport, avec des nuances : la brise de terre y est moins forte car non canalisée par effet Venturi comme à l'aéroport (vallée du Var), y compris dans la vallée du Paillon. Toujours en ville, la renverse de début de matinée par la brise de mer plus précoce, et en milieu d'après-midi les vents dominants de SW et E à la mairie (fig.1) laissent une large place à la brise de terre encore ou déjà établie, à l'aéroport (fig.7).

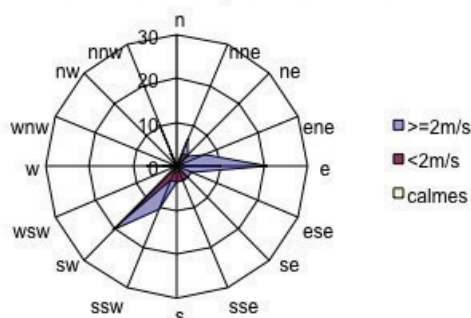
Rose des vents à 10h en janvier 2001 à Nice mairie



Rose des vents à 10h en janvier 2001 à Nice aéroport



rose des vents à 14h en janvier 2001 à Nice mairie



rose des vents à 14h en janvier 2001 à Nice aéroport

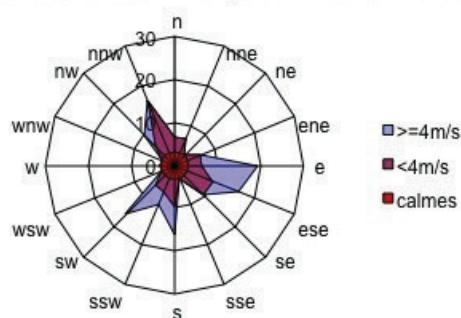


Figure 7. Roses des vents à Nice-mairie et Nice-aéroport en janvier 2001 à 10h et 14h TUC (Carrega, 2001).

En synthèse, toutes les mesures montrent que :

- La nuit une forte inversion thermique régnant sur la cuvette topographique siège de la ville aucun ICU est détectable au-dessus des toits, été comme hiver, par temps clair.

- En journée, les CLB suivis surtout en été ont montré qu'à l'exception d'un seul cas d'été sur une cinquantaine de trajectoires (Carrega, 2014), la règle est l'absence d'ICU détectable alors que plusieurs auteurs citent des courbes de profil en cloche atteignant aisément 500 à 800 m à Fribourg ou à Lisbonne (Ruffieux 1986, Fallot et Alcoforado 1988).

La couche limite urbaine de surface est plaquée vers le sol et surmontée d'une couche « rurale » d'origine continentale la nuit et en début de journée et d'origine marine en journée. C'est la stabilité de l'air qui domine, même de jour avec la brise marine.

Au sein de ces couches de brise diurne ou nocturne, la vitesse du flux est remarquablement constante, comprise entre 2,5 et 4 m/s (3 m/s en moyenne), mais elle est localement accélérée en basses couches, dans les vallées par canalisation, et peut alors dépasser aisément 5-6 m/s, et même atteindre parfois 10 m/s en brise de terre dans la vallée du Var.

Mais, en dehors de cas locaux d'accélération du vent liés à la topographie, en ville au-dessus des

toits l'air circule presque tout le temps, mais à des vitesses modérées de jour comme de nuit entre 2,5 et 4m/s (3 m/s en moyenne), la ventilation n'est donc pas optimale, et le renouvellement de l'air mal assuré du fait du recyclage dû aux renverses de direction associées aux brises thermiques.

4.3. L'ozone à Nice

L'ozone O_3 est un polluant nocif pour la santé humaine, la vie en général et les matériaux, le seul a priori moins abondant en ville que dans la campagne environnante puisqu'il est détruit par le monoxyde d'azote NO issu en particulier de la circulation automobile. Ce principe a été soumis à vérification par de nombreuses mesures itinérantes effectuées l'après-midi à vélo avec un analyseur portable durant plusieurs étés. Durant l'été 2007, 70 circuits similaires ont donné lieu chacun à 779 mesures en milieux très contrastés (Martin et al, 2009), (fig.8).

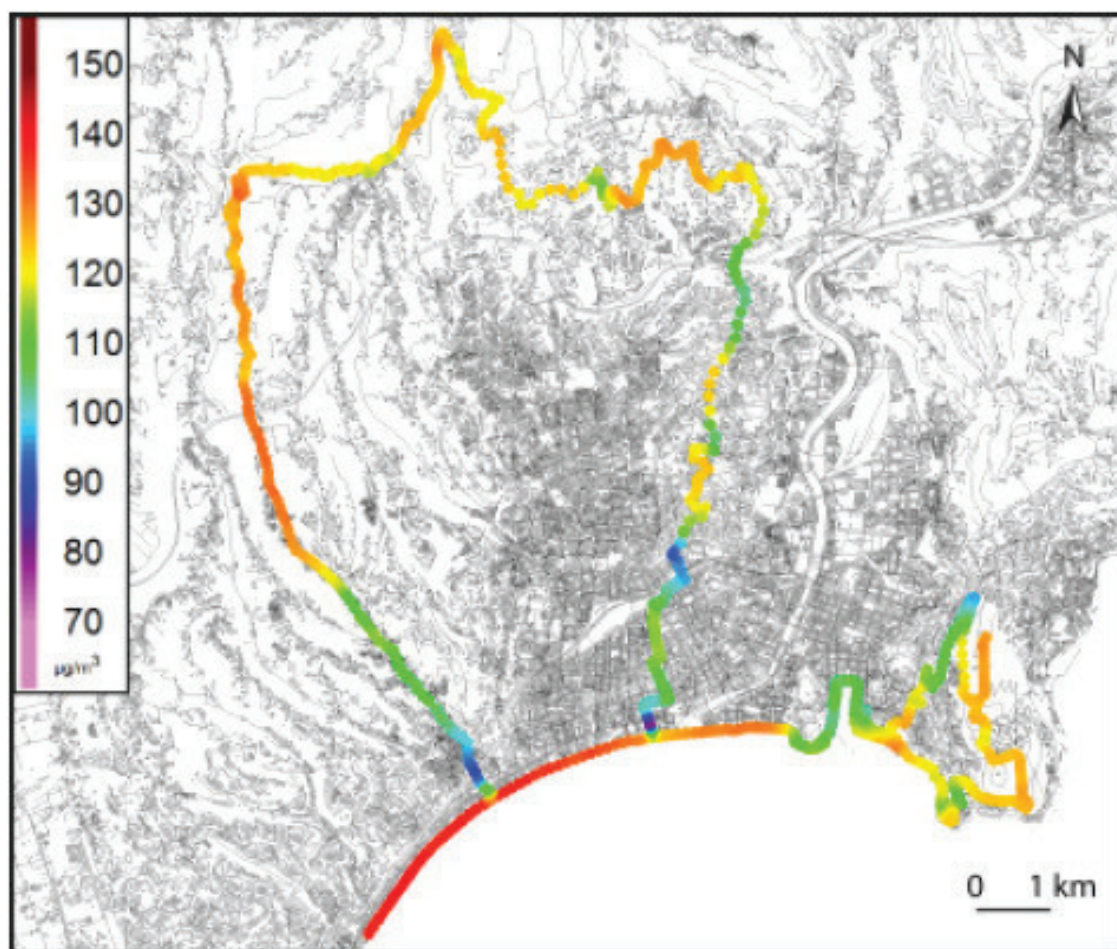


Figure 8. Moyenne des concentrations d'ozone (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en 779 mesures itinérantes, durant 70 journées d'avril à septembre 2007 en ville et en campagne environnante (Martin *et al*, 2009).

Il apparaît nettement que les concentrations maximales ($> 120\text{-}130 \mu\text{g}/\text{m}^3$) caractérisent deux milieux opposés : le littoral et les collines hors agglomération, tandis que les minimums sont en pleine ville, ainsi qu'au port (rejets des bateaux).

La modélisation par régressions environnementales s'est appuyée sur deux familles de prédicteurs :

- les variables fixes dans le temps : hauteur des immeubles environnants, largeur de la rue/route, altitude, distance à la mer ;

- les variables météorologiques issues d'une modélisation physique (modèle RAMS) : humidité relative, vitesse du vent, énergie cinétique turbulente.

Seules les deux premières variables ont un r dépassant 0,60 (0,77 pour la hauteur des immeubles), mais la combinaison des sept donne un coefficient de corrélation multiple de 0,84 soit $r^2 = 0,70$. Par ailleurs, 50 observations sur 779 n'ont pas été incluses dans le processus de modélisation pour permettre la validation : l'écart moyen pour les 50 points entre la mesure et la valeur calculée par l'équation du modèle est de $5,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La carte obtenue confirme que la ville est moins sujette l'après-midi à de fortes valeurs d' O_3 contrairement à la campagne et à la mer (fig. 9) : il n'est pas si bon de faire comme beaucoup son jogging sur le littoral par brise de mer...

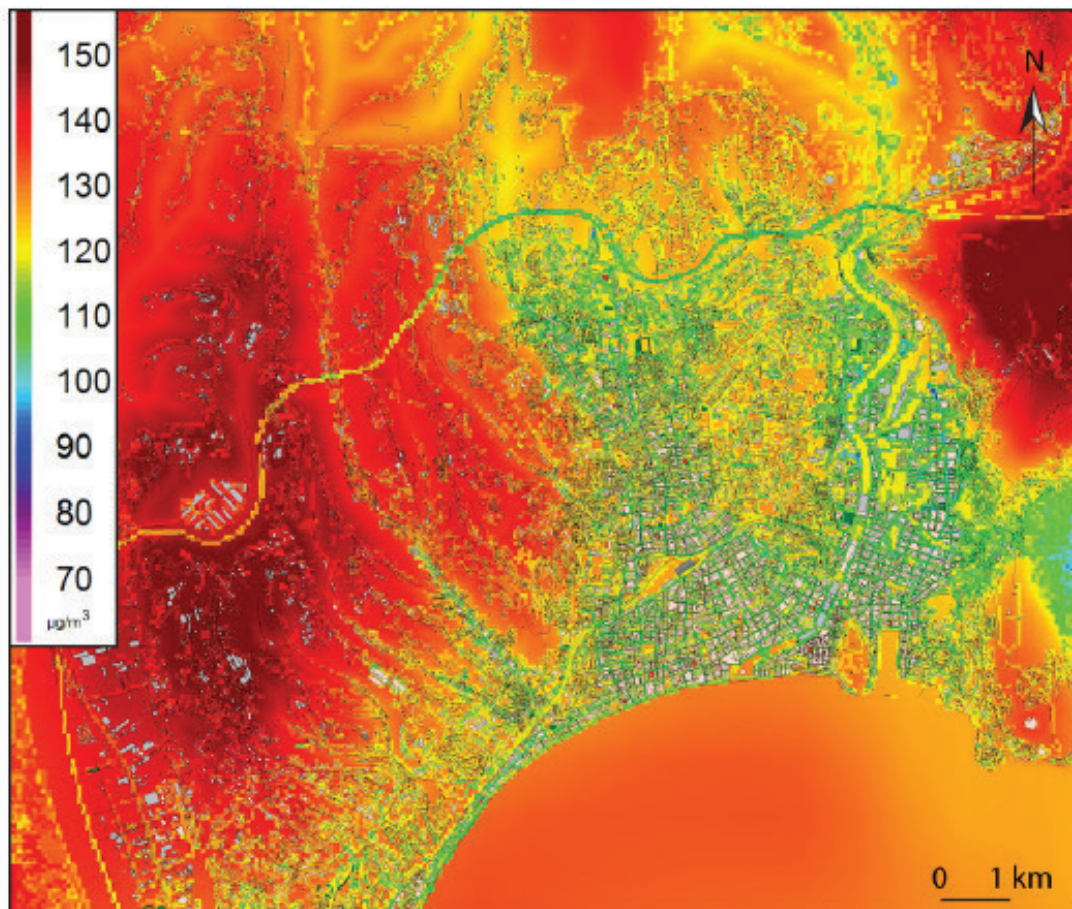


Figure 9. Interpolation spatiale des concentrations d'ozone (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) à partir de 729 mesures itinérantes, durant 70 journées d'avril à septembre 2007 (Martin *et al*, 2014).

Conclusion

Le climat urbain de Nice relève, comme ailleurs, à la fois de processus urbains (chaleur anthropique, comportement des matériaux, réflexions et absorption des rayonnements, etc) et de son environnement topographique. A Nice, toutefois, ce dernier, exerce une influence particulièrement lourde, par un contact terre-mer doublé de la présence locale de reliefs marqués et pentus, ainsi que de hautes montagnes plus distantes, qui alimentent la brise nocturne de la vallée du Var, faisant de celle-ci un couloir d'advection froide allogène. Cet effet est également présent mais atténué dans la vallée du Paillon drainant des reliefs moins lointains. Les brises thermiques locales diurnes ou nocturnes sont

donc omniprésentes bien que peu rapides sur la ville elle-même, dont elles gomment les processus relevant de l'urbain. La seule campagne de mesures prouvant la présence d'ICU (+ 2 m sur sol) est celle effectuée à 20h au printemps (1986), permis par la fraîcheur de la mer due à son inertie thermique. Les autres cas d'îlots de chaleur relevés ne sont pas des ICU mais des IC.

Le drainage de l'air urbain, est bien assuré aux extrémités de la ville, avec le Var à l'ouest et le Paillon à l'est, et beaucoup moins bien au centre-ville où les flux sont plus lents et recyclent l'air pollué, du fait de l'alternance de direction liée aux brises thermiques largement dominantes.

Bibliographie

- Carrega P., Ruffieux D., 1986 : Research into the urban heat island and the windflow above the city of Nice in summer, by vertical measurements and constant level balloons. *Intern. Symposium on Urban and Local Climatology, Freiburg (R.F.A.), 20-21 fevr.1986*, 96-109.
- Carrega P., 1988 : Climatology and air pollution in Nice (France). *Proceedings of the topoclimatological investigation and mapping studies group held in Christchurch, New-Zealand, 10-13 Aout 1988. Univ. of Canterbury, Christchurch (N.Z.)*,193-204.
- Carrega P., 1989 : Vents et échelles de contraintes géographiques : exemples en région niçoise". *Public. de l'Assoc. Inter. De Climatol. vol. 2, Actes du colloque de Pavia (Italie). 1-3 juin 1989. Aix en Provence*, 83-88.
- Carrega P., 1992 : *Topoclimatologie et habitat*. Thèse Doctorat d'Etat, ronéo, Nice, 475 p. + annexes. Publiée en 1994 dans la Revue d'Analyse Spatiale, Nice, n° 35 et 36. 408 p.
- Carrega P., 1998 : Les spécificités de l'îlot de chaleur urbain à Nice. *Colloque de climatologie urbaine, Rome, mars 1997. Nimbus n°13-14, Societa meteorologica subalpina, Torino*. 33-41.
- Carrega P., 2000 : *Etude synthétique du climat niçois et liaison avec la ventilation*. Rapport final contrat mairie de Nice. 53 p.
- Carrega P., Rosa F., 2005 : Aspects du climat urbain de Nice : îlot de chaleur, îlot de fraîcheur, effets de paroi . *Actes du XVIIIe colloque international de l'AIC, Gênes 7-11 septembre*, 35-38.
- Carrega P., 2009 : *Écoulements d'air à faible altitude au-dessus du bassin du Paillon*. Rapport 2 pour le Conseil Général des AM. Janvier 2009. 22 p.
- Carrega P., 2013 : Le climat urbain de Nice en milieu géographique contrasté : synthèse par approche inductive . *Climatologie*, vol. 10, 9-36, Grenoble.
- Fallot J.M., 1986 : Mesures de l'îlot de chaleur urbain dans le cadre d'une petite ville à topographie tourmentée : le cas de Fribourg (Suisse). *Intern. Symposium on Urban and Local Climatology, Freiburg (R.F.A.), 20-21 fevr.1986*, 19-29.
- Fallot J.M., Alcoforado M.J., 1988 : Mesures de l'influence de l'îlot de chaleur de Lisbonne sur les écoulements régionaux en été. *Actes des Journées de Climatologie. Mont-Rigi (Belgique), 5-7 Novembre 1987*. Presses universitaires de Liège,57-74
- Garcia E., Carrega P., 1999 : Topoclimatologie urbaine : l'exemple de la ville de Marseille. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, vol. 11, 424-432.
- Joly D., Fury R., 1996 : Modélisations à grande échelle de la variation spatiale des températures. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, Vol. 9, 219-227.
- Martin N., Adnes C., 2014 : Ozone spatialization in urban and hinterland areas. *Climatologie*, vol. 11, 79-84.
- Martin N., Carrega P., 2009 : La variabilité spatiale de l'ozone en milieu urbain et périurbain : le cas de Nice. *Pollution atmosphérique*. N° 204-octobre-novembre 2009, 461-474.

Martin N., Carrega P., Adnes C., 2014 : Downscaling à fine résolution spatiale des températures actuelles et futures par modélisation statistique des sorties Aladin-climat sur les Alpes-Maritimes. Grenoble, *Climatologie*, vol. **10**, 51-74.

METEOFRANCE : diverses données climatologiques pour l'aéroport de Nice.

Oke T. R., 1978 : *Boundary layer climates*. Methuen & Co., London, 372 p.

Ruffieux D., 1986 : *L'agglomération de Fribourg et son influence sur la ventilation*. Thèse de doctorat d'état. Ed. univ. Fribourg, Suisse. 134 p.

LE CLIMAT URBAIN: DE L'OBSERVATION DES PROCESSUS À L'ADAPTATION DES VILLES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

VALÉRY MASSON

Centre National de recherches météorologiques, Météo-France & CNRS, Toulouse, France

Le climat urbain

Même si le nombre exact de personnes habitant en ville est difficile à estimer, du fait de l'imprécision de la définition même de ce qu'est une ville, il est certain que la plupart de la population est maintenant urbaine. Or, les villes influencent le climat à différentes échelles. Tout d'abord, par les rejets de gaz à effets de serre et de gaz carbonique, elles sont une des sources majeures du réchauffement global depuis la révolution industrielle et sur les prochains siècles. D'autre part, elles modifient la météorologie locale, à des échelles temporelles bien plus courtes. Le phénomène le plus connu est l'îlot de chaleur urbain.

L'îlot de chaleur urbain a été observé scientifiquement depuis le 19ème par Luke Howard à Londres. Mais tout un chacun pouvait déjà s'en rendre compte. Guy de Maupassant ne décrivait-il pas ce phénomène dans *Bel Ami* à propos du Paris du milieu du XIXème ?

« Ils prirent un fiacre découvert, gagnèrent les Champs-Élysées, puis l'avenue du Bois de Boulogne. C'était une nuit sans vent, une de ces nuits d'été où l'air de Paris surchauffé entre dans la poitrine comme une vapeur de four. » *Bel-Ami*, Maupassant, 1855

Depuis, les géographes et les climatologues n'ont cessé d'avancer sur la description et la connaissance du phénomène de l'îlot de chaleur urbain. De nombreuses campagnes de mesures ont ainsi été menées, afin de caractériser le climat urbain dans différentes villes de par le monde. Par exemple, la figure 1 montre un îlot de chaleur de 6°C sur Toulouse une nuit d'été.

L'îlot de chaleur urbain est particulièrement fort la nuit, et en début de nuit après le coucher du soleil, avec des intensités pouvant atteindre 10°C pour des agglomérations de 10 millions d'habitants. Par contre, le jour, il est relativement ténu (de l'ordre de 1°C). Un point important à noter est que ce phénomène est très instationnaire dans le temps : il peut apparaître une nuit, disparaître la nuit suivante (si les conditions météorologiques sont défavorables), et être à nouveau présent la nuit d'après.

Les causes de l'îlot de chaleur urbain

Quelles sont donc les causes et phénomènes donnant naissance à cette caractéristique microclimatique locale des villes. Tout d'abord, je souhaite souligner deux idées fausses, souvent répandues parmi les acteurs urbains et la société en général à ce propos :

L'îlot de chaleur n'est pas du aux gaz à effet de serre. Comme mentionné plus haut, c'est un phénomène très rapide (quelques heures pour se former puis disparaître). Le contre-sens laissant croire que le CO2 est source de l'îlot de chaleur urbain vient du fait que le CO2 réchauffe le climat global, et que comme beaucoup de CO2 est relâché en ville, il aurait aussi tendance à réchauffer le climat local. C'est faux. Même si l'on voit parfois dans la presse grand public des articles « quantifiant » le refroidissement de l'air par captation du CO2 autour de la tour Eiffel si elle était végétalisée...

L'îlot de chaleur n'est pas non plus lié à la pollution de l'air, même si les deux arrivent souvent de concert : c'est simplement que les deux sont favorisés par des conditions anticycloniques.

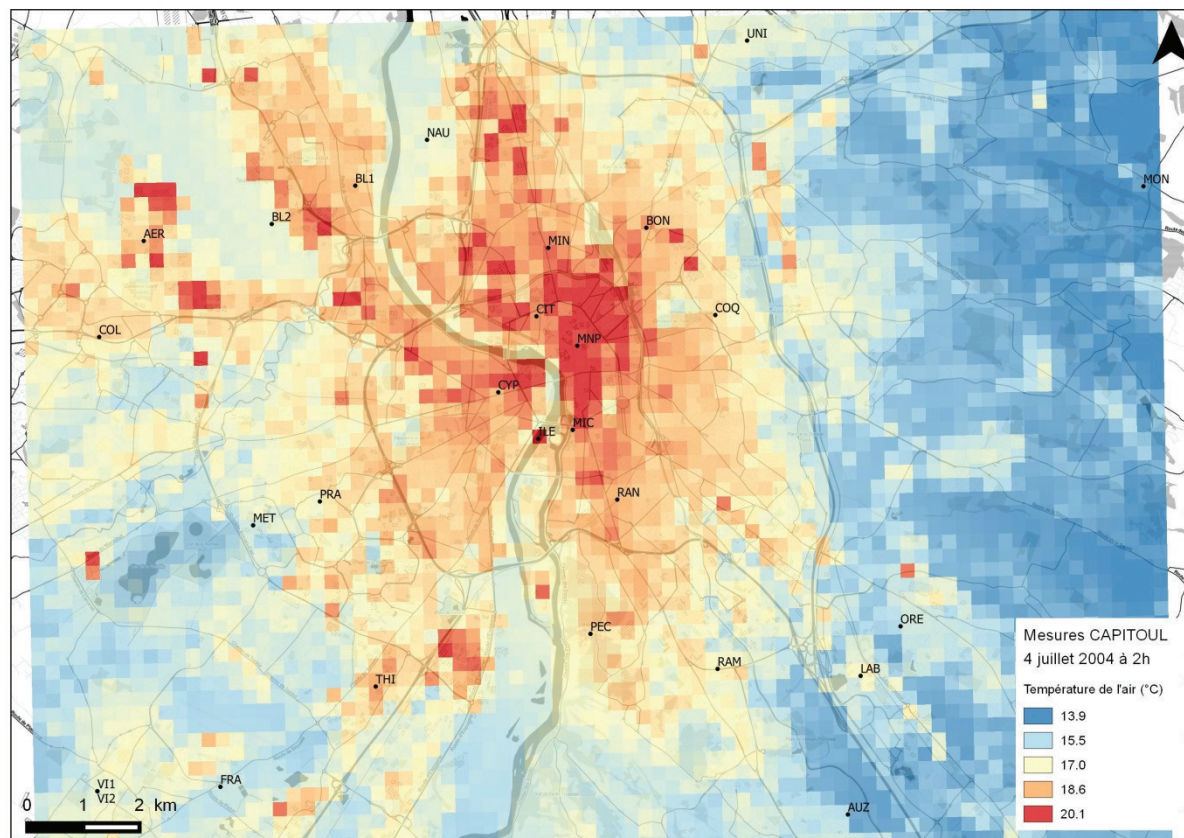


Figure 1 : îlot de chaleur urbain (température de l'air à 2m) mesuré à Toulouse le 4 juillet 2004 (expérience CAPITOUL)

Enfin, les dégagements de chaleur par les activités humaines (chauffage, climatisation, trafic, industries...) contribuent eux effectivement à l'îlot de chaleur urbain, mais uniquement au second ordre (de l'ordre de 1°C).

En fait, la chaleur permettant la création de l'îlot de chaleur urbain provient du soleil. Or le soleil brille le jour, et l'îlot de chaleur a lieu principalement la nuit. D'où vient ce paradoxe ?

Les processus en jeu ont été pour la première fois mis en évidence par T. Oke et ses collègues dans les années 1960 – 1970. Les matériaux urbains sont chauffés pendant la journée du fait de leur exposition au soleil (ce qui peut être vu par une image satellite, cf section suivante). Cette chaleur emmagasinée est ensuite rendue à l'atmosphère pendant la nuit, empêchant le refroidissement de l'air en ville... C'est l'imperméabilisation des surfaces qui crée donc cette surchauffe nocturne en ville.

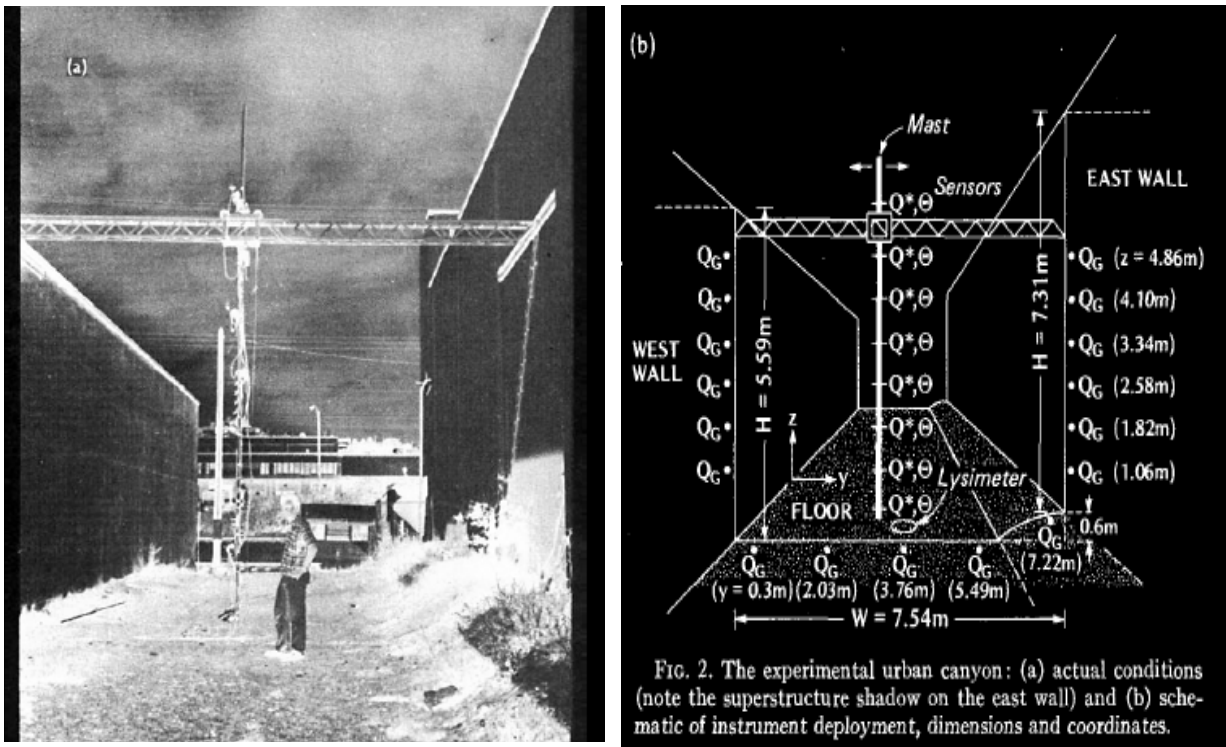


Figure 2 : Première expérience sur les processus du milieu urbain (Nunez et Oke 1976)

Ilot de chaleur urbain et température de surface

Étant donné la difficulté de mesurer les variations de la température de l'air pour quantifier l'îlot de chaleur urbain, de très nombreuses études se reportent sur l'analyse d'images satellites. Celles-ci typiquement montrent des variabilités très fortes des températures le jour, avec les zones urbaines bien plus chaudes que les zones rurales. Cependant, ceci traduit uniquement le fait que les températures de surfaces sont très chaudes (tuiles sur les toits, goudron sur les parkings et les routes, etc...). La nuit par contre, ces surfaces peuvent se retrouver plus froides que la végétation environnante. Il n'y a pas de lien direct et trivial entre ces deux îlots de chaleur : température de l'air et température de surface.

Les analyses des images de températures de surface satellite à haute résolution en zone urbaines sont souvent utilisées par les collectivités afin de déterminer l'emplacement des îlots de fraîcheur (comme les parcs ou trames vertes et bleues). Cependant, ces collectivités ne sont pas en général conscientes que cet îlot de chaleur de surface ne traduit pas la réalité de l'îlot de chaleur en température de l'air.

Les nouvelles stratégies de mesure de l'îlot de chaleur urbain

Toutefois, des collectivités installent maintenant, souvent en collaboration avec des laboratoires de recherche, des réseaux de mesure de l'îlot de chaleur, du fait de la nécessité (cf ci-après) de s'adapter au changement climatique, et donc d'avoir un diagnostic précis sur son territoire pour les problématiques de santé publique en cas de canicule par exemple.

Cette démarche permet ainsi de doter des agglomérations de plusieurs dizaines de stations météorologiques, souvent installées dans des écoles ou bâtiments publics. C'est le cas pour Birmingham par exemple (environ 80 stations Chapman et al 2015), ou d'Amsterdam (en collaboration avec l'université de Wageningen), ou Toulouse.



Figure 3 : stations de mesures mises en place sur Amsterdam

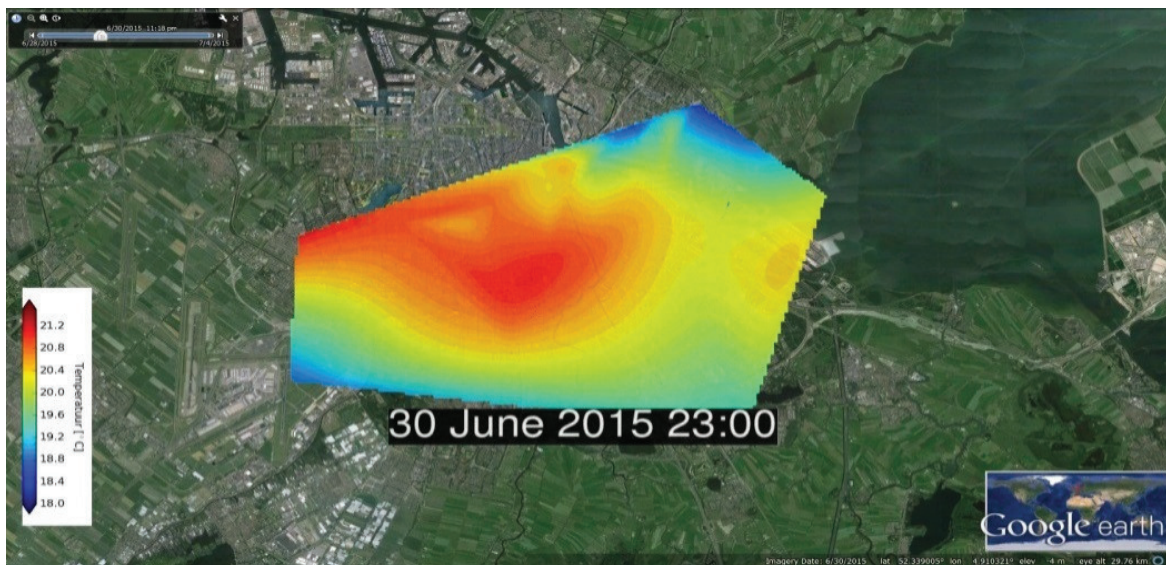


Figure 4 : exemple de mesure de l'îlot de chaleur sur Amsterdam (source : G.J. Steeneveld, Wageningen)

Des approches encore plus novatrices est l'analyse de données météorologiques participatives massives. Si les relevés de stations bénévoles existent depuis le début du XXème siècle, l'explosion des systèmes de communication permet maintenant l'accès en temps réel à de très nombreuses informations. C'est le cas par exemple des stations météorologiques 'netatmo', qui sont de plus en plus analysées.

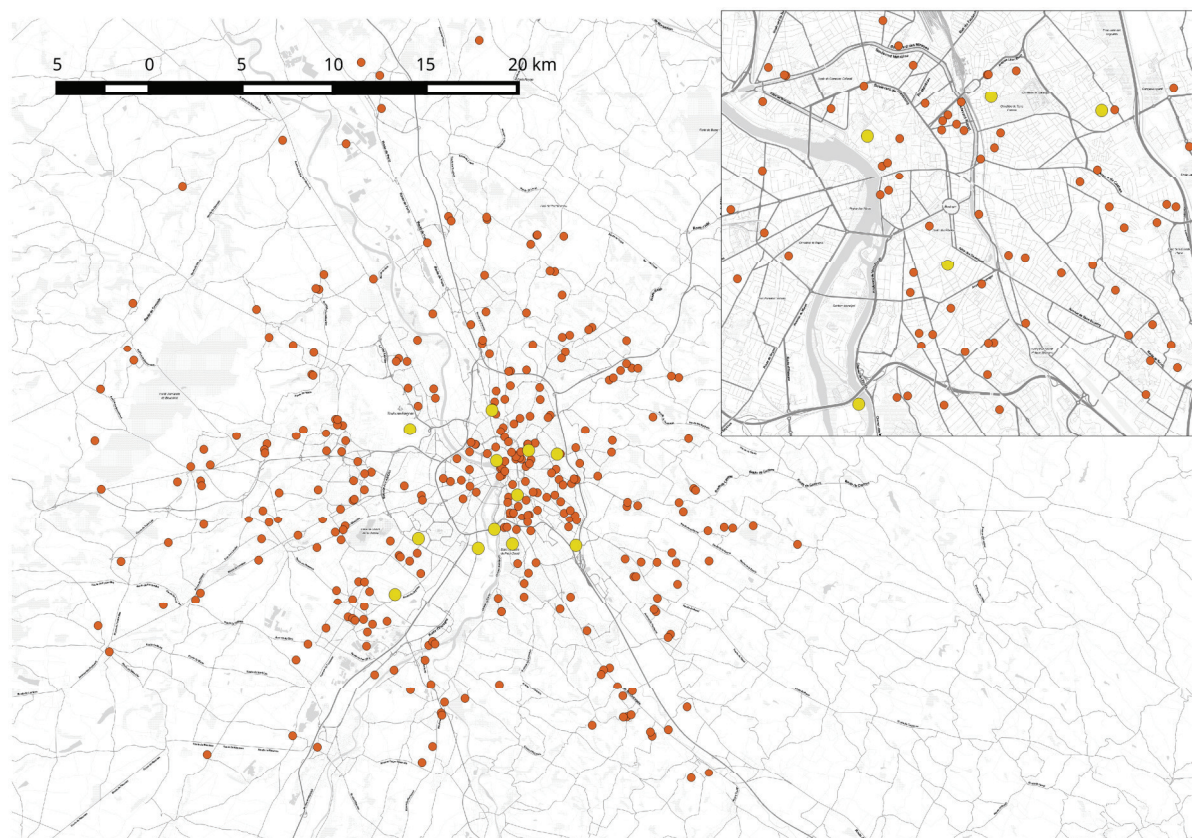


Figure 5 : localisation des stations netatmo sur Toulouse (320 stations après filtrage). Source : Napoly 2017.

Cependant, ces données sont de qualité incertaine (car mises en œuvre par le grand public, et sans abri météorologique contre le rayonnement), installées parfois sur des balcons, proches des murs ou même à l'intérieur. Ceci nécessite donc de développer des algorithmes nouveaux, mais ouvre des perspectives très riches pour la climatologie urbaine, car ces stations sont justement très denses en ville, là où manquent les stations conventionnelles.

L'adaptation des villes au changement climatique

Au climat urbain déjà existant se superposent les effets du changement climatique qui peuvent ainsi exacerber la vulnérabilité des villes (Lemonsu et al., 2013). Dans ce contexte, une réflexion sur les stratégies d'atténuation des effets urbains et d'adaptation au changement climatique doit d'ores et déjà être entreprise par les acteurs institutionnels et les aménageurs urbains pour planifier les villes de demain. En 2003 l'augmentation des températures et la quasi-absence d'un refroidissement nocturne notable a eu un effet catastrophique à Paris où une surmortalité exceptionnelle a été relevée.

Les préoccupations climatiques et énergétiques sont ainsi désormais reconnues comme enjeux à l'échelon mondial, européen, national et local. Le renouvellement du cadre réglementaire national conforte le rôle central des intercommunalités dans l'implémentation de stratégies locales sur ces problématiques. Si le volet atténuation de ces stratégies est aujourd'hui bien maîtrisé, celui relatif à l'adaptation – du fait sans doute de son caractère plus transversal – peine encore à s'affirmer comme un champ pertinent et autonome de l'action publique locale.

Ces stratégies d'adaptation ne doivent ainsi ne pas être conçues à l'encontre de l'atténuation. Or, les stratégies spontanées, comme le recours à la climatisation individuelle, sont souvent consommatrices d'énergie. De plus, la climatisation réchauffe encore plus l'air extérieur (la chaleur

extraite à l'intérieur est rejetée à l'extérieur), et peut aggraver l'îlot de chaleur urbain de l'ordre de 1°C supplémentaire (ce qui a été mis en évidence par des études numériques sur Tokyo et Paris).

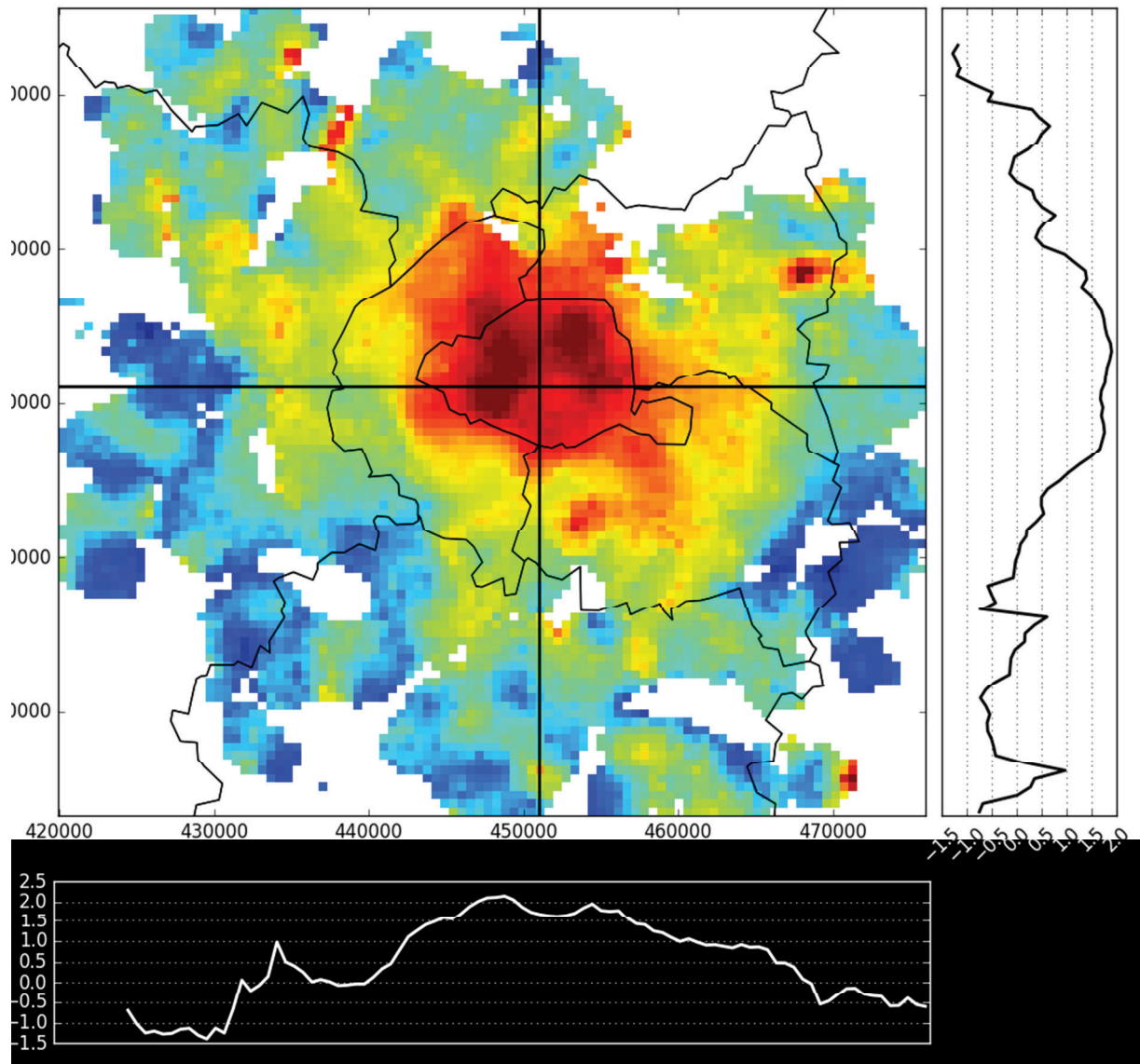


Figure 6 : température moyenne sur le mois de février 2017 sur Paris relevé par les stations netatmo (après tri et filtrage des données), source : Napoly 2017.

Avec le réchauffement climatique, il sera sans doute indispensable d'avoir recours à la climatisation lors des épisodes de canicules futurs, mais par contre, l'usage systématique de la climatisation peut lui être limité, via des stratégies d'adaptation au niveau des villes et des bâtiments, ainsi que par la modification des comportements (pourquoi climatiser à 18°C ?).

Ce qu'il est important de noter est que ces stratégies d'adaptation peuvent être mises en œuvre à des échelles très différentes, par des acteurs tout aussi différents (figure 7). De nombreuses stratégies permettent de combiner à la fois les problématiques d'adaptation au et d'atténuation du réchauffement climatique.



Figure 7 : exemple de stratégies d'adaptation mises en œuvre en ville.

Végétaliser les villes

Souvent, en particulier dans les climats tempérés et tropicaux humides, il est possible d'améliorer le climat urbain par l'apport de végétation. Ceci est naturel lorsque l'on se rappelle que l'îlot de chaleur urbain provient justement de l'imperméabilisation des surfaces. Mais pour que la végétation puisse jouer son rôle de régulateur thermique, il lui faut de l'eau. Ceci pose le problème de la gestion des ressources en eau, avec plusieurs acteurs et usages en compétition (agriculture, industrie, espaces verts, usage quotidien par la population, etc...).

Certaines stratégies de végétalisation sont moins efficaces que d'autres. Les toitures végétalisées par exemple ne rafraichissent l'air que quelques jours en période sèche, du fait du rapide assèchement du substrat. Les dernières recherches montrent que les stratégies les plus efficaces semblent être celles consistant à implanter des arbres en ville. Ceux-ci fournissent de l'ombre, puisent l'eau profondément, peuvent diminuer l'exposition au vent lorsque celle-ci est un enjeu. Toutefois, développer des stratégies au niveau des parcelles de recueil de l'eau de pluie en hiver ou saison des pluies pour la réutiliser en période chaude est aussi un axe à prendre en compte.

La réflexion de la végétalisation se construit aussi à l'échelle des agglomérations. Initié dès les années 1930 à Stuttgart, le développement ou la protection de corridors verts non constructibles (ou avec limitation de la taille des bâtiments pouvant y être construits) liant les collines alentours et le centre-ville permet de construire des couloirs de rafraichissement. Ces stratégies de ventilation urbaine sont à présent mises en œuvre dans de nombreuses mégapoles chinoises (figure 8).

Conclusions

De nombreuses études scientifiques sur l'îlot de chaleur urbain, autant sa caractérisation sur de nombreuses villes que sur les processus en jeu, ont été menés depuis les années 1970. Les années 2000 ont vu les premiers modèles de climat urbain dans les modèles météorologiques à très fine échelle, qui ont permis de compléter les approches expérimentales et géographiques, et entre autres permis d'évaluer des impacts de stratégies d'adaptation sur le climat urbain à différentes échelles.

Cependant, des enjeux nouveaux apparaissent, comme l'apparition de données connectées à la fois pour décrire la météorologie urbaine (stations météo personnelles) mais aussi pour décrire la ville, ses bâtiments, etc... De telles données, inexistantes aujourd'hui, peuvent être recueillies via des applications mobiles via la science participative, permettront de mieux comprendre les relations à échelle fine entre micro-climat et le tissu urbain, ainsi que sa modélisation numérique.

La problématique de l'estimation du climat urbain du futur, en lien avec les projections climatiques régionales et l'évolution des villes, est encore un champ scientifique à construire, avec notamment des problématiques d'interactions d'échelles spatiales et temporelles très larges.

Enfin, il convient d'avancer aussi sur le transfert de nos connaissances scientifiques vers les acteurs urbains, au premier rang desquels les urbanistes et les collectivités territoriales et les municipalités, qui construiront les villes de demain.



Figure 8 : prise en compte de la végétation à échelle (source : E. Ng, Chinese University of Hong Kong)

Bibliographie

Chapman et al 2015: Urban Meteorological Networks: An urban climatologists panacea?, 9th International Conference on Urban Climate, 20-24 juillet 2015, Toulouse, France.

Lemonsu A., R. Kounkou-Arnaud, J. Desplat, J.-L. Salagnac, V. Masson, 2013: Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate, *Climatic change*, 116, 679–692, DOI 10.1007/s10584-012-0521-6.

Napoly 2017: Utilisation des données participatives Netatmo pour l'étude du climat urbain. Application aux villes de Toulouse, Paris et Berlin, mémoire de master2, Ecole Nationale de La Météorologie, Toulouse, France.

Ng E., Adapting Asian Cities to Climate & Urban Climatic Changes, 9th International Conference on Urban Climate, 20-24 juillet 2015, Toulouse, France.

Nunez, M. and T. R. Oke: 1976, 'Long-Wave Radiative Flux Divergence and Nocturnal Cooling of the Urban Atmosphere. II: Within an Urban Canyon', *Boundary-Layer Meteorol.* 10, 121–135.

Thème : Climat urbain

INTENSITÉ ET DÉLIMITATION DE L'ÎLOT DE CHALEUR NOCTURNE DE SURFACE SUR L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE

MADÉLIN M.¹, BIGOT S.², DUCHÉ S.³ ROME S.²

¹Université Paris Diderot / Sorbonne Paris-Cité, UMR PRODIG CNRS, Paris, France, malika.madelin@univ-paris-diderot.fr

²Université Grenoble Alpes, CNRS-IRD-GINP, UMR IGE, Grenoble, France

³Université Grenoble Alpes, CNRS, UMR PACTE, Grenoble, France

Résumé : L'îlot de chaleur urbain est une des principales expressions du climat urbain. Mis en évidence depuis longtemps, il correspond aux différences de température entre les zones urbaines et les zones rurales avoisinantes et il a d'abord été défini à partir des températures de l'air mesurées par les stations des réseaux conventionnels ou par des mesures mobiles. Dans cette étude, nous avons utilisé les températures journalières nocturnes de surface (produit MODIS), à la résolution spatiale de 1 km, sur la période 2002-2017, afin d'analyser l'îlot de chaleur de surface sur la région parisienne. Les différentes images synthétiques (à partir de la moyenne, de la médiane des données, d'une analyse multivariée), fortement dépendantes des conditions de surface, ont montré une influence notable de l'occupation/utilisation du sol ; les températures nocturnes de surface des zones densément urbanisées sont beaucoup plus élevées (+ 6°C) que les zones agricoles avoisinantes, lors des nuits de ciel clair.

Mots-Clés : climat urbain, îlot de chaleur de surface, MODIS, agglomération parisienne.

Abstract: *Intensity and delimitation of the night Surface Urban Heat Island over the Paris metropolitan area.* The Urban Heat Island is one of the main factors of the urban climate. Known for a long time, it corresponds to a temperature difference between urban and rural areas surrounding and was defined firstly from the temperatures measured in the conventional network weather stations or by mobile measurements. In the present study, we used the daily night MODIS Land Surface Temperature (LST) product at 1 km resolution and during the years 2002-2017 in order to investigate the Surface Urban Heat Island (SUHI) over the Paris metropolitan area. The different synthetic images, obtained from the mean, median of all the dates selected and a principal component analysis (PCA), show clearly high surface temperatures over dense urban areas and a strong decrease (over 6°C) from the center of Paris to about 30 km.

Keywords : urban climate, Surface Urban Heat Island (SUHI), MODIS, Paris metropolitan area.

Introduction

Les propriétés thermiques des matériaux de surface en milieu urbain sont très différentes de celles rencontrées en zones rurales et le milieu urbain est souvent rendu imperméable (moins de végétation et de sols humides, plus de surfaces imperméables). Il en résulte des différences de flux radiatifs et convectifs entre ces deux milieux ainsi que des différences de température des surfaces puis de l'air sus-jacent. L'expression la plus emblématique de ces écarts thermiques est le phénomène bien identifié de l'îlot de chaleur urbain (Oke, 1982 ; Stewart, 2011), surtout perceptible la nuit, lors des conditions radiatives. En situation estivale (en particulier de canicule), la température élevée de l'air en ville peut amener à des situations d'inconfort et à un risque sanitaire pour les personnes les plus vulnérables.

Traditionnellement, l'îlot de chaleur urbain est évalué à partir des températures mesurées par les stations des réseaux conventionnels (Cantat, 2014 pour l'agglomération parisienne) ou *ad hoc* (e.g. Foissard, 2015 ; De Lapparent *et al.*, 2015 ; Azevedo *et al.*, 2016). La qualité de l'estimation de l'îlot de chaleur urbain repose alors sur la pertinence de l'implantation des stations et leur représentativité d'un climat dit « urbain » d'un autre « rural » (voir le développement sur les stations pour définir le climat urbain de Grenoble dans Bigot *et al.*, 2017). Pour pallier la faiblesse des points de mesure de la température, plusieurs auteurs s'appuient sur la modélisation numérique des champs de température (e.g. Kastendeuch et

Najjar, 2015 ; Colombert, 2008 et le projet EPICEA sur Paris), d'autres sur les données satellitaires pour définir un « îlot de chaleur urbain de surface » (SUHI *Surface Urban Heat Island* ; e.g. Cheval et Dumitrescu, 2009 ; Dousset *et al.*, 2011 ; Sakhy, 2016).

Dans cette étude, qui s'inscrit dans le prolongement de Madelin *et al.* (2012), il s'agit d'analyser l'îlot de chaleur de surface de l'agglomération parisienne, espace densément urbanisé au centre, avec une population importante (12 millions d'habitants en Île-de-France) et relativement pauvre en stations météorologiques (par exemple, avec seulement 2 stations complètes dans le réseau Météo-France : Montsouris et Tour Eiffel). Après une comparaison des températures de surface et de l'air, nous cherchons à délimiter l'emprise spatiale de l'îlot et à montrer les relations avec l'occupation/utilisation du sol, puis nous étudions la variabilité saisonnière du SUHI.

1. Données utilisées

1.1. Les données de températures de surface

Pour analyser l'îlot de chaleur urbain nocturne de surface, cette étude s'appuie sur le produit MODIS MYD11A1 (satellite *MODerateResolution Imaging Spectroradiometer*Aqua) donnant une estimation de la température de surface (LST - *Land Surface Temperature*) et de l'émissivité, à l'échelle journalière, avec une résolution spatiale d'environ 1 km. Le choix d'utiliser ce produit satellitaire a été motivé par la relative profondeur temporelle des données (depuis 2002) et par l'heure du passage au-dessus de la région concernée, vers 2 h TU. À partir du serveur NASA EOSDIS Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC : <http://lpdaac.usgs.gov>), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center (Sioux Falls, South Dakota), nous avons téléchargé l'ensemble des images nocturnes journalières LST, de septembre 2002 à mars 2017, et délimité la zone d'étude autour de Paris (150 km du nord au sud et d'ouest en est ; Fig. 1). Parmi ces nuits, nous avons sélectionné les images avec moins de 10 % de valeurs manquantes ou aberrantes (élimination des nuages), puis un contrôle visuel des répartitions spatiales a permis d'éliminer les dates avec, en toute vraisemblance, des biais. Au final, nous retenons 191 nuits pour lesquelles nous disposons d'une estimation de la température de surface. Ces nuits de ciel clair sont principalement des nuits au printemps (43 %, surtout 2011 et 2014), puis en été (27 %) et à l'automne (25 %) et très peu en hiver (5 %), en raison des conditions atmosphériques avec une couverture nuageuse fréquentes. Afin de nous affranchir des variations quotidiennes et saisonnières, nous avons utilisé les anomalies LST (différences entre chaque pixel et la moyenne de l'image).

1.2. Les données de températures de l'air

Pour comparer les champs de température de surface aux données de température de l'air, nous avons retenu deux stations du réseau Météo France (Fig. 1), Paris Montsouris (48°49'18"N, 2°20'16"E, 75 m) et Melun (48°36'37"N, 2°40'46"E, 91 m). Ces deux stations ne sont pas particulièrement représentatives d'un climat respectivement « urbain » et « rural » : la première étant située dans un parc parisien ; la seconde, classiquement utilisée (Cantat, 2004 ; APUR, 2012), certes éloignée d'environ 58 km du centre de Paris, mais installée sur un aéroport. Elles sont surtout retenues en raison de la disponibilité des données horaires.

1.3. Les données d'altitude et d'occupation/utilisation du sol

Afin d'analyser l'effet du relief et de l'occupation/utilisation du sol, nous avons utilisé deux bases de données en accès libre, que nous avons ré-échantillonnées selon l'étendue et la résolution des données MODIS (Fig. 1) : (i) la base de données altimétriques SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) donnant une altitude de surface avec initialement une résolution

d'environ 90 m (*via* le site web du CGIAR-CSI SRTM <http://srtm.csi.cgiar.org>) et (ii) la base de données Corine Land Cover (2000, 2006 et 2012) produite par l'Agence Européenne de l'Environnement à partir de photo-interprétations d'images satellitaires et cartographiant l'occupation et l'utilisation du sol. Ces dernières données ont été récupérées *via* le Service de l'observation et des statistiques (SOeS) du ministère chargé de l'environnement (<http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>). Nous avons simplifié la nomenclature en regroupant plusieurs classes de différents niveaux hiérarchiques et retenons, au final, 8 classes d'occupation et d'utilisation du sol. Enfin, des dizaines de pixels définis comme « Urbain dense » et « Agricole » ont été sélectionnés comme échantillon pour analyser l'intensité de l'îlot de chaleur de surface.

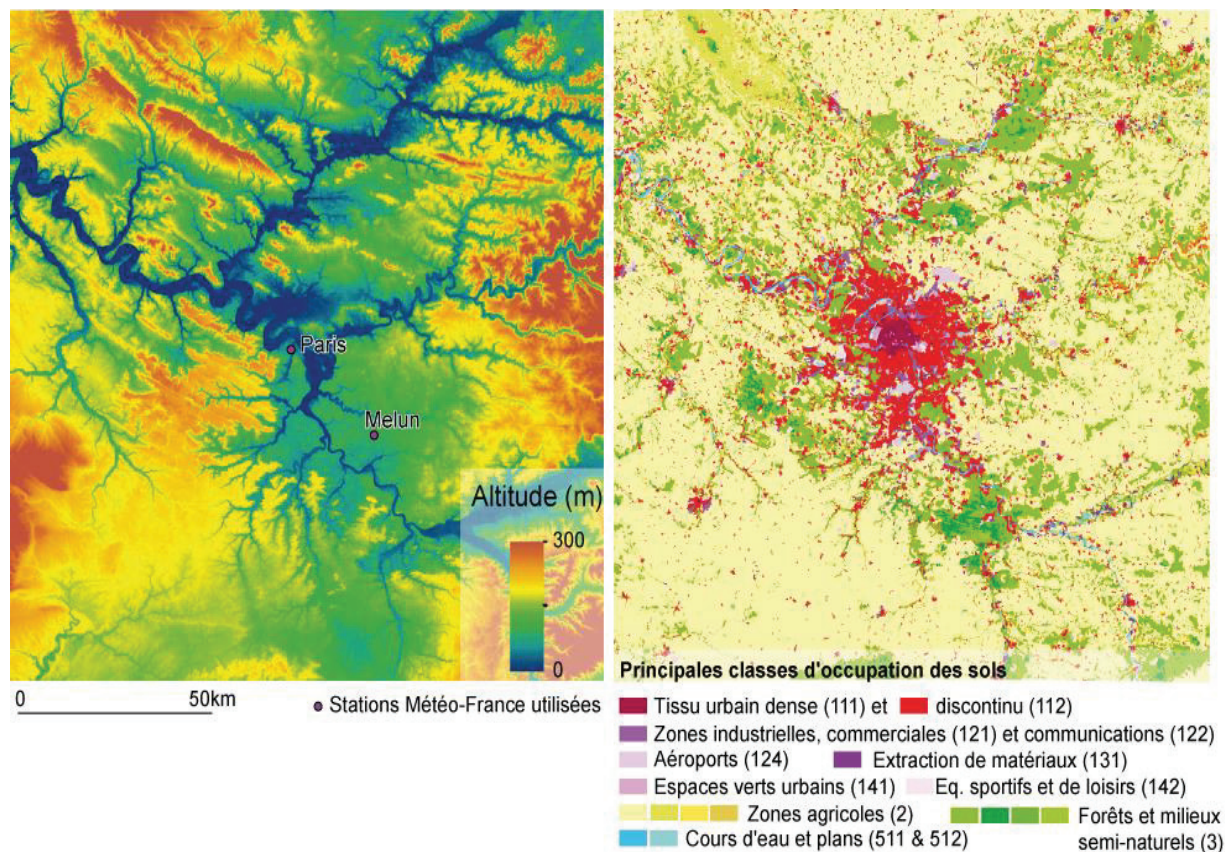


Figure 1. Relief et occupation/utilisation du sol de la zone étudiée, autour de Paris (sources : SRTM ; Corine Land Cover 2006)

2. Résultats

Avant d'explorer l'îlot de chaleur de surface, nous voulions, dans un premier temps, examiner la relation entre températures de surface et températures de l'air (traditionnellement utilisées pour définir l'îlot de chaleur). La corrélation linéaire entre les données ponctuelles des deux stations retenues ici pour évaluer l'îlot de chaleur urbain (avec toutes les réserves déjà mentionnées) et les données des pixels dans lesquels sont situées ces stations est significativement forte (0,99 pour Paris et 0,98 sur un échantillon de données horaires à 2 h TU pour 36 nuits).

2.1. Répartition spatiale et délimitation de l'îlot de chaleur nocturne de surface

La figure 2 représente la répartition spatiale de la médiane calculée, par pixel, à partir des anomalies des 191 nuits retenues. Pour délimiter l'îlot, nous avons détecté les ruptures de pente des gradients thermiques entre le centre de Paris et les zones avoisinantes, selon 36

transects (tous les 10° ; inspiré de Cheval et Dumitrescu, 2009), et représenté sur la figure les 1^{ers}, 2^{èmes} (médianes) et 3^{èmes} quartiles. Les surfaces les plus chaudes apparaissent clairement au centre de l'agglomération, avec des températures nocturnes de surface de plus de 6°C (p/r aux données de la zone entière), une nuit sur deux. Les vallées de la Seine, la Marne, l'Oise et des autres affluents, zones largement artificialisées (Fig. 1), se distinguent également avec des températures de surface plutôt élevées. À l'inverse, des zones agricoles souvent situées plus en altitude présentent des surfaces plutôt plus froides. La délimitation de l'îlot reste globalement très stable au cours du temps (sur les 191 nuits), sauf dans le sud de Paris qui présente une variabilité spatiale élevée, sans doute liée au mitage des territoires (entre tissu urbain discontinu et zones agricoles).

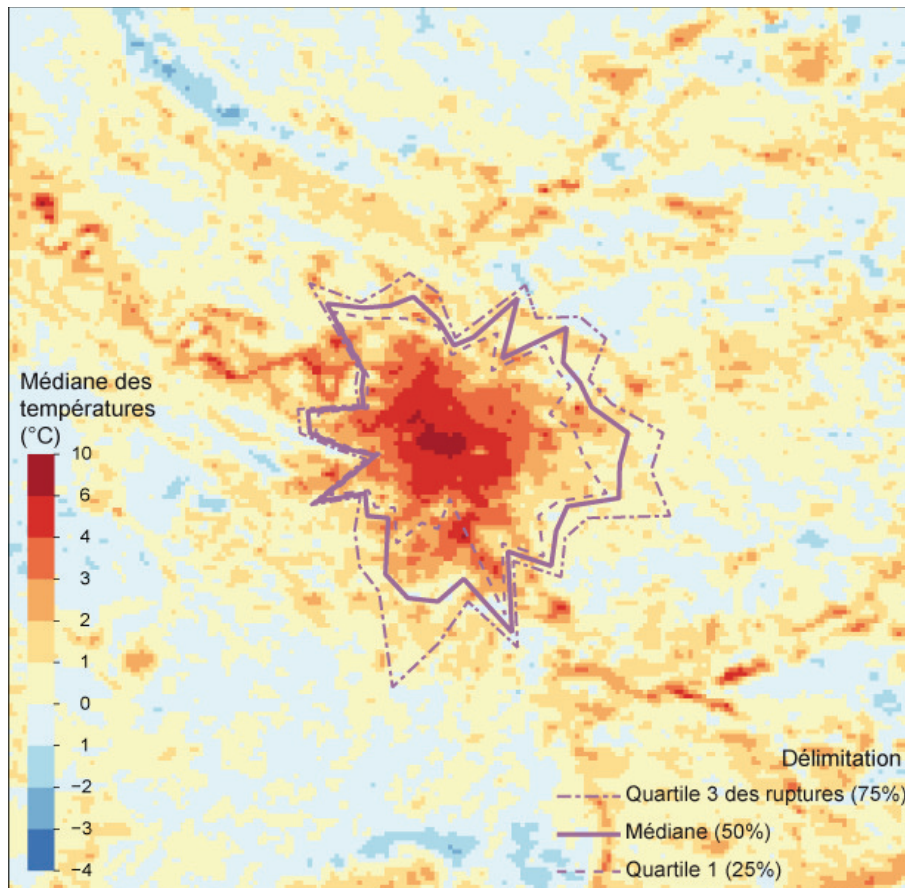


Figure 2. Répartition spatiale des valeurs médianes des anomalies de températures de surface et proposition de délimitation de l'îlot de chaleur urbain de surface (sources : MODIS Aqua 2003-2017, ici sur 101 dates ; Corine Land Cover 2006)

2.2. Influence de l'occupation/utilisation du sol

Pour approfondir cette influence de l'occupation/utilisation du sol, la figure 3 représente les profils thermiques de plusieurs occupations du sol, à partir des *boxplots* réalisés par superposition de ces données avec les médianes des anomalies par pixel. Ce graphique montre très clairement le poids des surfaces agricoles (66,8 %) dans la valeur médiane de l'image (moyenne autour de 0°C), surfaces qui sont les plus froides (tout comme les surfaces forestières). Inversement, les zones urbaines denses ont des températures de surface élevées (avec 75 % des valeurs supérieures à +5°C) et, dans une moindre mesure, les parcs et jardins urbains (en moyenne, +3°C). Le tissu urbain discontinu présente une forte variabilité de températures de surface, en raison de la diversité des occupations du sol.

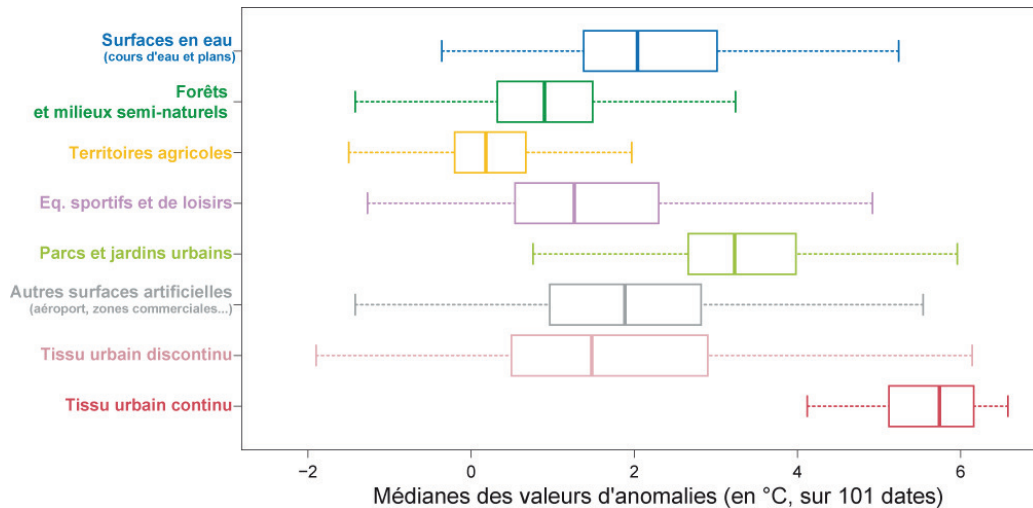


Figure 3. Influence de l'occupation/utilisation du sol sur les températures de surface (médianes des anomalies journalières) ; sources : MODIS Aqua 2003-2017 ; Corine Land Cover 2006

2.3. Images synthétiques des structures spatiales

La structure spatiale des médianes des anomalies de LST se retrouve très fréquemment, comme l'indiquent les résultats d'une analyse en composante principale effectuée sur les températures de surface, ici ramenées au niveau de la mer pour minimiser l'effet altitudinal (utilisation du gradient médian sur l'ensemble des dates : $-0,52^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; Fig. 4). Le premier axe, très structurant (60 %), s'explique principalement par l'occupation et l'utilisation du sol (une analyse de la variance a montré une relation significative avec les 8 classes retenues). Outre ce résultat peu surprenant au vu des précédentes conclusions, deux gradients spatiaux (NNW-SSE 6,5 % et W-E 5,2 %) structurent l'information ; ils décriraient *a priori* plutôt des répartitions spatiales en lien avec des advections d'air (aucune dépendance saisonnière observée). Rappelons que les nuits retenues à la suite de la critique des données satellitaires sont toutes caractérisées par un ciel clair (quasiment sur la totalité de la zone) et que les conditions atmosphériques liées à des perturbations (pourtant fréquentes sur la région) ne sont pas représentées dans cette analyse.

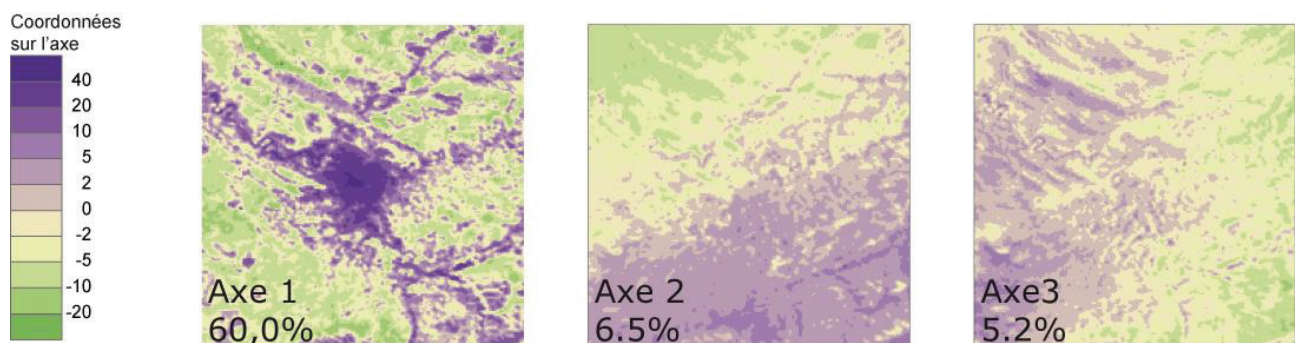


Figure 4. Répartitions spatiales des coordonnées sur les 3 premiers axes d'une ACP réalisée à partir des anomalies journalières des températures de surface ; source : MODIS Aqua 2003-2017

2.4. Variation saisonnière de l'îlot de chaleur nocturne

À partir des données des stations de Melun et de Paris Montsouris, nous avons calculé la différence des températures horaires de l'air : l'îlot de chaleur urbain, phénomène nocturne, est légèrement plus intense au printemps et à l'été qu'en hiver, ce qui corrobore partiellement les travaux de Cantat (2004). Rappelons que les deux stations ne sont pas très représentatives du milieu qu'elles sont censées représenter. L'écart moyen entre les deux stations est de $3,3^{\circ}\text{C}$

à 2 h TU (sur 69 dates), donc plus important que l'écart moyen souvent mentionné de 2,5°C entre Paris et les zones rurales périphériques (APUR, 2012) et se rapprochant des observations de Cantat (2014). À partir d'une sélection de pixels « urbains denses » et « agricoles », les mois estivaux témoignent d'un îlot de chaleur de surface plus intense, ce qui est globalement similaire aux résultats sur les températures de l'air.

Conclusion

Les différentes images synthétiques (à partir de la moyenne, de la médiane des données, d'une analyse multivariée), fortement dépendantes des conditions de surface, ont montré une influence notable de l'occupation/utilisation du sol ; les températures nocturnes de surface des zones densément urbanisées sont beaucoup plus élevées (+ 6°C) que les zones agricoles avoisinantes, lors des nuits de ciel clair. Facilement mobilisable et accessible, ce SUHI reste cependant une approximation de l'îlot de chaleur urbain, ne reflétant pas directement les températures de l'air et la ventilation (Azevedo *et al.*, 2016). Mais les températures de l'air, à 2 m, à l'abri, ne reflètent pas non plus la diversité des températures « vécues » et perçues par les habitants, en particulier à l'intérieur des habitations (Pinson, 2016). D'autres images satellites auraient pu être mobilisées dans une autre optique, privilégiant la résolution spatiale à la profondeur temporelle (ici sur 14 années). D'autres typologies des conditions de surface auraient également pu être utilisées, en particulier les *Local Climate Zones* (Stewart et Oke, 2012) ou les îlots morphologiques urbains définis par l'APUR. Nous avons estimé que leur résolution était trop fine pour l'appariement avec les données MODIS à 1 km, mais cela méritait d'être approfondi. Enfin, au-delà des enjeux sanitaires, sociaux et environnementaux des températures en ville (de plus en plus caniculaires), ce type d'analyse peut aider à la discussion sur l'implantation de nouvelles stations conventionnelles et être une aide à la connaissance - certes partielle - du climat urbain dans le cadre de diagnostics et de services urbains (Bigot *et al.*, 2017). Une piste intéressante serait aussi de s'intéresser aux données participatives ou aux micro-capteurs embarqués, véritable nouvel appui à la mesure du climat en ville (Muller *et al.*, 2015 ; Chapman *et al.*, 2016).

Bibliographie

APUR, 2012 : *Les îlots de chaleur urbains à Paris*. Cahier n°1, 38 p.

Azevedo J.A., Chapman L., Muller C.L., 2016 : Quantifying the daytime and nighttime urban heat island in Birmingham, UK: A comparison of satellite derived land surface temperature and high resolution air temperature observations. *RemoteSensing*, 8, 153.

Bigot S., Duché S., Madelin M. et Rome S., 2017 : Étude du climat urbain : pour une mise à disposition de nouveaux services climatiques. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, sous presse.

Cantat O., 2014 : L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps, *Norois* [En ligne], 191 | 2004/2.

Chapman L., Bell C., Bell S., 2016 : Can the crowdsourcing data paradigm take atmospheric science to a new level? A case study of the urban heat island of London quantified using Netatmo weather stations. *International Journal of Climatology*, doi:10.1002/joc.4940.

Cheval S. et Dumitrescu A., 2009 : The July urban heat island of Bucharest as derived from MODIS images. *Theoretical and Applied Climatology*, 96, 145-153.

Colombert M., 2008 : *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*. Thèse de doctorat en Génie urbain, Université Paris-Est, 341 p. + annexes.

De Lapparent B., Roux J., Richard Y., Pohl B., Bientz S., Codet-Hache O., Dumaître F., Toussaint H., Tissot A.-C., Thevenin D. et Thevenin T., 2015 : Mesures de la température et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain à Dijon. *Publications de l'AIC*, 28, 257-262.

- Dousset B., Gourmelon F., Laaidi K., Zeghnoun A., Giraudet E., Bretin P., Mauri E. et Vandentorren, S., 2011 : Satellite monitoring of summer heatwaves in the Paris metropolitan area. *International Journal of Climatology*, 31, 313-323.
- Foissard X., 2015 : *L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise*. Thèse de doctorat en Géographie, Université Rennes 2, 238 p.
- Kastendeuch P., Najjar G., 2015 : Une simulation des interactions ville-atmosphère à différentes échelles : application sur Strasbourg. *Climatologie*, 12, 44-64.
- Madelin M., Beltrando G. et Sakhy A., 2012 : Intensity and delimitation of the Night Urban Surface Heat Island. *EGU General Assembly 2012*.
- Muller C.L., Chapman L., Johnston S., Kidd C., Illingworth S., Foody G., Overeem A., Leigh R.R., 2015 : Crowdsourcing for climate and atmospheric sciences: current status and future potential. *International Journal of Climatology*, 35, 11, 3185-3203.
- Oke T.R., 1982 : The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108, 455, 1-24.
- Pinson L., 2016 : *Analyse et représentation des épisodes de caniculaires en zones urbaines denses : de la durée à la conception d'un indice de dangerosité*. Thèse de doctorat en Science de l'information géographique, Université Paris-Est, 408 p.
- Sakhy A., 2016 : *Îlots de chaleur et morphologie urbaine de l'agglomération parisienne : conséquences sur la mortalité durant la canicule de 2003*. Thèse de doctorat en Géographie, Université Paris Diderot, 306 p. + annexes.
- Stewart I.D., 2011 : A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature. *International Journal of Climatology*, 31, 200-217.
- Stewart I.D., Oke T. R., 2012 : Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of American Meteorological Society*, 93, 1879-1900.

IMPACTS DES ÉVÉNEMENTS CLIMATIQUES EXTRÊMES SUR LA MÉTROPOLE DE CASABLANCA (CAS DES INONDATIONS DU 29/11/2010)

SALOUÏ A.¹, CHAHHOÛ F-Z.²

¹ Université Hassan II – Casablanca, FLSH de Mohammedia, saloui.abdelmalik@gmail.com

² Université Hassan II – Casablanca, FLSH de Mohammedia

Résumé : La Métropole économique du Maroc est impactée par les événements climatiques extrêmes; récurrence d'incidences climatiques jamais connues auparavant : pluies torrentielles du 29/11/2010. Casablanca est confrontée en effet, à de nombreux risques, surtout qu'elle soit dotée d'une infrastructure mal adaptée. Mis à part les grands dégâts matériels, les dernières inondations de 2010 ont emporté pas moins de 35 personnes. Un rappel censé ne pas passer inaperçu chez les autorités qui ont le devoir d'anticiper ce genre de drame et d'inclure des mesures restrictives au niveau du schéma directeur ou du plan d'aménagement urbain. Dans l'avenir, les incidences climatiques seraient de plus en plus récurrentes. Les moyens d'adaptation semblent se hisser lentement. Ainsi, il devient vital de développer des moyens de résilience plus efficaces pour atténuer la vulnérabilité.

Mots-clés : Événement climatique extrême, inondation, impact, Casablanca.

Abstract : Morocco's economic metropolis appears to be impacted by extreme weather events. The evidence is embodied in the form of climatic incidents never known before, e.g. torrential rains of November 29th, 2010. Indeed, Casablanca faces many risks especially because of its poor infrastructure that makes it highly vulnerable. Apart from the great material damage, the last floods dating back to 2010 took away no fewer than 35 people. This material and human loss should not go unnoticed, also, it must be a reminder to the authorities whose duty is to anticipate and include restrictive measures in any master or urban development plan in order to prevent such tragedies from happening. Above all, extreme climatic incidents will be recurrent, however, the means of adaptations are raising very slowly. Consequently, it will be necessary to develop other means of resilience that are more effective in mitigating their destructive consequences.

Keywords : extreme weather event – flood- impact- Casablanca.

Introduction

Au Maroc, la variabilité croissante des précipitations et la multiplication des phénomènes extrêmes génèrent des crues susceptibles de provoquer des inondations, des dépassements des capacités de stockage des barrages et des débordements au niveau du réseau d'assainissement (Saloui, 2010).

En effet, les dernières années ont connu de violentes inondations engendrées par des pluies diluviennes dont l'effet est dévastateur quant à l'amplification du ruissellement au niveau des versants, causant ainsi des crues et des inondations avec des dégâts inestimables (Decamps H., 2010). L'on rappelle dans ce sens, l'accentuation et la multiplication de telles crues exceptionnelles durant la période 2008-2013, notamment au niveau de la moitié nord du territoire national, avec des périodes de retour estimées entre 10 et 20 ans (I.R.E.S., 2016).

La ville de Casablanca, Métropole économique du Maroc, semble être très influencée par les événements extrêmes qui se manifestent sous forme d'incidences climatiques jamais enregistrés auparavant, telles les pluies torrentielles du 29 novembre 2010 (Sebbar A., 2013). La ville se trouvait donc confronter à de nombreux risques, surtout qu'elle soit dotée d'une infrastructure mal adaptée. Le présent article tente de traiter la problématique du risque et des répercussions subits par la ville, suite à ces événements climatiques extrêmes. Il vise, aussi, la mise en claire des impacts et dégâts provoqués par de telles incidences climatiques (Chahhou F-Z., 2016). Il vise aussi l'incitation des chercheurs et des acteurs à scruter des solutions et des moyens de résilience. Enfin, mobiliser les décideurs, dans le sens d'une bonne

gouvernance pour l'élaboration de stratégies visant à promouvoir Casablanca et d'en faire "une ville durable".

1. L'événement météorologique extrême du 29/30 novembre 2010

1.1. Événement du 29 et 30 novembre 2010

La ville de Casablanca a reçu, la nuit du lundi 29 et Mardi 30 Novembre 2010, un cumul pluviométrique de 178 mm, volume d'eau qui correspond à la moitié des précipitations que connaît la station en une année. Une pluviométrie certes exceptionnelle pour cette ville, mais n'est pas impossible à gérer (fig. 1).

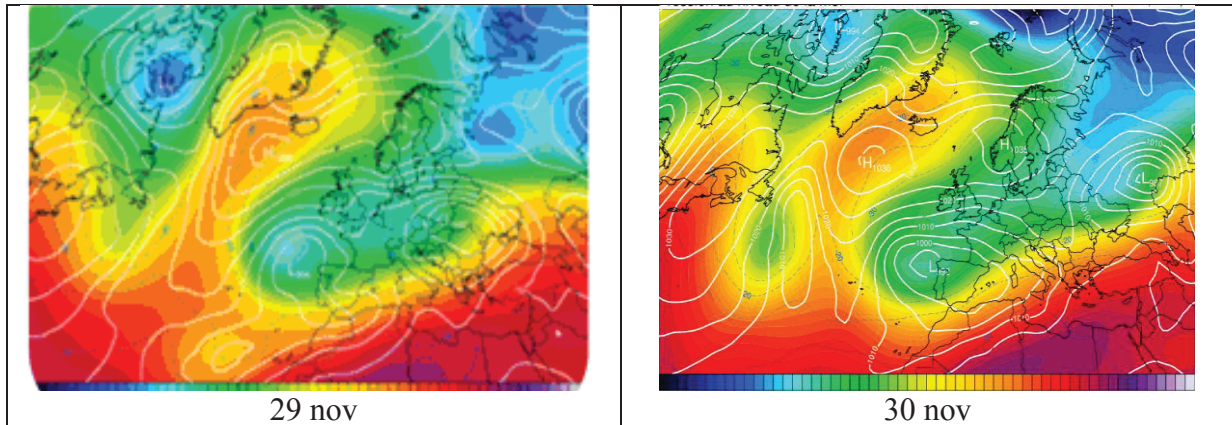


Fig.1: Cartes synoptiques du 28/29 novembre 2010

Le cas des synoptiques du 29-30 novembre 2010 montre bien le phénomène extrême des précipitations diluviennes survenues sur Casablanca suite au recul de l'anticyclone des Açores vers le sud-ouest (fig. 2). Situation ayant permis aux perturbations envoyées par la dépression d'Islande de frôler le nord-ouest du pays et de donner ce type de temps très pluvieux sur le pays (01/12/2010).

1.2 Analyse des précipitations

Le mois de novembre 2010, avec un cumul dépassant les 45 mm/24h, a enregistré des valeurs journalières inquiétantes. On est face à un phénomène météorologique extrême. Les pluies, tant attendues, sont ainsi devenues redoutées.

Les dernières catastrophes enregistrées à Rabat et à Casablanca en 2010, et celles de Guélmim en 2013, prouvent l'occurrence élevée de ces phénomènes.

Si le retour des pluies semble une aubaine pour les agriculteurs, il n'en est pas de même pour les citadins. En effet, ces fortes averses provoquent des inondations, causées en premier lieu par la concentration de pluies dans un espace déjà humidifié suite aux précipitations des mois précédents qui ont saturé les sols. Casablanca est un site presque totalement urbanisé du fait de la croissance démographique et économique. Chose qui signifie une énorme pression sur les ressources hydriques. Une pluviométrie élevée est très confortable sur le plan de la sécurité en eau, mais elle l'est moins pour la gestion du ruissellement des eaux pluviales.

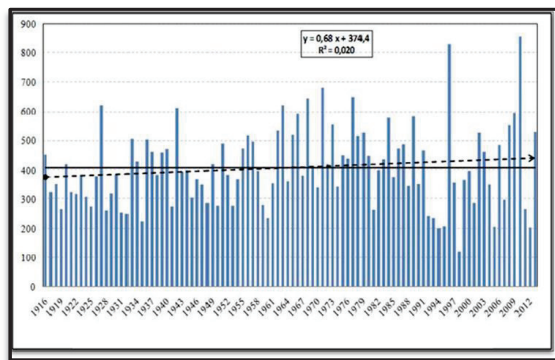


Fig. 2. la répartition des précipitations annuelles en 2010

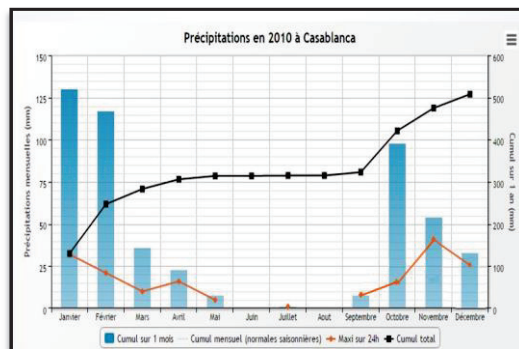


Fig. 3. la répartition des cumuls des précipitations en 2010

Selon les figures 2 et 3, l'année 2010 était très humide ; elle a battu les records de pluies des 60 dernières années. Les cumuls mensuels ont dépassé les 350 mm en hiver et en printemps.

2. Le risque d'inondation et la sensibilité actuelle de la Métropole

2.1. L'aménagement du lit majeur de l'Oued Bouskoura

Dans la ville de Casablanca, les risques d'inondations existent depuis toujours, et seront probablement très récurrent par le fait du changement climatique. De telles inondations, comme celle du 29 novembre 2010, surviennent fréquemment à cause de l'amplification du ruissellement et des crues de l'Oued Bouskoura, ainsi qu'aux problèmes liés à l'assainissement pluvial (Ministère de l'environnement, Direction de la surveillance et de prévention des risques, 2011).

Au début du 20^{ème} siècle, l'oued arrivait encore jusqu'à son embouchure près de la gare du train Casa-port. Son lit parcourait le cheminement suivant : Bouskoura, Sidi Maârouf, Route El Jadida, quartier de Maarif, Twin Center, Boulevard Roudani, Parc de la Ligue Arabe. La ville était traversée d'est en ouest par le lit de l'oued. Mais progressivement, et sous l'effet de l'urbanisation, le lit a cédé place à la ville, sauf à la périphérie sud de la métropole où il est toujours présent.

Le risque est d'autant plus sérieux suite à l'envahissement des bâtis (béton !). Aujourd'hui, bon nombre d'édifices publics sont construits à même le lit de la rivière, tel est le cas du parc d'exposition de l'office des changes, l'Ecole Hassania des travaux publics, ainsi que le siège de l'OCP qui, quoiqu'il ne soit pas planté dans le lit, il se trouve néanmoins dans une zone inondable.

Une rivière finit toujours par reprendre son lit ; c'est le cas due suite aux intempéries du 29-30/11/2010, à cause d'un événement météorologique extrême, où les précipitations ont atteint plus de 200 mm en moins de 12 heures, correspondant ainsi à la moitié du total pluviométrique de toute une année moyenne (fig. 2). L'Oued Bouskoura a débordé sur la Route d'El Jadida, au niveau du parc de l'office des changes, et a inondé les secteurs OCP, l'ancien aéroport d'Anfa, et plus de 800 postes de distribution.

Ceci-dit, l'Oued de Bouskoura connaît un débordement suite à la propagation d'un débit supérieur à celui que peut évacuer le lit mineur, dont la capacité est généralement limitée à de petits débits.

L'urbanisation intensive de ce petit bassin versant est à l'origine de l'imperméabilisation des sols qui accroît et aggrave considérablement le ruissellement. L'eau retrouve son chemin

naturel dont l'occultation dans la trame urbaine rend le phénomène d'autant plus inattendu et dangereux.

2.2. Les problèmes d'assainissement pluvial au sein de la ville

Vis-à-vis des risques d'inondation, les secteurs à risques sont relativement dispersés, et correspondent surtout à des zones peu ou mal dotées en matière d'assainissement pluvial.

Depuis les inondations importantes qui se sont produites en 1963, où plusieurs quartiers étaient inondés, des aménagements et des actions d'entretien (curage du réseau) ont été réalisés par la LYDEC afin de réduire les «points noirs». Actuellement, il existe 10 points noirs sur le réseau primaire qui génèrent des débordements des eaux des pluies de période de retour inférieure à la décennie. De nouveaux points noirs sont également apparus du fait de la densification de l'urbanisation. Certains points noirs sont dus à l'absence de réseau d'eaux pluviales. D'autres ne sont pas décrits dans le schéma directeur. Les débordements au niveau de ces points noirs sont générés par différentes causes :

Point 1 : Hay Hassani, au droit de la route El Jadida (RP. 8) : Les débordements sont générés par l'insuffisance marquée du collecteur unitaire Riviera. Ce point correspond également à l'arrivée de l'oued Bouskoura, qui est canalisé dans un collecteur de capacité très inférieure aux débits de crue de l'oued ;

Point 2 : Sidi Belyout, bassin versant du collecteur Delure : ce collecteur draine une partie du centre-ville et se rejette dans le port. Son insuffisance est à l'origine des débordements constatés, malgré la présence de déversoirs d'orage. Les secteurs touchés sont : la place des Nations Unies, le boulevard des Almohades, le secteur Casa-2000 et la gare Casa-Port. Ce collecteur peut être influencé par le niveau marin dans sa partie aval ;

Point 3 : Sidi Bernoussi - nouveau point de débordement apparu depuis le schéma directeur, au droit de la route El Jadida ;

Point 4 : Hay Hassani – secteur Ferrara, inondations dues à l'absence de système pluvial ;

Point 5 : Sidi Bernoussi – zone basse, les débordements sont générés par l'insuffisance du collecteur Bernoussi et aggravés par l'incidence du niveau marin en cas de fortes marées. Les inondations touchent la zone industrielle de Sidi Bernoussi, située dans une cuvette naturelle ;

Point 6 : Mers Sultan – Secteur de Hay Dakhla, la capacité du collecteur est insuffisante et provoque des débordements dans la zone basse de Hay Dakhla, où les hauteurs d'eau peuvent atteindre 60 cm au-dessus du niveau de la chaussée ;

Point 7 : Ain Chock Ouest – secteur de la voie des préfectures et de Sidi Maârouf. Les débordements étaient constatés lors de l'hiver 2005-2006 et celui de 2010 au niveau de la voie des Préfectures. Ils sont dus à la capacité insuffisante des collecteurs, non dimensionnés pour faire face à l'accroissement de l'urbanisation en cours sur le bassin ;

Point 8 : Ain Chock-Est – Bassin versant du collecteur Randet – secteur de Derb Diwane. Les débordements lors de chaque pluie intense à proximité du Boulevard du 2 mars sont dus à l'insuffisance généralisée du collecteur Randet, suite à l'accroissement de l'urbanisation sur le bassin.

Les points 1, 2, 5, et 6 correspondent à des zones de débordement existantes en 1997, puis les points 3 et 8 correspondent à des zones de débordements apparues après 1997 et enfin, les points 4 et 7 sont dus à l'absence de réseau d'eaux pluviales (B. M., 2013).

3. Impacts et répercussions du phénomène extrême sur la métropole de Casablanca

3.1. Dégâts matériels suite aux pluies intenses : exemple des précipitations diluviennes du 29/30 Novembre 2010

Le 30 Novembre 2010, Casablanca s'est levée sous l'eau, la pluviométrie a enregistré 178 mm. Des dégâts furent enregistré (fig. 4) :



Fig. 4. Quelques dégâts au niveau de l'infrastructure de la ville

- Des dégâts matériels dépassent les 11M dhs. Selon l'OCP (Bilan 2010/2011);
- Effondrement de 14 bâtiments de l'ancienne Médina, abritant plus de 50 familles (Agence Urbaine de Casablanca, 2012).

3.2. Mobilisation pour la protection contre le risque d'inondation (SCO)

L'objectif de protection retenu dans le cadre du nouveau schéma directeur d'assainissement en cours d'élaboration est la mise en place du Super Collecteur Ouest qui permettrait de dévier les eaux de crue de l'oued Bouskoura. Le projet est dimensionné pour une période de retour de 20 ans. Le collecteur recevra également les eaux de ruissellement de plusieurs bassins versants existants ou en cours d'urbanisation. Pour ces bassins, les débits de projet à drainer par le Super Collecteur Ouest correspondent à la période de retour de 10 ans.

Le collecteur, d'une longueur d'environ 7 km, a été réalisé en galerie sur 6300 m, et un diamètre de 4 m, avec un coût d'investissement de 633 Millions de dhs (Agence des bassins versants de Bouregreg et de la Chaouia, 2016, p. 7). Le projet Super Collecteur Ouest est de nature à alléger l'impact d'une crue torrentielle, mais seules les mesures préventives – non urbanisation dans le lit majeur – permettent de ne pas aggraver le risque.

Le retour des pluies pourrait entraîner un accroissement des débits de crue de l'ordre de 10 à 15%, ce qui réduirait le niveau de protection de 20 à 15 ans environ. Cependant, l'incertitude sur l'estimation des débits de l'oued est forte (elle est probablement bien supérieure à l'incidence prise en compte pour le changement climatique), et une attention particulière devra être portée sur le comportement du S.C.O. en cas d'épisodes exceptionnels dépassant la crue de projet.

Conclusion

La métropole est désormais très exposée à des événements climatiques extrêmes, surtout les inondations. Mis à part les grands dégâts matériels, les dernières inondations à Casablanca qui remontent à 2010 avaient emporté pas moins de 35 personnes. Un rappel qui

ne devrait pas passer inaperçu chez les autorités ; il est de leur devoir d'anticiper ce genre de drame, et d'inclure des mesures draconiennes dans tout schéma directeur d'aménagement urbain. Les moyens de résilience et d'adaptation se hissent d'une manière lente ; il va falloir développer d'autres moyens plus efficaces pour atténuer ses risques.

Dans sa quête d'attractivité à l'échelle internationale, Casablanca a besoin d'un projet métropolitain fort qui s'appuiera nécessairement sur de grands équipements qui lui conféreront sa durabilité et sa protection contre toutes incidences dues à la manifestation des incidences climatiques.

Il serait, donc, sage de partir de ces impacts pour mieux structurer l'espace de la métropole. Cette structuration s'effectuerait à travers la capacité d'un grand équipement à accentuer l'attractivité du lieu qui l'accueille, à lui conférer une relative spécialisation fonctionnelle, ainsi qu'une identité forte. Deux mesures, entre autres, semblent déterminantes dans la protection de la métropole contre les inondations :

- ✓ La formation des compétences humaines ;
- ✓ La bonne coordination entre les acteurs – décideurs du Grand-Casablanca.

Bibliographie

Agence Urbaine de Casablanca, 2014 : *Programme de réhabilitation de la ville de Casablanca, 2015-2016*.

Banque Mondiale, 2013 : *Adaptation au changement climatique et aux désastres naturels des villes côtières d'Afrique du Nord, Phase 1 : Évaluation des risques en situation actuelle et à l'horizon 2030 pour la ville de Casablanca*, Version finale.

Chahhou F-Z., 2016 : *L'impact du changement climatique sur les milieux : Cas de la zone de Casablanca*. Mémoire de licence, Université Hassan II Casablanca, FLSH Ain Choc.

Decamps H., 2010 : *Événement climatique extrême - Réduire les vulnérabilités des systèmes écologiques et sociaux*, Edition Académie des sciences.

I.R.E.S., 2016 : *Rapport de synthèse sur les changements climatiques, Programme d'études «Changement climatique : impacts sur le Maroc et options d'adaptations globales », phase 1*.

Ministère de l'environnement, Direction de la surveillance et de prévention des risques, 2011 : *Etude pour la réalisation d'une cartographie et d'un système d'information géographique sur les risques majeurs au Maroc : Le risque d'inondation*.

Saloui A., 2010 : *Etude de la variabilité des précipitations et des bilans hydriques*. Edit. FLSH de Mohammedia, Université Hassan II Casablanca.

Sebbar A., 2013 : *Etude de la variabilité de la pluviométrie au Maroc (1935-2005) : Réactualisation de la carte de précipitations*. Thèse de doctorat, Université Hassan II – Mohammedia, Faculté des Sciences, Ben M'sik.

EN NO_x ET CO DUES AU TRAFIC ET LA VARIABILITE DU VENT SUR LA QUALITE DE L'AIR À DAKAR.

SARR D., SY A., DIOP B., DIAKHABY A.

LSAO-Université Gaston Berger, Saint-Louis/Sénégal .dj14sarr@yahoo.fr,

LSAO-Université Gaston Berger, Saint-Louis/Sénégal .ablaye.sy7@gmail.com,

LSAO-Université Gaston Berger, Saint-Louis/Sénégal .diopbouya@yahoo.fr

Résumé : Dans la zone sahélienne, le développement de centres urbains est devenu un facteur important dans la pollution atmosphérique. Ce phénomène n'est plus simplement lié aux aérosols, mais fortement aux émissions de gaz polluants par le trafic automobile. Notre étude porte sur la contribution de polluants minéraux tels les oxydes d'azote (NO_x) et le monoxyde de carbone (CO) émis par la circulation automobile. Elle nous a permis d'évaluer les variations de leur concentration sur la qualité de l'air et de les comparer aux concentrations mesurées (immiscions) en tenant compte de la variabilité du vent. Ce travail nous permet d'établir un suivi de la qualité de l'air dans la capitale sénégalaise qui ne représente que 0,3% du territoire national mais concentre 23% de la population et l'essentiel du transport urbain.

Mots-Clés : pollution, polluants minéraux, trafic automobile, vent, Sahel.

Abstract: In the Sahelian zone, the development of urban centers has become an important factor in air pollution. This phenomenon is no longer simply linked to aerosols, but rather to emissions of gaseous pollutants by car traffic. Our study focuses on the contribution of mineral pollutants such as nitrogen oxides (NO_x) and carbon monoxide (CO) from vehicular traffic. It allowed us to evaluate the variations in their concentration on air quality and to compare them with the measured concentrations (immiscences) taking into account the variability of the wind. This work allows us to monitor the air quality in the Senegalese capital which represents only 0.3% of the national territory but concentrates 23% of the population and most of the urban transport.

Keywords: pollution, mineral pollutants, traffic, wind, Sahel.

Introduction

La capitale sénégalaise représente en superficie 0,3% du territoire national et concentre 23% de la population sénégalaise, soit une densité de 6416 habitants au km² (ANSD,2013). La forte concentration des industries et de l'activité économique associée à une démographie élevée peut expliquer l'importance des transports à Dakar. Le secteur du transport y est très dynamique à cause d'une intense activité économique et une forte concentration d'établissements scolaires (30,7%). La mobilité est importante avec 1751900 déplacements par jour dans les transports publics (EMTASUD,2015).

Le transport automobile est l'un des secteurs les plus pollueurs de l'activité humaine. Une estimation des contributions en gaz polluants par les transports principalement peut permettre de comprendre les niveaux de pollution tenant compte des paramètres météorologiques. L'augmentation du nombre de véhicules, combinée à la vétusté du parc, entraîne des problèmes de congestion qui réduisent les vitesses, produisant ainsi des quantités élevées de gaz de combustion. Les pots d'échappement des voitures automobiles produisent entre autres le monoxyde de carbone (CO), les oxydes d'azote NO_x (NO et NO₂).

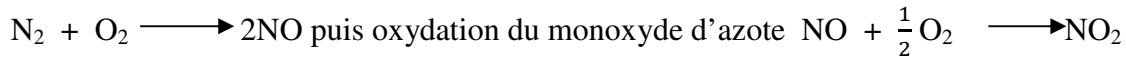
L'atmosphère étant assimilable à un système chimique où foisonnent un ensemble de réactions oxydantes incluant ces gaz produits et dont le principal précurseur est le radical hydroxyle (Monks2005). La composition de l'atmosphère dépend des émissions anthropiques fortement marquées par les transports à moteur.

Il sera présenté quelques processus photochimiques impliquant les gaz polluants mesurés par le Centre de Contrôle Technique des Véhicules Automobiles (CCTVA) à Dakar puis une évaluation de l'effet du vent sur leur concentration pour l'année 2015.

1. Processus chimiques de formation des NOx et CO

1.1 : Sources des oxydes d'azote NOx

Les oxydes d'azote anthropiques dans les milieux urbains proviennent à 60% des transports (Lajoie *et al.*, 1998), ils résultent en partie de la combustion du diazote (N₂) de l'air dans les véhicules à moteurs selon un processus en deux phases (Degobert ; 1992):



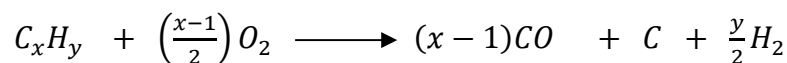
Certains additifs des carburants constitués de composés azotés (amines, acides aminés et nitriles) produisent également des NOx, lors des combustions. Le monoxyde d'azote NO produit dans ce cas se forme plus rapidement que dans le cas du diazote ; cela s'explique par les faibles énergies de liaison autour de l'atome d'azote contrairement à celle du diazote N₂.

Liaisons	Energie de liaison (kcal/mol)	$\text{NO}_2 + h\nu \longrightarrow \text{NO} + \text{O}$
$\text{N} \equiv \text{N}$	225,9	$\text{O} + \text{O}_2 \longrightarrow \text{O}_3$
$\text{H} - \text{NH}_2$	103	
$\text{O} - \text{NO}$	73	Schéma1 : photolyse du NO₂
$\text{O}_2\text{N} - \text{NO}$	10	

Dans les villes, le dioxyde d'azote NO₂, grâce à des rayonnements de longueur d'onde inférieure à 420nm peut conduire à la formation de l'ozone (schéma1). Ce polluant secondaire peut provoquer des irritations des yeux (Caselli *et al.*, 2002), il peut aussi attaquer la végétation car il détruit la chlorophylle (Rojey, 2008 ; Bliefert *et Perraud*, 2011).

1.2 : Sources du monoxyde de carbone

Le CO est l'un des polluants les plus répandus et le plus toxique pour l'homme, son caractère dangereux pour l'homme est lié à sa forte affinité avec l'hémoglobine. Ses sources (combustion de biomasse, des hydrocarbures, le chauffage, le transport, les activités industrielles) se rencontrent dans les villes comme Dakar. Sa densité faible de 0,97 explique sa dispersion et son transport rapide dans l'air. Il est produit lors de la combustion des matières organiques effectuées en présence d'une quantité insuffisante de dioxygène.



Dans les chambres de combustion des automobiles, la durée faible offerte au processus d'oxydation, le défaut d'homogénéité du mélange de carbures, l'hétérogénéité et les variations rapides de température ne permettent pas d'atteindre l'équilibre thermodynamique idéal devant conduire à la formation du dioxyde de carbone. Ces conditions entraînent à l'échappement des voitures des produits de combustion incomplète (Degobert, 1992).

Une fois émis dans l'atmosphère, le CO peut être éliminé par oxydation soit par le dioxygène soit par le radical hydroxyle suivant les schémas suivants :



Cependant la dépollution atmosphérique en CO avec le radical OH est la plus probable à cause des températures élevées que nécessite la première oxydation ; cette réaction joue un

rôle significatif dans les atmosphères tropicales à cause de l'importance du rayonnement solaire. Ce processus produit ainsi du CO₂ et de l'hydrogène atomique (MCquarrie,1991). Ces gaz polluants émis ont une forte influence sur la qualité de l'air.

2. proportions relatives de CO et NOx suivant le type de moteur du véhicule

2.1 : Principe de mesures

Les émissions en CO et NOx par les véhicules automobiles prennent naissance dans les chambres de combustion des moteurs des véhicules. Les quantités de ces gaz produits lorsque le moteur tourne dépendent du mélange air-combustible, de la durée de combustion. Nous n'avons, malgré le nombre de véhicules important de véhicules en circulation pu disposer que d'un échantillon de 187 véhicules dont 10% de type essence. Ces véhicules ont permis à titre d'exemple d'illustrer les émissions de ces gaz suivant l'âge et suivant le type de moteur.

Dans le CCTVA, pour le courant de l'année 2015, les proportions de CO, de NOx sont mesurées directement au niveau des pots d'échappement des 187 voitures automobiles, grâce à un analyseur automobile (Auto 4-2) pendant une durée de deux minutes.

2.2 : Profils des émissions en NOx en fonction de l'âge des véhicules

Ce profil de NOx permet de montrer la contribution des transports marqués par la forte proportion de véhicules diesel dans la pollution. Les émissions de NOx par les véhicules de type diesel sont plus importantes que celles du type essence (fig.1), elles atteignent leur maximum entre 15 et 19 ans ; elles sont faibles pour le type essence mais augmentent sensiblement à partir de 21ans. En moyenne la contribution en NOx par les transports augmente lorsque l'âge des véhicules est avancé.

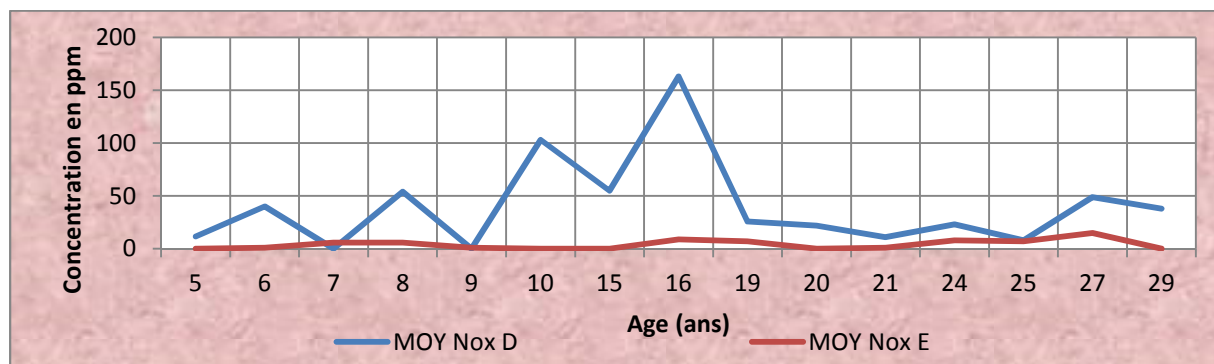


Figure1 : Profil des émissions en NOx pour voitures Diesel et essence

3. influence du vent sur les polluants

3.1 : Données et méthodes

Pour cette partie de notre étude, nous avons considéré les concentrations en NOx et en CO collectées en 2015 au niveau des sept stations de Dakar, fournies par la direction de l'environnement ; données qui ont permis d'établir un tableau statistique sur les moyennes mensuelle et annuelle. Les radiosondages du site de Wyoming associées aux valeurs moyennées des concentrations ont permis d'évaluer les variations des flux mensuels en fonction de la vitesse et la direction du vent, de l'humidité relative puis de leur écart en fonction du temps(en fonction des mois). Cette étude concerne une zone aérologique d'altitude correspondant à des pressions atmosphériques supérieures à 1000hPa, domaine spatial considéré pour évaluer les flux de NOx et CO sous l'influence des vents de surface. Les

niveaux de pollution sont évalués par rapport aux valeurs de référence de la norme NS- 05-062 en vigueur au Sénégal ; les moyennes pour l'année 2015 sont de $1,42\text{mg/m}^3$ pour le CO et $0,021\text{mg/m}^3$.

3.2 : Résultats et discussions

Vitesse et direction du vent moyen

Pour l'année 2015, les vents assez forts sont observés pendant les mois de janvier et février. La rose des vents de la figure 2 montre une forte domination des vents du Nord - Est constatée pendant la saison sèche (du mois de décembre au mois d'avril) avec une vitesse du vent supérieure à 7m/s correspondant à un vent assez fort. Cette vitesse va décroître jusqu'à son minimum entre Aout et septembre correspondant à la saison des pluies ; en cette période, le vent dominant est Sud -Ouest comme le montre la figure 2.

La presqu'île de Dakar est balayée par deux vents dominants : un vent du NO en saison sèche et un vent du SO pendant la période de l'hivernage. Ces vents moyens montrent une direction privilégiée NE-SO de déplacement des masses d'air à basse altitude qui semble produire un drainage permanent des polluants émises par les sources anthropiques de façon générale.

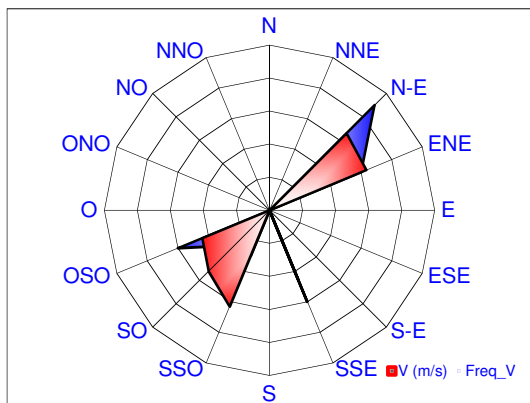


Figure2 : Rose des vents

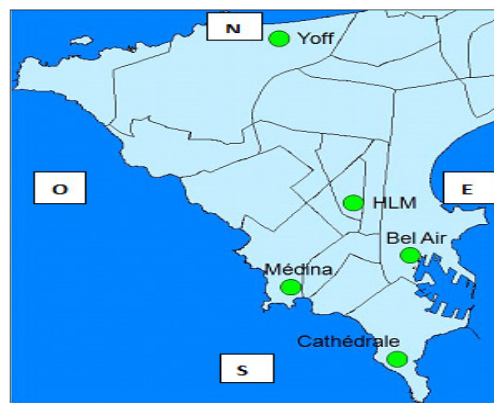


Figure 3 : Carte des stations de mesure à Dakar

Évolution du flux mensuel en fonction du temps

Les flux mensuels évalués pour le NOx et le CO pendant l'année 2015 en fonction de la vitesse du vent moyen mensuel présente les profils représentés par les figures 4 et 5.

L'évolution des flux mensuels (F) des composés n'est pas régulière en fonction de la vitesse (v) du vent, même si en moyenne ils augmentent avec la vitesse comme le montrent les courbes de régression en rouge sur les deux graphes. La pente de la courbe de régression est plus importante pour le CO que pour les NOx (environ 45 fois), cela pourrait s'expliquer par la dispersion du CO dans l'air qui facilite son transport par les vents de surface. Ces résultats montrent sans doute la contribution d'autres paramètres météorologiques.

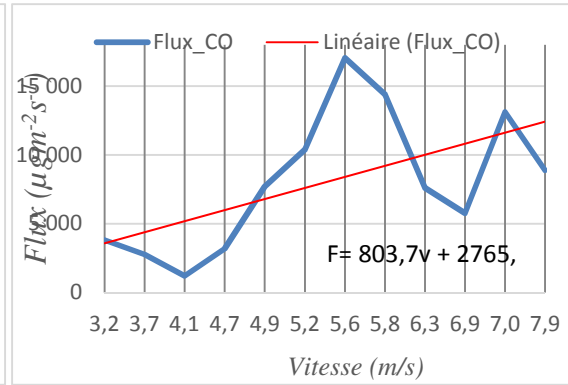
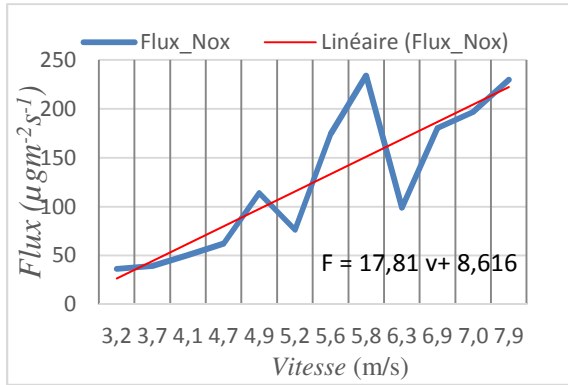


Figure 4. Flux NOx en fonction de la vitesse Figure 5. Flux CO en fonction de la vitesse

Évolution des écarts mensuels de flux en fonction du temps

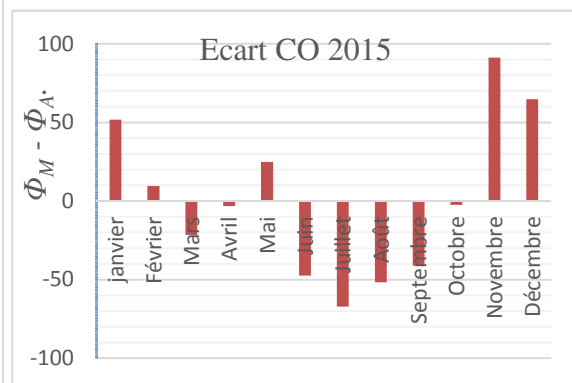
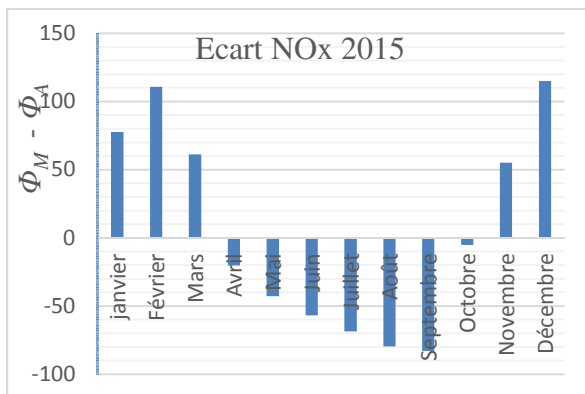


Figure6. Ecart NOx en fonction du temps Figure7. Ecart CO en fonction du temps

Les écarts mensuels ($\Phi_M - \Phi_A$) par rapport à la moyenne annuelle Φ_A des deux composés présentent des profils analogues à l'exception des mois de mars et d'avril qui semblent présenter des incohérences liées aux données collectées. Dans les deux cas, la période des grandes vacances scolaires qui englobe la saison des pluies est concernée par ces valeurs négatives qui représentent des flux mensuels faibles par rapport à la moyenne annuelle. Les variations, plus régulières au niveau des NOx qui prennent essentiellement naissance dans le transport, peuvent s'expliquer également par la diminution du trafic automobile due aux grandes vacances scolaires pendant la saison des pluies (fig.6).

Évolution des écarts mensuels de flux en fonction de l'humidité relative

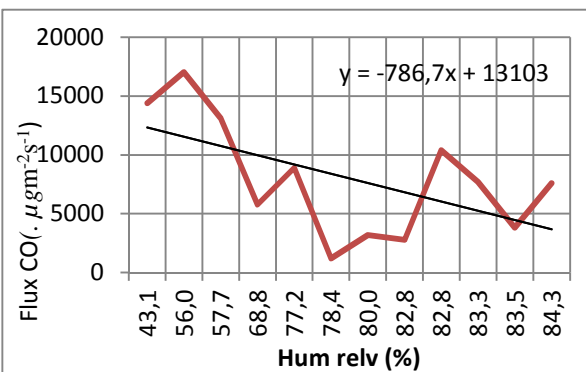
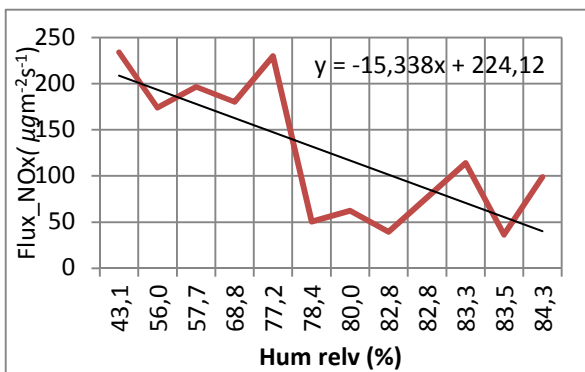


Figure 8. Flux NOx en fonction de l'humidité Figure9. Flux CO en fonction de l'humidité

En fonction de l'humidité relative, les flux adoptent en moyenne une tendance à la baisse avec une diminution plus forte pour le monoxyde de carbone (environ 51%) ; les minima des flux mensuels sont obtenus pour des humidités relatives comprises entre 78,4 et 82,8% valeurs correspondant à la saison des pluies, de juillet à octobre. Les précipitations ont une influence certaine sur les concentrations de ces composés chimiques grâce au phénomène de lessivage qui, en partie, entraîne leur dissolution.

Conclusions et recommandations :

La macrocéphalie de la ville de Dakar représente un enjeu de taille pour l'étude des niveaux de pollution pour un suivi de la qualité de l'air. Les concentrations des NOx et CO et autres polluants, mesurées par les différentes stations qui ne fonctionnent pas toujours correctement, proviennent en grande partie du trafic automobile notamment de véhicules âgés de type diesel. Cette étude a permis de montrer l'influence de la vitesse du vent et de sa direction, mais aussi de l'humidité relative. Les évolutions notées pendant la saison des pluies laissent penser à une contribution manifeste des précipitations sur la réduction des concentrations atmosphériques des polluants. Les concentrations diurnes minimales observées pour le CO et pour le NOx pendant cette période également de vacances scolaires donc de baisse du trafic expliquent le rôle du transport dans la pollution de la ville de Dakar.

Cette étude montre la nécessité d'un renouvellement du parc automobile, une amélioration des infrastructures pour une plus grande fluidité du transport. En outre les véhicules âgés qui représentent les principales sources de pollution urbaine devraient être remplacés par des moyens de transport de dernière génération (métro, tramway...) Les directions privilégiées du vent dominant dans la ville de Dakar doit être prise en compte dans les politiques d'aménagement et d'urbanisation des centres urbains pour éviter une accumulation des polluants anthropiques dans l'air ambiant.

Bibliographie :

ANSD, 2017. *Rapport de l'Agence Nationale des Statistiques et de la Démographie (ANSD) sur la population*. (site ou l'éditeur <http://www.ansd.sn/ressources/rapports/Rapport-definitif-RGPHAE2013.pdf> (date de dernière consultation le 04/07/2017))

Berg L., Raven P.H., 2008. *Environnement*. 6ème édition De boeck. Bruxelles

Briefert C., Perraud R., 2011. *Chimie de l'environnement : Air, eau, sol, déchets*. 2ème française. De boeck. Bruxelles.

Caselli G., Vallin J., Wunsch G, 2002 : *Démographie : les déterminants de la mortalité*. Vol III. Editions de l'institut National des études démographiques. 244p.

Degobert P., 1992. *Pollution et Automobile*. Editions Technip. Paris. 376p

EMTASUD, 2015 . CETUD. <http://www.cetud.sn/index.php/etudes-projets/etudes/2015-10-08-13-54-24/send/4-etudes-operationnelles/8-l-emasud-en-quelques-chiffres.html>

Lajoie et al 1998 . *Pollution atmosphérique et champs électromagnétiques*/Les presses de l'université de Laval. 53p

MCquarrie C. Donald A, 1991. *Chimie Générale* .3ème édition .De boeck .241p. Bruxelles

Monks P.S., 2005. Gas phase radical chemistry in the troposphere. *Chemical Society Reviews*. 376, 377, 378p.

Rojey A., 2008. *Energie et Climat : réussir la transition énergétique*. Editions Technip. Paris. 40p.

Sportisse B., 2008. *Pollution atmosphérique : des processus à la modélisation*. Springer, Paris.

BRISES LITTORALES ET CONCENTRATIONS POLLUEES EN NO_x, EN CO ET EN O₃ DANS LA BANLIEUE D'EL MOUROUJ (TUNIS) DURANT LE MOIS D'AOUT 2016

HACHICHA N.¹, EL MELKI T.¹

¹U.R. Géomatique et Géosystèmes, Université de La Manouba (Tunisie), Nozha.Hachicha@yahoo.com, lmlkitfik@gmail.com

Résumé : Cette étude relève d'une recherche doctorale ayant pour thème « la dynamique des brises littorales dans le Grand-Tunis et leurs impacts sur la qualité de l'air ». Cette ville souffre d'une pollution atmosphérique variée. Deux polluants primaires (issus des industries et du trafic routiers) sont retenus : les oxydes d'azote (NO_x) et le monoxyde de carbone (CO). Un polluant photochimique (favorisée par l'abondance du rayonnement solaire durant la saison estivale) : l'Ozone (O₃) est considéré. Ces derniers sont bien connus aussi bien par leurs effets néfastes sur la santé humaine que par leurs implications dans les processus du réchauffement climatique. Le but de ce travail mené durant le mois d'août (été 2016) vise à comprendre les effets des brises littorales sur les variations des concentrations des NO_x, des CO et des O₃ dans la banlieue d'El Mourouj.

Mots-clés : Brises littorales, pollution atmosphérique, NO_x, CO et O₃, Grand-Tunis.

Abstract : Littoral breezes and variations of NO_x, CO, O₃ in El Mourouj during August 2016. This study is carried out in the framework of a doctoral research project entitled "The dynamics of littoral breezes in the Grand-Tunis and its impacts on air quality". This city suffers from a varied atmospheric pollution. Two primary pollutants (coming from industries and traffic) are selected : nitrogen oxides (NO_x) and carbon monoxide (CO). A photochemical pollutant: Ozone (O₃) is also considered. These pollutants are well known both by their harmful effects on human health and by their implications in the global warming processes. The purpose of this work carried out during August (summer 2016) aims to understand the effects of coastal breezes on the variations of NO_x, CO and O₃ concentrations in the suburb of El Mourouj.

Keywords : Littoral breezes, atmospheric pollution, pollutants concentrations, NO_x, CO and O₃.

Introduction

L'étude des effets des brises littorales dans la région du Grand-Tunis est essentielle pour l'appréhension des variations spatiotemporelles de la qualité de l'air dans l'agglomération la plus grande du pays : capitale politique, économique et administrative de la Tunisie. Jusqu'à présent, hormis les deux banlieues de la Manouba et d'El Ghazela où l'effet des brises littorales sur les concentrations de quelques polluants a été étudié (El Melki, 2008, 2009 et 2010), il n'y a pratiquement pas d'études climatologiques concernant cette thématique dans le Grand-Tunis. Comme toute région littorale, le Grand-Tunis est soumis aux brises littorales surtout durant la saison chaude. Ces flux topothermiques d'échelle journalière et aux mécanismes actuellement bien connus (Carrega, 1994; Simpson, 1994; Beltrando et al., 1995; Planchon et al., 2004; Dahech, 2007; Dudouit, 2008; Martin, 2008; Michelot et al., 2014; etc.) jouent un rôle déterminant dans le transport et l'accumulation des polluants atmosphériques dans cette ville (El Melki, *idem*). Le présent travail cherche à caractériser les niveaux de concentrations des NO_x, des CO et des O₃ dans la banlieue d'El Mourouj (sud de la capitale) en relation avec les brises littorales.

1. Zone d'étude, données de base et méthodologie

La région du Grand-Tunis (36°40'N à 37°N et 10°E à 10°40'E), fait partie du Nord-est de la Tunisie, se situe au fond d'un golfe qui porte son nom. Cette nébuleuse urbaine s'étire sur

plus de 32 km (du nord au sud) et s'intercale entre le *Lac de Tunis* (plus de 38 km² de superficie) et la *Sabkhet Es-Sijoumi*. La région du *Grand-Tunis* est délimitée du côté continental par une série de *Jbels* (petites collines) : au nord par *Jbel Amar* (325 m) et *Jbel En-Nahli* (175m), à l'ouest : *Jbel Ain El Krima*, *Jbel Sidi Salah*, *Jbel Chekiret* au sud *Jbel Bougarnine* : 560m (fig.1). Cette topographie complexe exerce des effets remarquables sur la circulation des brises littorales : effets thermiques et canalisation des flux.

La cité d'*El Mourouj* (fig.1 et fig.2) est l'une des banlieues sud de la capitale. Elle comptait 104 586 habitants en 2014. Il s'agit d'une banlieue à vocation résidentielle en premier lieu (cité dortoir). La plupart de ces habitants actifs travaillent à Tunis ou dans ses différentes banlieues industrielles (Dlala, 2007). En dépit de cette vocation résidentielle, *El Mourouj* souffre d'une pollution aux origines multiples. Elle est limitrophe de l'axe routier et ferroviaire le plus important du pays, reliant la capitale à toutes les régions du centre et du sud du pays. Aussi, elle est limitrophe des deux banlieues industrielles : *Rades* et *Ben Arous* ; ces deux dernières s'intercalent entre la mer et la cité d'*El Mourouj* qui pourrait collecter de ce fait, par régime de brise de mer, une grande partie de la pollution issue du trafic et des industries indiquées.

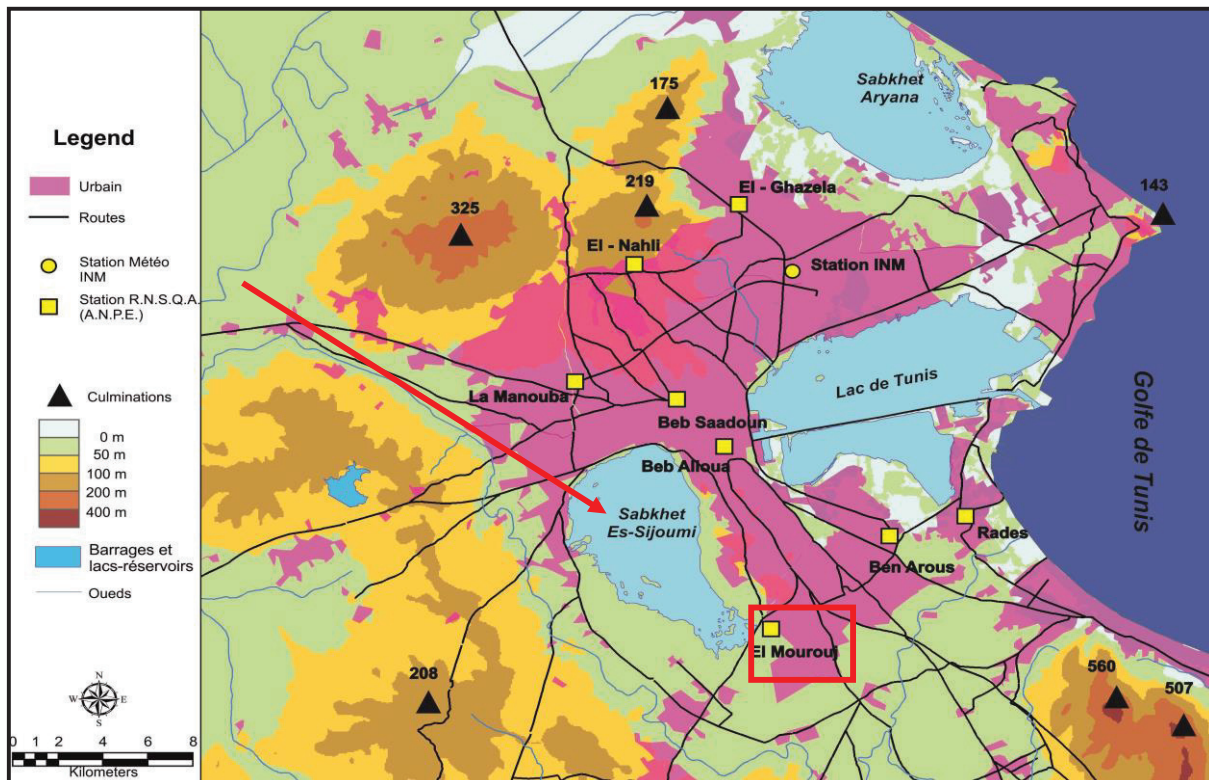


Fig. 1. Localisation de la ville de Tunis et des stations du « Réseau National de la Surveillance de la Qualité de l'Air » : R. N.S.Q.A. (A.N.P.E). (Flèche rouge : brise de terre canalisée par la topographie). Source : réalisation personnelle, d'après la Carte Agricole (CRDA) et Google Earth 2016.



Fig. 2. Localisation et site de la station de mesure de la qualité de l'air RNSQA (ANPE) d'El Mourouj dans la Banlieue Sud de Tunis : *Image Google Earth 2017*.

La période étudiée correspond au mois d'août 2016. Les données de base de cette étude, au pas de temps horaire, proviennent de la station d'El Mourouj, appartenant au Réseau National de la Surveillance de la Qualité de l'Air (R.N.S.Q.A.) contrôlé par l'Agence Nationale de la Protection de l'Environnement (A.N.P.E.), elle-même étant un organisme du Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD) de Tunisie. Les données météorologiques utilisées, sont les relevés des vitesses et des directions du vent. Les données de la qualité de l'air sont des relevés horaires de deux polluants primaires : le monoxyde de carbone (CO) et les oxydes d'azotes (NOx) et d'un polluant photochimique : l'Ozone (O₃).

Dans une première étape, un modèle de détection des journées de brises littorales composé de cinq filtres a été appliqué. Les principales conditions de ce modèle sont les suivantes : des vitesses de vent inférieures à 1 m/s, une alternance journalière des directions des brises et des valeurs de pression atmosphérique >1010 hPa. La période étudiée (août 2016) n'étant pas très longue (31 jours), un contrôle des résultats cas par cas a été effectué. Les deux autres filtres permettent la détection des périodes de renverse des brises de mer/terre.

Par la suite, le calcul des concentrations horaires moyennes et maximales des NOx, du CO et de l'O₃, permettant l'étude de la variation temporelle (échelle horaire) de la pollution atmosphérique a été effectué. Enfin, le calcul des concentrations horaires moyennes et maximales pour chaque type de directions observées du vent, permettant de dégager l'influence des brises littorales sur les concentrations de la pollution atmosphérique, a été effectué.

2. Résultats

2.1. Régime horaire des brises littorales durant le mois d'août 2016

Comme partout dans le monde, dans le Grand-Tunis, la direction et la force du vent sont strictement influencées par la topographie régionale, car le relief est capable de modifier et/ou de réorganiser l'écoulement de l'air à plusieurs échelles vu qu'« à l'échelle des méso et surtout des micro-échelles, l'ampleur spatiale des mécanismes du vent se restreint suffisamment pour que des vents différents en force et même en direction soient engendrés sur des distances de quelques kilomètres » (Carrega, 1994).

Le mois d'août 2016 s'est caractérisé par des situations synoptiques de marais barométriques ou franchement anticycloniques déterminant des types de temps radiatifs : calmes à ciel dégagé ; ce qui a favorisé l'installation des brises littorales. Celles-ci se caractérisent par des vitesses faibles à modérées (< 6 m/s) qui peuvent entraîner des conséquences néfastes en terme de pollution de l'air. Durant le mois d'août 2016, la brise de

mer soufflait, dans la cité d'El Mourouj des secteurs NE (12,7%) à ENE (11,5%) (fig.3.). Tandis que la brise de terre se manifestait des secteurs NNO (22,4%) et NO (17,8 %). L'évolution des vitesses et directions horaires moyennes des brises littorales enregistrées durant ce mois d'août 2016, confirme bien cela (fig.4) : vers 10heures, des advections continentales (brise de terre) survenant du secteur NNO (337°,5) avec une vitesse moyenne de 3 m/s sont encore observées à cette heure ; ensuite, une période de renverse de la brise de mer (entre 10h et 11h) s'effectue. À partir de 11heures, le régime de brise de mer s'établit. Les entrées maritimes proviennent du secteur NE à ENE avec une vitesse maximale de 5,2 m/s enregistrée vers 15h/16h. La brise de mer continue à souffler régulièrement jusqu'à 18heures (3,8 m/s) (fig.4).

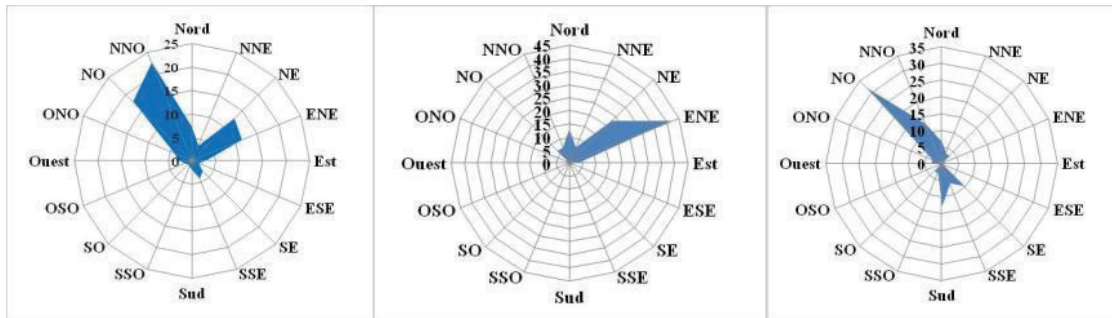


Fig. 3. Fréquences relatives (%) des directions des brises dans la station de la qualité de l'air (RNSQA) d'El Mourouj. De gauche à droite : fréquences totales du mois d'**août 2016**, fréquences à **15 heures** et fréquences à **23heures** ; Source des données brutes : ANPE.

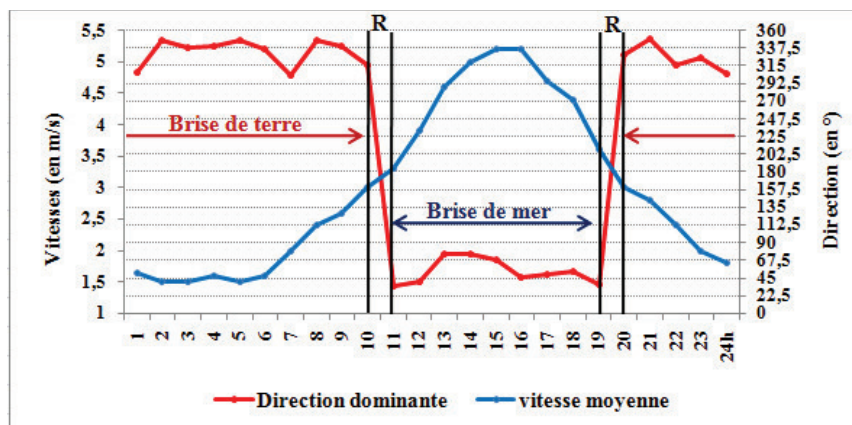


Fig. 4. Vitesses et directions horaires moyennes des brises littorales dans la station de la qualité de l'air (RNSQA) à El Mourouj en Août 2016. Source des données brutes : ANPE, Tunis

En conséquence, la rose des directions horaires totales (fig. 3, gauche) des brises littorales est bidirectionnelle à El Mourouj. Les directions des secteurs NO (17,8%) et NNO (22,5%) correspondent à une brise de terre qui s'achemine via *Sabkhet Es-Sijoumi* : terrain plat et asséché en été (fig.5). Bien que d'altitudes modestes, l'amphithéâtre topographique encadrant le *Grand-Tunis* du côté continental, paraît bien capable d'influencer l'écoulement des brises littorales. La brise de terre s'avère bien canalisée par la topographie : elle emprunte (Flèche rouge dans la fig. 1) vers la cité d'El Mourouj le petit col topographique séparant *Jbel Ammar* (325 m) et *Jbel Ain-El Krima*. Les directions des secteurs NE (12,7%) et ENE (11,5%) correspondent à une brise de mer. Les fréquences d'occurrence de celle-ci sont plus faibles que celles de la brise de terre. Plusieurs facteurs en sont responsables : entre autres, la distance assez importante par rapport au rivage du *golfe de Tunis* (13km) et l'effet de rugosité urbaine exercé par les banlieues de *Rades* et de *Ben Arous* (fig. 1 et fig.2). Les roses des

directions des brises de 15 heures et de 23 heures confirment bien ce constat. À 15 heures, la brise de mer (fig. 3, centre) est bien installée. A 23 heures la brise de terre (fig. 3, droite) est bien établie. Le site de la station de la qualité de l'air d'El Mourouj correspond à une petite colline dans un parc public relativement assez éloigné des quartiers résidentiels les plus proches (fig. 2) : c'est une station de fond périurbain, limitrophe d'un axe routier le plus important du pays qui relie la capitale aux autres régions du pays, comme elle évoque une zone proche des deux banlieues industrielles (*Rades* et *Ben Arous*), ce qui crée de ce lieu une zone à risque de concentrations des polluants.

2.2. Concentrations moyennes et maximales des polluants primaires (NO_x et CO) et du polluant photochimique(O₃) à El Mourouj durant le mois d'Août 2016

Les variations horaires des concentrations des NO_x, du CO et de l'O₃ présentent, dans la banlieue étudiée, une évolution régulière déterminée par plusieurs facteurs : les sources émettrices (fixes et mobiles) des polluants primaires en particulier le trafic automobile et les industries localisées aux voisinages, la longueur du jour (plus de 14 heures), l'intensité du rayonnement solaire caractérisant le mois d'août et, surtout la dynamique de l'aérodologie locale. En fait, l'étude des courbes des concentrations horaires moyennes des deux polluants primaires (fig.6) révèle trois pics durant toute la journée : le plus important est mesuré à 7heures : 19,7 ppb (NO_x) et 609,4 ppb(CO) ; et vers 15heures, on mesure 17,2 ppb et 599,3 ppb respectivement pour les deux polluants : c'est l'effet du mouvement pendulaire quotidien entre le lieu du travail et le foyer familial. Ces deux pics correspondent aux heures de pointe de la journée ouvrable (aller et retour) estivale (travail en temps-unique). Quoique, on relève une certaine chute des concentrations polluées en NO_x et en CO enregistrée entre 08 heures et 13heures, ce qui coïncide avec un certain allègement de la circulation automobile et avec le renforcement du rayonnement solaire initiant la photogénèse de l'ozone : transformation des polluants primaires en polluants secondaires. D'ailleurs, la courbe des concentrations moyennes de l'O₃ (fig.6-droite) vérifie bien cela : les valeurs commencent à augmenter à partir de 07 heures (14 ppb) jusqu'à 13 heures (27,7 ppb). Durant la nuit, les concentrations en polluants primaires (NO_x et CO) sont relativement moins importantes que celles enregistrées pendant le jour : 17,6 ppb (NO_x) et 590,9 ppb (CO) enregistré à 23 heures. Le trafic automobile s'apaise et la brise de terre met la banlieue d'El Mourouj sous le vent de l'arrière-pays du *Grand Tunis* et de ses banlieues ouest, pauvres en industries.

Le phénomène est encore plus net au niveau des concentrations horaires maximales (fig.7). Celles-ci s'élèvent généralement au double des valeurs horaires moyennes et coïncident toutes avec la phase diurne. Ce qui témoigne d'un apport en substances polluantes en provenance des contrées balayées par la brise de mer (les banlieues industrielles voisines et le reste du Grand-Tunis).

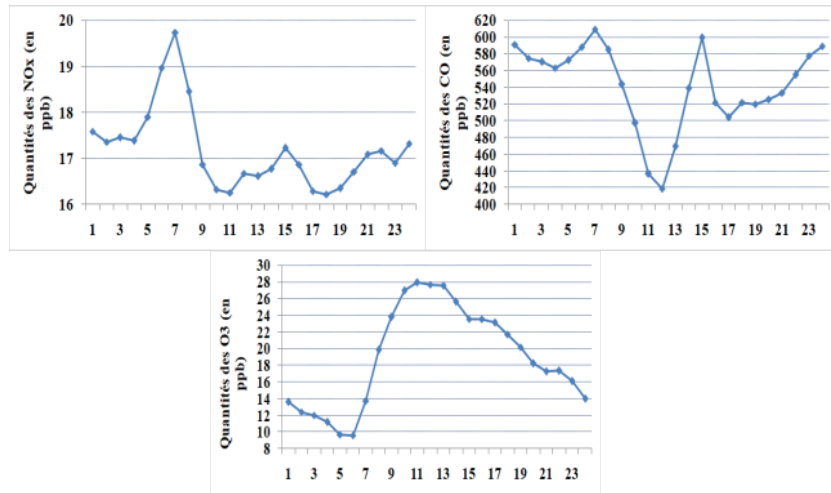


Fig. 6. Variations des concentrations horaires moyennes des NOx (à gauche), des CO (au milieu) et de l'O3 (à droite) dans la station de la qualité de l'air (RNSQA) à *El Mourouj* durant le mois d'août 2016. *Source des données brutes : ANPE, Tunis.*

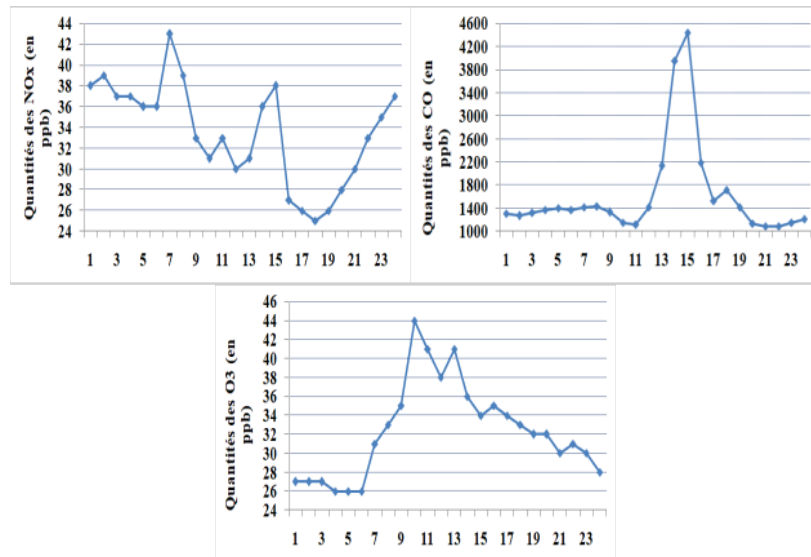


Fig. 7. Variations des concentrations horaires maximales des NOx (à gauche), des CO (au milieu) et des O3 (à droite) dans la station de la qualité de l'air (RNSQA) à *El Mourouj* durant le mois d'août 2016. *Source des données brutes : ANPE, Tunis.*

Les concentrations horaires maximales des NOx et de l'O3 (fig.7-droite), présentent des évolutions journalières comparables à celles de l'état horaire moyen (fig.6), cependant avec des concentrations de valeurs doubles. Cependant, les quantités maximales en CO présentent une évolution distincte de celle de l'état moyen : le pic de 07 heures est à peine perceptible, et celui de 15 heures est remarquable (4443 ppb) (fig.7-milieu). Il coïncide avec l'arrivée de la brise de mer qui rabat sur la cité d'*El Mourouj* une grande partie de la pollution du *Grand-Tunis*. D'ailleurs, c'est uniquement la rose des concentrations maximales du CO (fig.8, milieu : courbe rouge) qui montre des directions privilégiées : celles de la brise de mer. Pour le reste, les différentes autres roses des concentrations moyennes et maximales des différents polluants (fig.8) ne révèlent aucune direction vraiment privilégiée : la cité d'*El Mourouj* se trouvant sous le vent des différentes autres parties du *Grand-Tunis* collecte les polluants qu'elles produisant.

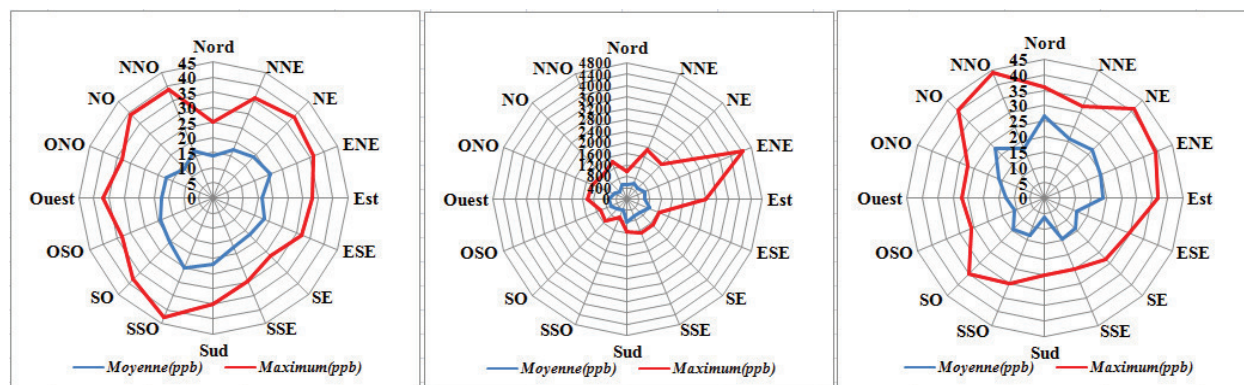


Fig. 8. Roses des concentrations moyennes et maximales des NOx (gauche), des CO (milieu) et des O3 (droite) et à *El Mourouj* durant le mois d'août 2016. Source des données brutes : ANPE, Tunis.

Conclusion

Les résultats de cette étude mettent en évidence la complexité des effets de la dynamique des brises littorales sur les concentrations des polluants dans un milieu fortement urbanisé et industrialisé tel que celui du *Grand-Tunis*. Les concentrations, maximales notamment, des NOx, du CO et de l'O₃ à *El Mourouj* prouvent que les brises littorales collectent les polluants atmosphériques (primaires et secondaires) dans les zones sources et les redistribuent dans des zones plus ou moins éloignées et peu productrices de pollution. Tel est le cas de la cité « dortoir » d'*El Mourouj* présentée dans cette étude. La dynamique des brises littorales est d'autant plus complexe qu'elle est influencée par la topographie contrastée de cet espace urbain très hétérogène. L'amphithéâtre topographique encadrant le *Grand-Tunis* du côté continental bien que d'altitudes modestes modifie l'écoulement des brises littorales et canalise la brise de terre.

Bibliographie

- Carrega P., 1994 : *Analyse spatiale quantitative et appliquée. Topoclimatologie et habitat*. Revue de Géographie du Laboratoire d'Analyse Spatiale Raoul Blanchard, UFR Espaces & Cultures - Université de Nice-Sofia Antipolis, 35 & 36, 408 p.
- Dahech S., 2007 : *Le vent à Sfax (Tunisie), impacts sur le climat et la pollution atmosphérique*. Thèse de Doctorat de l'Université Paris VII. 309p + Annexes.
- Dlala H., 2007 : Métropolisation et recomposition territoriale du Nord-Est tunisien, *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Environnement, Nature, Paysage, document 410, mis en ligne le 03 décembre 2007, consulté le 26 juin 2017. URL : <http://cybergeo.revues.org/13863> ; DOI : 10.4000/cybergeo.13863
- Dudouit A., 2008 : Une étude de brise de mer dans la région caennaise, *Noroi*, 193, 2004/4. URL: <http://noroi.revues.org/index721.html>.
- El Melki T., 2008 : Variation spatiotemporelle de la pollution photochimique dans le Grand-Tunis. *Actes du 21^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Montpellier, France, 9-13 septembre 2008, 243-248.
- El Melki T., 2009 : Les situations atmosphériques stables, un type particulier d'extrêmes climatiques : cas des surconcentrations d'Ozone à Tunis. *Pub. Geographia Technica*. Numéro spécial, 151-156.
- El Melki T., 2010 : Brises du littorales et variation des concentrations polluées dans le Grand Tunis : cas des banlieues de la Manouba et d'El Ghazela. *Actes du 23^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Rennes, France, 1-4 septembre 2010, 203-208.
- Martin N., 2008 : *La pollution par l'ozone et la climatologie dans un espace méditerranéen : les Alpes-Maritimes*. Thèse de doctorat de l'Université Nice-Sofia Antipolis. 282 p.
- Michelot N. et Carrega P., 2014 : Topoclimatologie et pollution de l'air dans les Alpes-Maritimes : mécanismes et conséquences en images. *Echo Géo*, 29 juillet 2014.
- Planchon, O., Bonnardot, V., Cautenet, S. 2004 : Effets de la topographie sur les circulations de brise de mer dans la Province Occidentale du Cap : Etude d'une situation caractéristique au moyen de la modélisation méso-échelle. *Publicaciones de l'Asociación Española de Climatología*, Serie A, 4, 115-124.

LES AMBIANCES CLIMATIQUES HIVERNALES AU NORD DE LA TUNISIE : TYPOLOGIE, CARACTÉRISTIQUES ET VARIABILITÉ

RIAH M.

Institut Supérieur des Sciences Humaines de Jendouba. Avenue Union du Maghreb Arabe 8198 Jendouba. Unité de recherche géomatique des géosystèmes. Mail : riahimostapha@gmail.com.

Résumé : *En hiver, le stress lié au froid altère le confort, déclenche des morbidités et engendre même des mortalités. En contre partie, des ambiances confortables figurent également en hiver offrant les meilleures perspectives en termes de répit climatique. L'analyse de la fréquence des ambiances climatiques, basée sur la combinaison d'indices et d'indicateurs climatiques, à Jendouba (station de vallée) et à Tunis (station côtière) dans la Tunisie du nord, révèle bien des ressemblances. Par ailleurs le comportement interannuel des ambiances permet de déceler des divergences parfois sensibles entre les deux topoclimats.*

Mots-clés : *Tunisie, ambiance climatique, froid, variabilité.*

Abstract : *Winterclimatic atmospheres in northern Tunisia: typology, characteristics and variability. In winter, the stress resulted from cold alters comfort, triggers morbidity and even causes mortality. On the opposite side, comfortable atmospheres also appear in winter offering the best prospects in terms of climatic respite. The analysis of the frequencies of climatic atmospheres, based on the combination of climate index and indicators, in Jendouba (valley station) and Tunis (coast station) in northern Tunisia, reveals many resemblances. Otherwise, the interannual behavior of the atmospheres makes it possible to detect divergences that are sometimes sensitive between the two topoclimats.*

Keywords : *Tunisia, climatic condition, cold, variability.*

Introduction

La définition des situations de confort/inconfort se fait toujours en jouant sur les trois paramètres de la température, de l'humidité relative et du vent. Ces paramètres sont, très souvent, utilisés dans des indices bioclimatiques. Bien que importante, la démarche demeure, toutefois, insuffisante et ne reflète pas parfaitement la sensation du confort climatique de la population en plein air. S'agissant de la quantification du confort, les phénomènes atmosphériques tels que pluie et ensoleillement sont souvent relégués en arrière plan. Or, en saison froide, des pluies plus ou moins fortes pourraient mouiller les vêtements et accélérer ainsi le refroidissement. Quant à l'ensoleillement, sa diminution en hiver est, certes, fâcheuse mais sa présence est, par contre, très salutaire.

La Tunisie du nord est la région dont la topographie est la plus diversifiée en Tunisie. Les conditions bioclimatiques y sont donc, en partie, tributaire de cette diversité topographique. On se propose donc de faire une typologie des ambiances hivernales, d'examiner leurs variations mensuelles dans deux stations, l'une côtière du nord-est et l'autre intérieure du nord-ouest ainsi que d'étudier leur variabilité interannuelle.

1. Données et méthode d'approche

Pour la caractérisation des ambiances climatiques en saison froide au nord de la Tunisie, nous avons utilisé les relevés tri-horaires de 6h, 9h, 12h et 15h relatifs à la période d'observation 1997-2016. Ces relevés concernent la température de l'air et la vitesse du vent. À l'échelle journalière et pour la même période, nous avons retenu les valeurs de la pluviométrie et de l'insolation. Ces données sont fournies par l'Institut National de la Météorologie. Il est à signaler que la série de l'insolation présente quelques lacunes qui ont été complétées par les valeurs de la nébulosité disponibles sur le site web [https://rp5.ru/Météo Monde](https://rp5.ru/Météo_Monde)



Les stations météorologiques retenues dans cette deux topoclimats différents : une station intérieure de vallée (Jendouba) et une autre côtière (Tunis); toutes deux sont situées approximativement à latitude égale (Figure 1).

La caractérisation des ambiances climatiques en hiver est fondée sur la combinaison d'indice(s) et d'indicateurs météorologiques. Dans ce travail, nous avons utilisé l'indice du pouvoir du refroidissement éolien K de Sipple et Passel (1945). C'est l'un des indices synthétiques les plus utilisés en Tunisie. Il associe la température de l'air ($T^{\circ}\text{C}$) et la vitesse du vent (m/s) pour mesurer la quantité de chaleur prélevée au corps par les conditions ambiantes. Les résultats sont exprimés en $\text{Kcal/m}^2/\text{h}$.

$$K = (10 \cdot \sqrt{V} + 10.45 - v) \cdot (33 - T)$$

Figure 1. Carte de localisation des stations

Le choix de cet indice a été motivé par le fait qu'il intègre le vent qui représente un paramètre de différence au niveau de l'ambiance entre la côte et l'intérieur (Henia et Alouane, 2009). De surcroît, il est le mieux adapté pour l'évaluation des ambiances hivernales car il tient suffisamment compte du refroidissement éolien. Nous n'avons pas retenu l'indice THI car l'impact de l'humidité sur le confort est plus significatif lors des fortes chaleurs (Alouane et Henia, 2009).

Nous avons dû opérer certaines modifications dans la classification initiale pour l'adapter au climat tunisien (tableau 1). D'abord, le seuil supérieur de la classe hypotonique, a été réduit de 299 à 249 (Alouane 2007). Nous avons ensuite réduit la limite 599 de la classe relaxante à 399. Cette valeur résulte d'une température mesurée de $15,2^{\circ}\text{C}$ (avec $15,2^{\circ}\text{C}$ on se situe juste au dessus de 15°C qui est la limite des températures fraîches) et d'une vitesse de vent de 2 m/s. A partir de $400\text{kcal/m}^2/\text{h}$ s'installe le mode tonique qui s'étend jusqu'à la valeur de 549. Cette valeur est le résultat de la combinaison d'une température de $8,7^{\circ}\text{C}$ avec 2m/s. En dessous de cette température on se trouve tout près de la limite supérieure du froid (8°C) selon le découpage d'Alouane (2002). Une classe baptisée franchement tonique a été ajoutée et s'étend de 550 jusqu'à $749\text{kcal/m}^2/\text{h}$. La limite supérieure s'explique par le fait qu'avec une température de 0°C (seuil de gel et dont l'impact sur la population sud-méditerranéenne n'est pas négligeable) et un vent de 2m/s on obtient une valeur de $745\text{Kcal/m}^2/\text{h}$. Mais pour que les intervalles des classes froides rigoureuses s'échelonnent toujours de 200 en 200 on a ramené la valeur 745 jusqu'à $749\text{Kcal/m}^2/\text{h}$. Enfin, le mode hypertonique commence ainsi de $750\text{Kcal/m}^2/\text{h}$ jusqu'à $949\text{Kcal/m}^2/\text{h}$ alors que le mode contractant concerne les valeurs \geq à $950\text{Kcal/m}^2/\text{h}$.

Tableau1. Nouvelle classification de l'indice K

Classes	Contractant	Hypertonique	Franchement tonique	Tonique	Relaxant	Hypotonique
Limites	> 949	949 - 750	749-550	549 -400	399-250	249-150

Pour déterminer les ambiances climatiques journalières qui résultent de l'effet combiné d'un côté de la température et du vent à travers l'indice K, et d'un autre côté de l'ensoleillement et de la pluie, nous avons d'abord calculé l'indice K journalier. Nous avons opté, à l'instar de plusieurs chercheurs, pour l'utilisation des codes. Nous avons accordé, à l'échelle des observations tri-horaires, un code allant de 0 pour la classe endothermique à 8 pour la classe contractante. En additionnant la somme des codes des quatre observations tri-

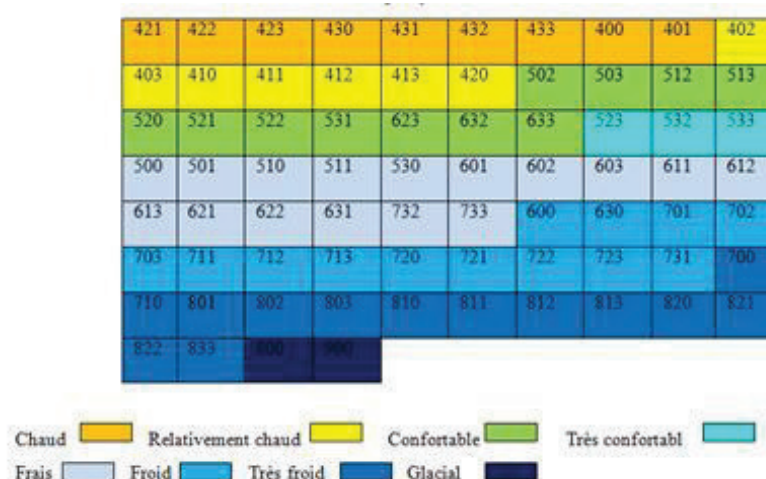
horaires on obtient une valeur journalière qui s'échelonne de 0 à 32 et qu'on a subdivisé en 9 échelles de confort allant de la classe torride à la classe du grand froid (Tableau 2).

Tableau 2. Indice K journalier

Classes	Contractant	Hypertonique	Franchement tonique	Tonique	Relaxant	Hypotonique
Limites	> 949	949 - 750	749-550	549 -400	399-250	249-150
Codes trihoraires	6	5	4	3	2	1
Valeur de 4 observations	24	20	16	12	8	4
Classes	Grand froid	Très froid	Froid	Frais	confortable	Relativement chaud
Limites	24 - 22	21 - 18	17 - 14	13 - 10	9 - 6	5 - 4

Nous avons, ensuite, fait appel aux indicateurs bioclimatiques en l'occurrence la durée d'insolation et la pluie. Toutefois, afin de pallier aux lacunes des données d'insolation, nous avons intégré la nébulosité journalière. Celle-ci, peut être substituée à la durée d'insolation car les deux paramètres sont étroitement liés et varient, approximativement, en sens inverse l'un par rapport à l'autre (Besancenot 1990). Pour chacun des paramètres précédents, nous avons accordé un code allant de 0 pour la classe la plus inconfortable à 3 pour la classe la plus confortable. Quant à l'indice K journalier, nous lui avons accordé un code allant de 1 pour la classe hypotonique à 6 pour la classe la plus froide. Enfin, en additionnant les codes de chacune des classes des différents paramètres nous obtenons une valeur globale indiquant le niveau du confort de l'ambiance climatique. Chaque ambiance est composée de trois chiffres. Exemple : l'ambiance 533 associant, de gauche à droite, une journée confortable selon l'indice K, un ensoleillement fort et une pluie nulle est jugée comme très confortable. Cette démarche détaillée, a l'avantage de fournir 74 combinaisons qui se présentent comme suit :

Tableau 3. Classification des ambiances climatiques journalières



3. Résultats

3.1. Répartition moyenne mensuelle des ambiances climatiques journalières

L'étude des ambiances climatiques hivernales laisse apparaître que la part des ambiances climatiques confortables est assez importante. La fréquence de celles-ci tourne le plus souvent autour du quart des jours pour les divers mois de l'hiver. Plusieurs facteurs seraient à l'origine

de cette réalité. D'abord, l'ensoleillement qui est à l'origine d'une majoration du confort climatique. Il permet de contrecarrer, au moins en partie, l'effet contraignant de la continentalité dans le topoclimat de Jendouba. De plus, la topographie de ce dernier, orientée est-ouest joue le rôle d'abri par rapport aux vents dominant du nord ouest. Dans le topoclimat côtier de Tunis, l'ensoleillement et l'effet modérateur de la mer permettent ensemble une amélioration sensible des conditions bioclimatiques. Quant aux ambiances chaudes, bien qu'elles soient minoritaires, la brièveté de leur apparition, pourrait créer, au plus fort de la saison froide, un véritable effet d'aubaine notamment suite à un cumul de plusieurs jours de froid rendant ainsi leur présence très salutaire. Les ambiances climatiques fraîches et à moindre degré les ambiances froides sont les plus fréquemment observées au cours des divers mois de l'hiver. La fréquence de ces deux classes montre que les écarts se resserrent entre les deux topoclimats. En effet, Jendouba rejoint à peu près Tunis en termes des fréquences des ambiances fraîches qui varient approximativement entre 33% et 36,3% dans la première station et entre 33% et 40% des jours dans la deuxième station, respectivement. Il en est de même pour les ambiances froides qui varient, souvent, dans les deux stations aux alentours du tiers des jours des mois de l'hiver. Enfin, les ambiances paroxysmiques (très froides à glaciales), certes, elles enregistrent la part la plus faible, bien qu'elles présentent le niveau de risque le plus élevé pour la santé de la population. Elles culminent à Tunis au mois de février avec plus de 7,5% des jours en raison essentiellement de l'importance des vents violents qui, une fois combinés avec des températures basses occasionnent ces ambiances. Elles diminuent au mois de janvier à 5,2% et encore plus au mois de décembre jusqu'à 3,5%. À Jendouba, ces ambiances sont relativement plus fréquentes et plus persistantes du fait que leur part, pendant les trois mois de l'hiver, est supérieure à 8,5%. Cela tient d'abord à l'importance relative des jours de forte pluie qui, en mouillant l'organisme, contribuent à accentuer la sensation du froid déjà imposé par la continentalité (Figure 2).

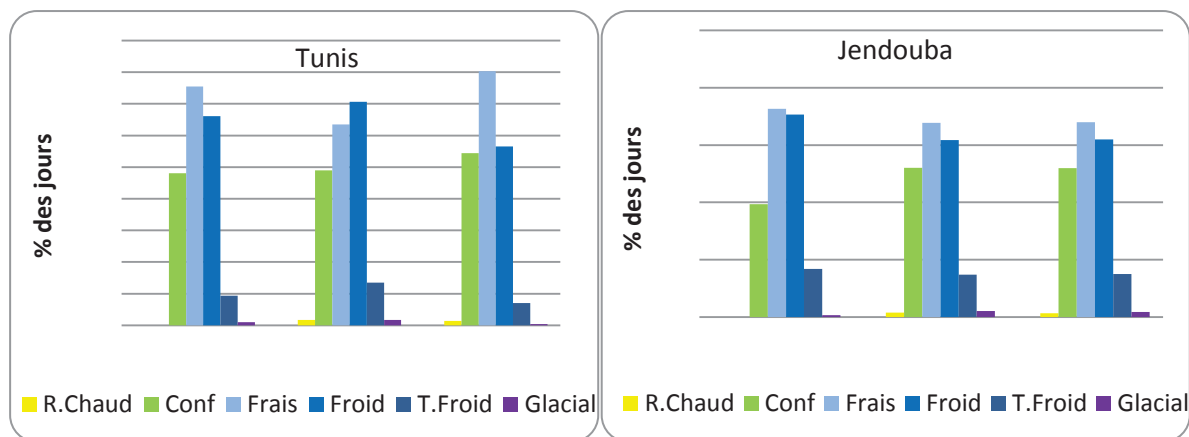


Figure 2. Moyennes saisonnières des ambiances climatiques journalières (1997 – 2016)

3.2. Fréquence interannuelle des ambiances climatiques journalières

3.2.1. Les ambiances froides

L'étude de l'évolution temporelle des ambiances climatiques saisonnière permet de déceler les remarques suivantes :

D'abord, une variabilité interannuelle plus marquée à Jendouba par rapport à Tunis. Les courbes des ambiances climatiques froides toutes catégories confondues, montrent un tracé plus sinueux à Jendouba qu'à Tunis. Elles sont donc plus fluctuantes à Jendouba où la fréquence a varié entre 29,9% en 2007 et 98,9% en 2003. La fluctuation des ambiances

climatiques froides est moins ample, à Tunis, du fait que les fréquences varient entre 53,2% en 2006 et 77% en 2012 (Figure 3).

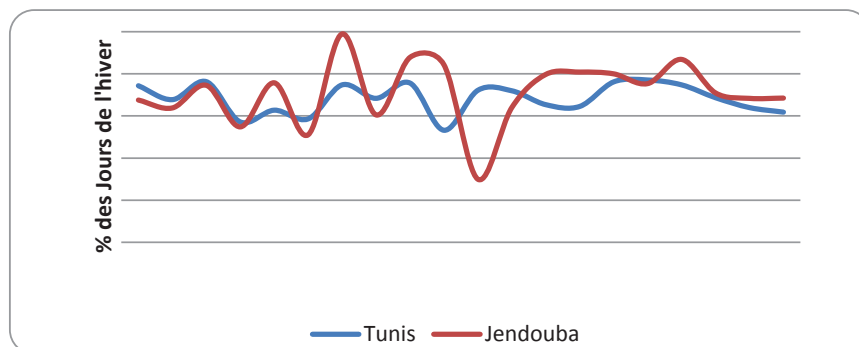


Figure 3. Fréquence inter-annuelle des ambiances climatiques froides (toutes catégories confondues) en hiver

On note toutefois des nuances plus marquées dans le comportement des ambiances froides selon les topoclimats et les catégories. Au topoclimat côtier de Tunis, les trois catégories fraîche, froide et très froide à glaciale connaissent des variations interannuelle importantes. Les fréquences peuvent, selon les années, varier du simple au double voire plus (Figure 4). On note aussi l'apparition d'années à la fois froides et paroxysmiques(2005), d'années froides et peu paroxysmiques (2012) et d'années paroxysmiques mais peu froides (2015).

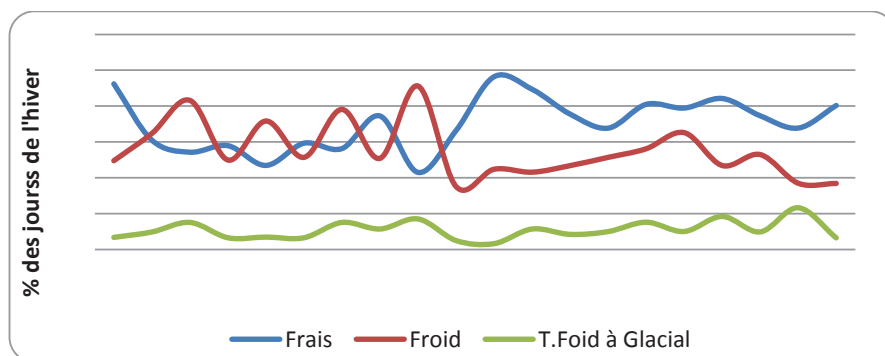


Figure 4. Fréquence inter-annuelle des ambiances fraîches, froides et très froides à glaciales à Tunis

À Jendouba, station de topoclimat de vallée, la variation interannuelle est plus marquée par rapport à Tunis. Exemple, la catégorie froide a presque quadruplé entre 2007 et 2005 (Figure 5). Les pics des ambiances très froides à glaciales (paroxysmiques) peuvent correspondre, à l'instar de Tunis, à des années froides (1999, 2001, 2003, 2005...), à des années moins froides (2015) ou inversement des années froides coïncident avec des années peu excessives (2010).

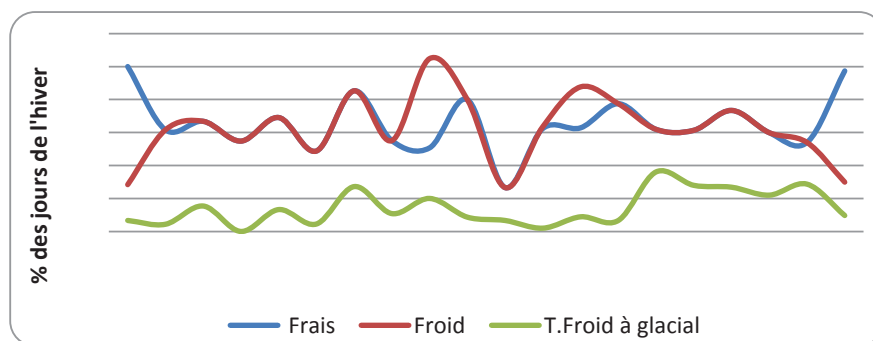


Figure 5. Fréquence inter-annuelle des ambiances fraîches, froides et très froides à glaciales à Jendouba

3.2.2. Les ambiances confortables

À l'image des ambiances climatiques froides, les ambiances climatiques confortables connaissent une grande variabilité interannuelle particulièrement à Jendouba. Ici les fréquences peuvent varier, selon les années, du simple au quadruple voire plus. En effet entre 2008 et 2002 les scores ont bondis de 10% à 42,5%. À Tunis, la variation maximale est relevée entre 2005 et 2006 avec respectivement 22% et 43,6%. (Figure 6).

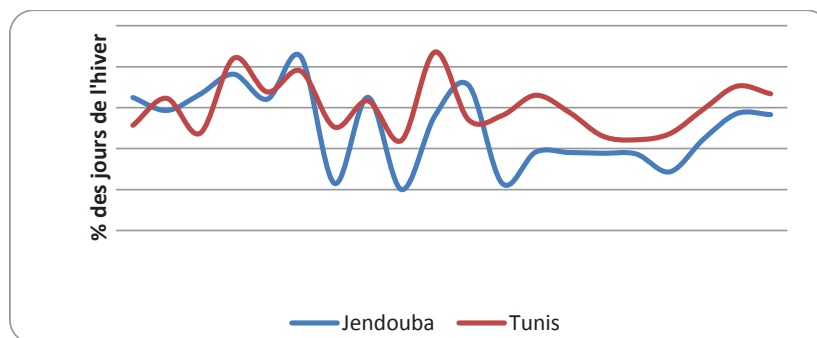


Figure 6. Fréquence inter-annuelle des ambiances climatiques confortables

Conclusion

L'analyse fréquentielle des ambiances climatiques effectuée s'est appuyée, dans le présent travail, sur une approche synthétique faisant appels à des paramètres biothermiques et des paramètres atmosphériques. Cette approche a réduit, sensiblement, les écarts, habituellement observés entre côte et intérieur. À Jendouba, le rôle d'abri joué par la topographie locale des vents forts associé à l'ensoleillement a permis à la station, au moins en partie, de contrebalancer l'effet contraignant de la continentalité en hiver. À Tunis, certes, l'effet modérateur de la mer est incontestable sur les ambiances mais l'importance des vents forts et violents résultant des contrastes terre/mer en a réduit partiellement cet avantage. Ces facteurs expliquent le fait que Jendouba rejoint Tunis au niveau de la fréquence moyenne de la classe confortable, fraîche et froide. Cependant, l'effet combiné de la continentalité et des fortes pluies à Jendouba est à l'origine de l'importance relative de la fréquence des ambiances excessives par rapport à Tunis. À l'échelle interannuelle, la variation des ambiances est plus marquée au topoclimat de Jendouba par rapport à Tunis. Certes, la période de référence retenue dans cette étude rend hasardeux de conclure à une hausse ou à une baisse des diverses catégories des ambiances climatiques. Néanmoins, il est permis, dans le contexte actuel du réchauffement global, de se demander si la tendance des ambiances froides hivernales est vers la baisse ? En effet, une éventuelle recrudescence des ambiances confortables aux dépens des ambiances stressantes pourrait offrir de larges perspectives au développement du tourisme alternatif et au désenclavement notamment des régions intérieures.

Bibliographie

Alouane T., 2002 : *Les ambiances bioclimatiques dans les principales régions touristiques de la Tunisie*. Thèse de doctorat (en arabe). Université de Tunis, FSHS, 470 p.

Alouane T., 2007 : Le répit thermique nocturne de la saison chaude en Tunisie. Actes du XX^{ème} colloque de l'AIC, Carthage, 75-80.

Alouane T. et Henia L., 2009 : *Les ambiances climatiques matinales en Tunisie*. Actes du XXII^{ème} colloque de l'AIC. 29-34.

Henia L. et Alouane T., 2009 : Les ambiances caniculaires dans les villes tunisiennes : cas de Monastir, Kairouan et Tozeur, *Géographia technica*, numéro spécial, Extrêmes climatiques : genèse, modélisation et impacts.

Besancenot J.P, 1990 : *Climat et Tourisme*. Masson, collection « Géographie » 223 p.

https://rp5.ru/Météo_Monde

IDENTIFICATION ET CARTOGRAPHIE DES TOITURES VALORISABLES POUR DES INSTALLATIONS SOLAIRES A L'ECHELLE DE LA VILLE D'AIX-EN-PROVENCE

BOURCHAK S., BRIDIER S.

Terre-Climat-Energie, Société d'étude, 13001 Marseille, bourchak.sofiane@gmail.com, +33646805589 LPED, Aix Marseille Université, 3 place Victor Hugo, 13003 Marseille, sebastien.bridier@univ-amu.fr.

Résumé – *L'objectif de cette étude était de cartographier les toitures valorisables pour des installations solaires sur la partie centrale de la commune d'Aix-en-Provence qui compte une population de 140 000 habitants. Il en résulte une couche de système d'information géographique (SIG) qui représente la production d'énergie solaire sur les toits tout au long de l'année. Les professionnels de l'énergie solaire peuvent l'utiliser pour optimiser les implémentations et pour dimensionner les systèmes de production d'énergie. Les résultats sont présentés sous la forme d'un ensemble de cartes, et d'histogrammes afin de déterminer les meilleurs coûts en termes de puissance photovoltaïque (électricité) et de puissance thermique (eau chaude).*

Mots-Clés : *Gisement solaire, photovoltaïque, système d'information géographique, thermique.*

Abstract - *Identification and cartography of recoverable roof for solar facilities Aix-en-Provence City. The objective of this study was to map the recoverable roofs for solar installations on the central part of the commune of Aix-en-Provence which has a population of 140,000 inhabitants. The result is a geographic information system (GIS) layer, which represents hourly and monthly the production of solar energy on roofs throughout the year. Solar energy professionals can use it to optimize implementations and to size energy production systems. The results are presented as a set of maps, and histograms in order to determine the most effective costs in Aix-en-Provence in terms of photovoltaic power (electricity) and thermal power (hot water).*

Keywords : *solar radiation, photovoltaic, geographic information systems, thermal.*

Introduction

Cette étude porte sur l'estimation du gisement solaire d'une ville moyenne comme Aix-en-Provence réalisée à partir des différentes équations combinant les paramètres atmosphériques, géographiques, temporels et géométriques de la disponibilité du rayonnement solaire (voir Silve, 2010) et représentée spatialement dans un Système d'Informations Géographiques. Les équations ont été synthétisées sous la forme d'un schéma récapitulatif rassemblant les paramètres atmosphériques, géographiques (la latitude et l'occupation du sol), temporels (la déclinaison solaire et l'angle horaire) traduisant la date et l'heure et géométriques (hauteur et azimut du soleil, inclinaison et orientation du récepteur). L'ensemble des équations permet de calculer le rayonnement global sur chaque face exposée au rayonnement solaire direct et diffus. Ce calcul a ensuite été appliqué de 9h à 15 h par jour durant 12 mois (Delorme, 2002) pour aboutir à un cumul journalier, mensuel et annuel sur l'ensemble des 3 millions de mètres carrés de toitures de la zone d'étude.

En appliquant les restrictions proposées par les constructeurs de panneaux solaires (orientation optimale vis à vis du soleil), nous retenons respectivement 2 millions de m² potentiels pour les panneaux solaires photovoltaïques et 1.7 millions de m² potentiels pour les panneaux solaires thermiques. La production théorique de ces systèmes aboutira à une valeur annuelle de 338 GWh pour le photovoltaïque et 732 GWh pour le thermique.

1. Méthodes et données

1.1. Calcul de la géométrie des toitures

Les couches de données SIG sont composées du cadastre, du bâti, de la voirie, d'une photographie aérienne et d'un modèle numérique d'élévation (MNE) d'une résolution de 1 m horizontale pour une extension de 42 km². Les traitements ont été appliqués pour identifier

45211 toitures à partir des 23917 bâtiments, puis de calculer leur pente et orientation respectives. Deux zooms sont présentés sur deux secteurs de la commune d'Aix en Provence : le centre historique et un secteur périphérique moderne à l'ouest.

Les statistiques montrent que 48% de la pente des toits se situent entre 11° et 20° (fig. 1). À titre indicatif, les résultats indiquent que les toits sont principalement orientés vers le nord ou le sud, avec des proportions respectives de 20% et 17%, les autres orientations sont assez équitablement représentées (fig. 1).

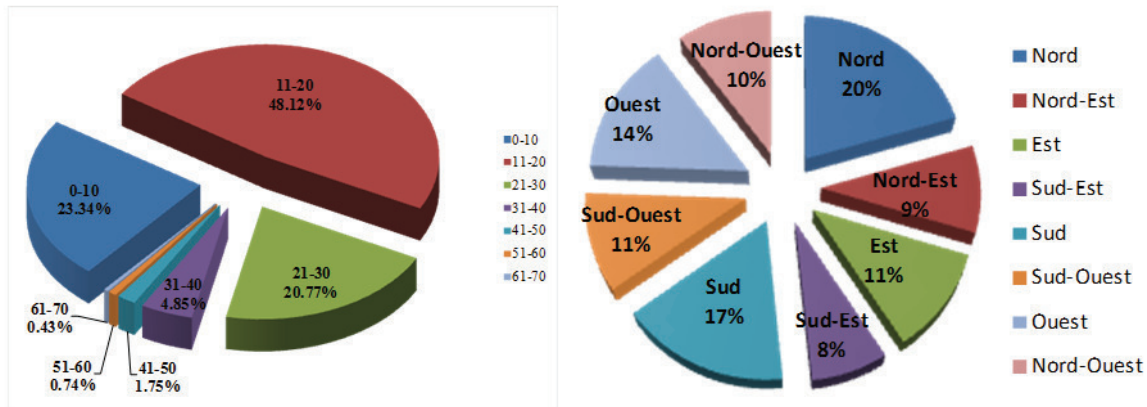


Figure 1. Orientation et pente des toitures de la zone d'étude

1.2. Calcul du rayonnement global

Les équations proposées (Perrin de Brichambaut, 1963) ont été assemblées en une suite de calculs implémentés dans une feuille de calcul. En appliquant ces calculs à chaque toiture caractérisée par sa pente et son orientation, on obtient pour chaque date (heure et mois) la puissance solaire disponible. Ces valeurs ont ensuite été pondérées par le rendement théorique des panneaux pour obtenir une puissance théorique produite. La somme a été calculée de manière horaire, journalière et mensuelle pour aboutir au cumul annuel. La figure 2 présente les liens entre les équations et les variables, et comprend les calculs implémentés comme une chaîne de traitement SIG, des traitements d'image et des feuilles de calcul afin d'obtenir une carte de rayonnement solaire.

Il est possible de quantifier l'énergie solaire reçue sur les toits avec une répartition spatiale et temporelle du rayonnement solaire.

Les résultats obtenus sont représentés soit sous forme de cartes, soit d'histogrammes, mais les données brutes sont des couches SIG et des tableaux de données organisés dans une base.

Nous montrons ici l'exemple du 21 juin à 12 h pour les 2 secteurs de 1 km² du centre historique (fig. 3) et de la zone moderne (fig. 4).

En regardant les résultats sous l'aspect cartographique on constate que le centre de part sa densité représente un plus grand potentiel d'installation alors que la périphérie, présente un bâti plus éparse et donc une moins grande densité de production potentielle. Chaque date (heure et mois) peut être cartographiée de cette manière pour apprécier les variations spatiales et temporelles.

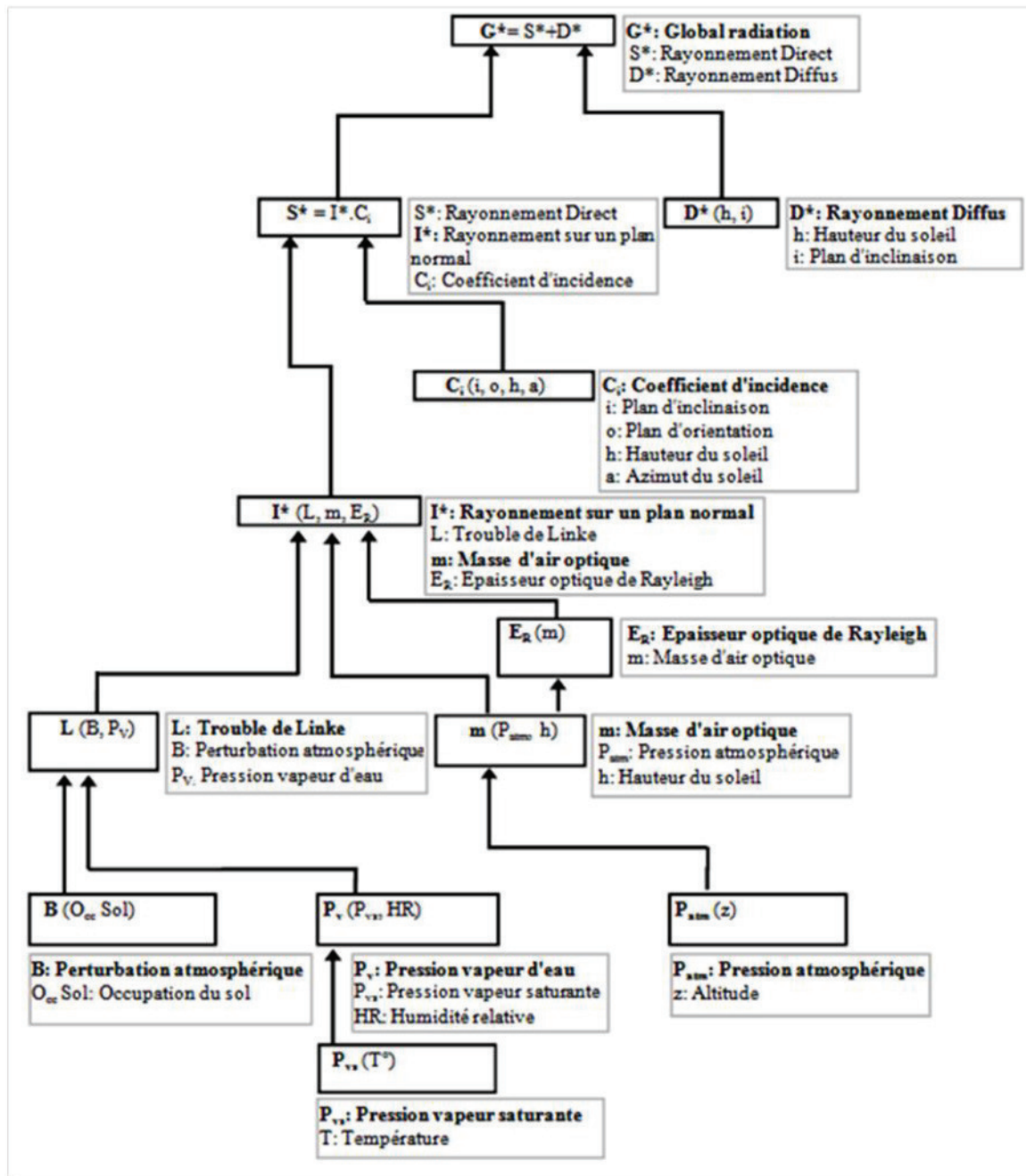


Figure 2. Schéma récapitulatif reliant les équations entre elles

En regardant les résultats sous l'aspect graphique, on peut apprécier la distribution temporelle de l'énergie (fig. 5 et 6) et sa conversion possible en énergie renouvelable. Le réglage des calculs permet aussi de tenir compte de la nébulosité.

Nous ne présentons ici que quelques graphiques (fig. 7, 8 et 9) mais il est possible de détailler pour chaque toiture ou groupe de toiture l'énergie reçue et la production attendue.



Figure 3. Quantité d'énergie solaire reçue le 21 juin à 12h par les toitures de la zone historique

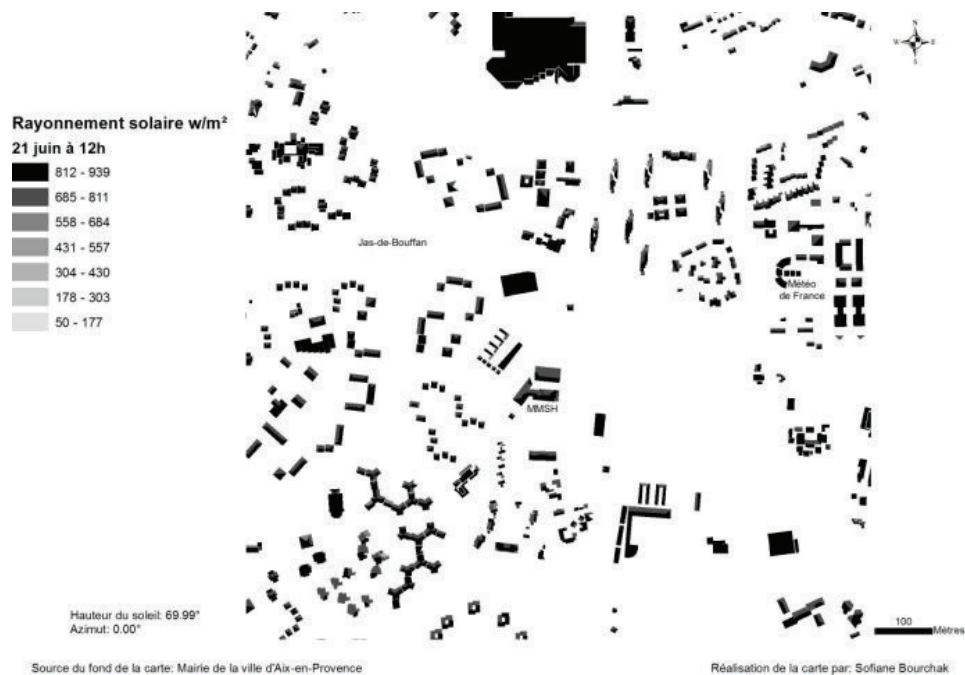


Figure 4. Quantité d'énergie solaire reçue le 21 juin à 12h par les toitures de la zone moderne

L'application des contraintes d'implantation et de rendement des différents types de panneaux permet d'estimer la production théorique. Les contraintes d'orientation réduisent le choix des toitures au secteur est à ouest pour le photovoltaïque, avec une surface minimale de 20m² installée, et au secteur sud-est à sud-ouest pour le thermique avec une surface minimale de 4m² installée. Les rendements attendus sont respectivement de 10 % pour le photovoltaïque (ADEME, 2007) et de 30% pour le thermique (ADEME, 2002). On peut donc comparer la puissance installable par type de technologie.

Il est alors possible de fixer clairement des choix quant au type de technologie et aux productions attendus.

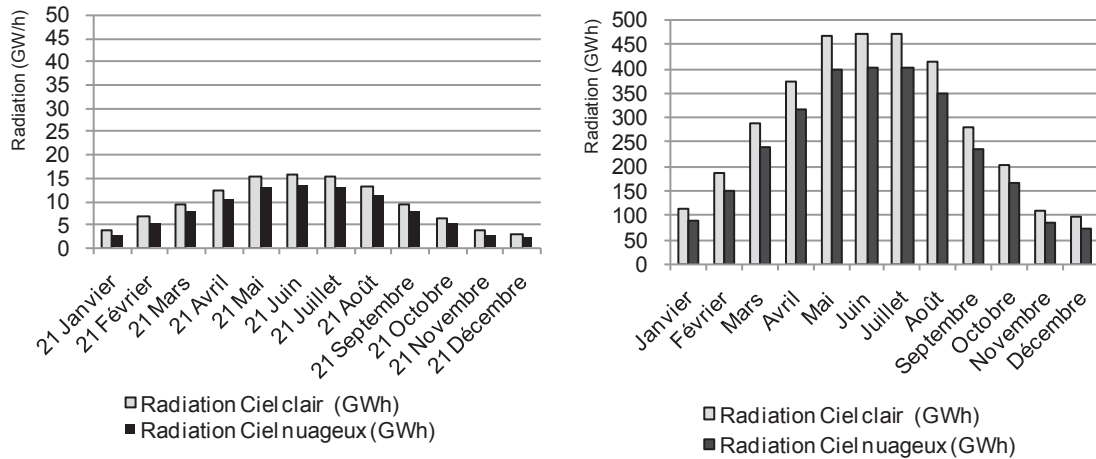


Figure 5. Somme de la quantité du rayonnement solaire journalier (à gauche) et mensuel (à droite) (le 21 du mois) reçu par les toitures par ciel clair et par ciel nuageux

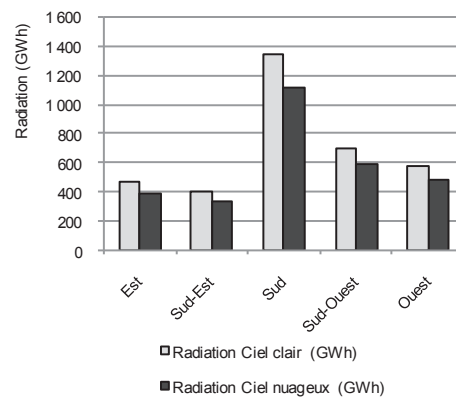


Figure 6. Quantité du rayonnement mensuel reçu sur les toitures, pour différentes orientations, par ciel clair et par ciel nuageux.

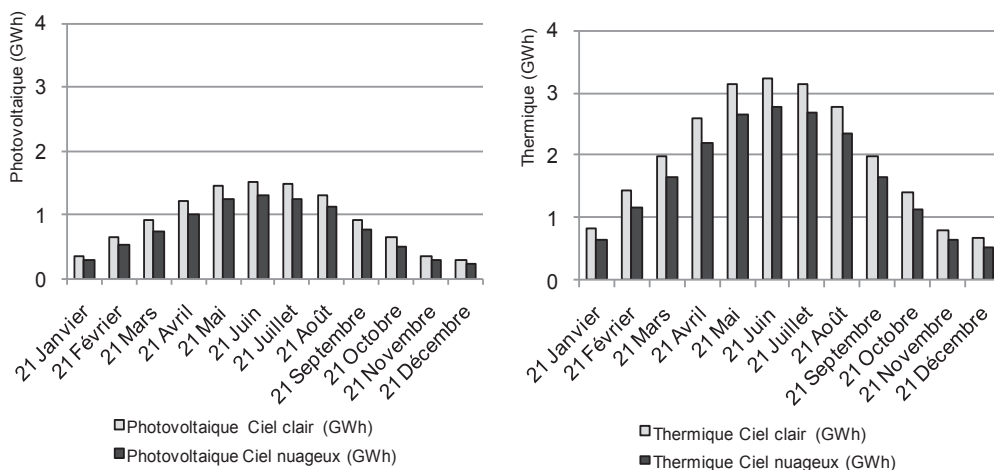


Figure 7. Production quotidienne par les systèmes photovoltaïques et thermiques par ciel clair et par ciel nuageux.

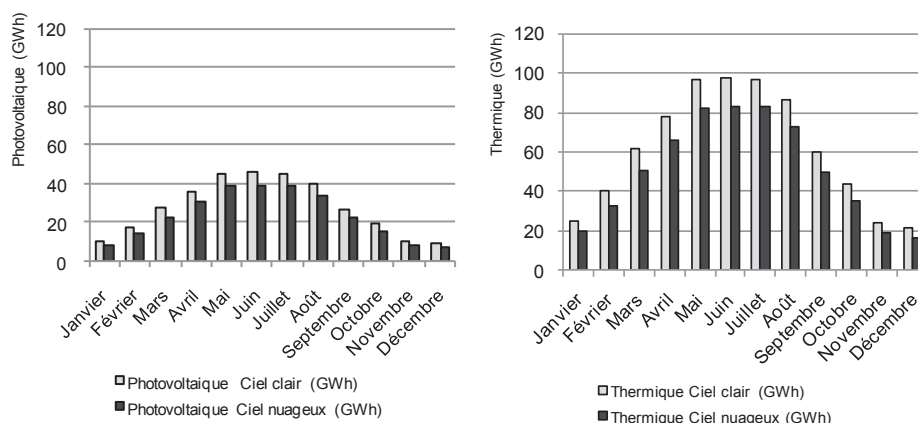


Figure 8. Production mensuelle par les systèmes photovoltaïques et thermiques par ciel clair et par ciel nuageux.

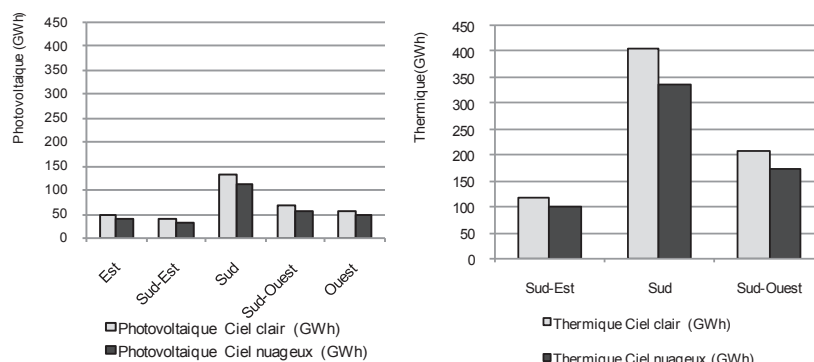


Figure 9. Production annuelle par les systèmes photovoltaïques et thermiques par ciel clair et par ciel nuageux.

Cette méthodologie a été appliquée à partir d'une demande théorique d'énergie en fonction des données de l'ADEME et d'ERDF sur la consommation des ménages. Pour 61000 ménages consommant en moyenne 1 MWh par mois il faut pour une année 732 GWh d'énergie, qui peuvent être alors rapprochés de la production théorique de 338 GWh en photovoltaïque et 730 GWh en thermique.

Conclusion

L'ensemble du processus permet de déterminer avec une relative précision la production théorique d'énergie. Les chiffres d'énergie incidente ont été validés par des mesures avec une erreur de moins de 5 %. Cette méthode va être déployée sur l'ensemble des communes de la l'agglomération d'Aix-en-Provence.

Bibliographie

ADEME, 2002 : *Eau chaude solaire, manuelle pour la conception, le dimensionnement et la réalisation des installations collectives*. Guide technique, 34 p.

ADEME, 2007 : *Guide des producteurs d'électricité d'origine photovoltaïque*. Document de synthèse (production, vente, norme et guides pour mises en œuvre), 16 p.

Delorme C., 2002 : Détermination d'une irradiation solaire journalière à partir de trois irradiations horaires à 9, 12 et 15h. *Physique appliquée*, **11**, 123-127.

Perrin de Brichambaut Ch., 1963 : *Rayonnement solaire et échange radiatifs*. Gauthier-Villars, 300p.

Silve, 2010 : <http://herve.silve.pagesperso-orange.fr/solaire.htm> (disponible à la date de 18/04/2017).

VARIABILITÉ ET TENDANCES DES TEMPERATURES DANS LES VILLES DE L'ÉTAT DE SÃO PAULO / BRÉSIL.

FANTE K. P.¹, DUBREUIL V.², SANT'ANNA NETO J. L.³

¹Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente, Brésil, karimefante@hotmail.com.

²Université Rennes 2, Rennes, France, LETG-Rennes-COSTEL, UMR 6554 CNRS, vincent.dubreuil@uhb.fr.

³Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente, Brésil, joaolima@fct.unesp.br.

Résumé –Cet article analyse la variabilité et l'évolution des températures dans quatorze villes situées dans l'État de São Paulo, Brésil. Les données de températures maximales et minimales proviennent de l'Institut National de Météorologie (INMET) et de l'Université de São Paulo (USP), et s'étendent de 1961 à 2011. Les méthodes utilisées sont 1) des techniques de statistiques descriptives pour analyser la variabilité inter-annuelle (Percentile); 2) des tests sur les tendances des séries (Pettitt). Les résultats montrent qu'il existe une tendance significative à la hausse des températures dans la plupart des stations, qui dépend selon les villes, de l'évolution de l'occupation des sols ou d'effets globaux. On constate une prédominance des années très froides et froides dans la première moitié de la série, soit les années 1960 et 1970, et une augmentation progressive des températures jusqu'à la décennie 2000, où sont observées les années les plus chaudes. Les tests de Pettitt permettent de vérifier dans la plupart des villes des ruptures positives 1) des températures maximales pour onze stations météorologiques entre les années 1983-1993 et 2) des températures minimales pour dix stations météorologiques, pour les températures minimales.

Mots-Clés : Température; Variabilité temporelle; Tendance; Brésil.

Abstract - Variability and trends of temperatures in the cities of São Paulo State/Brazil. This article analyze the variability and evolution of temperatures in fourteen cities in São Paulo State, Brazil. The maximum and minimum temperature data were obtained by National Institute of Meteorology (INMET) and the University of São Paulo (USP), 1961 to 2011. The methods used are : 1) descriptive statistics techniques to analyze the annual variability (Percentil); 2) Homogeneity tests (Pettitt). These results show that there is a significative increasing trend of temperatures in most of weather stations, caused especially for the evolution of land use, local effects (cities) and global effect. The majority of very cold and cold years are present in the decadal period 1960-1970, and a gradual increase the temperature at 2000s, when the warmest years are observed. The Pettitt test show a positive changes trends in the eleven weather stations , between the years 1983-1993, for the maximum temperature, and also, for the minimum temperatures in dix weather stations.

Keywords: Temperature; Temporal variability; Trend; Brazil.

Introduction

Les changements et la variabilité du climat ont fait l'objet de nombreuses discussions de nature scientifique et politique. Sur fond d'incertitude et de préoccupations diverses, des voix dissonantes ont pu s'exprimer pour chercher à comprendre et à quantifier le degré de changement climatique, ses causes et ses conséquences. En effet, les changements climatiques observés à l'échelle locale résultent des interactions entre différents niveaux scalaires où l'action de l'homme est rarement absente : la production d'espace génère des modifications du système climatique qui se traduisent par une augmentation de la température liée à la fois aux effets globaux de l'augmentation de l'effet de serre et des effets locaux liés à l'extension des surfaces urbanisées (Sant'Anna Neto, 2001). Ainsi, l'Etat de São Paulo, qui est la région la plus urbanisée du Brésil, a connu d'importantes modifications du climat à l'échelle locale (Lombardo, 1985 ; Amorim, 2000). Dans le même temps, à l'échelle régionale ou nationale, le réchauffement climatique était également bien observé au Brésil. Plusieurs chercheurs ont ainsi démontré une augmentation statistiquement significative après les années 1960 pour les températures comme pour les précipitations dans les principales villes de l'Etat de São Paulo (Collins, Touches et Marqués, 2009 ; Mendonça, 2006; Blain, 2010; Galina, 2002) : Dufek et Ambrizzi (2005) ont aussi noté une diminution du nombre de jours froids en hiver et des nuits fraîches en été.

L'objectif de cet article est d'étudier les tendances des températures minimales et maximales pour quatorze stations de l'Etat de São Paulo situées à proximité de ville moyennes

et petites, c'est à dire où l'influence urbaine est *a priori* peu sensible, mais représentatives de la diversité climatique de la région.

1. Méthodologie

Les données climatiques utilisées dans cette étude sont les températures maximales et minimales journalières, obtenues auprès de l'Institut National de Météorologie (INMET) et l'Université de São Paulo (ESALQ/USP), pour les années 1961-2011. Les stations retenues sont celles des villes de : Avaré, Catanduva, Campos do Jordão, Franca, Piracicaba, Iguape, Presidente Prudente, Santos, São Carlos, São Simão, Sorocaba, Taubaté, Ubatuba et Votuporanga, situées dans différentes régions géo-climatiques de l'État de São Paulo/Brésil. Aucune de ces villes (à l'exception de Sorocaba) dépasse 500.000 habitants.

Le choix des stations permet d'envisager une diversité des situations climatiques, plus ou moins proches du littoral mais aussi à des altitudes variables où peuvent s'exprimer largement les nuances entre le domaine tropical et subtropical. En effet, le climat de l'État de São Paulo est caractéristique d'une zone de transition traversée par le tropique du Capricorne : "Du point de vue climatique, cela se traduit par un flux d'énergie considérable toute l'année, avec une distribution irrégulière des pluies dans l'espace et le temps (...) contribuant à une large variabilité de régimes climatiques allant du tropical au subtropical" (Nunes, Vicente et Candido, 2009, p. 243 et 244).

Les tests d'homogénéité et de ruptures, Pettitt (Pettitt, 1979; Debortoli *et al*, 2012; Nascimento Junior *et al*, 2013), ont été utilisés pour vérifier si les séries de données étaient homogènes, ou si il y avait des discontinuités positives ou négatives importantes du point de vue statistique.

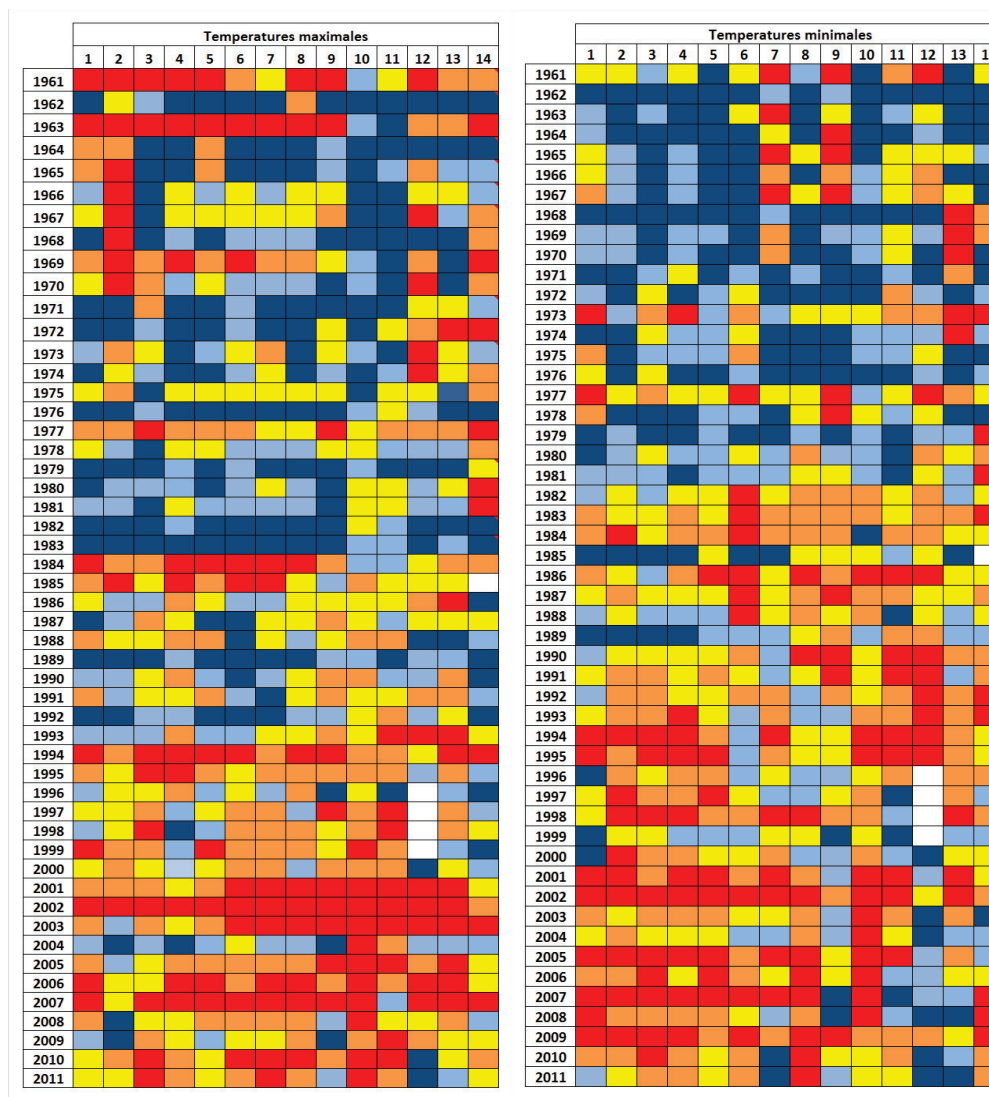
La méthode des Percentiles (Marcondes, 1979) a également été utilisée afin de distinguer les années très froides (Percentile de 0 à 0,20), froides (Percentile de 0,21 à 0,40), normales (Percentile de 0,41 à 0,60), chaudes (Percentile de 0,61 à 0,80) et très chaudes (Percentile de 0,81 à 1) de chaque série.

2. Résultats

A partir de l'application des deux techniques statistiques, les résultats indiquent que pendant les cinquante dernières années les températures, dans la plupart des villes étudiées, ont connu une tendance positive à l'augmentation des températures maximales et minimales.

L'analyse des données annuelles a montré une prédominance des années froides dans les premières années de la série, entre les années 1960 et 1970, et une augmentation progressive des températures jusqu'à atteindre les années les plus chaudes dans les années 2000. Les années identifiées comme les plus froides de la série et avec les plus faibles valeurs de température minimales étaient : 1962, 1963, 1964, 1966, 1968, 1970, 1971, 1972, 1974, 1975, 1976, 1978, 1979 et 1985 (figure 1). Pour toutes les stations analysées, la grande majorité des années ayant les températures minimales les plus froides ont eu lieu durant la décennie 1961 à 1970, avec 44,1% des incidences, suivie par la décennie 1971 à 1980 avec 32,9%. La décennie avec le moins d'années froides ou très froides a été celle de 1991 à 2000 avec 4,6% des incidences pour toutes les stations analysées.

Pour l'ensemble des données de températures moyennes maximales les années les plus chaudes sont : 1961, 1963, 1984, 1994, 2001, 2002, 2003, 2007 et 2010.



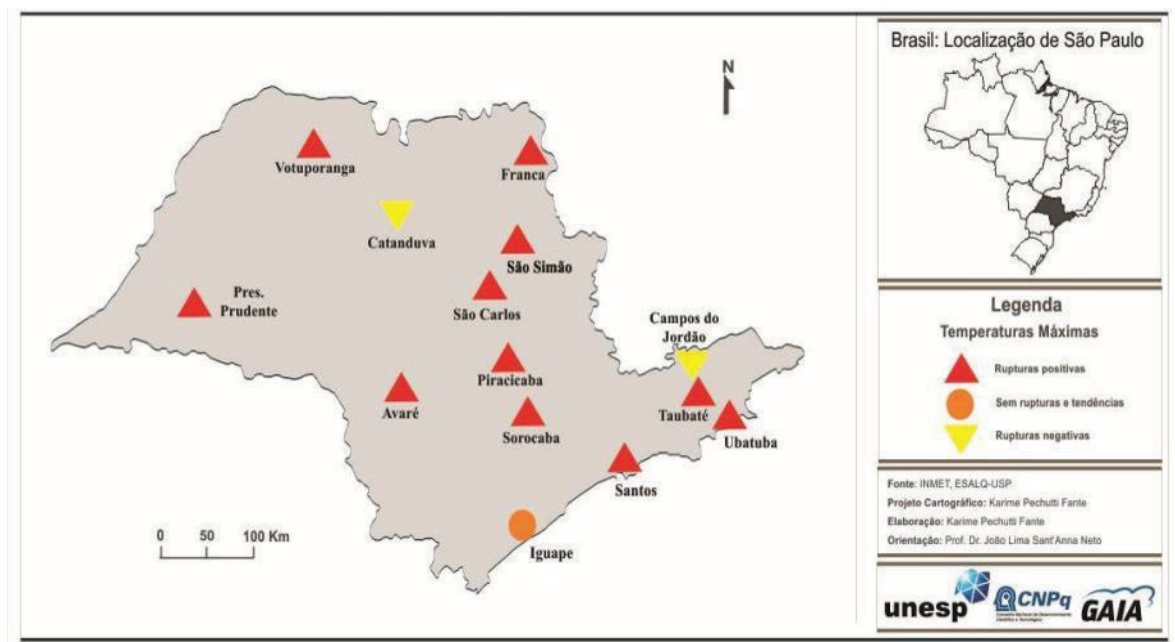
Légende			
Ville		Percentile	
1	Avaré	8	Sorocaba
2	Catanduva	9	Taubaté
3	Franca	10	Votuporanga
4	Piracicaba	11	Santos
5	Pres. Prudente	12	Iguape
6	São Carlos	13	Ubatuba
7	São Simão	14	C. do Jordão
		0-20	Très froid
		21-40	Froid
		41-60	Normal
		61-80	Chaud
		>80	Très chaud

Figure 1. Identification des années très froides, froides, normales, chaudes et très chaudes d'après la technique des Percentiles.

La majorité des années avec des températures maximales chaudes et très chaudes ont été enregistrées entre 2000 et 2011, avec plus de 43% d'occurrences concentrées pendant cette dernière décennie. La décennie 1991 à 2000 a connu 24,2% des années les plus chaudes. La décennie avec le moins d'années chaudes a été celle de 1971 à 1980 avec 8,3% des incidences.

Le test de Pettitt a montré que dans la plupart des villes de l'État de São Paulo les données des températures maximales et minimales ne sont pas homogènes et présentent des ruptures et/ou des tendances significatives.

Concernant les températures maximales (figure 2), 11 des 14 stations météorologiques étudiées ont connu des ruptures positives pendant les années 1983 et 1993 à l'exception de Catanduva et Campos do Jordão (ruptures négatives) et Iguape (aucune tendance). L'augmentation des températures maximales dépasse 1°C à Santos (+1,18°C) et Votuporanga (+1,94°C). Pour les autres stations, l'augmentation est moins spectaculaire (+0,42 à Taubaté, +0,53°C à Piracicaba, +0,62°C à Ubatuba et Franca). Ce changement systématique sur les mêmes années, indépendant de tout changement général des conditions de mesures (emplacement, type de matériel) donne à penser à un changement vraisemblablement de nature climatique liée à la dynamique générale.

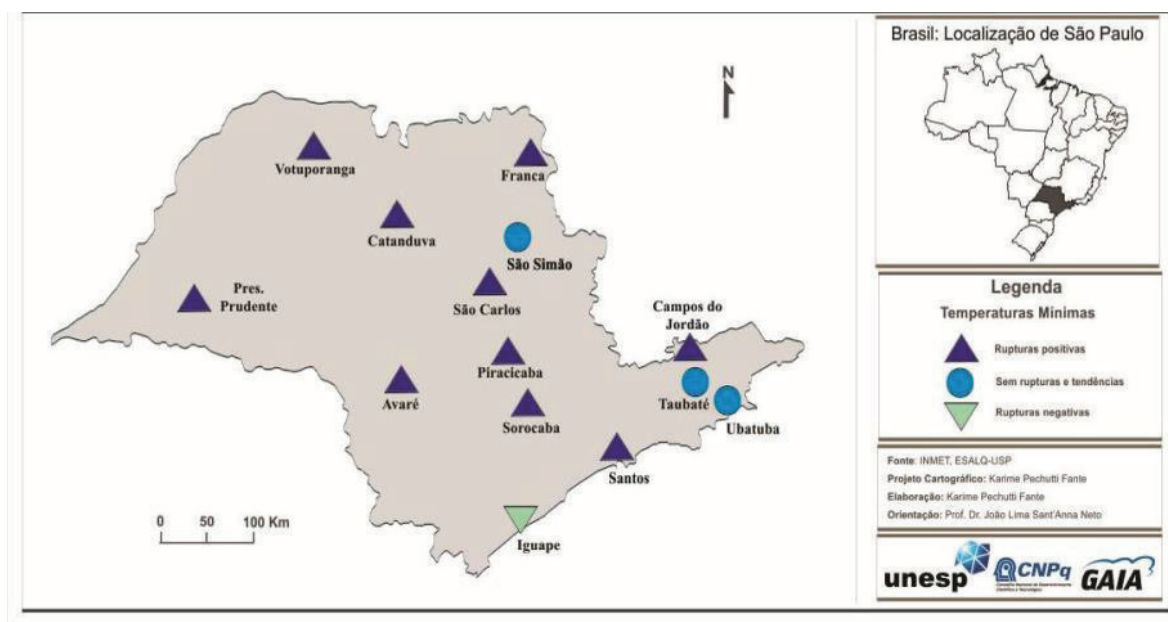


Source: Fante (2014) et Fante (2016).

Figure 2. L'État de São Paulo: résultats des ruptures positives, négatives et absence de tendance/rupture pour les températures maximales.

Pour les données de températures minimales (figure 3), 10 des 14 stations météorologiques ont également connu des ruptures positives. Les exceptions sont les stations de São Simão, Taubaté et Ubatuba, où les valeurs de températures ne montrent ni ruptures ni tendances. Iguape est la seule station où on observe une rupture négative. Ces quatre stations sont celles dont l'environnement local a été le moins modifié, celles localisées à proximité de la mer ou celles des zones restées rurales jusqu'à aujourd'hui.

Pour les autres stations, l'augmentation des minimales est la plus importante (plus de 1°C) à Sorocaba (+1,9°C), Presidente Prudente (+1,75°C), Franca (+1,48°C), Votuporanga et Campos do Jordão (+1,44) ; elle est plus modeste ailleurs, entre +0,57°C à Santos et +0,65°C à Avaré. Pour toutes ces stations, il apparaît donc que les températures minimales, contrairement aux maximales, connaissent des dates de ruptures plus dispersées dans le temps. Il s'agit aussi des stations dont les sites de mesures se sont peu à peu modifiés par l'extension de l'urbanisation et où l'effet d'îlot de chaleur urbain ne peut pas être totalement négligé.



Source: Fante (2014) e Fante (2016).

Figure 3. L'État de São Paulo: résultats des ruptures positives, négatives et absence de tendance/rupture pour les températures minimales.

Conclusion

Cette étude montre qu'il existe une tendance significative à l'augmentation des températures des 50 dernières années, dans les stations des villes moyennes de l'Etat de São Paulo. La grande majorité des années froides (pour les minimales comme pour les maximales) ont été observées dans les décennies 1960 et 1970, alors que les années chaudes concernent essentiellement les décennies 1990 et 2000. Presque toutes les séries ont connu des changements avec des tendances ou ruptures significatives. La majorité des stations (8 sur 14) ont connu une augmentation des minimales comme des maximales, confirmant la tendance générale au réchauffement climatique à l'échelle régionale. Cependant, plusieurs stations présentent des tendances contradictoires avec hausse des maximales mais sans tendances sur les minimales, surtout pour les stations restées les plus rurales. En outre, les dates de ruptures, très proches entre les stations pour les maximales, sont plus dispersées pour les minimales.

Il semble donc que le réchauffement observé, même dans les villes moyennes de l'Etat de São Paulo, soit une combinaison des effets globaux (sur les maximales) et des effets locaux liés à l'urbanisation (sur les minimales) montrant la nécessité des approches multiscalaires des impacts de l'homme sur le climat.

Bibliographie

Amorim M. C. de C. T., 2000 : *O clima urbano de Presidente Prudente*. (Thèse de doctorat). Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brésil.

Blain G. C., 2010 : Séries anuais de temperatura máxima média do ar no Estado de São Paulo: variações e tendências climáticas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25, n.1, 114 – 124. Disponible sur: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v25n1/v25n1a10.pdf> (Consulté le Octobre, 2012).

Collins J. M., Chaves R. R., Marques, V. da S., 2009 : Temperature Variability over South America. *Journal of climate*, 22, 5854 – 5869.

Debortoli, N.; Dubreuil, V.; Henke, C.; Rodrigues Filho, S, 2012 : Tendances et ruptures des séries pluviométriques dans la région méridionale de l'Amazonie brésilienne. *Actes du 25^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie* (pp. 201 – 206). Grenoble, France.

Dufek, A. S.; Ambrizzi, T, 2005 : Variabilidade climática da temperatura no Estado de São Paulo. *Revista de Iniciação Científica* (USP), **7**, 23-29.

ESALQ/USP - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 2010 : Disponible sur : <http://www.lce.esalq.usp.br/base.html> (consulté le 21 janvier 2010).

Fante, K. P, 2014 : *Variabilidade da temperatura em áreas urbanas não metropolitanas do Estado de São Paulo – Brasil no período de 1961 a 2011*. (Mémoire de Master). Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, Brésil.

Fante, K. P, 2016 : As temperaturas em cidades paulistas : análise das tendências e rupturas nos padrões térmicos. Dans: Sant’anna Neto, J. L., Amorim, M. C. de C. T. ; Silva, C. A (Eds.). *Clima e gestão do território*. Jundiaí, Paco Editorial. 315 – 341.

Galina, M. H., 2002 : *Mudanças climáticas de curto prazo: tendências dos regimes térmicos e hídricos e do balanço hídrico nos municípios de Ribeirão Preto, Campinas e Presidente Prudente (SP) no período de 1969-2001*. (Mémoire de Master). Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, Brésil.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Disponible sur : <http://www.inmet.gov.br/sim/sonabra/convencionais.php> (consulté le mai 2010).

Lombardo, M. A, 1985 : *Ilha de Calor nas Metrôpoles: o exemplo de São Paulo*. São Paulo, Editora Hucitec, 244 p.

Marcondes. E, 1979 : Desvio Padrão Vs. Percentil. *Pediatria*, **vol. 1. n.1**, 148 - 158.

Mendonça, F, 2006 : Aquecimento Global e suas manifestações regionais e locais: alguns indicadores da região Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*. **v.2, ano 2**, 71 – 86.

Nascimento Junior L.; Silvestre M. R.; Dubreuil, V.; Sant’anna Neto, J. L., 2013 : Rupturas e Tendências em Series Históricas no Paraná. Dans : *XV Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada (SBGFA)*, (pp. 298 – 307). Vitória, Brésil.

Nunes, L. H., Vicente, A. K., Candido D. H, 2009 : Clima da região sudeste do Brasil. Dans: Cavalcanti, I. F. A. *et al* (Eds.). *Tempo e Clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 244-258.

Pettitt A.N, 1979 : A Non-Parametric Approach To The Change-Point Problem. *Applied Statistics*, **28**, 126-135.

Sant’anna Neto, J.L, 2001 : Por uma Geografia do Clima - antecedentes históricos, paradigmas contemporâneos e uma nova razão para um novo conhecimento. *Terra Livre*, **17**, 49-62.

SYSTEMES DE BRISES THERMIQUES ET DISTRIBUTION DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE A BEYROUTH

SAKR S.¹, BRIDIER S.²

¹Département de géographie, université libanaise, Fanar, Liban, samarsakr2005@hotmail.com.

²LPED, Université de Provence, 3, place Victor Hugo, 13002 Marseille, France, sebastien.bridier@univ-amu.fr

Résumé - La localisation de Beyrouth, à l'interface de la mer Méditerranée et de la chaîne du Mont Liban, favorise la mise en place de brises thermiques entre le littoral et la montagne, susceptibles de transporter et d'accumuler les polluants produits dans l'agglomération. Cette étude porte à la fois sur l'identification des situations de brises par l'analyse statistique des données de la station de l'aéroport international, et sur l'observation des brises et de la pollution par un réseau temporaire de mesures (météorologie et pollution) entre août et octobre 2010. L'étude montre l'occurrence statistique sur 11 années des situations de brises en été et en automne, et détaille les heures de mise en place et de disparition du phénomène pour chaque date. L'observation des taux cumulés de polluants (O_3 et NO_2) permet de mettre en évidence à la fois la dynamique spatiale et temporelle et de l'associer avec le cycle des brises, notamment entre le littoral, le centre urbain et les vallées.

Mots-clés : brises thermiques, topographie, polluants, recirculation.

Abstract – *Thermal breezes and air pollution pattern at Beyrouth.* The location of Beirut, at the interface of the Mediterranean Sea and the Mount Lebanon range, favors the establishment of thermal breezes between the coast and the mountains, which can transport and accumulate the pollutants produced in the area. This study involves both the identification of breeze situations through the statistical analysis of the data at the international airport station, and the observation of breezes and pollution through a network of meteorological and pollution measurements, between August and October 2010. The study shows the statistical occurrence over 11 years of breeze situations in summer and fall, and details the hours of establishment and disappearance of the phenomenon for each date. The observation of cumulative pollutant rates (O_3 and NO_2) makes it possible to highlight both spatial and temporal dynamics, and to associate it with the cycle of breezes, in particular between the coastline, the urban center and the valleys.

Key words: breezes, topography, pollutants, recirculation.

Introduction

Cette étude a eu pour but de mettre en évidence et de caractériser les systèmes de brises thermiques de la région de Beyrouth (Liban), et de comprendre leur impact sur la qualité de l'air, à l'image des travaux de Michelot et Carrega (2014) et de Dahech (2015). La localisation particulière de la capitale libanaise entre la mer Méditerranée et la chaîne du Mont Liban, inscrit l'agglomération dans un système de brises thermiques s'installant entre les versants montagneux et la surface maritime. Ces brises thermiques peuvent influencer la distribution des polluants atmosphériques produits sur place ou recirculant lors des situations favorables. En effet, le site est constitué par une plaine étroite (figure 1) regroupant 1,3 M d'habitants, où sont implantées les grandes infrastructures locales et régionales (boulevards urbains et autoroute, port) à l'origine d'importantes émissions de polluants primaires.

Pour caractériser les systèmes de brises thermiques et les relier à la fluctuation de la qualité de l'air, nous avons utilisé conjointement les données de l'aéroport international situé au sud ouest de la ville sur la période 1999 à 2010 (seule station pérenne disponible dans la région), et les données produites par un réseau de 5 stations météorologiques et de 4 capteurs de polluants irritants respiratoires (O_3 et NO_2), implanté durant l'été et l'automne 2010.

1. Données et méthodes

Trois types de données ont été utilisés :

- Les données météorologiques mises à notre disposition par le département de Météorologie, service climatologique, de l'aéroport de Beyrouth, pour la période de 1999 à 2010, à un pas de temps horaire. Elles regroupent la vitesse et la direction du vent à 10

mètres du sol, l'humidité relative, la pression atmosphérique et la température. Les données météorologiques provenant du réseau de 5 stations fixes que nous avons implanté pour observer l'atmosphère à l'échelle microclimatique. Les mesures ont été réalisées d'août à octobre 2010 (tableau 1).

- Les données de pollution provenant du réseau de 4 capteurs portatifs Cairpatch de Cairpol mesurant le cumul O₃ et NO₂ à un pas de temps de 15 minutes. Les capteurs ont été implantés suivant 2 campagnes de mesure, du 1^{er} août au 30 septembre, et du 4 octobre au 31 octobre 2010 (tableau 1).

Tableau 1. Caractéristiques des stations de mesures

Localisation	Type	Altitude	Mesures météo	Mesures pollution
Aéroport	littoral	10 m	permanente/temporaire	
AUB	littoral	10 m	temporaire	
Achrafîyyé	urbain	90 m	temporaire	été 2010
Mar Roukoz	péri urbain	150 m	temporaire	
Université A. Baadba	péri urbain	145 m	temporaire	
Caserne Pompier	littoral			été 2010
Av de Gaule	littoral			automne 2010
Ghbayré	urbain			automne 2010
Musée de Beyrouth	urbain			automne 2010
Dikwané	péri urbain			été 2010
Hazmiyé	péri urbain			automne 2010

- Les données SIG provenant du traitement d'une image Landsat, orthorectifiée à partir de points de contrôle et d'un MNT. Un MNT a été réalisé par photogrammétrie à partir d'une prise de vue aérienne (2005). L'image a été traitée pour construire une occupation du sol reprenant la nomenclature CORINE LANDCOVER (figure 1).

2. Résultats

2.1 Régime de brises thermiques

La base de données horaires de la station météorologique de l'aéroport de Beyrouth regroupant la pression atmosphérique, la vitesse et la direction de vent, l'humidité relative et les précipitations sur une période de 11 ans a été étudié en s'appuyant sur plusieurs études préalables menées sur les caractéristiques des circulations des brises (Carrega, 1994 ; Simpson, 1994 ; Born et *al.*, 1998). Nous avons vérifié que la brise de mer s'est levée, c'est-à-dire si un changement de la direction du vent d'au moins de 90° de la terre vers la mer au cours de la journée, associé à une augmentation de la vitesse du vent, s'est produit (figure 2). Une augmentation de l'humidité relative a été observée lors de l'installation de la brise. Dans la plupart des cas, l'arrivée de la brise de mer ne se traduit pas par une nette diminution mais par une stabilité de la température de l'air.

L'étude de ces journées de brises a montré que ces circulations apparaissent tous les ans mais soufflaient plus ou moins fréquemment d'une année à l'autre. L'étude mensuelle des journées de brise de mer a montré que l'apparition de ces types de circulation est importante durant la saison estivale et automnale. 25% ont été enregistrées au mois d'août et 27% au mois de septembre.

2.2 Impact des brises thermiques sur la répartition spatio-temporelle du NO₂ et O₃

Le type de capteurs utilisé réalise un cumul des deux polluants (O₃ et NO₂). C'est à la base un capteur d'alerte destiné aux personnes asthmatiques sensibles aux irritants respiratoires de type NOx.

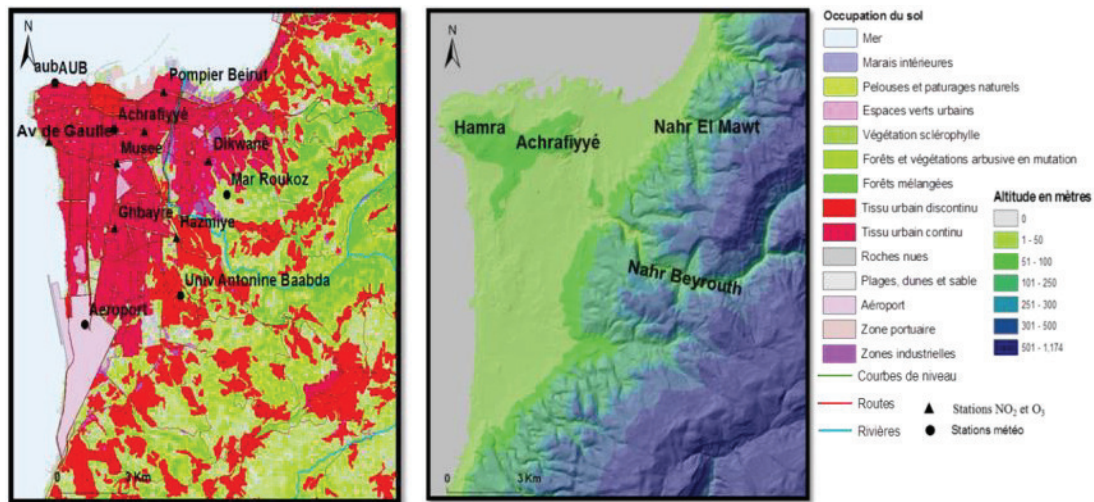


Figure 1. Occupation du sol et topographie de la région d'étude.

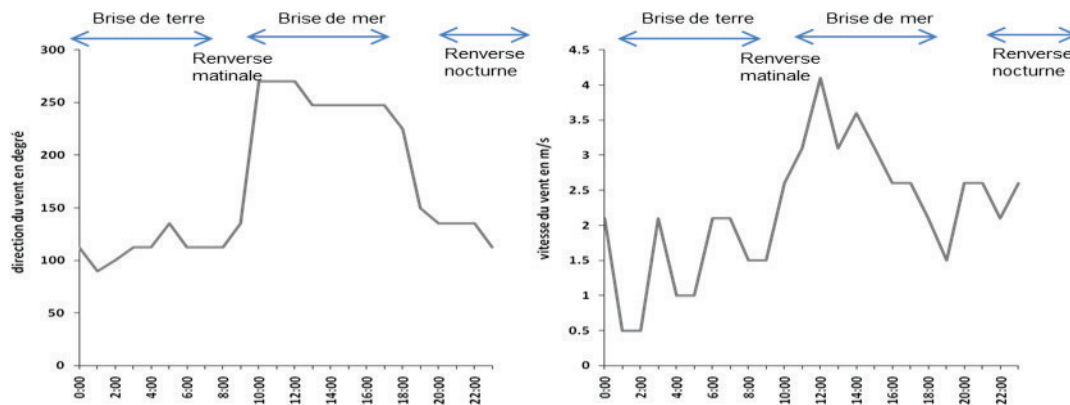


Figure 2. Direction et vitesse du vent d'une journée de brise sélectionnée (données de la station de l'aéroport de Beyrouth, le 24 août 2006).

Pour la campagne de mesure menée durant les mois d'août et septembre 2010 dans la zone Nord de la région d'étude, l'écart le plus grand existe entre les stations Pompier Beyrouth (littoral) et Dikwané (périurbain) (figure 1). En effet, les stations côtières situées à proximité des grands axes de circulations (sources d'émission importantes) enregistrent des concentrations importantes de NO₂ et O₃. Les NO_x (NO et NO₂) jouent un rôle complexe car ils sont à la fois précurseurs et destructeurs d'O₃. Certains facteurs locaux contribuent aussi à l'augmentation ou à la destruction de l'O₃ troposphérique de surface et du NO₂, il est donc difficile de préciser la cause des taux de cumul de ces deux polluants. Les concentrations maximales journalières de NO₂ et d'O₃ observées sont importantes dans les stations de l'AUB, Pompier Beyrouth et Achrafiyyé, connues par un trafic routier dense (notons bien que la station de Pompier Beyrouth est aussi proche du port de Beyrouth). Pour la station Dikwané (périurbain), le trafic routier y est moins dense qu'à proximité des autres stations nommées ci-dessus. Pour la zone Sud, les concentrations les plus élevées ont été mesurées aux stations urbaines (Ghbayré, Avenue de Gaule et Musée) situées au voisinage de fortes sources d'émissions (trafic routier). Elles sont suivies par la station de Hazmiyé, qui connaît un trafic routier moins dense que les autres, la moyenne maximale des concentrations est proche des autres stations (figure 3). Les concentrations moyennes enregistrées sur la période de mesure

montrent un écart sensible entre les stations côtières et urbaines (AUB 104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Pompier Beirut 113 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Achrafiyyé/Cessine 88 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Av De Gaulle 94 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; Ghbayré 98 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et Musée 89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) et les stations périurbaines (Dikwané 55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ et Hazmiyé 62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

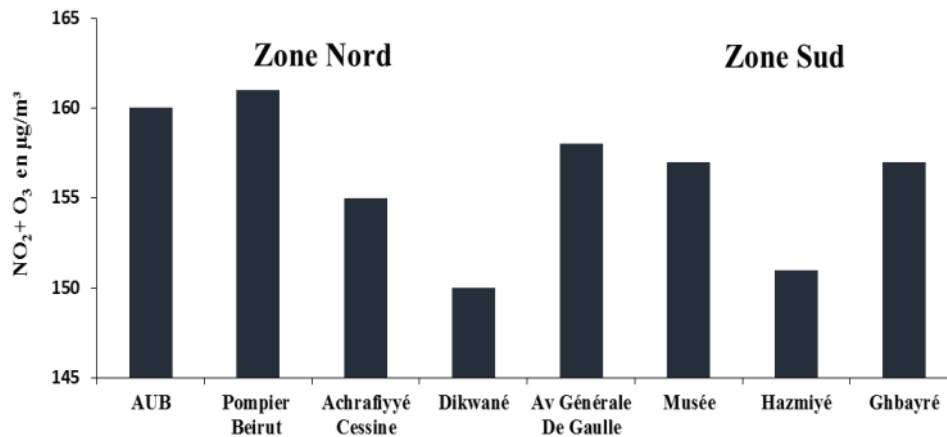


Figure 3. La moyenne maximale des concentrations du NO_2 et O_3 dans la zone Nord du 1^{er} août au 31 septembre et du 1^{er} au 31 octobre 2010 dans la zone Sud

Toutes les journées de pollution par temps de brises ont été étudiées afin de mettre en évidence les différents cas possibles produits durant les campagnes de mesures de l'été 2010. 29 journées de brises thermiques ont été identifiées du 1^{er} août au 31 octobre 2010. Nous avons programmé deux campagnes de mesures. 26 journées ont alors été sélectionnées. La méthode de calcul adoptée pour étudier la variation de la pollution de l'air durant les épisodes de brises a consisté à analyser la variation des concentrations des polluants enregistrées à chaque station de mesure entre l'heure d'apparition de la brise de mer et l'heure précédent son apparition : $[(P_{(t)} - P_{(t-1)}) \times 100 / P_{(t-1)}]$, P étant le cumul de NO_2 et O_3 .

Nous analysons ici deux situations constituées d'un cycle de 2 jours de brise thermiques. La première se déroule du 10 au 11 septembre 2010. La situation synoptique en altitude durant ces 2 jours de brises se caractérisait par la présence d'un champ de haute pression subtropical dessinant une légère dorsale au-dessus du Moyen-Orient et amenait une situation de stabilité sur le Liban malgré une pression assez basse de 1008 à 1010 hectopascals au niveau de la mer. Une analyse des résultats obtenus à la suite de l'étude des variations horaires des concentrations de NO_2 et O_3 à chaque station de mesure montre une augmentation plus importante des concentrations de NO_2 et O_3 aux stations où la brise de mer est apparue par rapport à celles qui ne sont pas encore sous son influence (tableau 2). Pour chaque heure, la différence entre la moyenne des variations des concentrations des polluants calculées aux stations où la brise souffle et celle des variations observés aux stations où elle n'est pas encore apparue est positive pour le cycle de brise observé durant le 10 et le 11 septembre 2010, surtout pour les stations d'Achrafiyyé et AUB le 10 septembre, et AUB, Pompier Beyrouth et Achrafiyyé le 11 septembre. Pour la station de Dikwané, une hausse se produit une heure avant l'arrivée de la brise de mer. Le fort rayonnement solaire en période estivale favorise les réactions photochimiques et l'accumulation des polluants qui ne sont pas dispersés par les brises thermiques en présence des conditions topographiques particulières, notre zone d'étude étant une zone côtière et montagneuse. Les brises thermiques constituent le mécanisme central des épisodes de pollution de l'air en région littorale montagneuse. La brise de mer combinée aux brises de versant crée une recirculation d'air le long des côtes (Millan *et al.*, 2002).

Tableau 2. Variation horaire du cumul des concentrations de NO₂ et d'O₃ le 10 et 11 septembre 2010

	AUB	Pompier Beyrouth	Achrafiyyé Cessine	Dikwané	AUB	Pompier Beyrouth	Achrafiyyé Cessine	Dikwané
08h00	20%	24%	40%	28%	16%	10%	40%	27%
09h00	17%	20%	27%	41%	36%	35%	15%	28%
10h00	20%	13%	4%	-6%	8%	9%	33%	6%
11h00	5%	4%	19%	18%	5%	4%	1%	30%
12h00	1%	1%	2%	16%	2%	2%	2%	1%
13h00	1%	-1%	-4%	1%	-2%	1%	1%	0%
14h00	-7%	-6%	-1%	-1%	0%	-3%	0%	-1%
15h00	-6%	-5%	-11%	-8%	-9%	-2%	-8%	1%
16h00	2%	1%	-1%	-1%	0%	2%	1%	2%
17h00	1%	2%	-4%	4%	3%	2%	3%	6%
18h00	-18%	-8%	-22%	-25%	-8%	-9%	-15%	-20%

Les pourcentages colorés en gris sont les variations des concentrations d'O₃ et de NO₂ calculés lorsque la brise de mer souffle à la station météorologique la plus proche.

La seconde se déroule du 12 au 13 octobre 2010. La situation synoptique se caractérisait par de hautes pressions subtropicales en altitude accompagnées en surface par une pression monotone de 1015 hectopascals. Vers 12h00 la brise de mer s'est fait sentir aux stations de l'aéroport de Beyrouth et à celles de l'AUB et Achrafiyyé, après une période de vent très faible (de 0.5 m/s à 1 m/s). Elle s'est ensuite levée vers 13h00 à l'Université Antonine de Baabda. Une augmentation importante des concentrations de NO₂ et O₃ aux stations où la brise de mer est apparue par rapport à celles qui ne sont pas encore sous son influence a été observée. Les variations de polluants accompagnées par la direction et la vitesse du vent mesurées aux stations météorologique les plus proches ont été cartographiées pour le 13 octobre (figure 4).

De 08h00 jusqu'à 11h00, les concentrations de polluants continuent à augmenter à toutes les stations en raison du trafic routier et des processus de production d'ozone depuis le lever du soleil. La vitesse du vent enregistrée était faible à toutes les stations de mesure (0.5 m/s à 1 m/s) et la brise de mer n'est pas encore apparue.

A 12h00 la brise se fait sentir aux stations littorales avec une direction d'Ouest et une vitesse de 3 m/s à AUB, de 2.6 m/s à l'aéroport et de 2.5 m/s à Achrafiyyé. Les concentrations de polluants observées ont nettement augmenté aux stations d'Avenue de Gaulle, Musée et Ghbayré.

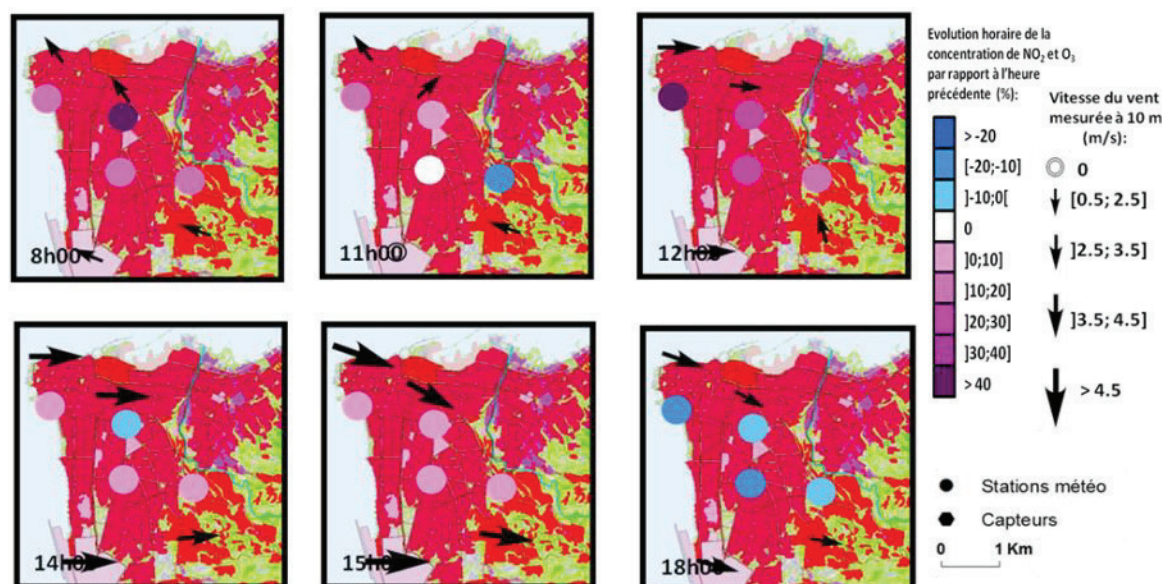


Figure 4. Directions et vitesses de brise de mer et variations de concentrations d'O₃ et NO₂ le 13 octobre 2010

La mise en place de la brise de mer aura donc été associée dans ces 2 cas avec une hausse des concentrations de polluants irritants. Il se peut que cette forte augmentation soit due à un trafic intense mais l'observation du trafic à la station de Gaulle a montré que le nombre de voiture diminue de 11h00 à 15h00 (12'500 voitures) avec un trafic routier moins dense que les stations du Musée (21'600 voitures) et de Ghhayré. L'arrivée de la brise de mer se traduit par une meilleure ventilation et une dispersion des concentrations de NO₂.

Mais les concentrations d'O₃ sont élevées au-dessus des mers et sont ramenées par la brise de mer. Lorsque la brise de mer se lève, elle ramène les polluants émis ou produits la veille sur la côte. Cette boucle peut recirculer les mêmes polluants pendant deux à trois jours (Millan *et al.*, 1992). Cela pourrait expliquer la hausse des concentrations cumulées. Des mesures séparées de ces polluants pourront confirmer ces hypothèses. A 18h00, les concentrations continuent à diminuer à toutes les stations et la vitesse de la brise de mer continue à diminuer.

Conclusion et perspective

L'étude des données météorologiques enregistrées à la station météorologique de l'aéroport de Beyrouth a montré que la brise de mer souffle tous les ans surtout durant les mois d'août et septembre, se lève tôt avec une humidité relative élevée. La vitesse du vent enregistrée avant l'installation de la brise de mer, durant la période nocturne et tôt le matin entre 00h00 et 07h00 heure locale, est faible et de direction Est à Sud-Est.

A partir de l'analyse du cumul des concentrations de NO₂ et d'O₃ enregistrés dans la région pendant deux campagnes de mesures, on constate que les sites situés près du littoral à proximité du boulevard périphérique, sont pollués lorsque la brise de mer est présente. Ensuite ce sont les sites situés à l'intérieur qui sont touchés. L'incidence est néfaste sur la région en raison de la recirculation des polluants et de la topographie complexe du site qui forme un barrage naturel et empêche la dispersion des polluants. Il sera important de pouvoir mesurer séparément les deux polluants NO₂ et O₃ pour faire la part entre les processus chimiques et le transport à l'échelle continentale et ceux se produisant aux échelles régionale et locale.

Bibliographie

- Born K., Chen D., Nunez M., 1998 : A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the Swedish west coast. *International Journal of Climatology*, vol. 8, 901-914.
- Carrega P., 1994 : Analyse spatiale quantitative et appliquée. Topoclimatologie et habitat. *Revue de Géographie du Laboratoire d'Analyse Spatiale Raoul Blanchard, UFR Espaces & Cultures – Université de Nice-Sofia Antipolis 35&36*. 408 p.
- Dahech S., 2015 : Caractéristiques de la brise littorale dans la région de Sfax (centre Tunisien). *Actes du 28^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège, Belgique*, 251-256.
- Michelot N. et Carrega P., 2014 : Topoclimatologie et pollution de l'air dans les Alpes-Maritimes : mécanismes et conséquences en images. *Echo Géo*, 29.
- Millan M., Begona A., Alonso L., Castro M., Fernandez-Patier R., Goberna J., 1992 : *Mesometeorological cycles of air pollution in the Iberian Peninsula. Air pollution Research Report 44*. Commission of the European Communities, G.G.XII/E-1, Rue de la Loi, 200 B-1040 Brussels, Belgium.
- Millan M., Sanz M.J., Salvador R., Mantilla E., 2002: Atmospheric dynamics and ozone cycles related to nitrogen deposition in the western Mediterranean. *Environmental Pollution*, 118, 167-186.
- Simpson J-E., 1994 : *Sea breeze and local winds*. Cambridge University Press, 324 p.

A PRODUCTION DE LA VILLE : ENTRE PRESSION FONCIERE ENJEUX ECONOMIQUES ET PRESERVATION DE L'ENVIRONNEMENT

TRIFA JAMOUCSI H.

Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme. Mail : hajerjamoussi.jihak@tunet.tn

Résumé : La communication propose d'approcher la question de l'environnement, à partir de l'analyse de trois opérations d'aménagement réalisées dans le Grand Tunis : la zone industrielle « M'Ghira » à Ben Arous, le complexe touristique « La Baie de Gammarth » et le lotissement « Les résidences de Carthage », à la banlieue nord. Il s'agit de montrer que, malgré les enjeux environnementaux et la valeur historique des sites, ces espaces ont fait l'objet d'aménagements sans prendre en compte leurs fragilités ni prévenir les déséquilibres écologiques qu'ils peuvent provoquer. Certes, l'inscription de la dimension environnementale dans l'agenda politique tunisien, a fait évoluer le cadre institutionnel et réglementaire cependant, les actions sont restées fragmentées, fortement sectorialisées et sans concrétisation visible sur terrain. Manque de volonté politique ou contraintes financières ? Cachent-elles les intentions d'un pouvoir politique à la recherche d'une certaine légitimité, ou sont-elles l'instrument de pratiques clientélistes servant des intérêts immobiliers et financiers en jeu ?

Mots-clés : Aménagement urbain, environnement, développement urbain durable, politiques urbaines.

Abstract : The Production of the City: between land pressure, archaeological sites stakes, and ecological balance
The paper focuses on the urban environmental side. It is based on the analysis of three projects realized in the area of the Big Tunis: The Industrial area of « M'Ghira » at Ben Arous, the touristic resort Area « La baie de Gammarth », and the subdivision « Les résidences de Carthage » at the northern suburb of Tunis. The issue is to show that in spite of the environmental challenges and the historical value of these sites, these areas have been upgraded without taking care about their fragility neither considering the ecological damage that it might cause. Although the Environmental dimension in the tunisian political agenda is well defined, the actions remained fragmented without concrete incidences on the ground. Was this due to political will or financial constraints? Does this hide the political power intentions searching for a certain legitimate or is this a result of real estate lobbying with all the financial interest that it hides?

Keywords : Urban planning, Sustainable urban development, urban policies, environmental Protection.

Introduction

La Tunisie est connue pour la rareté de ses ressources naturelles, la vulnérabilité de ses zones humides, l'accélération du processus de désertification, la montée du niveau de la mer, etc. Elle figure parmi les pays particulièrement vulnérables aux changements climatiques qui affectent actuellement les deux tiers de son territoire (MedPartnership, 2015).

Le contexte de forte concurrence régionale, liée à la globalisation des économies, aggrave la situation. Pour améliorer la compétitivité des grandes villes, la Tunisie choisit un modèle de développement libéral, qui s'appuie notamment sur les secteurs du tourisme et de l'industrie. Or, ces deux activités sont à l'origine de pollutions de fond persistantes. Aussi, le référentiel de l'urbanisation durable met-il en tension les choix dominants du développement néolibéral et les risques qu'ils font peser sur les aménités socio-environnementales.

Pourtant, la Tunisie a très tôt pris conscience des défis liés à la question de l'environnement, et à ce qu'elle pose comme dangers pour le développement économique et pour la qualité de vie de la société¹.

Cependant, les villes tunisiennes et notamment le Grand Tunis (GT) et les régions côtières, connaissent encore une forte pression foncière urbaine². Le cas du Grand Tunis illustre

¹Code Forestier en 1966 (refondu en 1988), loi sur la protection des terres agricoles (1985), Code des Eaux (1975), Code de l'Urbanisme (1979) (abrogé par la loi de 1994 relative au Code de l'Aménagement du Territoire et de l'Urbanisme CATU) etc.

l'ampleur du phénomène : 500ha/an en moyennesont consommés dans le G.T. Le processus d'étalement urbain est encore en marche. De part le recul des terres agricoles fertiles, le développement urbain se fait au détriment d'espaces présentant une fragilité écologique (lacs, sebkhas et lagunes, littoral, etc.), ayant une forte valeur historique ou favorisant la prévention contre les changements climatiques (forêts, parcs urbains, dunes littorales, etc.).

Aussi, à travers l'analyse des mécanismes de production de trois projets urbains situés dans le Grand-Tunis : la zone industrielle « M'ghira » au sud-ouest de Tunis, le complexe touristique « Cap Gammarth » et les « résidences de Carthage » à la banlieue-nord (Figure 1), je tenterai de montrer que l'intégration de la dimension environnementale dans les politiques urbaines suscite des enjeux politiques, économiques et foncierset relève de logiques contradictoires³.



Figure 1. Plan de situation de la zone Industrielle M'ghira, de la baie de Gammarth et des Résidences de Carthage

1. Dispersion institutionnelle et efficacité limitée des initiatives: contraintes financières ou manque de volonté politique?

Depuis la montée en puissance des enjeux environnementaux, confirmée lors du Sommet de la Terre de Rio, suivi des Sommets de Kyoto en 1997, de Johannesburg en 2002 et de Copenhague en 2009, la Tunisie s'allie au mouvement planétaire et fait figure de bon élève vis-à-vis de la communauté internationale. Elle procède à la ratification et à la mise en œuvre des Accords Multilatéraux Environnementaux (AEM). Elle opère un profond redéploiement institutionnel⁴ et réglementaire pour intégrer les diverses thématiques environnementales dans son agenda politique.

Néanmoins, les rapports effectués à l'initiative des partenaires régionaux et internationaux sur l'évolution de la situation environnementale en Tunisie, regrettent la forte dispersion des

² En 2005 et dans le cadre de la révision de plus de 150 Plans d'Aménagement Urbains, la superficie globale des terres agricoles à déclasser a été estimée à près de 58000ha (30000 ha pour la révision des Plans d'Aménagement Urbain et près de 28000 ha pour la régularisation des situations foncières dans les quartiers d'habitat spontané).

³ Ces opérations ont été identifiées à l'occasion du relevé systématique des lotissements approuvés dans le Grand-Tunis entre 1997 et 2006. Le relevé a été effectué dans le cadre de ma thèse de doctorat intitulée « Le rôle de l'Etat dans la production des terrains à bâtir : le cas du Grand Tunis » (Trifa Jamoussi, 2016)

⁴ On cite notamment le Ministère de l'Environnement créé en 1991, l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE) (1988), l'Agence de Protection et d'Aménagement du littoral (APAL) (1995) chargée de délimiter le Domaine Public Maritime (DMP) et la protection environnementale du rivage de la mer, des plages, les sebkhas, des dunes de sable, des îles et des falaises.

initiatives et le double emploi des actions entreprises, qui pèsent sur l'efficacité de la politique environnementale et diluent les responsabilités (Banque Mondiale, 2012).

En effet, les contradictions apparaissent de manière évidente sur terrain et trahissent souvent l'attitude permissive si non complaisante du pouvoir en place.

2. La sebkha Sijoumi et la zone industrielle de M'ghira : quand un écosystème fragile est sacrifié au nom du développement économique

La zone industrielle de M'ghira a été implantée sur la rive sud-ouest de la sebkha de Sijoumi. Cette dernière constitue l'une des zones humides les plus menacées de la Tunisie⁵. En effet, l'urbanisation autour de la rive sud-ouest, qui se réduisait aux localités Mohamadia et Fouchana, se développe vers le milieu des années 80, suite à l'intervention des opérateurs publics. Vers le milieu des années 90, s'engage un processus de remplissage des espaces interstitiels entre les deux localités qui forment désormais une véritable conurbation.⁶

L'Agence Foncière Industrielle, opérateur public, choisit le terrain empiétant sur les berges sud-ouest de la sebkha (localité de M'ghira contiguë à Fouchana) pour y implanter une vaste opération industrielle (260 ha). (Figure 2, Figure 3)



Figure 2. Site de la zone industrielle M'ghira Figure 3. Zone industrielle M'ghira après aménagement

Or, l'étude de mise en valeur et d'aménagement de la sebkha (DGSAM) indique que la restriction de sa surface, suite aux grignotages de la zone tampon naturelle, constitue l'une des conséquences des pressions anthropiques que subit ce plan d'eau (DGSAM, p. 4)

D'autre part, un sérieux déséquilibre du régime hydrologique de la sebkha est constaté. L'imperméabilisation des sols, conséquence directe de l'urbanisation, augmente le débit des eaux pluviales se déversant naturellement vers l'émissaire. D'un autre côté, on a relevé des points de rejets hydriques provenant des raccordements directs illicites des réseaux d'eaux usées sur les canaux d'évacuation des eaux pluviales, des débordements du réseau d'assainissement des eaux usées, arrivé à saturation, et des trop pleins des stations de pompage des eaux usées brutes (DGSAM, p.2).

Les eaux de la sebkha ont fini par contaminer la nappe. Les analyses de ses eaux révèlent l'existence d'origine fécale, ce qui rend l'eau souterraine impropre à la consommation des habitants des rives de la sebkha (Chouari, 2013). Pourtant, les quelques

⁵ La sebkha est inscrite en 2007 à la convention Ramsar en tant que zone humide d'importance internationale (DGSAM, p.4).

⁶ Entre 1997 et 2006, 260 ha de lotissements réglementaires y ont été réalisés : soit 13% de la surface globale produite par la filière réglementaire dans le Grand Tunis durant la même période. (Trifa Jamoussi, 2015)

interventions effectuées suite à l'épisode de pluie exceptionnelle de 2003, relèvent plus d'actions curatives, que d'une intervention globale sur le plan d'eau (DGSAM, p.9).

3. La progression de l'activité touristique autour du golfe de Tunis: la frange littorale de Gammarth menacée

Le projet « La Baie de Gammarth » est approuvé pour le compte de la Société Immobilière Touristique Marina Gammarth en 2005. Il est constitué d'une marina avec un port de plaisance et un complexe résidentiel et de loisir. Le terrain occupe la forêt artificielle de Gammarth et s'étend sur une vingtaine d'hectares, dont 7 ont été remblayés en mer (Figure 4, Figure 5).



Figure 4. Site de la Baie de Gammarth



Figure 5. La Baie de Gammarth après aménagement

En fait, la forêt a été implantée dans le cadre de la campagne de boisement forestier lancée dans les années 40-50 pour protéger le littoral et de fixer les dunes. Un périmètre de fixation des dunes de la région de Gammarth est délimité en 1946⁷. A partir du milieu des années 1975 on démarre le déclassement des dunes boisées de Gammarth et l'expropriation des parcelles nécessaires aux aménagements touristiques. La forêt qui s'étendait de Raoued à la Marsa couvrait 500ha. En 2003, il n'en restait que 135 ha⁸.

L'étude sur la délimitation du DPM en prévision d'une Elévation Accélérée du Niveau de la Mer (EANM) en Tunisie, a bien souligné que la marina du Cap Gammarth « peut générer une érosion qui peut être accentuée avec l'EANM » (Ministère de l'environnement et du Développement Durable, 2007) et recommande « d'approfondir la conception de la marina pour éviter les conséquences négatives sur les côtes des banlieues de Tunis nord. » (MEDD, 2007). Le projet était déjà approuvé par les diverses instances depuis 2005 !

Dans une interview accordée à la revue Archibat (Dimassi, 2012), le Maître d'Oeuvre, reconnaît les enjeux environnementaux, en ces termes : « Lorsqu'on conçoit un projet d'aménagement qui intègre une partie du littoral, on se trouve face à une contradiction: construire ou sauvegarder? Il faut partir du principe que tout projet de cette envergure va générer des nuisances. Le défi consiste à minimiser au maximum l'impact sur l'environnement. »

⁷ Décret du 26 décembre 1946 relatif à la constitution du périmètre de fixation des dunes de la région de Gammarth

⁸ Selon le décret N° 2003/1144 du 19 mai 2003 modifiant les limites du périmètre des dunes de Gammarth, la forêt ne couvrait plus que 135 ha

Rappelons que la Communication initiale de la Tunisie à la CCNUCC en octobre 2001⁹ a considéré le golfe de Tunis comme faisant partie des zones côtières les plus vulnérables à une EANM. (MedPartnership, 2015, p.24). Aussi, l'impact prévisible de la submersion marine en situation d'évolution extrême, conduira « à la submersion de la totalité de l'espace balnéaire le long du littoral dans les zones urbanisées » (BM, 2011).

Le complexe touristique et balnéaire haut de gamme « la Baie de Gammarth » est la manifestation tangible de l'implication des acteurs agissant dans le secteur, par rapport aux dégâts irréversibles apportés à la côte de la banlieue nord et la forêt littorale. Il est clair que le haut niveau de profit que draine l'opération, exclut toute considération environnementale.

4. L'avancée des quartiers de très haut standing dans la banlieue nord de Tunis : Le Parc Archéologique National de Carthage-Sidi Bou Saïd menacé

En 2006, le lotissement "Les résidences de Carthage" est approuvé par la mairie de Carthage, pour le compte de la société immobilière « Carthage Hannibal d'Animation et de Loisir ». Le terrain (4.7ha) est déclassé du "Parc Archéologique National de Carthage-Sidi Bou Saïd" au cours de la même année par décret, « en vue de réaliser un projet à usage d'habitation »¹⁰ (Figure 6, Figure 7).

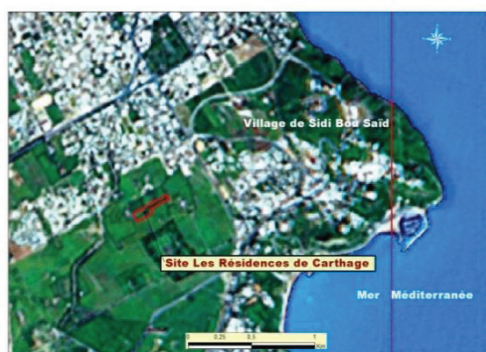


Figure 6. Site avant aménagement



Figure 7. Le lotissement les Résidences de Carthage

Or, le Parc est institué en raison de l'intérêt archéologique, historique, esthétique et naturel du site. Son classement « constitue un acte de protection et de valorisation d'un ensemble de sites historiques du patrimoine national, auxquels l'UNESCO a reconnu le caractère universel : le site de Carthage figurant sur la liste du patrimoine mondial fixé par l'UNESCO »¹¹.

Un Plan de Protection et de Mise en Valeur du parc (PPMV) est élaboré pour, à la fois conserver le site et lui donner une vocation culturelle, touristique et sociale (1992 – 2000). Jalel Abdelkafi, urbaniste et partie prenante dans l'élaboration du PPMV, explique dans une interview accordée à la revue Réalité, que « chaque fois que la commission se réunissait pour approuver le plan, le conseiller du président, venait pour bloquer le processus » (Zbiss, 2011). En fait, ces hésitations cachent les vraies intentions du président déchu et de son entourage

⁹ La communication a porté essentiellement sur la vulnérabilité accentuée du pays à l'élévation du niveau de la mer et sur ses impacts environnementaux. (MedPartnership, 2015, p. 19)

¹⁰ Article premier du décret n°2006/2416 du 4 septembre 2006.

¹¹ Article premier du décret N°85-1246 du 7 octobre 1985, relatif au classement du site de Carthage comme faisant partie du patrimoine mondial.

qui ont largement tiré profit de cette situation et bénéficié, sans contraintes, des valeurs inestimables du site historique.

Des réseaux illégaux, actifs au plus haut niveau de la sphère politique et agissant dans le domaine spéculatif de l'immobilier, font passer, sans grande peine, des décrets de déclassement des sites archéologiques, sans observer les procédures fixées par la réglementation. Il s'agissait souvent de l'exécution des "instructions d'en haut".

Conclusion

La multiplication des lois et des institutions en charge de la préservation de l'environnement, conduit à l'éparpillement des initiatives, augmente les risques de dérives et ne permet pas de répondre à des enjeux largement pilotés par les mécanismes fonciers et économiques. D'une part, l'appropriation de la thématique par le régime en place, sert à appuyer le pouvoir autoritaire. D'un autre côté, la mise en avant de l'argument du développement économique, lui confère la légitimité d'accorder des dérogations en faveur des acteurs bénéficiaires de la rente foncière. Cet aspect de l'intervention des pouvoirs publics est souvent doublé d'une attitude permissive vis-à-vis des dépassements. Il peut aller jusqu'à l'implication directe des acteurs publics, au plus haut niveau de la sphère politique. Le tourisme, l'industrie et l'habitat se développent conjointement sur un milieu assez fragile. Ils sont à la fois des secteurs de pression sur les ressources naturelles et victimes de la dégradation environnementale. Les enjeux que génèrent les intérêts politiques, le marché foncier et le développement économiques, pèsent lourdement sur l'émergence d'une véritable politique qui intègre la dimension environnementale, problème majeur en Tunisie.

Bibliographie

- Banque Mondiale, 2011 : Adaptation aux changements climatiques et aux désastres naturels des villes côtières d'Afrique du Nord / Phase 1 : Evaluation des risques en situation actuelle et à l'horizon 2030 pour la ville de Tunis. 221p. URL : <http://www.egis-bceominternational.com/pbm/>
- Barthel P.A., Clerc V., Philifert P., 2013 : La ville durable précipitée dans le monde arabe : Essai d'analyse généalogique et critique. *Environnement Urbain/Urbain Environment*, volume 7, 16-30. URL : <http://www.erudit.org/revue/eue/2013/v7/n1027724ar.pdf>
- Chouari W., 2013 : Problème d'environnement lié à l'urbanisation contemporaine dans le système endoréique d'Essijoumi (Tunisie nord-orientale). *Physico-Géo*, Volume 7|1, 111-138. URL: <http://physio-geo.revues.org/3493> ; DOI : 10.4000/physio-geo.3493.
- Dimassi Ines : La Baie de Gammarth à l'horizon 2012 : *Archibat*. <http://www.archibat.info/news.php?artid=10>
- Emilianoff C., 2004 : Urbanisme Durable ? *Ecologie et Politique*, Dossier Urbanisme Durable, n°29, 13-19. <https://www.cairn.info/revue-ecologie-et-politique1-2004-2-page-13.htm>
- Gauthier M., 2009 : Urbanisme et développement durable. *Environnement Urbain/Urbain Environment*, volume 3, 2009, II-V3. URL : <http://id.erudit.org/iderudit/037596ar>
- MedPartnersship, 2015 : Expérience tunisienne pour faire face à la variabilité et au changement climatique en Tunisie, 40 p. URL : http://planbleu.org/sites/default/files/publications/rapport_national_tunisie_october_2015.pdf
- Ministère de l'Équipement et de l'Aménagement du Territoire, Direction Générale des Services Aériens et Maritimes : Etude de mise en valeur et d'Aménagement de Sebkhah Sijoumi, Rapport Diagnostique, IHE Tunis, 10p. <http://fr.slideshare.net/jiljap/resume-synthese-rapport-de-diagnostic-de-la-situation-actuelle-de-la-sebkhah-sijoumi>
- Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, 2007 : Etude de la délimitation du Domaine Public Maritime (DPM) en relation avec l'élévation du niveau de la mer, IHE Tunis, 103p. URL : www.changementsclimatiques.tn/etude/Vul_DPM.doc
- Ministère de l'Environnement et du Développement Durable, 2007 : Rapport National sur l'Etat de l'Environnement, 217 p.
- Ministère de l'Environnement, 2012 : Profil Environnemental de la Tunisie. URL : http://eeas.europa.eu/archives/delegations/tunisia/documents/projets/profil_environnemental_tunisie_oct2012_fr.pdf
- Trifa Jamoussi H., 2015 : Le rôle de l'Etat dans la production des terrains à bâtir : le cas du Grand Tunis. Thèse de doctorat en urbanisme. Tunis : Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme. 791 p.
- Zbiss H., 2011 : Tunisie : les malversations des Trabelsi dans le domaine du patrimoine : Des appétits insatiables ! , *Réalité* du 03/03/2011.

POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE PARTICULAIRE ET SANTÉ À SOUSSE

LAHMAR L.¹, HENIA L.²

¹Faculté des Lettres et Sciences Humaines de Sousse, lahmarleila@yahoo.fr

²Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, latifahenia@yahoo.fr

Résumé : Alors que les études publiées dans les revues scientifiques les plus prestigieuses soulignent toutes, les effets nocifs de la pollution atmosphérique sur la santé humaine, en Tunisie, cette piste de recherche demeure encore peu fréquentée. Ce papier est une contribution à la connaissance de l'effet de la pollution atmosphérique particulaire sur la santé à Sousse, une grande ville littorale et une destination touristique importante dans le pays. Notre choix pour la pollution particulaire se justifie par le fait que ce type de pollution est dominant à Sousse. Pour l'étude de son effet sur la santé nous avons opté pour deux types de pathologies: les pathologies respiratoires et celles cardiovasculaires, vue leur sensibilité à ce polluant.

Mots clés : pollution atmosphérique particulaire, maladies respiratoires, maladies cardiovasculaires, Sousse.

Abstract : *Particulate atmospheric pollution and health in Sousse.*

While the studies published in the most prestigious scientific journals all point to the harmful effects of air pollution on human health, in Tunisia, this research track is still little used. This paper is a contribution to the knowledge of the effect of particulate air pollution on health in Sousse, a big coastal city and an important tourist destination. Our choice for particulate pollution is justified by the fact that this type of pollution is dominant in Sousse. For the study of its effect on health we have opted for two types of pathologies: respiratory and cardiovascular pathologies, given their sensitivity to this pollutant.

Key words : *particulate atmospheric pollution, respiratory diseases, cardiovascular diseases, Sousse.*

Introduction

L'organisation mondiale pour la Santé (OMS) estime que les décès prématurés tributaires de la pollution atmosphérique s'élèvent, en 2012, à 7 millions de décès/an dans le monde entier. Les causes directes de la mortalité sont souvent liées à des pathologies cardio- et cérébro-vasculaires (80%), broncho-pneumopathies obstructives (11 %) et cancer de poumon (6%). En Tunisie, la ville de Sousse est considérée comme une ville très peu ou non polluée. Cependant, l'examen des données mesurées des polluants montre que le niveau de la pollution atmosphérique dans cette ville est loin d'être négligeable. Ce papier essaye de mettre en lumière la relation entre la morbidité respiratoire et cardiovasculaire et la pollution atmosphérique à Sousse.

1. Données et méthode d'approche

L'étude s'appuie sur deux types de données :

1.1. Des données environnementales : Ces données sont réparties en :

- Données météorologiques tri-horaires sur la température, l'humidité relative, la pression atmosphérique, la vitesse et la direction du vent recueillies auprès de l'Institut National de la Météorologie (INM) pour la période 2006-2007. Elles concernent la station de Monastir aéroport (la station principale la plus proche de Sousse, elle en est distante de 14 km seulement). La période retenue (2006-2007) est dictée par la disponibilité des données cliniques et de la pollution atmosphérique.
- Données sur la qualité de l'air : Ces données sont recueillies auprès de l'Agence National de Protection de l'Environnement (ANPE). Elles sont sous forme de relevés quotidiens horaires concernant les polluants suivants : le PM10, le NO2, le SO2 et l'O3 mesurés à la station de surveillance de la qualité de l'air implanté à Sousse (à l'hôpital Farhat Hached) pour la même période. Les données concernant les trois derniers polluants (NO2, SO2 et O3) nous ont permis de juger l'importance relative de la pollution par le PM10 à Sousse.

1.2. Des données cliniques

Les données cliniques sont recueillies auprès de l'hôpital Farhat Hached à Sousse. L'analyse porte sur une population de patients domiciliés à Sousse et qui ont été hospitalisés pendant la période 2006-2007. Les pathologies retenues sont l'asthme, le pneumothorax, la dilatation des bronches, les broncho-pneumopathies chroniques obstructives (BPCO) et les pneumopathies aiguës pour les pathologies respiratoires. En ce qui concerne les pathologies cardiovasculaires, nous avons retenu l'angine de poitrine, l'infarctus de myocarde et les troubles de rythme cardiaque. Ce sont, en fait, les pathologies respiratoires et cardiovasculaires qui sont le plus souvent corrélés aux aléas climatiques.

Notre méthode d'approche consiste à déterminer les épisodes pollués pour la période 2006-2007 ainsi que les conditions climatiques propices à leur formation. La superposition des pics de pollution atmosphérique aux pics des admissions hospitalières pour pathologies cardio respiratoires permet d'estimer le degré de liaison entre la pollution atmosphérique et la santé à Sousse.

2. Résultats et discussions

2.1. La pollution atmosphérique à Sousse est essentiellement une pollution particulaire

En Tunisie, la surveillance de la qualité de l'air est confiée à l'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE). La ville de Sousse bénéficie depuis l'année 2006 d'une station de mesure implantée à l'hôpital Farhat Hached. Les bulletins et les rapports de l'ANPE classe toujours Sousse comme une ville non polluée. En effet, au moins durant notre période d'étude (2006-2007), on n'enregistre aucun dépassement des seuils retenus pour les différents polluants mesurés. En réalité, si le niveau de la pollution atmosphérique à Sousse, comme d'ailleurs pour la plupart des stations de mesure en Tunisie, paraît faible, c'est parce que les normes tunisiennes de la pollution de l'air sont portés à des seuils très hauts. Le tableau n°1 montre la grande différence entre les normes nationales et internationales concernant les différents polluants atmosphériques mesurés.

Tableau 1. Normes nationales et internationales de la pollution atmosphérique

Polluant atmosphérique	Normes tunisiennes (ANPE)	Normes internationales (OMS)
SO ₂	365 µg/m ³ /J	20 µg/m ³ /J
NO ₂	660µg/m ³ /h	200µg/m ³ /h
CO	40000µg/m ³ /h (40 g/m ³ /h)	30000µg/m ³ /h (30 g/m ³ /h)
O ₃	235 µg/m ³ /h	150 µg/m ³ /h
PM ₁₀	260 µg/m ³ /J	50 µg/m ³ /J

Cependant, la confrontation des concentrations mesurées à la station de Sousse aux normes de l'OMS permet de voir que le niveau de la pollution atmosphérique dans cette ville est loin d'être négligeable, notamment en ce qui concerne la pollution particulaire. En effet, au cours des deux années considérées (2006 et 2007) et pour les différents polluants mesurés nous avons pu recenser 3 jours dont les concentrations moyennes en SO₂ dépassent le seuil 20µg/m³/J (normes de l'OMS) et 318 jours (soit 43% des jours) dont la concentration moyenne en PM₁₀ atteint ou dépasse 50 µg/m³/J (valeur guide retenue par l'OMS). La figure suivante permet de repérer les épisodes pollués enregistrés à Sousse entre janvier 2006 et décembre 2007 (Figure 1).

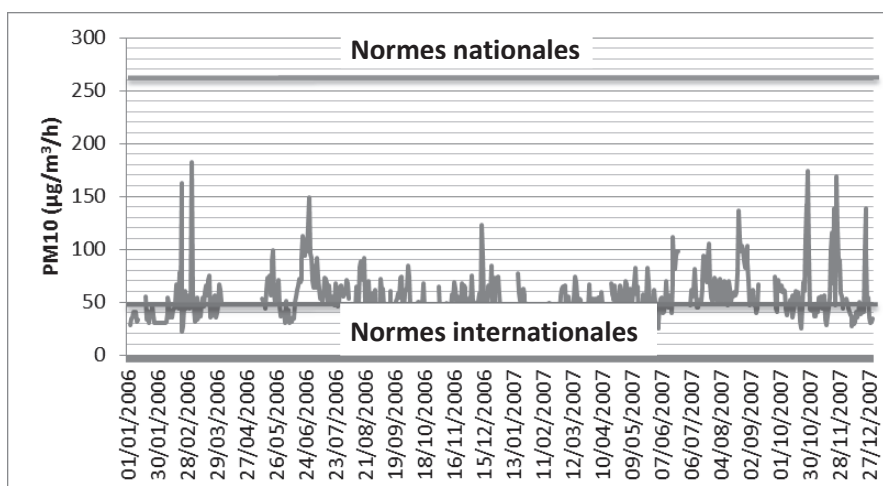


Figure 1. Variation quotidienne des concentrations moyennes en PM10 pour la station de Sousse (2006-2007)

La répartition mensuelle des jours de forte pollution particulaire (Figure 2) laisse apparaître que cette dernière s'accroît en été. Alors que, pendant l'hiver, la fréquence des jours pollués diminue clairement (Figure 2). L'impact sanitaire de cette pollution atmosphérique particulaire dépend de la taille et de la nature des particules en suspension dans l'air. Plus les particules sont fines (d'origine anthropique), plus elles sont dangereuses. Selon une étude menée aux Etats Unis et en Royaume Unis, une élévation des concentrations moyennes en PM10 de $+20\mu\text{g}/\text{m}^3$ entraîne une hausse de la mortalité journalière de 0.6%. Alors qu'une augmentation du taux des PM2.5 de $+10\mu\text{g}/\text{m}^3$ seulement pourrait être à l'origine d'une élévation de la mortalité journalière de 1.4% (Brook R.D, 2008).

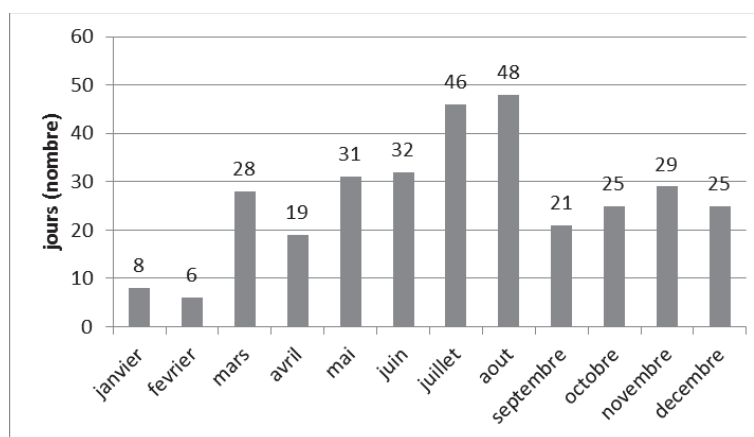


Figure 2. Répartition mensuelle des jours dont la concentration moyenne quotidienne en PM10 dépasse $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ (années 2006-2007)

Il va sans dire que les conditions atmosphériques influencent de près la dispersion et la concentration de ce polluant dans l'atmosphère. En effet, selon l'échelle de Beaufort les poussières commencent à s'envoler dans l'atmosphère à partir d'une vitesse du vent supérieure ou égale à 5.5 m/s. Si nous nous référons à ce seuil, nous remarquons, sur la figure 3 que les types de temps dépressionnaires et venteux (vitesse entre 5.5 et 15 m/s) ont été associés, au cours de notre période d'étude, à une pollution atmosphérique particulaire élevée à Sousse. Ils ont été enregistrés en dehors de la saison fraîche alors que les types de temps calmes (vent de vitesse inférieure à 5.5m/s) et pollués sont moins fréquents. Ils sont enregistrés surtout pendant la saison hivernale. La figure 3 laisse apparaître aussi que les types de temps très venteux (vent de vitesse supérieure à 30 m/s) et pollués sont peu fréquents et apparaissent surtout en été et en intersaisons.

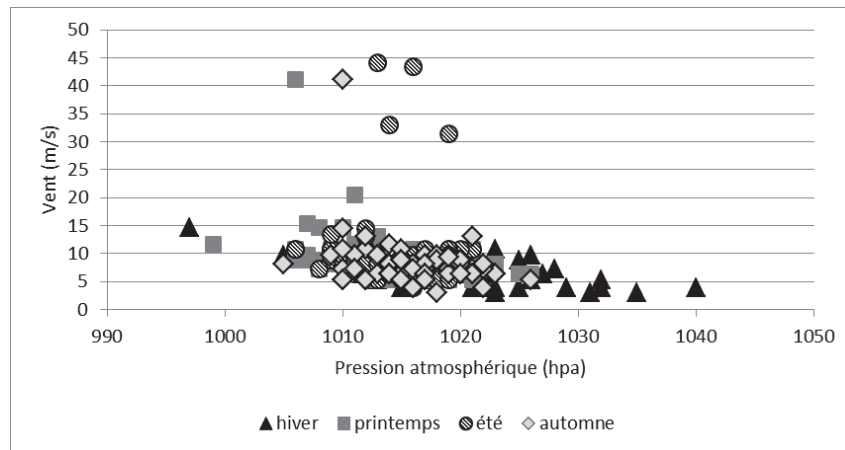


Figure 3. Distribution des jours dont la concentration moyenne quotidienne en PM10 dépasse 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ selon la pression atmosphérique et la vitesse du vent à Sousse

Etant donné que le climat de la Tunisie centrale tend vers l'aridité, nous pouvons admettre que les pics de pollution particulaire enregistrés pendant la saison chaude, particulièrement en été, pourraient être composés essentiellement de poussières naturelles. En effet, en été, la sécheresse du sol ainsi que celle de l'atmosphère et la forte chaleur, peuvent favoriser le soulèvement des particules fines, à la fois, naturelles et anthropique. Par contre, en hiver, la hausse de l'humidité de l'air et du sol n'est pas propice au soulèvement de la poussière naturelle d'origine locale. Ceci plaide en faveur d'une pollution d'origine anthropique surtout. Les situations anticycloniques pendant cette saison ne sont pas propices à la dispersion de la pollution ; ce qui pourrait favoriser les pics.

Ainsi, en hiver très probablement, la pollution particulaire d'origine anthropique prédomine à Sousse surtout pendant les situations de temps calme qui ne favorise pas la dispersion. Cette pollution atmosphérique anthropique pourrait être en relation avec le trafic routier qui connaît, depuis quelques décennies, une croissance galopante. En l'absence de données sur les PM2.5 et PM10 (les particules anthropiques les plus nuisibles pour la santé), l'étude de la répartition des pics des admissions hospitalières pour pathologies respiratoires et cardiovasculaires par rapport aux pics de pollution atmosphérique pourrait nous aider à confirmer ou à rejeter cette hypothèse.

2.2. Les pics des admissions hospitalières succèdent le plus souvent à des concentrations très élevées en PM10 même si le type de temps est peu stressant pour l'organisme humain

Un jour à pic des admissions hospitalières tels que nous le définissons ici est un jour dont l'effectif des admissions hospitalières pour pathologies respiratoires ou cardiovasculaires est supérieur ou égal à 3 admissions (sachant que la variation de l'effectif quotidien des admissions à l'hôpital Farhat Hached de Sousse, varie entre 0 et 4). L'examen de nos séries de données permet de repérer 21 jours à pics.

La figure suivante montre que les pics des admissions hospitalières pour pathologies respiratoires et cardiovasculaires sont plus fréquents pendant la saison fraîche particulièrement les mois de novembre et février (8 jours sur un total de 21 jours de pic enregistrés).

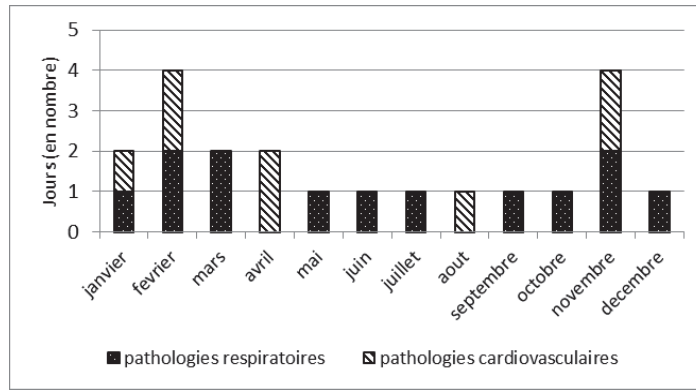


Figure 4. Distribution mensuelle des jours à pic d'admission pour pathologies respiratoires et cardiovasculaires à l'hôpital FarhatHached de Sousse (2006-2007)

L'étude de la variation des concentrations moyennes en PM10 pendant les 7 jours précédant les jours à pics des admissions hospitalières (Figure 5) permet de constater que la majorité des pics succèdent à des épisodes pollués parfois même fortement pollués à l'exemple des pics enregistrés le 28 juin 2006 et surtout les 2 pics de 2 novembre et 28 décembre 2007 (Figure 5). En effet, le seuil $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ fut largement franchit.

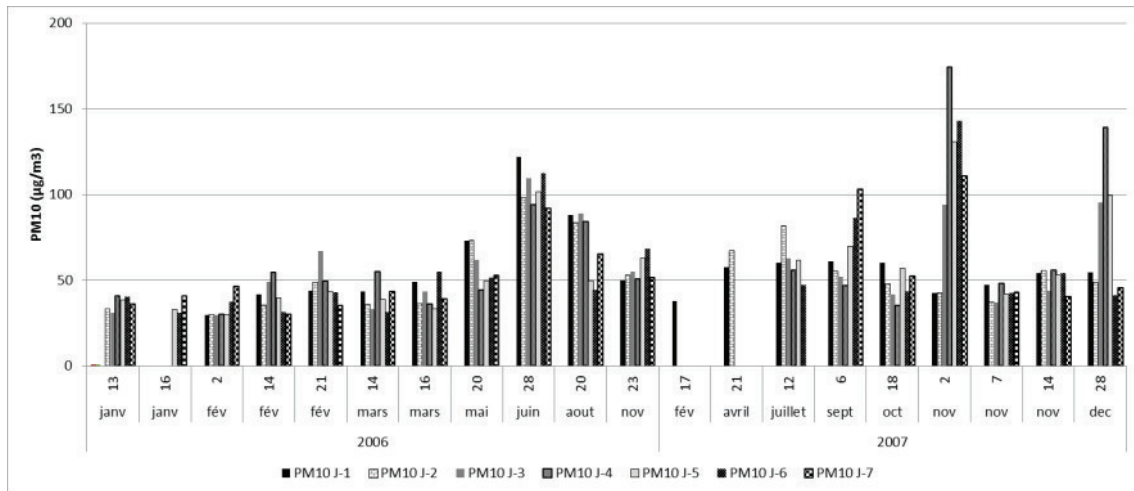


Figure 5. Variation des concentrations moyennes en PM10 précédant les jours à pics des admissions hospitalières pour pathologies cardio respiratoires

Pour le pic de 2 novembre 2007, le graphique ci-dessous (Figure 6) permet de voir que ce pic de 3 admissions hospitalières observé au service de cardiologie de l'hôpital Farhat Hached fut précédé des conditions thermiques loin d'être stressantes.

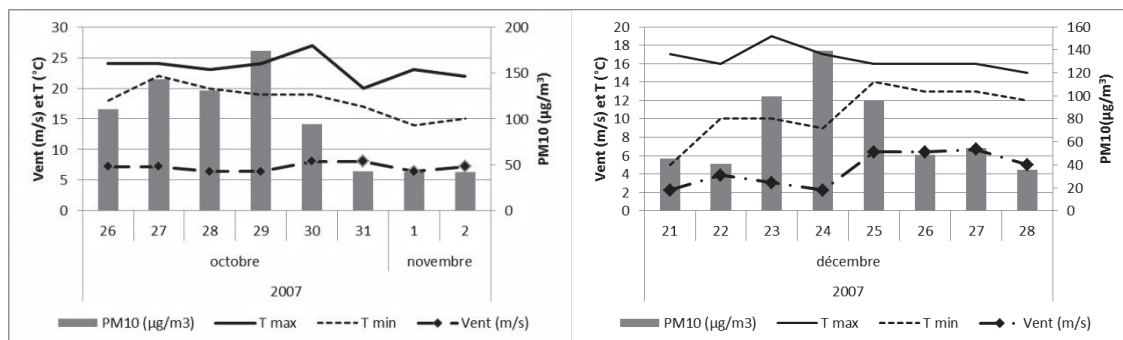


Figure 6. Variation de la vitesse du vent, de la température et de la concentration de PM10 dans l'air précédant les deux pics d'admissions hospitalières du 2 novembre et 28 décembre 2007

En effet, malgré sa légère décroissance, la température et surtout la maximale, reste toujours supérieure à 20°C. Cependant, les concentrations moyennes quotidiennes en PM10 dépassent souvent 100µg/m³ et atteignent le 29 octobre, par conditions synoptiques stabilisatrices (Figure 7 a), des valeurs critiques (174µg/m³).

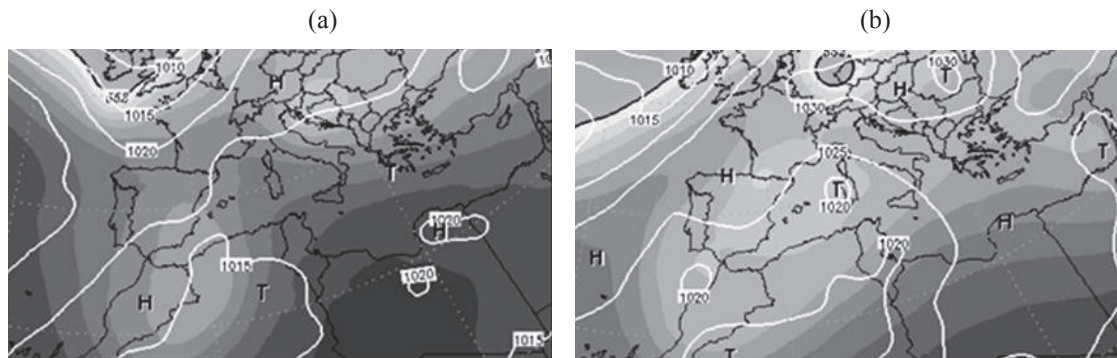


Figure 7. Situation synoptique le 29 octobre (a) et le 24 décembre 2007 (b)

Pour le second pic observé le 28 décembre au service de pneumologie de l'hôpital FarhatHached (3 admissions), quoique la température minimale atteigne un niveau très faible notamment le 21 décembre (jour-7), la température maximale demeure, durant toute la semaine précédant ce pic, supérieure à 16°C (température clémente). La faiblesse de la vitesse du vent en relation avec un champ barométrique anticyclonique (Figure 7 b) ne fait que renforcer la sensation du confort thermique, mais ne favorise pas la dispersion de la pollution. L'examen de la variation quotidienne des concentrations atmosphériques en PM10 laisse apparaître que le niveau de pollution a dépassé les 100µg/m³ entre le 23 et le 25 décembre.

Globalement, les conditions climatiques précédant ces deux pics de novembre et décembre 2007 ne montrent pas des conditions de stress climatique assez claires auxquelles on pourrait attribuer cette recrudescence des admissions hospitalières au service de cardiologie comme au service de pneumologie. Par contre, le niveau de pollution atmosphérique particulaire précédant ces deux pics fut exceptionnel.

Conclusion

En somme, la pollution atmosphérique particulaire à Sousse peut atteindre et assez fréquemment, des niveaux élevés qui se sont révélés à risque pour la santé respiratoire et cardiovasculaire notamment pendant la saison fraîche. De ce fait, ce type de pollution mérite plus d'attention de la part des chercheurs et des acteurs dans le domaine de la santé et de la qualité de l'air. Notamment, il faut plus de stations et plus de campagnes de mesures pour suivre non seulement les concentrations atmosphériques en PM10 mais aussi en PM2.5 et en PM1.

Bibliographie

Brook RD, 2008 : Cardiovascular effects of air pollution in *Clinical Science*, **115**, 175-187.

Helaoui Z. et Slama M., 2007 : Pluie et pollution atmosphérique à Tunis (Tunisie). XX^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Tunis, 301-306.

Filleul L., Medina S et Cassadou S., 2003 : La pollution atmosphérique particulaire urbaine : de l'épidémiologie à l'impact sanitaire en santé publique. *Revue d'épidémiologie et de santé publique*, **51**, N°5, 527-542.

Lahmar L., 2016 : *Climat et maladies cardio respiratoires à Sousse et Kairouan (Tunisie)*, PAF, Sarrebruck, 664 p.

Organisation Mondiale de la Santé, 2005 : Lignes directrices OMS relatives à la qualité de l'air (www.who.int/phe/health_topics/outdoorair_aqg/fr/).

CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE CONTEXTE URBAIN CONTEMPORAIN

AIT ABDELKADER M. H.

Université Mouloud Mammeri (U.M.M.T.O.) de Tizi-Ouzou (Algérie). Adresse électronique : www.mohamedtizi@hotmail.fr.

Résumé : Les zones bâties en ville contribuent directement à l'élévation des températures par comparaison avec les espaces campagnards voisins, provoquant de cette manière des "îlots de chaleur urbains". En sus d'imperméabilité des espaces urbains et du manque de végétation, le changement climatique engendrera une transformation dans l'emploi des chauffages et de la climatisation par les citadins. Les matériaux des milieux urbains ont une inertie thermique plus grande que la terre ; à la fin de la journée, la ville se refroidit peu rapidement que les zones rurales d'alentours. Les villes sont formées d'une masse de surfaces (immeubles, toitures, rues, ...), pour cette raison, beaucoup d'énergie solaire y est assimilée. Cependant, la compacité d'obstacles ne laisse pas les rayons solaires de gagner les rues. Comme cela, la chaleur restituée par les surfaces est susceptible de se maintenir davantage dans les rues voire même après le crépuscule.

Mots-clés : changement climatique ; environnement urbain ; îlot de chaleur urbain ; perméabilité des sols.

Abstract : *Climate change in the contemporary urban context* - The built-up areas in the city contribute directly to the rise of temperatures in comparison with the neighboring country areas, causing in this way "urban heat islands". In addition to the impermeability of urban spaces and the lack of vegetation, Climate change leads to a transformation in the use of heating and cooling by city dwellers. Materials in urban environments have greater thermal inertia than earth; at the end of the day, the city cools down rather slowly than the surrounding rural areas. Cities are made up of a mass of surfaces (buildings, roofs, streets, etc.), for this reason, a lot of solar energy is assimilated. However, the compactness of obstacles does not let the sun rays to reach the streets. Like this, the heat restored by the surfaces is likely to remain more in the streets or even after the twilight.

Keywords : climate change ; Urban environment ; Urban heat island ; Soil impermeability.

Introduction

Parmi les grands enjeux environnementaux et écologiques urbains, le changement climatique est l'un des plus importants à être le centre d'une menace anticipée de la part de la communauté scientifique.

Plus de la moitié des principales villes en Afrique et en Asie sont localisées sur le littoral ou près de lui. La région méditerranéenne ne se soustrait pas au phénomène d'urbanisation rapide qui touche la totalité de notre planète terrestre depuis le début de XX^e siècle. La croissance naturelle, l'exode rural et la modernité poussent toujours davantage de populations rurales à venir dans des villes qui s'amplifient, s'étendent et modifient de plus en plus l'occupation du sol. Mais pourtant, les agglomérations urbaines et industrialisées ont des caractéristiques bien distinctes des espaces campagnards et naturels ; les répercussions sur certains facteurs du climat sont différentes aussi.

Les activités humaines affectent l'environnement et l'air, elles transmettent et diffusent aussi de la chaleur et des polluants par l'emploi de chauffages, les entreprises industrielles et le trafic routier qui concourent à intensifier ces « îlots de chaleur urbains ». Les villes rejettent aussi des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, entre autres, le dioxyde de carbone -(CO₂) qui participa aussi au réchauffement climatique d'origine anthropique. L'environnement urbain dispose de propriétés radiatives, thermiques et aérodynamiques qui sont d'une tout autre nature que les zones naturelles et rurales, qui influent sur la température de l'air et limitent la vitesse du vent.

1. L'îlot de chaleur urbain (I.C.U.)

Le changement climatique est capable de transformer et d'être à l'origine de certains risques naturels, autrement dit de phénomènes parfois catastrophiques susceptibles d'affecter durement les populations urbaines. Mise en présence de tous ces événements naturels, une ville quelconque est plausiblement peu ou prou atteinte. Cette précarité relève de divers paramètres, notamment l'urbanisme, les fonctions économiques régionales, la présence de fondations de défense et de sauvegarde, et le pouvoir d'achat des foyers familiaux citadins. Par conséquent, dans les agglomérations urbaines, le coût des vagues de chaleur est considérablement lié à l'urbanisme, aux structures installées, au mode de logement et d'ancrage géographique, ainsi qu'aux styles de vie.

Les villes sont soumises à des conditions climatiques spécifiques qui se distinguent par des températures de surface la plupart du temps plus élevées que dans des espaces éloignés du centre ville. Ce phénomène mis en évidence par un « îlot de chaleur urbain » pour la première fois en 1820 à Londres (Landsberg, 1981), et a fait l'objet, à partir des années 1980, des premiers travaux expérimentaux en climatologie urbaine.

En accord avec différents résultats réunis par Oke (1987), la différence de température liée à l'I.C.U. peut passer de 2°C pour une petite ville de 1000 habitants à 12°C pour une agglomération de plusieurs millions d'habitants.

L'apparition et l'accentuation d'un îlot de chaleur urbain (I.C.U.) est liée à la combinaison de divers facteurs, en premier lieu les conditions météorologiques. L'écart de température entre le milieu urbain et l'espace rural limitrophe se manifeste par temps clair et calme ou par vent faible et est dans l'ensemble plus prononcé en début de nuit (Landsberg, 1981).

L'I.C.U. est soumis à une oscillation diurne. Il s'intensifie ou commence à se manifester graduellement au cours du refroidissement nocturne suite au faible refroidissement dans les secteurs les plus-urbanisés, comparés aux espaces péri-urbains. Le plus souvent, l'I.C.U. se fait sentir juste après le crépuscule, puis s'atténue rapidement dès les premières lueurs du soleil. L'intensité de l'I.C.U. s'atténue avec l'augmentation de la force du vent. Ainsi l'I.C.U. disparaît avec des vents de plus de 11 m/s. L'intensité de l'I.C.U. s'atténue avec l'augmentation de la nébulosité. Les nuages atténuent le refroidissement radiatif nocturne au moment où se fait sentir l'I.C.U. Les I.C.U. sont plus fréquents en saison chaude, et moins fréquents en saison froide. Néanmoins, l'intensité maximale des I.C.U. est la même quelque soit la saison (O.N.E.R.C., 2009).

Trois stratégies envisageables pour la diminution de l'I.C.U. sont : la plantation d'arbres, les toits végétalisés et les surfaces de haut albédo, c'est-à-dire les surfaces qui réfléchissent une portion élevée du rayonnement solaire (O.N.E.R.C., 2009).

1.1. Impact de l'I.C.U. sur les ressources énergétiques des immeubles

L'I.C.U. est favorisé par la substitution des sols végétalisés et perméables par des édifices et matériaux imperméables ou étanches. La mise en parallèle des propriétés radiatives des espaces urbains et campagnards laisse percevoir les mécanismes physiques qui déterminent la mise en place de ce phénomène (De Munck, 2013).

L'I.C.U. résulte de la combinaison des facteurs qui provoquent une augmentation générale de la température dans les villes avec des répercussions sur la consommation énergétique des immeubles (édifices). L'interaction des manifestations de transfert de chaleur et de masse dans un contexte urbain et renforcées par les facteurs anthropiques contribuent à intensifier l'I.C.U. et à affaiblir de la ressource énergétique des immeubles (Doya, 2010).

1.2. Confort et variation thermiques en ville et leurs répercussions sur les besoins hydrauliques et électriques

En rapport immédiat avec la question du stress thermique et du sentiment de bien-être, la hausse des températures urbaines dans l'avenir permet d'établir des prévisions sur la croissance de l'utilisation d'énergie en rapport avec le recours abusif à la climatisation (notamment les installations à air conditionné). En se rapportant à la méthode des « analogues climatiques » évoquée par Hallegatte *et al.* (2007), et au modèle de canopée urbaine T.E.B. - B.E.M. cité par Bueno *et al.* (2012), ces auteurs ont prévu une progression de la consommation d'énergie d'ici à la fin du siècle ; en effet, l'usage respectif de climatisation et de chauffage courants serait en mesure de se pondérer mutuellement et peut-être même de s'inverser en climat futur.

Ainsi, du fait de variation de température provoquée par l'évolution climatique à venir, les sollicitations en chauffage hivernal devraient être amenées à diminuer et les demandes en climatiseurs à portée d'augmenter. Ces dernières risquent de survenir en période estivale, et changer la commodité et le sentiment du bien-être thermique en ville dans le cadre d'accès plus difficiles à l'électricité (et par suite d'éventuels surenchérissements ou d'éventuels coupures). De fait, la production électrique est spécialement fort subordonnée à la ressource hydraulique ; une élévation de la température des nappes et cours d'eau est susceptible d'affecter la source froide des centrales nucléaires et thermiques habituelles, et la baisse de la réserve en eau des barrages en saison chaude (compte tenu du risque de diminution du temps d'enneigement, assèchement des lacs, des cours d'eau et des marais, augmentation des débits, la fréquence plus élevée et allongement de la durée des phases de sécheresse, ...) aurait des répercussions négatives sur la production hydraulique. L'augmentation des besoins en eau hors du domaine énergétique aggraverait davantage encore la pénurie, du fait de la concurrence avec, en particulier, les secteurs agricoles et touristiques (O.N.E.R.C., 2009).

Selon certains scénarios climatiques, il est de la sorte envisagé que, autour de la Méditerranée, d'ici à 2050, et pour chaque année, approximativement, deux à trois semaines de moins requerront du chauffage, tandis que deux à cinq semaines d'autre part requerront de la climatisation. À cause de cela, l'accroissement des besoins en électricité est susceptible de varier dans l'espace, de l'hiver à l'été (O.N.E.R.C., 2009).

Ces prévisions et points de vue climatiques, environnementaux, hygiéniques et énergétiques soulignent la vulnérabilité des milieux urbains aux mutations climatiques et la nécessité impérieuse d'envisager au plus tôt des politiques d'acclimatation et de mitigation.

2. Impact de l'effet de serre sur le réchauffement climatique

Initialement, l'effet de serre est un phénomène climatique naturel au moyen duquel les couches inférieures de l'atmosphère maintiennent les radiations infrarouges diffusées par la réflexion des rayons solaires sur l'espace terrestre. L'effet de serre intervient considérablement sur la vie, puisqu'il donne la possibilité à la surface terrestre de garder une température moyenne de 15°C, tandis que sans lui, la température serait voisine de -18°C. Cependant, on observe actuellement une accentuation progressive de l'effet de serre naturel compte tenu des émissions de gaz à effet de serre issues de l'activité humaine qui sont à l'origine du réchauffement global.

3. Conséquences du changement climatique

Les villes ont constamment été exposées à des risques naturels, ainsi que les tremblements de terre, les tempêtes, les raz de marée, les glissements de terrain et inondations. Les impacts du changement climatique sur la ville sont susceptibles d'avoir de sévères retombées sur la

santé, les ressources alimentaires et les besoins matériels, spécifiquement pour les habitants de la ville qui vivent dans le besoin, les familles urbaines nécessiteuses, les modes de peuplement et d'ancrage géographique informels et d'autres groupes en situation précaire (comme les personnes âgées, les enfants, les femmes, les handicapés et les groupes sociaux minoritaires). Les impacts du changement climatique vont de la recrudescence de la fréquence des phénomènes météorologiques intenses et des inondations à la hausse des températures et aux soucis de santé publique (Guide pour l'adaptation au changement climatique des villes).

3.1. L'imperméabilisation des sols et l'extension des phénomènes (risques) urbains

Une ville qui ne prend pas au sérieux les effets futurs du changement climatique est exposée à des périls inhérents aux mutations climatiques. Il en est de même aussi de l'imperméabilisation des sols, entre autres ; la sophistication graduelle des aires naturelles et leur revêtement par des asphaltes, des pavés et des cadres bâtis réduisent l'infiltration et accroissent fortement le ruissellement. Cette étanchéité est une des raisons éventuelles d'extension du risque d'inondation dans les espaces urbains (O.N.E.R.C., 2009).

Le changement climatique, aura des effets accentués sur le débit des cours d'eau, à travers une fluctuation du régime des pluies et de chutes de neige, et à travers la diminution ou disparition des glaciers de montagne. En fonction de la situation et de l'implantation géographique, l'exposition aux crues des cours d'eau peut de la sorte être aggravée. À ces aléas de crue des cours d'eau, renforcés dans les agglomérations urbaines, vient s'ajouter celui des inondations par ruissellement au cas où les dispositifs d'écoulement des eaux de pluie sont débordés par l'intensité des pluies. Par ailleurs, il est approprié ici d'ajouter l'impact de l'imperméabilisation des sols, qui abaisse la propriété d'absorption immédiate du sol et accroît ainsi les débits supérieurs aux capacités des réseaux de drainage. Ces dangers sont spécialement importants dans les régions où se produisent de graves épisodes de précipitations torrentielles, à l'image des zones urbaines méditerranéennes (O.N.E.R.C., 2009).

L'évolution de l'intensité et de la durée des épisodes de sécheresses, l'élévation de la température, et les précipitations intenses provoquent le retrait-gonflement des argiles, et les changements climatiques déjà attestés pourraient conduire à une combinaison de ces phénomènes (O.N.E.R.C., 2009).

Quelques-uns des sols argileux sont en mesure de s'enfler et de se tasser en lien avec des variations de leur teneur en eau. Quand, derrière un édifice ou un immeuble, le tassement est irrégulier, au cas où, entre autres, le sol sous l'immeuble ne s'humidifie ou ne s'assèche pas au même rythme et proportion que le sol extérieur, des dommages quelquefois considérables peuvent être causés à la construction, en particulier si cette dernière a des soubassements légers. Les dégâts aux infrastructures sont de toute façon importants et irrévocables, ce qui implique de démolir les bâtiments (O.N.E.R.C., 2009).

De multiples autres risques peuvent être aggravés en raison du changement climatique ; notamment les feux de forêt, les avalanches, mouvement de terrain, gonflement et érosion des sols, dangers d'accidents technologiques occasionnés par des aléas naturels. Les répercussions du changement climatique sur ces risques sont toutefois insuffisamment connues. (O.N.E.R.C., 2009).

Nonobstant, pour chaque ville, les modalités ou les caractères de l'habitat et des constructions et le degré d'organisation et de disposition de la communauté et des instances urbaines influent la plupart du temps immédiatement sur l'étendue de ces aléas. Au sein de nations développées, les risques ont été notablement contenus suite à des décennies d'engagements dans le secteur d'habitat et des infrastructures urbaines (CIVIS, 2009).

3.2. La pollution

Le changement climatique peut être à l'origine de la recrudescence des pollutions urbaines, notamment dans les espaces urbains où diverses concentrations de polluants ont été mesurées. En réalité, certains polluants à l'exemple de l'ozone sont engendrés par l'effet de la chaleur et du rayonnement solaire sur les gaz d'échappement. L'existence de plages et de rivages de grand beau temps en saison estivale peut aussi contribuer au développement des crises de pollution de ce type. Mais ce péril est nuancé selon que l'on s'installe dans un environnement à concentration plus ou moins forte du trafic routiers, influant sur les émissions de gaz d'échappement et de projections de composés organiques volatils (C.O.V.) (O.N.E.R.C., 2009).

3.3. Conséquences sanitaires

Le changement climatique aura certains effets bénéfiques sur la santé, à l'instar du déclin de la mortalité suite au froid, les températures hivernales devenant plus clémentes. Pourtant, sans capacités d'acclimatation, les préjudices hygiéniques occasionnés par l'accroissement de la fréquence et de l'intensité des canicules, surtout sur la bordure méditerranéenne méditerranéen méridionale, et une importante recrudescence des maladies transmises par la nourriture et par d'autres agents (comme les moustiques et quelques espèces d'acariens) risquent de se multiplier (O.N.E.R.C., 2009).

Quel que soit l'épisode d'émission, les prévisions des scénarios climatiques font ressortir une hausse des températures moyennes estivales et une accentuation de la variabilité des températures annuelles, l'ensemble provoquant des aléas soutenus de vagues de chaleur en été. Le vieillissement des populations urbaines accroît certes la vulnérabilité, et aggrave les risques sanitaires (O.N.E.R.C., 2009).

L'élévation des températures moyennes est en phase d'élargir de nouveaux environnements qui pourraient renfermer plusieurs maladies tropicales, dont les enfants seront fréquemment les victimes. En d'innombrables zones urbaines, le paludisme, par exemple, représente un risque sérieux (CIVIS, 2009).

Les jeunes générations et les personnes âgées sont davantage soumises au stress thermique, plus spécialement dans les agglomérations urbaines pauvres où les hauts niveaux de saturation et l'insuffisance d'espace libre et de verdure engendrent des I.C.U. intenses (CIVIS, 2009).

3.4. Les effets sur l'activité touristique

Les villes pourraient devoir faire face à de multiples impacts inhérents au changement climatique, que ce soient des incidents graves à l'instar des inondations et d'autres phénomènes naturels ou des pertes activités subordonnées à une fluctuation des flux touristiques (O.N.E.R.C., 2009).

L'attraction d'une destination touristique est la conséquence de plusieurs données, et plusieurs d'entre elles sont attachées aux variations climatiques. Certaines y sont en rapport direct (journées d'ensoleillement et température moyenne estivale, chute de neige en hiver, etc.), alors que d'autres y sont en rapport indirect (disponibilité et qualité de l'eau, aires naturelles et culturelles, etc.) (O.N.E.R.C., 2009).

Le changement climatique a également des retombées conditionnelles sur le tourisme au moyen de son impact sur les écosystèmes. Les feux de forêt et le stress hydrique capables de le suivre peuvent susciter des transformations importantes de la végétation et des configurations paysagères. Le malaise thermique causé par l'élévation des températures estivales en milieu urbain est susceptible par ailleurs d'avoir un grand effet sur l'activité

touristique, autour du bassin méditerranéen et dans les principales villes, où les températures sont toujours augmentées par les I.C.U. Cet inconfort urbain est susceptible de provoquer une fluctuation de la fréquentation touristique générale, et une répartition différente de la fréquentation touristique en fonction des saisons (redoublement du flux touristique au printemps et en automne par exemple) (O.N.E.R.C., 2009).

Conclusion

L'environnement urbain détermine les propriétés radiatives, thermiques et hydriques de surface dans les villes. La couche superficielle du sol, son couvert végétal et sa teneur en eau, les fonctions ou les activités des citoyens qui entraînent des transferts de chaleur et des émissions de polluants, et le tissu urbain, avec ses équipements de construction et une certaine structure des édifices, sont les plus importants agents de cette modification des conditions climatiques.

Le changement climatique intervient dans la hausse des températures moyennes et de l'élévation du niveau de la mer à l'échelle mondiale. Il est susceptible de modifier les régimes météorologiques, aggravant de telle manière l'amplitude et la fréquence des vagues de chaleur et des tempêtes. En admettant que les régimes politiques internationaux s'accordent à faire diminuer les émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble de la planète ; et dans une proportion appréciable de la part des pays développés, on pourra épargner des dégâts ou des dommages graves à l'échelle mondiale.

L'enjeu capital de l'urbanisme pour les prochaines années, est de parvenir à une meilleure adéquation entre une expansion inéluctable des villes et un environnement urbain agréable. Sous l'action du réchauffement climatique, les climatologues prévoient une dégradation de la qualité de vie dans les villes, et des répercussions sur la capacité de résistance physiologique des populations urbaines à la chaleur, surtout au moment des épisodes de canicules.

Bibliographie

- Bueno B., Pigeon G., Norford L. K., Zibouche K., Marchadier C., 2012 : Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme, *Geoscientific Model Development (G.M.D.)*, **5**, 433-448.
- Communauté Intercommunale des Villes Solidaires du Sud (CIVIS), 2009 : Quelles sont les implications du changement climatique pour votre ville ? *Cities Alliance*, Numéro 1, Washington DC, Version électronique sur Internet (www.citiesalliance.org), 4 p.
- De Munck C., 2013 : *Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville*, Thèse de l'Université de Toulouse, Spécialité : Océan, Atmosphère et surfaces continentales, Sous la direction du Mme LEMONSU Aude.
- Doya M., 2010 : *Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense*, Thèse de l'Université de La Rochelle, Discipline : Génie Civil, Sous la direction de ALLARD Francis et BOZONNET Emmanuel.
- Guide pour l'adaptation au changement climatique des villes, Résumé analytique, *The World Bank Group*, Washington DC, Version électronique sur Internet (siteresources.worldbank.org), 8 p.
- Hallegate S., Hourcade J. C., Ambrosi P., 2007 : Using Climate Analogues for Assessing Climate Change Economic Impacts in Urban Areas. *Climate Change*, **82**, 47-60.
- Landsberg H. E., 1981 : *The Urban Climate*. Academic Press, New York, 285 p.
- Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (O.N.E.R.C.), 2009 : *Villes et adaptation au changement climatique. Rapport au premier ministre et au Parlement*, Version électronique sur Internet.
- Oke T. R., 1987 : *Boundary Layer Climates*. Methuen, Seconde édition, London, 435 p.

STRATÉGIES DES VILLES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

ILOTS DE CHALEUR URBAINS

JUVANON DU VACHAT R.

Société Météorologique de France, 73 avenue de Paris, 94165 Saint-Mandé Cedex. Mail : rjduvachat@gmail.com

Résumé : *Le réchauffement global de la planète augmente régulièrement même si l'accord de Paris (décembre 2015) veut limiter cette hausse à 2°C ; les scénarios extrêmes peuvent aller jusqu'à 6°C en 2100 (GIEC). Les villes qui concentrent plus de la moitié de la population du globe depuis 2007 (ONU) sont très vulnérables à ces hausses de température comme l'a montré la canicule de 2003 en France avec ses 15 000 morts ! Par ailleurs l'îlot de chaleur urbain aggrave cette hausse de température et les grandes métropoles tentent de réduire ses effets néfastes grâce à l'architecture et à l'urbanisme. Nous illustrons ceci à Rennes et à Rome avec le programme de recherche POPSU, enfin à Paris avec le projet Epicéa.*

Mots-Clés : *Réchauffement climatique, Adaptation au changement climatique, Villes, Ilot de chaleur urbain.*

Abstract : *Cities and climate change – Urban heat islands Planetary global warming regularly increases even with the Paris agreement (december 2015) trying to limit the temperature increase to 2°C ; that generates extreme scenarios going up to 6°C for 2100 (IPCC). Cities concentrate more than half of the world population since 2007 (UN) and are very vulnerable to these temperature increases as demonstrated in France during summer 2003 with 15 000 casualties! In large cities, urban heat islands aggravate the effects of temperature warming. These agglomerations try to reduce the adverse effects of their urban heat island by the architecture and the urban planning. We illustrate these actions in Rennes and Rome with the research program POPSU, then in Paris with the project Epicéa.*

Keywords : *Global warming, Climate change adaptation, Cities, Urban heat island.*

Introduction : Ville et Climat

Depuis 2007 plus de la moitié des habitants de la planète vivent en ville (77% en Europe) et ce sera 70% en 2050. Aujourd'hui les villes consomment environ 75 % de l'énergie mondiale et émettent 80 % des gaz à effet de serre de la planète entière. Ceci souligne l'importance du thème de la ville qui apparaît dans beaucoup d'agendas (Climat, Habitat, ONU en général). Sur le plan de la météorologie (ou du climat) la ville apparaît comme un paradoxe puisque les variables météorologiques (climatiques) doivent être mesurées dans des espaces dégagés selon les normes de l'OMM, ce qui n'est pas le cas des villes. Cependant depuis une quinzaine d'années le thème de la météorologie (voire climatologie) urbaine s'est développé et a donné lieu à des colloques où se confrontent des observations et des modélisations. Ainsi le 9^{ème} colloque international sur le climat urbain (ICUC) tenu à Toulouse en 2015 a rassemblé plus de 200 communications ! Tout ceci est la découverte que la météorologie (climatologie) appliquée doit s'intéresser aux lieux où résident les habitants, c'est-à-dire les villes ! Cette évolution s'est souvent faite grâce aux spécialistes de la pollution qui utilisent les données météorologiques en plus des mesures de pollution faites en ville. N'oublions pas cependant le véritable ancêtre de la météorologie urbaine Luke Howard, qui publia en deux volumes le climat de Londres en 1818 et 1820, à partir d'observations météorologiques (cf. Howard, 2012). A cette époque, il notait un écart des températures nocturnes de 3,7°C entre le centre de Londres et la campagne environnante, ce qui représente les premières mesures de l'îlot de chaleur urbain (ICU) qui va nous intéresser ici. L'îlot de chaleur urbain (ICU) représente l'écart important de température (4 à 5°C) entre le cœur de la ville (béton, constructions minérales) et la périphérie qui est voisine de la campagne.

Ainsi lors de la canicule d'août 2003 on a observé à Paris un écart important de température entre le centre et la périphérie ! Ce phénomène d'ICU entraîne la difficulté de récupération la nuit de l'organisme humain et peut causer des décès comme lors de la canicule

d'août 2003, qui a occasionné en France une surmortalité catastrophique (Hémon et Jouglà, 2003).

Par ailleurs le réchauffement climatique mondial ne cesse de croître, malgré des engagements de limitation (COP21, Paris, 2015) et pourrait atteindre 1,1°C à 6,4 °C en 2100. Bien sûr le phénomène d'ICU qui touche toutes les grandes villes est aggravé par ce réchauffement global et devient un enjeu important que ces villes doivent maîtriser. En particulier, en cas de scénario extrême du GIEC la canicule 2003 pourrait survenir un été sur deux, il faut donc s'y préparer.

Le projet de recherche POPSU (Terrin, 2015) s'est intéressé à cette évolution de l'ICU dans une dizaine d'agglomérations en intégrant des chercheurs, des architectes et des urbanistes. Il a analysé comment ces villes réagissent au changement climatique futur et tentent de limiter les conséquences de l'ICU. On présente deux exemples de villes tirés de ce projet : Rennes et Rome puis les travaux parisiens dans ce domaine avec le projet Epicéa (Kounkou-Arnaud *et al.*, 2014). On conclura alors sur les enseignements de ces trois situations urbaines pour la prise en compte de l'ICU dans le cadre de l'adaptation au changement climatique.

1. Analyse de l'îlot de chaleur urbain (ICU) à Rennes

Voilà quelques réflexions sur l'ICU à partir de l'exemple de Rennes, où il a été étudié à partir d'un réseau de vingt-et-une stations avec la thèse de Foissard (2015). L'ICU peut atteindre 6,2°C entre le centre ville (station Griffon) et la station de référence « campagne » au Nord de Rennes (station Melesse). Au centre les stations ont toutes un écart supérieur à 4°C, et en périphérie les écarts mutuels ne dépassent pas 2,2°C. On observe aussi que la proximité d'espaces verts d'une certaine envergure atténue sensiblement cet écart. Ainsi à la station Prairies-Saint Martin, une zone humide avec végétation, crée un îlot de fraîcheur.

Sur le plan de sa variation annuelle l'ICU est présent toute l'année, mais significativement marqué de mars à octobre. Sa fréquence est plus importante en été qu'en hiver dans la mesure où sa formation est favorisée par un régime de ciel clair et d'absence de vent. L'ICU a aussi une variation quotidienne : les écarts de température sont plus faibles dans la journée et augmentent dès le coucher du soleil jusqu'à la fin de la nuit. C'est un phénomène essentiellement nocturne.

Pour quantifier les fréquences d'apparition d'ICU nocturne à Rennes, Xavier Foissard (2015) utilise le modèle ARPEGE avec le scénario médian A1B sur la période 1950-2100 et calcule la température maximale moyenne T_x . Cette température maximale sera comparée aux valeurs 25°C (journée d'été) et 30°C (journée très chaude). Il obtient alors le nombre moyen de jours par an où T_x est supérieur à 30°C (i), compris entre 25 °C et 30°C (ii), les autres cas (iii) et compare la climatologie simulée 2050-2079 avec la climatologie observée 1981-2010. Les résultats figurent dans le Tableau 1 ci-dessous.

On observe que le nombre de journées chaudes ($T_x > 25^\circ\text{C}$) pourrait doubler dans le futur, passant de 43,7 à 87,9 par an et que le nombre de journées très chaudes ($T_x > 30^\circ\text{C}$) pourrait tripler selon ce scénario A1B. Rappelons que le nombre de journées très chaudes a doublé à Rennes entre les périodes 1950-1979 et 1980-2009. Enfin selon ce scénario médian A1B, la température moyenne à Rennes augmentera de 2,1°C.

Tableau 1 : Nombre de journées par an très chaudes ($T_x > 30^\circ\text{C}$), chaudes ($25^\circ\text{C} < T_x < 30^\circ\text{C}$) ou normales (simulation comparée à l'observation). Number of days per year very hot ($T_x > 30^\circ\text{C}$), hot ($25^\circ\text{C} < T_x < 30^\circ\text{C}$) or normal (simulation compared to observation).

Nombre de jours par an	T _x > 30°C	25°C < T _x < 30°C	T _x < 25°C
Observation (1981-2010)	9,4	34,3	321,6
Simulation (2050-2079)	34,6	53,3	277,4

Dans la suite de ce travail à Rennes, Foissard (2015) a analysé l'environnement urbain du réseau d'observation pour trouver une corrélation avec l'ICU et préciser les conditions de sa formation. Pour cela, il a utilisé deux indices caractérisant l'occupation du sol au voisinage de la station : la fraction de végétation et la fraction bâtie-imperméabilisée. Ainsi le site de référence « campagne » est composé d'une fraction bâtie de 5% contre 90% de végétation. A l'inverse le contexte de la station Griffon est composé de 5% de fraction de végétation contre plus de 40% de fraction bâtie, avec une hauteur moyenne des bâtiments de dix-huit mètres.

Ressortent alors les causes suivantes de l'ICU classées par ordre hiérarchique d'importance :

- 1) Les surfaces verticales : les façades des bâtiments et des murs absorbent la chaleur.
- 2) Le phénomène de « canyon urbain » : une faible fraction de ciel visible ou une forte fraction d'immeubles hauts favorise la rétention de la chaleur.
- 3) La nature des matériaux (albédo compris) et la réduction des flux d'air.
- 4) L'augmentation de la chaleur sensible au détriment de la chaleur latente : diminution de l'eau en ville qui réduit l'évapotranspiration.
- 5) L'activité humaine : circulation automobile, chauffage,...

Clairement c'est la même conclusion à laquelle aboutissait Oke (1978) mais dans le contexte urbain nord-américain !

2. La ville de Rome face au changement climatique

La ville de Rome veut protéger son patrimoine artistique et culturel mais aussi augmenter sa résilience face aux événements extrêmes dans le cadre du réseau « Défi 100 villes résilientes ». Rome se trouve à vingt-cinq kilomètres à vol d'oiseau du littoral et la ville se déploie au cœur de la plaine alluviale du Tibre, qui constitue un bassin hydrique où pénètre la brise de mer (le fameux « Ponentino Romano ») qui garantit l'aération de Rome. Cependant l'expansion urbaine de la fin des années soixante-dix avec la construction de lotissements, villas périurbaines et logement social en direction de la côte ont réduit l'intensité des brises (Terrin, 2015). Ainsi le phénomène d'îlot de chaleur n'a fait que s'accroître à Rome. Par ailleurs la ville est sensible aux vagues de chaleur comme en juillet 2007, où la température diurne a atteint 40,6°C tandis que la température nocturne restait à plus de 27°C.

Une carte de vulnérabilité climatique de la ville de Rome a été réalisée pour analyser les effets d'îlot de chaleur et les zones inondables (le changement climatique pouvant renforcer la fréquence d'épisodes pluvieux, dont Rome est parfois le théâtre). Pour cela le territoire a été divisé en fonction des classes définies par le plan d'occupation des sols du Latium produit en 2013 et les impacts calculés à partir des images infra-rouges du satellite MODIS. Les valeurs de vulnérabilité pointent les secteurs du territoire communal où la concentration d'habitants âgés (plus de 65 ans) ou jeunes (moins de 12 ans) est la plus forte. Deux facteurs de résilience sont calculés à partir de l'indice de végétation NDVI. L'un concerne l'étendue et la qualité de

la couverture végétale de la zone considérée, l'autre le degré de proximité des parcs ou jardins, zones qui permettent une récupération nocturne plus rapide de l'organisme humain. En intégrant aussi des données liées aux inondations passées on a obtenu une carte synthétique de la vulnérabilité climatique de Rome (Terrin, 2015).

Cette carte de vulnérabilité distingue trois anneaux concentriques à partir du centre : les Murs d'Aurélien ; l'anneau intermédiaire ; le Grande Raccordo Annulare (GRA). A l'extérieur du GRA la vulnérabilité est limitée sauf au Sud-Ouest avec la vallée du Tibre qui reste une zone à risques. La première couronne rencontrée a une vulnérabilité moyenne (plus forte au Nord-Est avec le risque d'inondations). La partie centrale est la plus vulnérable en particulier au Nord-Est et surtout aux périodes nocturnes l'été pour la partie la plus centrale. On découvre aussi deux secteurs moins vulnérables qui pénètrent jusqu'au cœur de la ville : le parc archéologique de l'Appia Antica et le parc étrusque de Veio. Apparaît enfin une zone plus vulnérable encadrée par les voies consulaires Casilina et Tiburtina, dont la vulnérabilité résulte de plusieurs facteurs (densité de population, sols imperméabilisés, vulnérabilité aux températures nocturnes, risque d'inondations pluviales).

Deux projets pilotes ont aussi été développés dans le cadre du programme POPSU pour limiter la vulnérabilité climatique et en particulier l'ICU. Il s'agit de la requalification de la zone d'habitations à loyer modéré Tor Sapienza (Est) et du pôle d'échanges de l'avenue Marconi (Sud-Ouest).

Sur la zone Tor Sapienza l'artère routière principale a été réduite en largeur pour maintenir la perméabilité des sols voisins et le réseau routier redimensionné, avec des ralentisseurs de vitesse. En outre, un réseau piétonnier et cyclable facilite les déplacements et l'accès au réseau ferroviaire. Tout ceci maintient inchangés la perméabilité des sols et l'interaction entre espaces ouverts et zones résidentielles, ce qui assure des températures modérées l'été, compte tenu des régimes de pluie et des vents dominants.

Le pôle d'échanges Marconi comprend une gare de trains régionaux, une station de métro, une gare routière et un parc relais de six cent places. Sur la carte de vulnérabilité climatique l'avenue Marconi présente des pics de chaleur estivale élevés. Avec les transformations de la via Ostiense voisine et des flux de circulation engendrés, on peut craindre une aggravation de ces îlots de chaleur. Ainsi tout l'espace situé entre l'avenue Marconi et la vallée du Tibre, au délicat équilibre hydrogéologique, est repensé dans une continuité spatiale et fonctionnelle entre la ville, le quartier et le fleuve. Pour lutter contre les inondations, le parc relais comporte un pavement au sol qui alterne portions pavées et portions perméables, avec un système diffus de drainage des eaux de pluie, utilisées en partie pour le nettoyage du sol et l'irrigation. En outre un système de stockage des eaux de pluie et d'écoulement différé de 200 m³ de capacité pour un événement exceptionnel de 43 mm par heure, ce qui permettrait de retarder de 12h l'introduction des eaux de pluie dans le réseau urbain.

Pour finir soulignons que la participation au projet « Défi 100 villes résilientes » a permis d'élaborer une stratégie en 2016. Notons qu'à Rome la conservation du patrimoine impose des contraintes particulières, même si ce patrimoine a permis de maintenir une présence significative de la nature jusqu'au centre historique. Cet aspect est particulièrement important pour contenir le développement de l'ICU. La capacité de maintenir cet équilibre avec la nature permet de réaliser la synthèse entre la part symbolique de la ville éternelle et les exigences du développement contemporain.

3. Le projet Epicéa pour la ville de Paris

A Paris le projet Epicéa a associé Météo-France, le CSTB et la ville de Paris pour évaluer l'ICU lors de la canicule d'août 2003, particulièrement intense à Paris et les stratégies

d'adaptation à développer pour le limiter. Le projet s'est focalisé sur période du 8 au 13 août pendant laquelle les températures les plus élevées ont été relevées et un pic de surmortalité a été observé en France et plus particulièrement à Paris (Rousseau, 2005). Une cartographie détaillée à échelle fine (250m) du couvert urbain-végétal a été réalisée par l'atelier parisien d'urbanisme (APUR), et une représentation du bâti à cette échelle proposée par le CSTB.

Les simulations Méso-NH (Lafore *et al.*, 1998) avec les schémas de surface TEB (Masson, 2000) et Isba (Noilhan et Planton, 1989) ont pu être réalisées à cette échelle très fine de 250m. Cinq scénarios ont été simulés pour limiter l'écart de température de l'ICU. Le scénario S1 modifie les propriétés radiatives des toits et des murs, avec forte émissivité et un albédo proche de 1 (on blanchit les surfaces). Le scénario S2 verdit les surfaces de sol nu et la moitié des rues larges, ce qui augmente la végétation de 89% dans Paris *intra muros*. Le scénario S2bis est le scénario S2 mais avec arrosage régulier de la végétation, pour que l'évapotranspiration se fasse naturellement. Dans S3 on arrose les rues comme cela se pratique en Espagne ou au Japon par fortes chaleurs. Enfin le scénario total Stot combine les trois premiers scénarios (avec S2bis). Voilà les résultats obtenus.

Dans le cas du scénario S1, la structure spatiale de l'ICU dans Paris *intra muros* est similaire à la simulation de référence mais avec diminution d'intensité pouvant aller jusqu'à 1°C. S2 n'apporte quasiment aucune modification à l'ICU. Avec S2bis la structure spatiale de l'ICU est modifiée, les arrondissements centraux sont encore chauds mais les zones végétales ou végétalisées gagnent 0,5 à 1°C, localement 2°C (voire 3°C dans les bois : Boulogne,...). Avec S3 l'impact sur l'ICU est limité : baisse de 0,25 à 0,5°C restreinte aux arrondissements centraux. Par contre avec le scénario complet Stot la diminution obtenue est substantielle de 1 à 2°C localement (voire 3°C dans les bois) et la structure de l'ICU est modifiée : les températures élevées se situent sur les communes proches de Paris.

Conclusion

Rappelons d'abord que des techniques traditionnelles ont été longtemps en usage dans les pays chauds pour conjuguer les effets nocifs du climat, avec des patios, des moucharabiehs, des bassins d'eau et des fontaines, comme dans les jardins du Généralife à Grenade. En Iran, en Irak ou en Egypte, on canalise l'air frais dans les villes jusqu'au cœur des habitations. Malheureusement il semble que l'architecture et l'urbanisme modernes aient oublié ces techniques ancestrales pour la construction des villes.

Cet article a analysé la situation des trois villes : Rennes, Rome et Paris face au changement climatique et leur stratégie pour réduire l'îlot de chaleur urbain grâce au projet de recherche POPSU (Rennes et Rome) et avec le projet Epicéa (Paris). Cet îlot de chaleur correspond à une différence de température de quatre à cinq degrés environ, entre le cœur des villes et la périphérie qui touche la campagne. C'est un phénomène essentiellement nocturne qui peut causer de nombreux décès lors de fortes chaleurs comme lors de la canicule 2003 à Paris.

L'analyse détaillée du phénomène d'îlot de chaleur à Rennes a été faite grâce à la présence d'un réseau d'observation conséquent. Ensuite la situation de Rome a été décrite grâce à une carte synthétique de vulnérabilité (incluant aussi les risques d'inondation du Tibre) qui permet de localiser les risques les plus élevés. En outre la ville de Rome a conservé des jardins jusque dans le centre, pour maintenir le patrimoine antique ! Enfin le projet Epicéa à Paris a été présenté. Il rejoue la canicule 2003 et fait l'évaluation comparée de techniques de réduction de l'îlot de chaleur comme le blanchiment des bâtiments, le verdissement des toits, des murs ou des chaussées ou encore l'arrosage des chaussées. Avec la meilleure stratégie on peut réduire d'environ 2°C cette différence de température de quatre à cinq degrés à Paris.

Voici maintenant quelques réflexions qui découlent de la plateforme européenne POPSU (Terrin, 2015). Il est important de bien mesurer l'ampleur thermique de l'îlot de chaleur pour pouvoir le maîtriser, grâce à un réseau d'observation correctement installé. Le climat urbain est une constellation de microclimats très locaux, du fait de la complexité géométrique des villes, où l'aspect radiatif joue un rôle important (couleur des bâtiments, ouverture des rues vers le ciel,...). La texture urbaine et son orientation influencent la pénétration du soleil (lumière et chaleur) et du vent dans la ville et par là l'îlot de chaleur. La technique idéale pour réduire l'îlot de chaleur se résume dans la formule « ville blanche, verte et bleue ». La ville blanche renvoie la chaleur grâce à des surfaces claires, la ville verte est ombragée et rafraîchie par des espaces plantés (végétalisation), enfin la ville bleue exploite les pouvoirs de rafraîchissement de l'humidité lorsqu'elle s'évapore. En voici deux illustrations pour terminer. Le projet Euroméditerranée à Marseille représente une coulée verte qui accélère la circulation du vent et un dispositif bleu avec des bassins permanents, des mares, des prairies humides,...L'effet se fait sentir jusqu'à 100m au delà du parc, portant la surface rafraîchie de 14 ha (surface du parc) à 54 ha. La ville bleue est mise en oeuvre à Toulouse dans le Grand Parc Garonne, avec le fleuve passant en centre ville et une composition très végétalisée.

Pour finir, n'oublions pas qu'il faut aussi prendre garde à l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, en évitant l'usage de la climatisation ou la densification urbaine. Enfin le concept de résilience ajoute l'aspect social aux qualités environnementales pour fédérer les villes en un réseau « Défi 100 villes résilientes » dont Paris et Rome font partie.

EPICEA : Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement Climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne (www.cnrm-game.fr/projet/epicea)

ICU : Ilot de Chaleur Urbain

POPSU : Plateforme d'Observation de Projets et de Stratégies Urbaines (www.popsu.archi.fr)

Bibliographie

Foissard X., 2015 : L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise. Thèse de Doctorat en Géographie

Hémon D. et E. Jouglu, 2003 : Surmortalité liée à la canicule d'août 2003. Rapport d'étape Inserm. 59p.

Howard L., 2012 : *The climate of London deduced from meteorological observations*. Cambridge University Press.

Kounkou-Arnaud R., J. Desplat, A. Lemonsu et J.-L. Salagnac, 2014 : Epicéa : Etude des impacts du changement climatique à Paris. *La Météorologie*, **84**, 42-48.

Lafore J.-P., J. Stein, N. Asencio, P. Bougeault, V. Ducrocq, J. Duron, C. Fischer, P. Hérel, P. Mascart, V. Masson, J.-P. Pinty, J.-L. Redelsperger, E. Richard et J. Vilà-Guerau de Arellano, 1998 : The Meso-NH atmospheric simulation system. Part I : Adiabatic formulation and control simulations. *Ann. Geophys.*, **16**, 90-109.

Masson V., 2000 : A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Bound.-Layer Meteorol.*, **94**, 357-397.

Noilhan J. et S. Planton, 1989 : A simple parameterisation of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536-549.

Oke, T.R., 1978: *Boundary layer climates*. Londres, Routledge

Rousseau D., 2005 : Analyse fine des surmortalités pendant la canicule 2003. L'événement météorologique de la nuit du 11 au 12 août 2003 en Ile-de-France. *La Météorologie*, **51**, 16-22.

Terrin J.-J., 2015 : *Villes et changement climatique—îlots de chaleur urbains*. Editions Parenthèses

CONTRIBUTION DE LA VEGETATION URBAINE A LA REGULATION DU CLIMAT : CAS DES JARDINS PUBLICS DE LA COMMUNE DU PLATEAU (ABIDJAN- CÔTE D'IVOIRE)

KOUADIO YJ-C¹, TIEBRE M-S¹, OULAÏTAR ME¹ VROH BTA¹, GONE BI ZB¹², N'GUESSAN KE¹

¹Laboratoire de Botanique, UFR Biosciences, Université Félix Houphouët-Boigny, 22 BP 582 Abidjan 22, Côte d'Ivoire.

²Centre Suisse de Recherche Scientifique en Côte d'Ivoire, 01 BP 1301 Abidjan 01

*Auteur pour correspondance : jeanclouis1012@gmail.com

Résumé - La végétation urbaine offre aux citoyens des services d'approvisionnement, socio-culturels mais surtout, elle participe à l'amélioration de l'environnement urbain. Cependant, peu d'études ont été consacrées à leurs contributions au bien-être des citoyens. L'objectif général de notre étude était de montrer l'importance des jardins publics dans la régulation du climat. Pour mener à bien cette étude, une enquête a été réalisée auprès des usagers. L'enquête a consisté, dans un premier temps, à relever les usages des 3 jardins publics. Ensuite, les paramètres dendrométriques des arbres que sont le diamètre à hauteur de poitrine (DBH) et la hauteur ont été relevés. Il ressort de cette étude que le repos reste la raison principale de visite. Les jardins constituent pour les citoyens des îlots de fraîcheur. Le stock de carbone séquestré par l'ensemble des trois jardins publics s'élève à 618,02 tC/ha.

Mots clés : Végétation urbaine, services écosystémiques, climat, Abidjan.

Abstract - *Economic evaluation of the recreation services of three public garden of the plateau township (Abidjan - Côte d'Ivoire)*

Urban vegetation provides city-dwellers with supply, socio-cultural to their contributions to the well-being of urban dwellers. The general objective of our study was to show the importance of public gardens in the regulation of the climate. To carry out this study, a survey was carried out among the users. The survey consisted, first, of raising the uses of the 3 public gardens. Then, the dendrometric parameters of the trees, the diameter at breast height (DBH) and the height, were recorded. The study shows that rest is the main reason for visits. The gardens are a source of freshness for city dwellers. The carbon stock sequestered by all three public parks amounts to 618.02 tC / ha.

Keywords: Urban vegetation, ecosystem services, climate, Abidjan.

Introduction

Les espaces verts urbains, issus de propagation naturelle ou plantés par l'être humain contribuent au bien être physiologique, sociologique et économique des citoyens (Carreiro & Zipperer, 2008). La réflexion pour des villes durables, pourvoyeuses de bien-être humain a contribué au développement de ces surfaces vertes par la création de parcs nationaux urbains, jardins aménagés, plantations d'alignement, squares, jardins botaniques, aires de jeux et des pelouses. Ils constituent aujourd'hui de véritables zones refuges de la biodiversité (Morsink *et al.*, 1989). Plusieurs pays africains à l'instar de la France et du Canada (Carter, 1995), ont opté, pour la création et la promotion de ces espaces. Cependant, cette prise de conscience reste encore timide et se limite aux villes des pays à faible couvert forestier (FAO, 2012). En Côte d'Ivoire, dans la ville d'Abidjan, les arbres occupent divers habitats. Malheureusement, ces espaces verts en général et les jardins publics en particuliers sont soumis à d'intenses pressions anthropiques du fait de l'urbanisation incontrôlée et de l'incivisme de la population (Akionla, 2012). Cette situation préjudiciable à l'environnement urbain pourrait être atténuée si les liens entre ces espaces et le bien-être des citoyens étaient développés.

Malheureusement, il existe peu d'études sur les jardins publics de la ville d'Abidjan et elles traitent de leurs diversités floristiques (Vroh *et al.*, 2014 ; Kouadio *et al.*, 2016. Celles relatives à leur contribution dans la régulation du climat sont rares et doivent être encore documentées. Ainsi, l'objectif général de cette étude est de montrer l'importance des jardins publics dans la régulation du climat. De façon spécifique, il s'agit d'estimer le stock de

carbone et d'identifier les perceptions des usagers sur la contribution des jardins publics dans la création de microclimat urbain.

1. Site, Matériel et méthodes

Abidjan est la principale ville de Côte d'Ivoire, située dans la région des lagunes au sud-est. Elle s'étend sur une superficie de 57 735 ha et comptait en 2014, 6.351.086 habitants selon l'Institut National des Statistiques (INS). La présente étude a été réalisée dans la commune du Plateau (2,5 km²) en forme de presqu'île entourée par la lagune Ébrié (Figure 1).

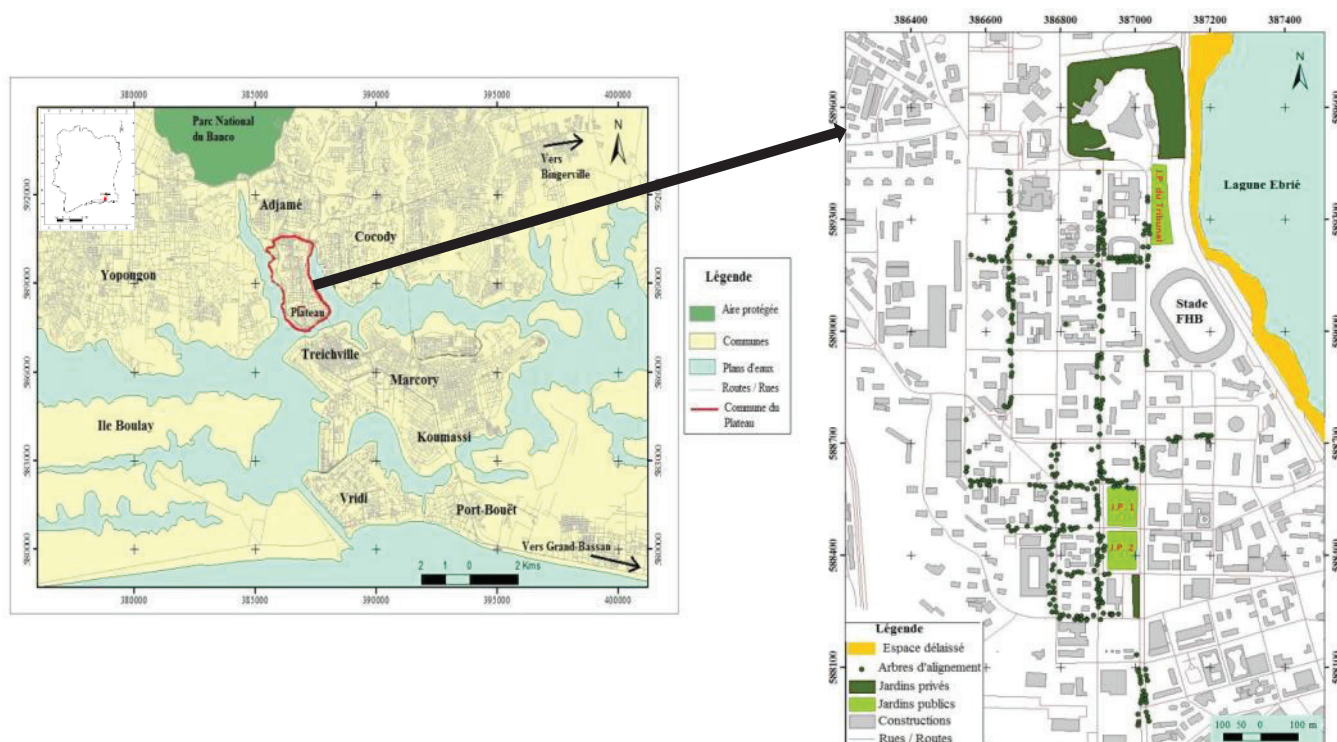


Figure 2. Situation géographique de la zone d'étude et des différents jardins publics (J.P1 ; J.P2 et J.P du tribunal)

Nous avons parcouru pendant 3 semaines, de 8h à 18h, les trois jardins publics de la commune du Plateau (Figure 1), soit 1 semaine par site, pour dénombrer le nombre de visiteurs, recueillir auprès de ces usagers les raisons de visite. Au total, 569 visiteurs ont participé à cette enquête (308 enquêtés dans le J.P1; 102 dans le J.P2 et 159 dans le jardin public du tribunal).

L'estimation du stock de carbone s'est fait par l'intermédiaire de la biomasse végétale. Cette dernière a été estimée à partir de modèles allométriques en utilisant les paramètres dendrométriques que sont le diamètre à hauteur de poitrine (DBH) et la hauteur des arbres (Brown et Lugo., 1984 ; Brown, 1997). En raison des lacunes en matière d'équations allométriques spécifiques aux espèces dans les zones urbaines (Nowak *et al.*, 1996 ; Jo, 2002), il a été utilisé, pour cette étude, des équations allométriques générales d'arbres urbains connues sous le nom de « Urban General Equations » (Aguaron & McPherson, 2012). Selon le type morphologique de l'espèce (arbres, palmiers), deux équations allométriques spécifiques ont été utilisées. Ces différentes équations s'écrivent comme ci-après.

$$\text{Biomt (arbres)} = 0,16155 \times \text{DBH}^{2,310647} ; \text{Biomt (palmiers)} = 1,282 \times (7,7 H + 4,5)$$

Dans ces formules, Biomt désigne la biomasse totale exprimée en kg/tige et H, la hauteur totale de l'arbre mesurée en mètre ; DBH désigne le diamètre à hauteur de poitrine exprimé en

cm. Enfin, la biomasse totale a été convertie en stock de carbone correspondant, en la multipliant par 0,5 (Brown et Lugo, 1992 ; Malhi *et al.*, 2004 ; GIEC, 2006 ;).

En ce qui concerne les analyses statistiques, nous avons procédé par le test de χ^2 pour comparer les proportions des différentes raisons de fréquentation. La signification du test est déterminée en comparant la probabilité P associée à la statistique du test au seuil $\alpha = 0,05$. Un test post-hoc a permis de discriminer les proportions pour lesquelles il existe une différence. Par la suite, l'Analyse des Correspondances Multiples (ACM) a consisté à discriminer les différents jardins publics décrits par les usages. Un test non paramétrique de Kruskal-Wallis a permis de comparer les stocks de carbone des différents jardins publics. Ce dernier test a été utilisé car les données présentaient des variances inégales et non normalisées. Le logiciel R version 3.1.3 a été utilisé pour la réalisation de ces tests statistiques.

2. Résultats

2.1. Heures de visite des jardins publics

Au total, 798 visiteurs par jour ont été recensés pour les 3 jardins publics. Ils se répartissent comme suit : 425 pour le jardin public 1, 150 pour le jardin public 2 et 223 visiteurs pour le jardin public du tribunal. Dans ces espaces, les heures de visite vont de 8 heures à 16 heures et au-delà (Figure 2). Lorsqu'on considère la proportion des visiteurs en fonction des heures de visites, la plus faible proportion de visiteurs est de 4,85% pour les visiteurs fréquentant les jardins publics entre 14 heures et 16 heures. Par contre, la plus forte proportion de visiteurs qui est de 73,79% est obtenue pour les visiteurs qui fréquentent les jardins publics entre 12 heures et 14 heures.

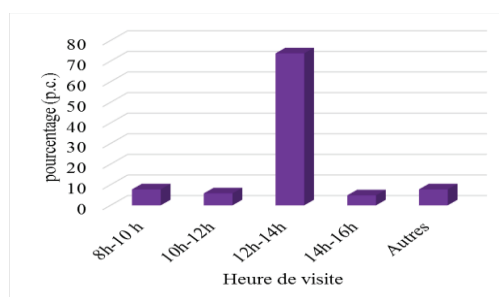


Figure 3. Heures de visite des usagers des jardins publics

2.2. Raisons de la fréquentation des jardins publics

Le repos/ombrage constitue la principale raison de fréquentation des jardins publics (Figure 3). Il est cité par 45% des visiteurs. Il est suivi par la pratique de cérémonie (17%). La plus faible proportion de visiteurs est enregistrée chez les visiteurs dont la raison de visite reste l'inspiration (6,4%). Les proportions des autres raisons de fréquentation restent intermédiaires à ces deux valeurs. Ces proportions sont statistiquement différentes les unes des autres ($\chi^2 = 874,97$; $P < 0,001$). La carte factorielle des raisons de visite en fonction des sites montre que chaque jardin public est distinct de l'autre selon les possibilités d'usages qu'il offre aux visiteurs (Figure 4). Ainsi, on distingue quatre (4) groupes de visiteurs. Dans le jardin public 1, on rencontre un premier groupe (G 1) d'usagers dont la plus grande tranche s'y trouve pour un rendez-vous, une partie de jeu ou encore pour une restauration. Le deuxième groupe de visiteurs qu'on rencontre dans le jardin public 2 utilise cet espace pour des besoins de cérémonies. Sur le jardin public du tribunal, la raison majeure de visite évoquée par le troisième groupe de visiteurs est le repos. Cet espace offre à ces visiteurs la tranquillité et le calme. Le dernier groupe de visiteurs rencontrés (G 4) est celui de ceux qui profitent de l'ombrage et la fraîcheur de ces espaces.

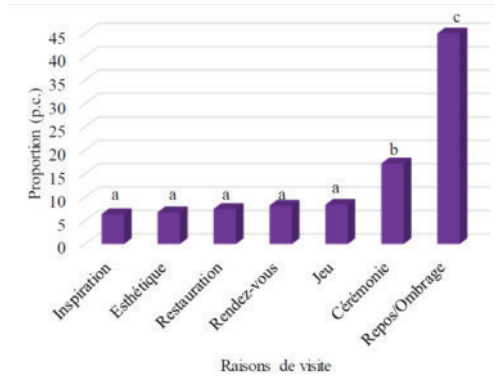


Figure 4. Proportion des différentes raisons de visite des jardins publics. (Les proportions portant les mêmes lettres sont statistiquement identiques)

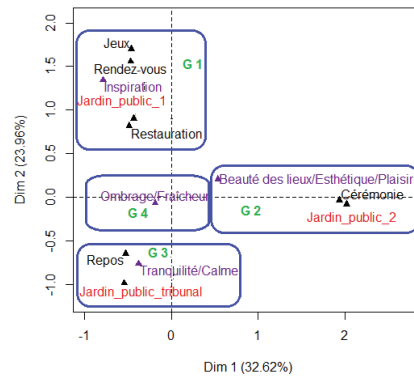


Figure 5 : Carte factorielle de la raison de présence des usagers en fonction des jardins publics

2.3. Stock de carbone séquestré des jardins publics

Le stock de carbone séquestré par l'ensemble des trois (3) jardins publics est de 618,02 tC/ha. Il varie de $357,78 \pm 594,58$ tC/ha pour le jardin public 1 à $869,82 \pm 1001,88$ tC/ha pour le jardin public 2. Celui du jardin public du tribunal reste intermédiaire à ces deux valeurs (Tableau 1). Le test de comparaison de moyenne indique qu'il n'existe aucune différence significative entre ces valeurs ($\chi^2 = 0,42$; $P = 0,81$).

Tableau 1. Stock de carbone des différents espaces échantillonnés

Variable	Jardin Public 1	Jardin Public 2	Jardin Public tribunal	Statistique du test	
				χ^2	P
Stock de carbone (tC/ha)	$357,78 \pm 594,58$	$869,82 \pm 1001,88$	$626,47 \pm 1502,27$	0,42	0,81

3. Discussion

Dans les jardins publics présents dans la commune du Plateau, les heures de forte affluence se situent entre 12 heures et 14 heures. En effet, les visiteurs étant en majorité des travailleurs, c'est pendant la pause de la mi-journée qu'ils ont la possibilité d'utiliser ces sites. Plusieurs raisons justifient leur présence en ces lieux. Sur le jardin public 1, l'aménagement d'espaces de restauration, de banquettes et surtout l'ombrage fourni par les grands arbres qui s'y trouvent pourraient expliquer le choix de ce site par les visiteurs comme lieux de rendez-vous, de restauration et de pratique de jeu. En effet, comme l'ont déjà signalé Alonso *et al.* (2002), le choix d'un site dépendrait de la localisation géographique, la conception paysagère et les équipements disponibles. Les mêmes observations ont été faites par Boutefeu *et al.* (2007) qui soulignent que le choix des espaces verts comme lieux de rendez-vous est d'autant plus courant lorsque les jardins sont aménagés de banquettes. Ceux-ci permettent aux visiteurs de s'asseoir et se reposer à l'ombre (Alonso *et al.*, 2002). La pratique de jeu sur le jardin public 1 est du ressort des joueurs de PMU (Paris Mutuel Urbain). Outre les installations des guichets PMU à proximité du site, le cadre favorise une meilleure inspiration des joueurs qui profitent de l'ombrage et de la fraîcheur pour mieux réfléchir à leurs différentes combinaisons gagnantes. Sur le jardin public du tribunal, la forte densité des espèces arborescentes permet aux visiteurs de bénéficier également de l'ombrage et de la fraîcheur pendant leur moment de repos. En effet, dans la commune du Plateau, en période de forte chaleur, les citoyens aspirent tous à la fraîcheur des jardins publics. Ces espaces constituent ainsi un moyen de lutte contre

la chaleur urbaine. Ces résultats confirment ceux de Leblanc et Malaisse (1978) obtenus dans leur étude sur l'écosystème urbain de la ville de Lubumbashi. Ces auteurs ont constaté que les quartiers commerciaux de la ville qui disposaient de plus de bâtiments possédaient un microclimat plus chaud que les quartiers résidentiels dotés d'espaces verts. Une étude sur les écarts de température entre les zones urbaines fortement minéralisées et les espaces comportant des végétaux (parcs, boisés urbains, terrains gazonnés) a montré que la différence de température pouvait atteindre 12° C (Sieghardt *et al.*, 2005; Hardin et Jensen, 2007).

Les visiteurs du jardin public du tribunal disent y venir aussi pour bénéficier d'un moment de tranquillité. En effet, la végétation urbaine en se substituant en écran contre le bruit permet aux populations de s'abstraire de ce fléau et en conséquence d'évacuer le stress urbain. Ce constat corrobore les travaux de Kuo (2001). La pratique de cérémonies de mariage et de baptême sur le site du jardin public 2 relève du fait que les organisateurs prennent en compte le caractère esthétique du site. Cette beauté du site serait la conséquence de l'aménagement et l'agencement des espèces de plantes portant de belles fleurs qui inspirent l'enchantement et cadrent bien avec l'évènement. Plusieurs études ont montré que l'aspect esthétique des arbres apprécié par les habitants et les visiteurs compte comme l'une des valeurs principales associées à la végétation urbaine (McPherson *et al.*, 2007). La séquestration du carbone par les arbres des jardins publics du Plateau implique un retrait de CO₂ atmosphérique et un stockage du carbone fixé par ceux-ci. La séquestration du carbone par des arbres urbains est donc un service écosystémique permettant la régulation du climat ; le dioxyde de carbone (CO₂) l'un des gaz à effet de serre étant désigné comme la première cause du réchauffement climatique (GIEC, 2006). En Côte d'Ivoire, le ministère en charge de l'environnement l'estimait déjà en 2011 à 0,31 tonne métrique par habitant (MINEF, 2011). Le district d'Abidjan qui compte 4 653 592 habitants enregistre le plus fort taux de rejet de CO₂ (1 442 613,52 tonne métrique). C'est pourquoi, il convient d'assurer la protection de ces jardins publics et mieux d'encourager la création d'espaces verts publics afin que ce patrimoine arboré continue de jouer son rôle compensatoire dans les émissions du dioxyde de carbone.

Conclusion

Dans les jardins publics de la commune du Plateau, la raison principale de visite reste le repos. Ces espaces procurent aux usagers de l'ombrage, la fraîcheur, la tranquillité, et l'esthétique. Ainsi, les jardins publics du plateau sont perçus par les populations comme des îlots de fraîcheur pendant les périodes de forte chaleur. Les jardins publics participent également à la régulation du climat à travers la séquestration du carbone. Ainsi, il convient d'assurer leur protection et mieux d'encourager la création d'espaces verts publics afin que ces derniers continuent de jouer leur rôle dans la lutte contre le changement climatique.

Bibliographie

Aguaron E. & McPherson E.G., 2012: *Comparison of Methods for Estimating Carbon Dioxide Storage by Sacramento's Urban Forest*. Urban Ecosystems and Social Dynamics Program, USDA Forest Service, 1731 Research Park Dr, Davis, CA 95618, USA 300 p.

Akionla M.A., 2012 : *Diversité et fonctions des formations végétales dans la ville de Porto-Novo*. Mémoire de DESS en Gestion de l'Environnement, Université de Parakou (Bénin), 83 p.

Alonso C., Boutefeu E. & Wiplier N., 2002 : *Pratiques et usages dans trois espaces verts publics de Lyon*, cedex 06, 60.

Boutefeu B., 2007 : *La forêt comme un théâtre ou les conditions d'une mise en scène réussie*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure, Lettre et Sciences, Paris (France), 525 p.

- Brown S. & Lugo A. E., 1984 : Biomass of tropical forests : a new estimate based on forest volumes. *Science* **223** (4642): 1290-1293.
- Brown S. & Lugo A.E., 1992 : Aboveground biomass estimates for tropical moist forests of the Brazilian Amazon. *Interciencia* **17** (1): 8-18.
- Brown S., 1997: Estimating biomass and biomass change of tropical forest. Food and Agriculture Organisation (FAO) vol **134**, 93 p.
- Carreiro M.M. & Zipperer W.C., 2008 : Urban Forestry and the Eco-City: Today and Tomorrow. In: *Ecology, Planning, and Management of Urban Forests: International Perspectives*, Springer, Dordrecht (Pays-Bas), 435-456.
- Carter E.J., 1995 : *L'avenir de la foresterie dans les pays en développement: un document de réflexion*. FAO, 95 p.
- FAO, 2012 : Etude sur la foresterie urbaine et périurbaine de N'Djaména, Tchad. FAO, 95p.
- GIEC 2006 : Guide pour l'inventaire national des gaz à effet de serre ; agriculture, foresterie et autre usage des terres. Institute for Global Environmental Strategies Japon, **4**, 46-52.
- Hardin P.J. & Jensen R.R., 2007 : The Effect of Urban Leaf Area on Summer time Urban Surface Kinetic Temperatures. *Urban Forestry & Urban Greening*, **6**, 63-72.
- Jo H., 2002 : Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea. *Journal of Environmental Management*. **64**, 115-126.
- Kouadio Y.J.C.; Vroh B.T.A., Gone Bi Z.B., Adou Yao C.Y., & N'Guessan K.E., 2016 : Evaluation de la diversité et estimation de la biomasse des arbres d'alignement des communes du Plateau et de Cocody (Abidjan - Côte d'Ivoire). *Journal of Applied Biosciences*, **97**, 9141-9151.
- Kuo F.E., 2001: Coping with poverty: Impacts of environment and attention in the inner city. *Environment and Behaviour*, **33**, 5-34.
- Leblanc M. & Malaisse F., 1978 : *Lubumbashi, un écosystème urbain tropical*. Centre International de Sémiologie, 178 p.
- Malhi Y., Baker T.M., Phillips O.L., Almeida S., Alvarez E., Arroyo L., 2004 : The above-ground coarse wood productivity of 104 neotropical forest plots. *Global Change Biology*, **10**, 563-91.
- McPherson E.G., Simpson J.R., Peper P.J., Gardner S.L., Vargas K.E. & Xiao Q., 2007 : *Northeast Community Tree Guide – Benefits, Costs, and Strategic Planting*. Center for Urban Forest Research, General Technical Report, Consultée le 13 août 2015.
- MINEF, 2011 : *Atelier sous régional sur les stratégies de réduction des gaz d'échappement des véhicules et autres engins motorisés*. Allocution de Monsieur le ministre de l'environnement, des eaux et forêts, 5 p.
- Morsink W.A.G., Ubbens R.M.U., Pickering J.R., Perkins R.G., & Lewis-Watts P.A., 1989 : An urban forestry strategy for Ontario. *The Forestry Chronicle*, **65** (2), 97-101.
- Nowak D.J., Rowntree R.A., McPherson E.G., Sisinni S.M., Kerkmann E., Stevens J.C., 1996 : Measuring and analyzing urban tree cover. *Landscape and Urban Planning* **36**: 49 – 57
- Sieghardt M.E., Mursch-Radlgruber E., Paoletti E., Couenberg A., Dimitrakopoulos F., Rego A., Hatzistathis & Randrup T.B., 2005 : The Abiotic Urban Environment: Impact of Urban Growing Conditions on Urban Vegetation. In: *Urban Forests and Trees: A Reference Book*, Springer, 281-323.
- Vroh Bi T.A., Tiebre M-S. & N'Guessan K.K., 2014 : Diversité végétale urbaine et estimation du stock de carbone: cas de la commune du Plateau, Abidjan, Côte d'Ivoire. *Afrique science*, **10** (3), 329- 340.

RISQUES CLIMATO-PATHOLOGIQUES DES MALADIES HYDRIQUES À SFAX (TUNISIE) : PERCEPTION DE LA VULNÉRABILITÉ PAR LA POPULATION ET MODALITÉS DE GOUVERNANCE

JARRAYA M.

Université de Sfax, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Laboratoire Syfacte, route de l'aéroport Km 4,5
3000 Sfax BP 1168 - Tunisie - Tél : 00216 74 670 544 Fax : 00216 74 670 540 [jarrayamounir@gmail.com]

Résumé – Les maladies infectieuses d'origine hydrique prolifèrent en automne à Sfax. L'analyse de leurs aspects climato-pathologiques montre une concordance entre la hausse de la morbidité et la prédominance des ambiances inconfortables dues à la chaleur et à l'humidité élevées. D'autres facteurs socio-environnementaux, dont l'hygiène qui en constitue un élément capital, aggravent la vulnérabilité des individus à ces maladies. La gouvernance des risques liés à ces maladies infectieuses s'appuie sur une sensibilisation consolidée et continue du public, afin de réduire les causes « anthropiques » de l'infection.

Mots-Clés : maladies infectieuses hydriques, aspects climato-pathologiques, hygiène, gouvernance.

Abstract - Climatic-pathological risks of water diseases in Sfax (Tunisia): perception of the vulnerability by the population and governance modalities.

Infectious waterborne diseases proliferate in autumn in Sfax. The analysis of their climatic-pathological aspects shows a concordance between the increase in morbidity and the predominance of uncomfortable atmospheres due to heat and high humidity. Other socio-environmental factors aggravate the vulnerability of individuals to these diseases, of which hygiene is a crucial element. Governance of the risks associated with these infectious diseases relies on a consolidated and continuous public awareness to reduce the "anthropogenic" causes of the infection.

Keywords : Infectious waterborne diseases, climatic-pathological aspects, hygiene, Governance.

Introduction

Les maladies infectieuses hydriques comme le paludisme, la diarrhée, l'hépatite A... constituent une source de gêne majeure pour la santé publique et une cause de morbidité et de mortalité élevées. Selon les estimations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), les maladies hydriques sont à l'origine de 9% de la morbidité et de 6% de la mortalité enregistrées chaque année à l'échelle mondiale. Au niveau des pays en développement, ces taux atteignent 11% au niveau de la morbidité et 6% au niveau de la mortalité (OMS, 2016). Ces maladies se présentent en permanence dans le tableau clinique dans le secteur de la Santé de Base en Tunisie. La mise en œuvre d'un programme national de lutte contre ces maladies (DSB, 2009) reflète les soucis qu'elles représentent aussi bien chez les planificateurs sanitaires que chez les praticiens. Ces maladies, largement fréquentes dans les régions tropicales humides (Same-Ekobo, 1997 ; Siala *et al.*, 2003), sont favorisées par un contexte climatique chaud et humide. Les maladies hydriques représentent un risque pour la santé compte tenu de la diversité des symptômes gênant le bien-être, voire des répercussions parfois cruciales sur la vie des individus. Cette thématique de risque sanitaire intègre tout élément de l'environnement extérieur qui présente une menace pour la santé des individus nécessitant ainsi une réponse propice du système de soin (Besancenot *et al.*, 2004). À Sfax, c'est en automne que la morbidité des maladies infectieuses hydriques connaît son apogée (40% de l'effectif annuel des consultations pour ces maladies). Cette morbidité est exprimée par les consultations médicales enregistrées par les Centres de Santé de Base (CSB) (appelés aussi dispensaires). L'analyse de ces données épidémiologiques permet de souligner une prépondérance automnale et cela nous incite à suggérer un lien possible avec les caractéristiques de la situation thermo-hygrométrique de l'ambiance bioclimatique, c'est-à-dire la chaleur et l'humidité élevée (température dépassant 30°C et humidité relative supérieure à 60%) enregistrée durant cette saison. Nous déterminerons les aspects et les origines de la vulnérabilité des individus non seulement à travers la morbidité, mais aussi par

le biais d'une investigation directe. Celle-ci nous permettra de mettre l'accent sur d'autres déterminants liés à l'Homme et à son cadre de vie. L'objet de ce travail est donc d'analyser tout d'abord, les aspects climato-pathologiques des maladies infectieuses hydriques à Sfax en mettant l'accent sur la vulnérabilité de la population à celles-ci. Nous chercherons ensuite à élucider la perception publique de ces risques, en soulignant la synergie avec d'autres éléments environnementaux et sociaux dans l'explication des niveaux élevés de la morbidité enregistrée en particulier en automne. Enfin, nous avancerons quelques points qui puissent aider à atténuer ces risques et constituer des éléments d'une stratégie de gouvernance de ces maladies à caractère communautaire.

1. Données et méthodes

Notre approche est rétrospective. Elle s'étale sur 7 ans (2009-2015) et repose sur plusieurs types de données : d'abord, les données météorologiques qui correspondent aux mesures tri-horaires de la température et de l'humidité relative de l'air enregistrées par la station synoptique *Sfax El-Maou*. Ensuite, les données épidémiologiques qui coïncident avec le nombre journalier des consultations pour maladies infectieuses hydriques enregistrées par les CSB à Sfax. Nous notons à ce propos, que cet ensemble pathologique étudié dans le présent travail regroupe les deux maladies suivantes : la diarrhée et les parasitoses intestinales. Enfin, nous avons établi une enquête, (60 patients) dans 3 dispensaires localisés différemment dans l'agglomération de Sfax du 15 au 17 septembre 2015, qui a permis de déterminer d'autres origines de vulnérabilité à ces maladies perçue par les individus. L'observation de la fréquence des maladies hydriques nous a conduits à spécifier la fin de la saison chaude (septembre-octobre) à Sfax par une analyse des aspects climato-pathologiques. Pour analyser l'éventuel impact de l'environnement atmosphérique sur la fréquence des maladies infectieuses hydriques, nous nous sommes basés sur un diagnostic de l'ambiance biométéorologique automnale qui influe sur la morbidité enregistrée. Pour ce faire, nous avons utilisé l'indice d'humidex (*Heat Index*) (HI) dont le calcul se fait automatiquement sur le site <http://www.meteo-mussidan.fr/hum.php>, en introduisant les valeurs de la température et de l'humidité de l'air. L'avantage offert par l'humidex réside dans le fait qu'il nous renseigne sur l'état thermo-hygrométrique de l'ambiance biométéorologique, afin de déterminer son effet éventuel sur la morbidité. Nous rappelons ici que lorsque HI franchit 30, l'ambiance tend à l'inconfort. Nous notons également que nous chercherons la concordance entre une thermo-hygrométrie inconfortable et une morbidité des maladies hydriques élevée. Bien qu'il soit indirect, l'effet de ce contexte bioclimatique chaud et humide est décisif sur la morbidité puisqu'il maintient une forte activité des agents infectieux. Compte tenu de la sensibilité de ces maladies à la forte chaleur et à l'humidité extérieure, nous avons choisi de nous limiter aux seules mesures thermiques et hygrométriques mesurées au cours de la journée, c'est-à-dire à 9h, à 12h et à 15h, et de calculer la moyenne diurne de HI. Outre l'analyse des aspects de la concordance climato-pathologique automnale à l'échelle des pentades, nous mettrons l'accent sur d'autres causes socio-environnementales susceptibles d'aggraver la vulnérabilité de la population aux pathologies infectieuses hydriques.

2. Caractéristiques de la morbidité des maladies infectieuses hydriques à Sfax

À Sfax, les maladies infectieuses hydriques se caractérisent par des prévalences assez élevées au niveau de la population (une moyenne annuelle de 14102 consultations sur la période 2009-2015). L'incidence annuelle est de l'ordre de 2014 cas pour 100000 habitants. Celle-ci est largement inférieure à celle estimée par l'OMS (36000 cas pour 100000 personnes) en 2015 à l'échelle mondiale (OMS, 2016). Les maladies faisant l'objet de ce présent travail sont la diarrhée infectieuse et les parasitoses intestinales, qui représentent

respectivement 86% et 14% dans cet ensemble pathologique étudié. Ces maladies prédominent le tableau clinique et constituent un motif permanent de consultations dans les

dispensaires à Sfax. À titre illustratif, elles représentent 8,7% dans la catégorie des maladies infectieuses classées par la Direction de la Santé de Base à Sfax, un taux relativement faible compte tenu de la présence d'autres maladies de type communautaire telles que la grippe, la rhinopharyngite, les mycoses... En termes de vulnérabilité, nous notons que les nourrissons (≤ 1 an) et les enfants (≤ 14 ans) constituent les catégories d'âge les plus touchées, puisqu'ils représentent 58,7% de l'effectif total des consultations pour maladies infectieuses hydriques.

À l'échelle temporelle, la morbidité des maladies infectieuses hydriques est marquée par un régime saisonnier, qui se caractérise par une prédominance automnale (40% des consultations annuelles) (**figure 1**). Celle-ci est observée nettement dans l'accroissement régulier de la consultation mensuelle et le pic enregistré en octobre (2286 cas) (**figure 2**). Cette fréquence automnale élevée de la morbidité nous a incités à étudier l'influence de la thermo-hygrométrie de l'ambiance. Nous remarquons qu'un humidex moyen, qui demeure élevé à la fin de la saison chaude (34 en septembre), peut justifier la haute morbidité (**figure 2**). Nous suggérons donc qu'un environnement extérieur marqué par une chaleur et une humidité élevée, et donc inconfortable, favorise la forte propagation des maladies infectieuses hydriques. Par ailleurs, l'analyse de la concordance climato-pathologique à une échelle plus fine (des pentades) peut élucider certaines spécificités.

3. Un impact capital du climat... mais d'autres facteurs interviennent

3.1. Quels aspects météopathologiques automnaux ?

L'analyse de la correspondance entre la morbidité des maladies infectieuses hydriques et le contexte thermo-hygrométrique à l'échelle des pentades laisse apparaître une concordance entre une thermo-hygrométrie et une morbidité élevées durant les pentades inconfortables. C'est en septembre que l'inconfort prédomine, puisque la part des pentades enregistrant HI moyen diurne dépassant 34 et exprimant un malaise assez grand et généralisé est de l'ordre de 93% sur la période 2009-2015 (**figure 3**). C'est durant ces pentades que nous enregistrons des moyennes journalières élevées de morbidité à cause des maladies infectieuses hydriques, comme les cas de la 4^{ème} pentade de septembre 2011 (85 cas) et de septembre 2012 (83 cas) et

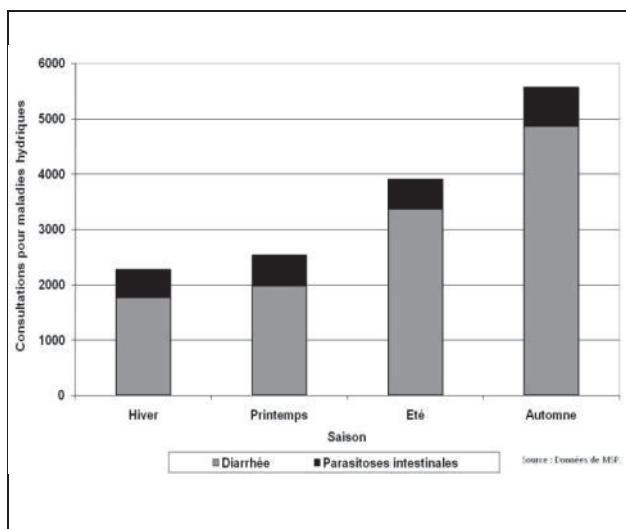


Figure 1. Variation saisonnière des maladies infectieuses hydriques (diarrhée et parasitoses intestinales) à Sfax (2009-2015)

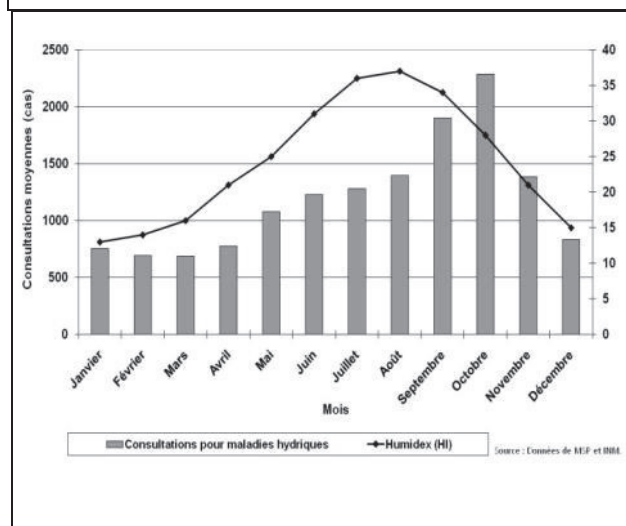


Figure 2. Variation inter-mensuelle moyenne des consultations pour maladies hydriques et d'humidex à Sfax (2009-2015)

de la 2^{ème} pentade de septembre 2013 (85 cas) (**figure 4**). En dépit de leur régression, les pentades exprimant un malaise généralisé en octobre se caractérisent par des niveaux élevés de morbidité, tel est le cas de la 3^{ème} pentade d'octobre 2015 (142 cas) et d'octobre 2014 (138 cas).

L'inconfort prédominant s'avère favorable à une forte activité des agents pathogènes responsables des maladies infectieuses hydriques : les virus de *Rotavirus*, le *Norovirus*, l'*Adenovirus*, responsables de la diarrhée infectieuse et les parasites *Giardia intestinalis* et *Enterobius vermicularis* provoquant les parasitoses intestinales. Cette sensibilité à un environnement atmosphérique chaud et humide est due à la fréquence d'un flux maritime chaud et humide, appelé *Chlouk* qui atteint Sfax au Sud-Est en automne (Ben Boubaker, 1998). Elle est accentuée par la présence de l'eau, étant donné que l'automne constitue la saison pluviale à Sfax, qui y accapare près de 40% des quantités annuelles. En tant qu'élément majeur de l'environnement, cet effet de l'eau sur la morbidité fera l'objet d'une analyse dans la partie suivante.

Si la représentation matricielle montre que généralement, la montée de l'inconfort s'associe à une augmentation notable au niveau des consultations pour maladies hydriques en septembre, nous remarquons qu'en octobre, la morbidité demeure élevée même avec l'atténuation de l'inconfort. En témoignent les cas de la 4^{ème} pentade (114 cas) d'octobre 2015 et la 4^{ème} pentade (106 cas) d'octobre 2014, qui expriment un malaise plus ou moins grand, voire avec le rétablissement du confort comme dans la 6^{ème} pentade d'octobre 2009 (87 cas) et d'octobre 2010 (87 cas) (**figure 4**). Ainsi, une thermo-hygro-métrie élevée renforce l'inconfort corporel, une telle situation qui s'avère également propice à l'enregistrement d'une morbidité croissante sous l'effet de fortes activités d'abord d'affection par la maladie, et ensuite de transmission.

Cette persistance d'une morbidité élevée peut être justifiée par des raisons épidémiologiques liées au ralentissement de l'activité des agents pathogènes responsables des maladies hydriques qui atteignent le niveau de la contamination maximale en octobre, laquelle est soutenue par une transmission inter-humaine active (Jarraya, 2016). Cela se traduit par la faible augmentation au niveau des consultations correspondantes aux modes inconfortables enregistrés en octobre en comparaison avec septembre. À titre d'exemple, un accroissement de 39,6% a été enregistré au niveau des consultations correspondantes aux modes exprimant un malaise plus ou moins grand et un malaise généralisé en septembre contre 15% enregistré en octobre. Cela peut indiquer que la saison épidémique arrive à terme.

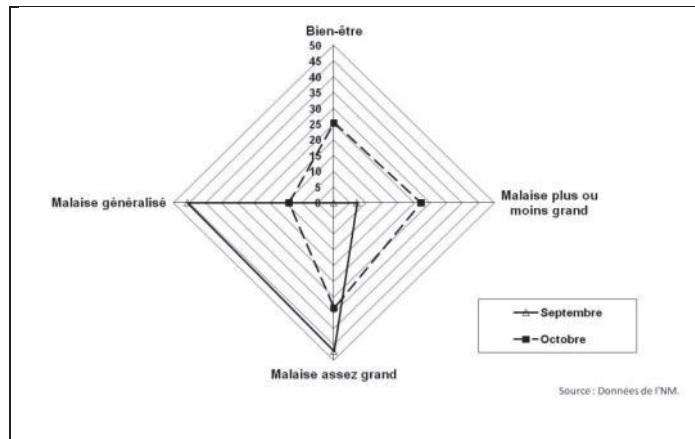


Figure 3 : Répartition des pentades selon le niveau de confort en septembre et octobre (2009-2015)

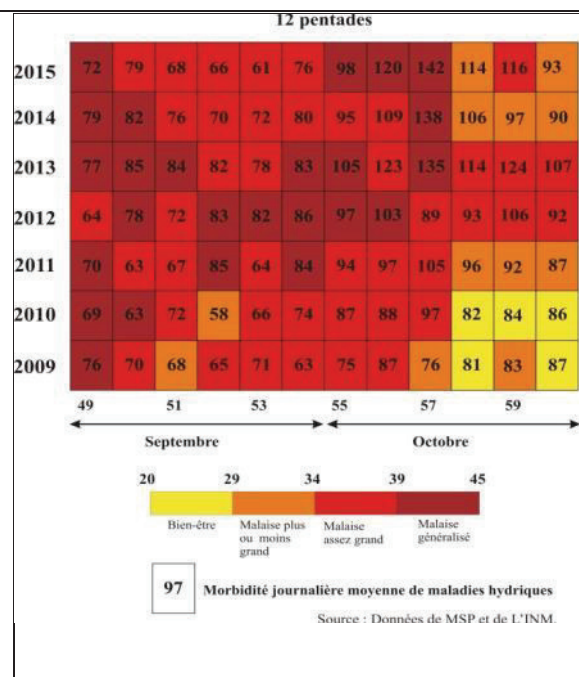


Figure 4 : Variation inter-annuelle d'humidex moyen et la morbidité des maladies hydriques associée par pentade durant la phase septembre-octobre

Par ailleurs, bien que le facteur bioclimatique soit agissant, cette fréquence automnale élevée de la morbidité des maladies hydriques ne peut pas être dissociée de son contexte socio-environnemental. Étant donné que le climat fait partie de l'environnement, nous désignons ici par « la composante environnementale », tous les éléments du milieu qui peuvent intensifier le risque d'affection par ces maladies et en particulier l'eau.

3.2. Des déterminants socio-environnementaux agissent aussi

Si cette analyse des aspects climato-pathologiques relevés aussi bien à l'échelle des décades qu'à l'échelle saisonnière affirme le rôle important que joue la situation thermo-hygro-métrique en automne dans l'augmentation de la morbidité des maladies infectieuses hydriques, l'investigation au niveau des individus qui fréquentent les CSB permet de souligner l'effet d'autres déterminants liés à l'Homme et à son cadre de vie. Il ressort de notre enquête établie en septembre 2005 que le contexte socio-environnemental agit pour déterminer la vulnérabilité des personnes aux maladies hydriques. Nous notons tout d'abord, que la quasi-totalité des personnes interrogées affirment qu'elles sont affectées par ces maladies le plus souvent en automne et donc, elles suggèrent un lien fort avec l'humidité et la chaleur élevée et donc l'ambiance inconfortable torride en automne.

Outre les virus véhiculés par l'air et qui menacent tous les individus susceptibles d'être affectés par la diarrhée infectieuse, l'hygiène hydrique constitue un facteur explicatif de ces infections. 64% des réponses des personnes interrogées ont attribué leur affection à la qualité douteuse de l'eau de boisson. Cette inculpation est justifiée par le fait qu'une eau souillée peut constituer un réservoir propice pour le développement des parasites qui peuvent survivre longtemps sous forme d'œufs, de spores ou d'oocystes et par conséquent, pénétrer dans l'organisme humain par voies transcutané ou digestif (Cheikhroukhou *et al.*, 2009). En écartant le risque d'affection par l'eau contrôlée du réseau public de la Société Tunisienne de l'Exploitation et de Distribution de l'Eau (SONEDE), l'eau stockée dans des réservoirs domestiques creusés dans la terre, appelés « *Majels* », peut être à l'origine des infections.

Le stockage de l'eau pluviale est une tradition ancienne pratiquée jusqu'aujourd'hui dans l'agglomération de Sfax (Jarraya, 2014). La qualité de cette eau de *Majel*, utilisé en premier lieu pour la boisson, est assurée par l'application d'une série de règles d'hygiène recommandées par les ancêtres, comme la propreté de la toiture qui constitue l'impluvium de collecte et l'entretien régulier de l'eau dans le réservoir. Cependant, ces règles ont été marginalisées par la société moderne, ce qui met en question la qualité de l'eau des *Majels*. La toiture non entretenue par la chaux pendant des années et l'eau de *Majel* non traitée par la chaux ou la javel, dépourvue de l'oxygène et non contrôlée par des tests bactériologiques périodiques peuvent altérer la qualité de l'eau et constituer une source de maladies hydriques, en particulier les parasitoses intestinales. Cette inculpation de l'hygiène hydrique s'associe à une si la détermination de ces paramètres personnels est très difficile lors des entretiens avec les individus, nous trouvons que le niveau socio-économique faible des ménages peut expliquer les conditions d'habitat précaires (manque d'hygiène au niveau de cuisine, salle de bain et toilette) affectant ainsi l'hygiène corporelle (en particulier fécale), ce qui accroît la vulnérabilité des personnes aux parasitoses intestinales et à la diarrhée infectieuse. Les habitants des quartiers populaires localisés au sud et à l'ouest de la ville et caractérisés le plus souvent par un niveau de vie bas, s'avèrent les plus vulnérables à ces types d'infections compte tenu de leurs revenus insuffisants et leurs conditions de vie incertaines. Cette imputation du niveau socio-économique n'exclut pas la responsabilité des individus, car l'hygiène corporelle reflète *à priori* une bonne éducation et une mentalité saine. Nous déduisons que la vulnérabilité aux maladies hydriques est en partie naturelle (l'effet des virus, bactéries et parasites soutenus par une chaleur et une humidité élevées), mais elle est due aussi à des facteurs anthropiques qui l'accroissent et qui alourdissent par conséquent le bilan de la morbidité en automne. mise en question d'autres facteurs d'infection liés à l'alimentation. Les réponses des personnes interrogées (23%) permettent de souligner que des légumes, des fruits qui ne sont pas bien « lavés » et des menus « fast-food » dont la qualité des ingrédients est incertaine, sont à l'origine de la diarrhée. Ces effets sur la santé ont été bien confirmés par les médecins en poste dans les dispensaires.

La dégradation de l'hygiène hydrique et alimentaire ne peut pas se dissocier de l'état d'hygiène domestique, à savoir les conditions d'hébergement et la propreté corporelle. Même

4. Quelques modalités de gouvernance à suivre

La gouvernance des maladies infectieuses hydriques doit tenir en compte les origines de la vulnérabilité analysées ci-dessus. Si la marge de manœuvre s'avère relativement limitée face aux agents pathogènes favorisés par l'ambiance bioclimatique automnale, un grand effort doit se déployer au niveau des origines socio-comportementales. La prévention contre ces maladies, mettant l'accent actuellement sur la lutte contre la transmission interhumaine, doit axer son effort sur la sensibilisation des individus et sur les facteurs socio-comportementaux qui les aggravent. La mise en valeur du concept de l'hygiène dans tous ses domaines d'application (hydrique, alimentaire, corporelle) au niveau domestique peut limiter les sources anthropiques de vulnérabilité. Le « redressement » du comportement des individus s'avère indispensable pour alléger la morbidité des maladies infectieuses hydriques et pour parvenir à la maîtriser dans son « niveau naturel » et pathogène. Il est important de prendre conscience de l'interférence du climatique et du pathologique, afin de diminuer les cas de morbidité. Pour ce faire, il faut mettre en place une plateforme médicale susceptible de répondre à l'augmentation des demandes en consultations médicales, voire en hospitalisations.

Conclusion

Les maladies infectieuses hydriques sont influencées par l'état de l'ambiance bioclimatique automnale et plus précisément par une chaleur et une humidité élevées, qui provoquent une grande morbidité, enregistrée dans le secteur de la Santé de Base à Sfax. Outre l'altération du niveau du confort corporel, cette ambiance offre les conditions propices à une forte activité des agents pathogènes variés et donc à une contamination massive dont les conséquences sur la morbidité sont bien notables en octobre. Bien qu'elle soit limitée dans le temps et l'espace, notre investigation des patients laisse apparaître l'effet d'autres éléments liés au cadre de vie des individus. Une hygiène hydrique, alimentaire et corporelle insuffisante peut conduire à l'affection par l'une des maladies infectieuses hydriques. Le cadre de vie peu sain, le comportement, qui sous-estime le risque, ainsi que l'enveloppe atmosphérique favorable à l'infection justifient des niveaux élevés de consultations médicales en automne. Nous déduisons que la responsabilité de l'Homme dans l'accentuation de la vulnérabilité à ces maladies est certaine, c'est pour cette raison que toute stratégie de gouvernance des risques des maladies hydriques infectieuses doit s'articuler autour du changement du comportement des individus et de l'atténuation des facteurs du risque présents dans son milieu de vie.

Bibliographie

- Ben Boubaker H., 1998 : Le flux de Sud-Est maritime (Chlouk) et ses incidences topothériques en Tunisie. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **11**, 401-408.
- Besancenot J-P, Handschumacher P., Ndione J-A., Mbaye I., Laaidi K., 2004 : Climat, eau et santé au Sahel ouest-africain. *Sécheresse*, **15** (3), 233-241.
- Cheikhroukhou F., Trabelsi H., Sellami H., Makni F., Ayadi A., 2009 : Parasitoses intestinales dans la région de Sfax (Sud tunisien) : étude rétrospective. *Rev. Tun. Infectiol.*, **3**, 14-18.
- Direction de Santé de Base (DSB), 2009 : *Rapport annuel 2009*. Ministère de la Santé Publique, Tunisie, 409p.
- Jarraya M., 2014 : L'eau de « Majel » dans l'agglomération de Sfax (Centre-Est de la Tunisie) : réponses aux contraintes climatiques, mais quels défis sanitaires ? *Actes du colloque International « Ressources en Eaux et Changement Climatique en Région Méditerranéenne »*, Hammamet 21-23 octobre 2014, 22 p.
- Jarraya M., 2016 : Bioclimatologie des infections cutanées mycosiques à Sfax (Centre-Est de la Tunisie). *EchoGéo* [En ligne], 38 | 2016, URL : <http://echogeo.revues.org/14764> ; DOI : 10.4000/echogeo.14764
- OMS (Organisation Mondiale de la Santé), 2016 : *Eau, assainissement et hygiène pour accélérer la lutte contre les maladies tropicales négligées*. Genève, 33 p.
- Same-Ekobo A., 1997 : *Santé, climat et environnement au Cameroun*. Yaoundé, Editions Jutey-Sciences, 328 p.
- Siala E., Aoun K., Zallagua N., Maatoug R., Bouratbine A., 2003 : Intérêt du dépistage des parasitoses digestives et urinaires chez les étudiants non résidents permanents en Tunisie. *Archs. Inst. Pasteur Tunis*, **80**, 29-33.

LES DECHARGES SAUVAGES DANS L'AGGLOMERATION DE SFAX : IMPACTS SANITAIRES SUR LES ENFANTS

EUCHI H., DAHECH S.

Université de Sfax, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Laboratoire SYFACTE, route de l'aéroport km 5, 3023 Sfax, Tunisie (euchihamdi@hotmail.fr et salem.dahech@gmail.com).

Résumé : *Ce papier a pour objectif de déterminer, d'une part, le nombre de décharges sauvages dans l'agglomération de Sfax et d'autre part leurs éventuels impacts sanitaires sur la santé infantile. Dans l'agglomération de Sfax, 4850 décharges sauvages sont énumérées. Conséquemment, 1000 habitants peuvent créer jusqu'à 48 points de dépôts d'ordures sauvages. Ces dernières se multiplient de plus en plus, dans les quartiers pauvres. D'après les pédiatres interrogés, des maladies respiratoires et allergiques et en particulier l'asthme et la pneumonie sont observées chez les enfants à cause des décharges sauvages, notamment celles qui sont brûlées. Depuis la dite révolution, en janvier 2011, une forte récurrence de ces maladies est enregistrée.*

Mot clés : *Décharges sauvages, morbidité infantile, Sfax.*

Abstract : *Wildlife in Sfax agglomeration: sanitary impacts on children. This paper aims to determine, on the one hand, the number of wild dumps in the agglomeration of Sfax and their possible health impacts on the children. Then, out of 4850 wild dumps are determined so 1000 inhabitants can create more than 48 wild deposit point. They are increasing in popular neighborhoods. According to the interviewed pediatricians, respiratory and allergic diseases and in particular asthma and pneumonia are observed because of burned wild dumps. After January 2011 a strong recurrence of these diseases is recorded, especially for pneumonia.*

Keywords : *Wild dumps, pediatricians, children, Sfax.*

Introduction

L'incinération des déchets génère plusieurs polluants à savoir la dioxine, le carbone, le méthane et les particules en suspension suite, essentiellement, à la combustion incomplète. Ces polluants s'amplifient et s'accumulent près ou loin de leurs sources, selon les paramètres météorologiques qui conditionnent leur dispersion à un moment donné (SFSP, 1999; NRC, 2000; Puddu, 2003; Dahech, 2007; Ngo et Régent, 2008 ; IBGE, 2009 ; Fintz, 2014).

Par ailleurs, l'inhalation des fumées issues des décharges sauvages pourrait être, à l'origine, de plusieurs maladies comme l'asthme, la pneumonie et la Broncho-pneumopathie Chronique Obstructive (BPCO) etc. (Lhuillier et Cochin, 1999 ; INVS, 2004 ; ADME, 2008; ORS, 2010).

Dans les pays en développement, comme en Tunisie, la gestion de déchets est quasi-absente. Dans l'agglomération de Sfax, située au centre-est du pays, (Fig.1 A) comptant environ 600 000 habitants (INS, 2014), la seule décharge contrôlée a été mise en place en 2008. Cependant, cet aménagement n'a pas empêché la prolifération des décharges sauvages, Cette situation s'est détériorée davantage après la dite révolution du « 14 janvier 2011 » pour plusieurs raisons. En effet, nous remarquons la dégradation des services municipaux à cause des contestations sociales incessantes des agents de la propreté, des revendications de la population riveraine qui a bloqué l'accès au site de la décharge municipale principale durant plusieurs jours successifs, sans oublier le comportement irresponsable de la population qui crée des points de dépôts des ordures ménagères sauvages. Dans ce contexte, les acteurs se trouvaient dans l'impunité juridique. Ainsi, des ordures ménagères, incinérées directement ou indirectement, dégagent des odeurs nauséabondes et des fumées, devenaient un paysage familier à Sfax (Fig.1B et C). Ces décharges pourraient avoir des conséquences sur la santé de l'Homme et en particulier des enfants car cette catégorie d'âge est caractérisée par une immaturité physiologique (Puddu, 2003).

L'objectif du présent papier est de déterminer la répartition spatiale des décharges sauvages et de montrer leur éventuel impact sanitaire sur la morbidité infantile dans l'agglomération de Sfax.



Figure 1. (A) Localisation de la zone d'étude, (B et C) deux exemples montrant les décharges sauvages prise en novembre 2011 (source : Google Earth).

1. Données et méthodes

D'abord, en s'appuyant sur une image Google Earth (Fig.1) datant du premier novembre 2015, à 50 cm de résolution, nous repérons les décharges sauvages et extrayons leurs coordonnées géographiques avant de calculer leurs diamètres en mètre et vérifier s'il y a des traces d'incinération. Puis, les données récoltées sont intégrées dans un Système d'Information Géographique (SIG) afin d'effectuer des analyses spatiales comme la répartition spatiale des décharges sauvages par secteur et/ou en fonction de la distance par rapport au centre-ville. Enfin, un questionnaire a été administré à un échantillon de 26 pédiatres, soit 56 % de la population mère pratiquant dans l'agglomération de Sfax. Il a porté sur les maladies probablement observées chez les enfants suite à leurs expositions aux émissions issues des décharges sauvages et l'éventuelle récurrence de ces maladies depuis l'année 2011.

2. Résultats

2.1. Répartition spatiale du nombre de décharges par secteur et suivant la distance au centre-ville

Nous avons dénombré 4850 décharges sauvages, réparties dans toute l'agglomération de Sfax. Leurs diamètres varient de 1 à 35 m (Fig.2). Le nombre le plus important est observé au secteur de Merkez kaïnich (délégation de Sakiet-Eddair) où 695 décharges ont été comptées. Cependant, le secteur de Sidi Salah, au nord de la ville de Sfax, ne compte que 11 décharges (Fig.2 A).

Les dépôts d'ordures ménagères se multiplient dans les secteurs caractérisés par une forte densité urbaine et en particulier dans les quartiers populaires comme à cité Bourguiba, cité El-

Bahri et Merkez Kaànich, etc. Ces quartiers sont caractérisés par la dégradation de la qualité de vie de la population et se sont implantés, parfois, dans des zones non-aménagées (SDGS2,2012 ; Dahech *et al.*, 2016). Dans les quartiers résidentiels, comme à Merkez El-Bacha et Gremda, la situation est moins alarmante.

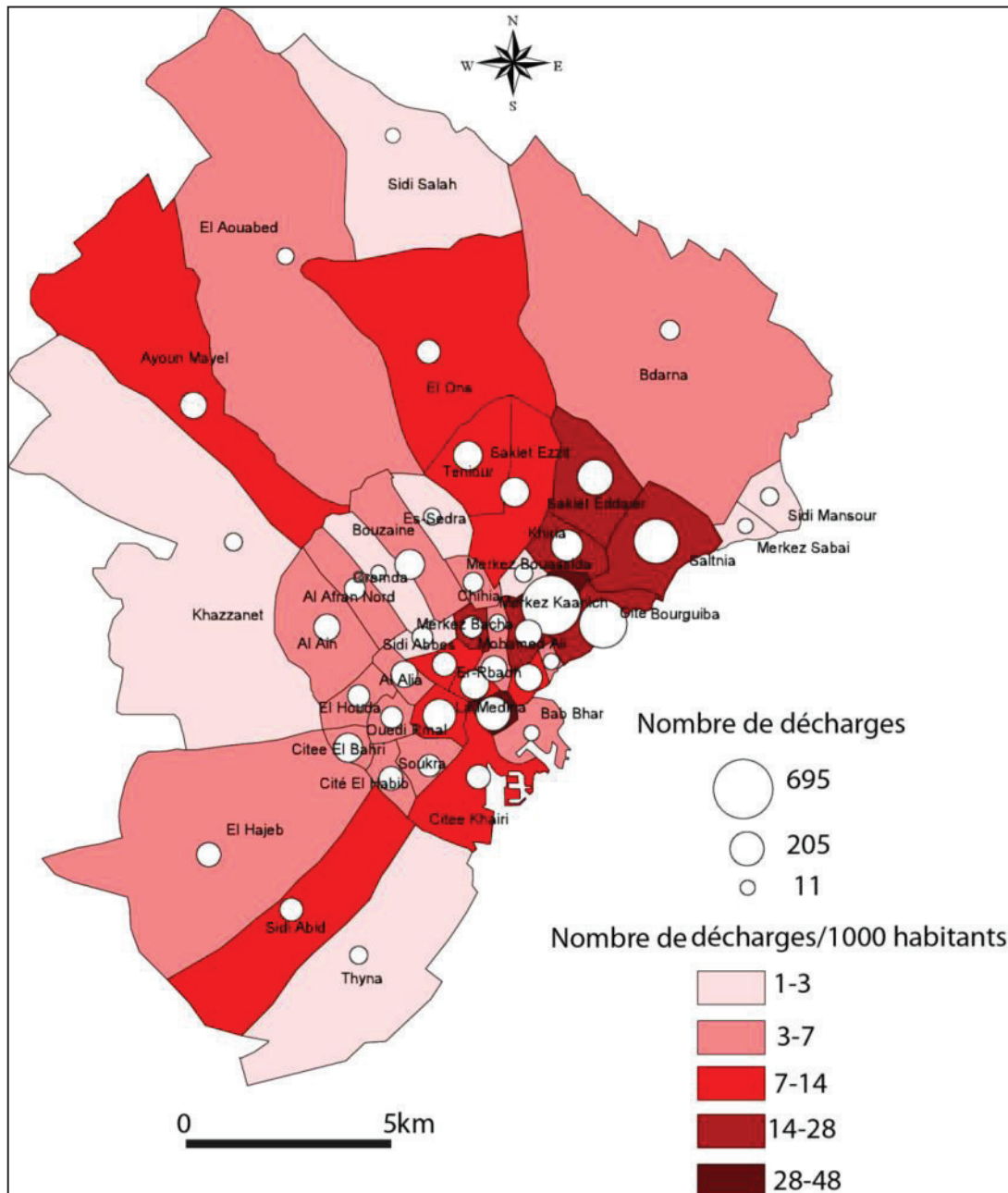


Figure 2. Nombre de décharges par secteur et par 1000 habitants (décharges identifiées sur une image Google Earth du novembre 2015).

Nous avons étudié la répartition spatiale des décharges par rapport à la distance au centre-ville (la Médina). Alors, l'agglomération a été divisée en trois couronnes : de 0 à 5 km, de 5 à 10km et de 10 à 15km. Il s'est avéré que le nombre le plus élevé des points de dépôts de déchets incontrôlés est observé dans la deuxième couronne entre 5 et 10 km de la Médina (2508 décharges) (Fig.3 B). Cependant, la densité des décharges sauvages la plus élevée est remarquée dans la première couronne (43/km², Fig.3D). En effet, la densité urbaine est moins élevée dans la deuxième couronne puisque elle est consacrée en grande partie, à l'habitat résidentiel et elle est plus étendue. Des densités moins élevées du nombre de décharges/km²

sont enregistrées en périphérie, dans la troisième couronne, où 4 décharges/km² uniquement ont été recensées, soit environ 10% du total des décharges de l'agglomération. Cette zone, à vocation agricole, se caractérise par une baisse considérable de la densité du bâti mais des décharges anarchiques liées à l'activité d'élevage des volailles peuvent se présenter dans cette zone périphérique. Nous pouvons déduire que la variabilité spatiale de la densité des décharges sauvages dans l'agglomération de Sfax dépend de la densité du tissu urbain.

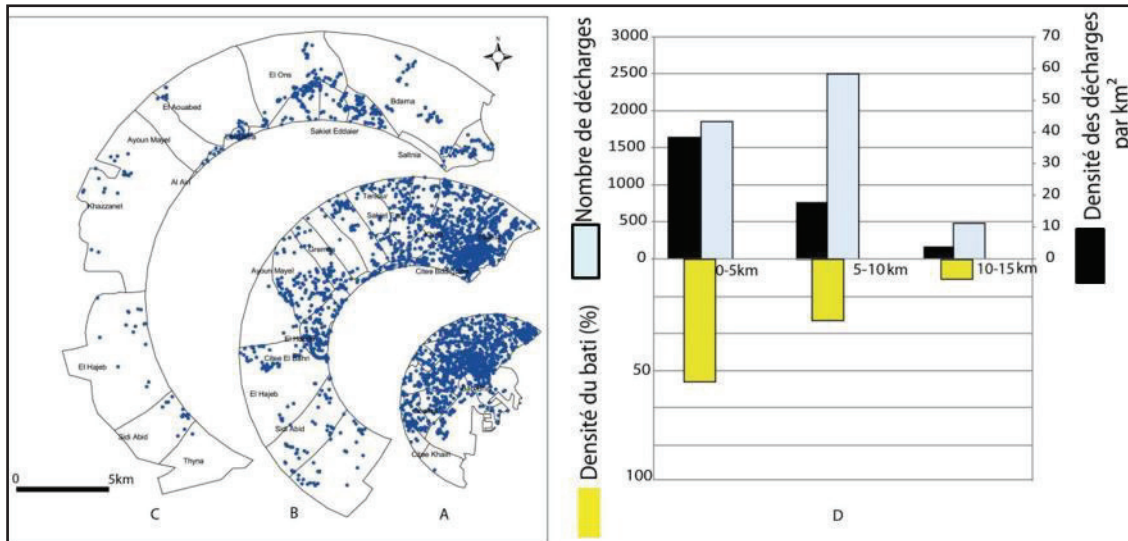


Figure 3. Densité des décharges solides suivant la distance au centre-ville: de 0 à 5km (A), de 5 à 10 km (B) et de 10 à 15km (C) et suivant la densité du bâti (D).

Généralement, les diamètres de décharges dénombrées varient entre 1 et 35 m. Les tailles les plus importantes sont observées au niveau de la première couronne (0 à 5km) telle que la décharge de port de pêche (35m) qui reçoit principalement des déchets industriels combustibles (Fig.1 A). Par contre, les décharges remarquées dans la deuxième et la troisième couronne (5 km à 10 km ; 10 km à 15km) sont de petites tailles variant entre 1m et 15m (Fig.3 B et C).

Par ailleurs, des traces d'incinération ont été trouvées dans plus de la moitié de ces décharges. Egalement, le nombre de décharges brûlées le plus important est remarqué dans les secteurs dominés par les quartiers populaires. En effet, le niveau socio-économique des habitants semble avoir un impact sur leurs comportements civiques. De même, le service de propreté y est confié à la municipalité. Néanmoins, dans les secteurs dominés par l'habitat résidentiel, des prestataires privés s'occupent de la propreté ; ils sont mieux équipés et plus efficaces subséquentement.

3. Quelles éventuelles retombées sanitaires ?

3.1. Localisation géographique des cabinets de pédiatrie

Une enquête a été menée en janvier 2017 auprès de 26 pédiatres parmi eux 23 sont des praticiens privés. Le choix de cet échantillon de pédiatres est justifié par la répartition géographique de leurs cabinets. En effet, outre ceux qui se concentrent dans le centre-ville (la moitié de l'effectif médical), nous avons retenu tous les médecins pratiquant sur les radiales. En plus, nous avons enquêté trois praticiens hospitaliers au CHU de Hédi Chaker.

3.2. Les maladies causées par les décharges sauvages d'après les pédiatres et leurs récurrences après 2011

Nos entretiens avec les pédiatres révèlent que l'asthme, avec 22 citations, est la maladie la plus fréquente. Egalement, plus de la moitié de ces spécialistes évoquent la pneumonie (Fig.4). Ensuite, d'autres maladies allergiques et respiratoires sont indiquées par les pédiatres (20% des réponses) telles que la toux chronique, l'intoxication par les fumées, la rhinite allergique (Fig.4). De plus, deux praticiens hospitaliers signalent que l'exposition des enfants aux émissions issues des décharges sauvages pourrait engendrer des cancers. Concernant, l'éventuelle récurrence de ces maladies après 2011, 92% des réponses affirment cette hypothèse et citent en particulier l'occurrence accrue de la pneumonie. En effet, la moyenne quotidienne des atteintes par cette pathologie respiratoire est passée de 4 enfants en 2010 à 8 enfants entre les années 2011 et 2016 (92 % des réponses). Sous l'effet de la température de l'air élevée, les déchets ménagers peuvent être à l'origine du dégagement des agents pathogènes (des bactéries par exemple) dans l'air qui pénètrent profondément dans les voies aériennes inférieures en provoquant des infections pulmonaires sérieuses comme le cas de certaines pneumonies. De telles infections peuvent exacerber l'asthme intrinsèque dont la toux et la dyspnée constituent les symptômes les plus fréquents (Jarraya et Beltrando, 2016).

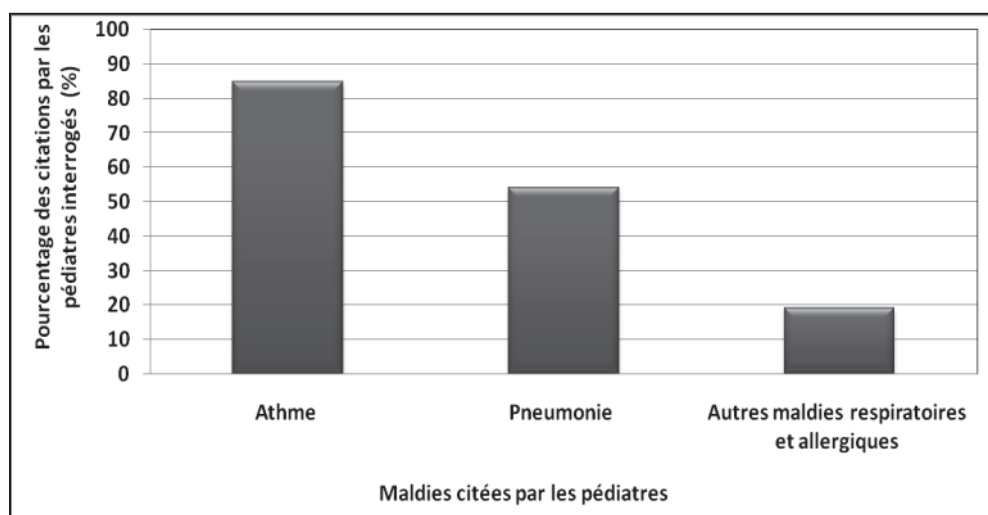


Figure 4. Les maladies probablement observées chez les enfants suite à leurs expositions aux émissions des décharges sauvages brûlées (données : enquête auprès de 26 médecins, janvier 2017).

Conclusion

Après la dite révolution, les actes d'incivisme se sont multipliés par la population à Sfax tels que le dépôt de déchets ménagers dans des sites non appropriés notamment dans des lieux marqués par une qualité de vie dégradée comme les quartiers pauvres. Les répercussions sur la santé de ces décharges sauvages ne sont pas négligeables. Une enquête établie au niveau des pédiatres a montré que des maladies respiratoires et allergiques peuvent affecter la population infantile. De plus, 92% des pédiatres enquêtés concordent sur l'augmentation du nombre des incidents pneumoniques depuis 2011. Dans le contexte politique actuel, la résolution du problème des déchets sauvages à Sfax n'est pas à l'ordre du jour tant que l'approche à la fois participative et consensuelle entre les acteurs de la ville et la société civile est encore absente.

La question de la propreté et les problèmes environnementaux, en général, seront parmi les promesses principales des élections communales, prévues pour décembre 2017. Dans les prochains travaux, nous souhaitons actualiser la base de données à partir de nouvelles images Google Earth, plus récentes et des levées de terrain afin d'étudier les aspects de vulnérabilité de la population toutes catégories d'âges confondues.

Bibliographie

- Dahech S et Bouaziz R, 2016 : Perception de la pollution atmosphérique à Sfax (centre-est de la Tunisie): *Actes du 29^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 6-9 juillet 2016, Besançon, 33-38.
- Dahech S, 2007 : *Le vent à Sfax (Tunisie), impacts sur le climat et la pollution atmosphérique*. Thèse de doctorat. Université Paris VI, France, 347 p.
- Fintz E, 2014 : *Recrudescence d'asthme et pollution atmosphérique (thèse de doctorat)*. Université Toulouse3 – Paul Sabatier, France, 91 p.
- Institut Bruxellois pour la Gestion de l'Environnement (IBGE), 2009 : *Guide de gestion des déchets de construction et de démolition*, 82 p.
- Jarraya M., Beltrando G., 2016 : Poussés d'asthmes à Sfax (Tunisie) : aspects multiples de vulnérabilité accrue par le contexte climatique. *Actes du XXIV^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Besançon-Lausanne 06-09 juillet 2016*,137-142.
- Lhuilier D, Cochin Y, 1999 : *Déchets et santé : représentations des risques sanitaires liés aux déchets et à leurs modes de traitement*. Synthèse du rapport final. Université Paris 7, 17 p.
- Municipalité de Sfax, 2012 : Stratégie de Développement du Grand Sfax phase II (SDGS2) : *Etude des zones urbaines populaires*. Rapport de synthèse, 100 p.
- National Research Council (NRC), 2000 : Waste Incineration and public health : Commission on Life Sciences, Board of environmental studies and toxicology. *Committee on health effects of waste incineration, National Academy Press eds*. Washington, 335 p.
- Ngô C, Régent A, 2008 : *Déchets, Effluents et pollution : impact sur l'environnement et la santé*. Paris : Dunot, 176 p.
- Puddu M, Bayingana K, Tafforeau, 2003 : *L'Asthme et la Pollution de l'air Etat des connaissances et données disponibles pour le développement d'une politique de santé en Belgique*. Institut Scientifique de la Santé Publique, 179 p.
- Société française de santé publique (SFSP), 1999 : *L'incinération des déchets et la santé publique : bilan des connaissances récentes et évaluation du risque*. Collection santé et société n° 7, 368 p.

Webographie

- INS : <http://www.ins.nat.tn> consulté le 02 février 2017
- OMS : <http://www.who.int/fr> consulté le 02 février 2017
- ORS : www.orsnpdc.org consulté le 02 février 2017
- INVS : www.invs.sante.fr consulté le 02 février 2017
- ADEME: www.ademe.fr consulté le 02 février 2017

LE CLIMAT URBAIN ET LA SANTÉ: LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET LA DENGUE DANS LES VILLES BRÉSILIENNES

MENDONÇA F., STEINMETZ G.

UFPR / LABOCLIMA - Centro Politécnico – Jd. Américas. Curitiba/PR. Brésil. chico@ufpr.br - gustavo.soares@ufpr.br

Résumé : La dengue est officiellement une maladie urbaine au Brésil. Ce constat met en évidence l'importance de l'étude du climat urbain, en particulier le champ thermique pour comprendre la relation entre le climat urbain et la dengue à partir des températures de surface (Landsat 8 et MODIS) dans 10 villes brésiliennes. Toutes ces villes présentent des niveaux de risque variés de prolifération de l'*Aedes aegypti* (le vecteur de la dengue), avec des possibilités accrues de risque futur compte tenu des scénarios de l'IPCC et du PBMC pour le climat futur des villes.

Mots-clés : Climat urbain, thermographie, dengue, Brésil.

Abstract : Dengue is officially an urban disease in Brazil. This fact highlights the importance of studying the urban climate, especially its thermal aspect. To understanding the relationship between the urban climate and dengue fever, this study shows the application of surface thermography (Landsat 8 and MODIS) in 10 Brazilian cities. All them present low to high risk of *Aedes aegypti* (dengue vector) proliferation in the present, with possibilities for future risk intensification in face of IPCC and PBMC scenarios for the future climate of cities.

Keywords : Urban climate, thermography, dengue, Brazil.

1. Introduction

Le climat influe directement sur l'écologie des vecteurs de maladies transmissibles telles que la dengue, le paludisme, la fièvre jaune, etc. (Besancenot, 2001). La dengue est classée par l'OMS (2012) comme une maladie tropicale négligée. La répartition des zones à risque de la maladie à l'échelle mondiale comprend les climats tropicaux et subtropicaux, où la température, l'humidité, le vent et les précipitations sont les facteurs majeurs de la prolifération du moustique *Aedes aegypti*. Outre l'influence des facteurs climatiques et environnementaux, s'ajoutent des facteurs sociaux, en particulier l'urbanisation et le mode de vie des populations urbaines, pour favoriser les conditions de reproduction des moustiques.

La dengue est une des épidémies les plus importantes enregistrées dans le monde au cours de la dernière décennie, faisant près de 100 millions victimes /an, dont plus de 20000 décès enregistrés (OMS, 2012). N'étant pas possible de maîtriser la prolifération de cette épidémie, il revient aux autorités publiques et au public de trouver des solutions alternatives, en particulier pour la lutte contre son principal vecteur.

Au Brésil, la dengue est considérée comme une maladie urbaine, puisque la quasi-totalité du nombre de cas est enregistré dans les villes. Ce fait révèle la situation démographique du pays (85% de la population vivent en milieu urbain) et en même temps, le fait que le moustique vecteur est très bien adapté à l'environnement urbain.

L'analyse de l'association entre les épidémies de dengue, l'urbanisation chaotique et le changement climatique mondial est à la base d'un programme de recherche développé par LABOCLIMA / UFPR. Il vise à contribuer à la lutte contre la maladie au Brésil. 10 grandes villes situées dans différentes zones climatiques (fig. 1), où l'épidémie a été observée constituent l'objet d'étude, dont une partie est présentée ici.

Ce texte analyse les caractéristiques thermiques des villes impliquées dans l'étude et cherche à mettre en évidence la relation entre les températures et l'apparition de la dengue en milieu urbain. L'objectif est d'identifier la variation de la température de surface dans les villes concernées et son influence sur la propagation de la maladie.

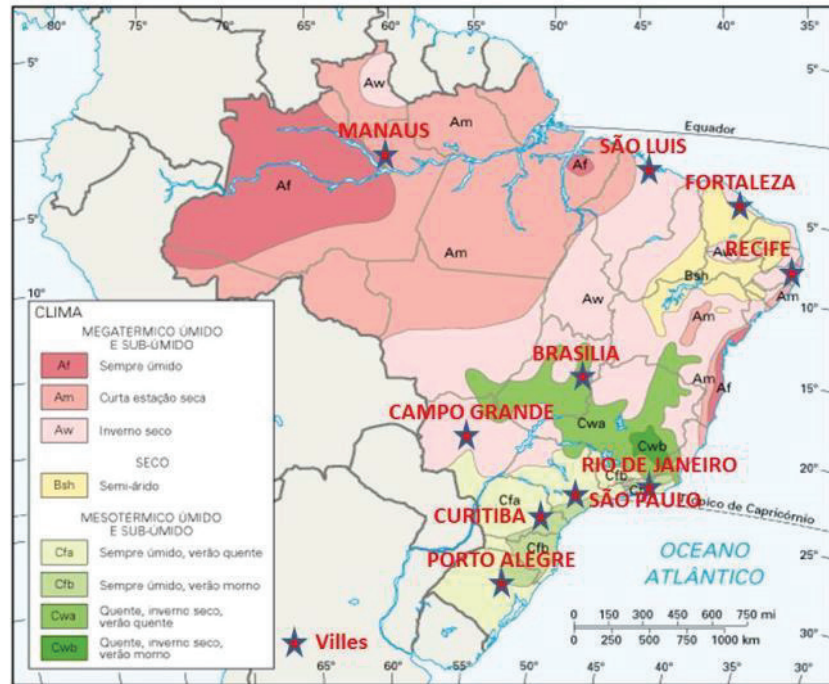


Figure 1. Localisation des 10 villes impliquées dans l'étude sur "Le climat urbain et la dengue au Brésil". Source : IBGE – Institut Brésilien de Géographie et Statistique, 2012.

Cette étude a été élaborée en tenant compte également des scénarios futurs de réchauffement climatique qui prévoient une augmentation des températures (entre $0,5^{\circ}\text{C}$ et $2,5^{\circ}\text{C}$) dans un avenir proche (IPCC, 2015 ; PBMC, 2016). Dans des conditions futures plus chaudes, il est attendu que le vecteur de la dengue trouvera de meilleures conditions pour la prolifération et la transmission du virus de la maladie.

2. Méthodes et techniques

En première étape de cette étude, une étude bibliographique a été menée pour identifier des méthodes et des techniques utilisées dans l'étude du climat urbain (Monteiro et Mendonça, 2007). Ensuite, l'étude s'est basée sur l'analyse du champ thermique des villes en s'appuyant sur l'analyse de l'imagerie satellitaire.

Les images satellites utilisées - Landsat 8 (capteur TIRS) et Terra (capteur MODIS) - ont été acquises par voie électronique (www.earthexplorer.usgs.gov). Le choix de ces images a été inspiré des études sur l'application de la télédétection à l'étude du climat urbain (Usman, 2016 et Steinmetz, 2016), en particulier pour la production des cartes des températures de brillance en ville. La période de référence de la recherche s'étend de juin 2014 à décembre 2015, mais la qualité et la disponibilité des images ont été des éléments de choix. Pour l'analyse comparative des 10 villes, il a été nécessaire de choisir des images prises à des dates et des heures proches les unes des autres.

Les images Landsat 8 sont au format GeoTIFF avec une résolution radiométrique de 16 bits, et comprennent 11 bandes. Les bandes 10 et 11 sont obtenues par le capteur TIRS avec une résolution spatiale de 100 mètres et couvrent le spectre thermique. Les images du capteur MODIS Terra, avec 36 bandes, sont disponibles sous diverses formes, en format HDR.

Les images Terra MODIS fournissent la température superficielle en degrés Kelvin, ce qui nécessite la conversion en degrés Celsius. Les images Landsat 8 portent la réflectance exprimée en valeur DN (Digital Number). La séquence des techniques utilisées pour le traitement des images Landsat 8 sont fournies par Usman (2016, en ligne) et ont été appliqués

à cette étude. Une conversion du DN en température de surface a été réalisée avec correction selon l'émissivité, calculée sur NDVI (indice de végétation). Les étapes de traitement étaient les suivantes: 1- Calcul du rayonnement dans la partie supérieure de l'atmosphère; 2- Conversion de la luminosité de la valeur liée à la sonde de température; 3- Conversion en degrés Celsius; 4- Calcul du facteur de réflexion au sommet de l'atmosphère corrigée en fonction de l'angle d'élévation du soleil bandes 3 et 4; 5- Calcul du NDVI; 6- Calcul de l'émissivité de la surface; 7- Calcul de la température de surface.

Les images ont été colorées avec la même palette de couleurs (gamme de 12°C à 47°C et avec 4°C d'intervalle) pour permettre une comparaison des résultats. La limite municipale de chaque ville a été tracée sur ces images. Une collection de cartes de thermographie de surface des 10 villes a été produite et organisée (fig. 2). Leur juxtaposition rend possible une analyse comparative.

Ce type d'étude est un élément partiel pour la compréhension du champ thermique des villes. Il va sans dire que la température de surface influe sur la température de l'air, sans être son déterminant unique. Les données provenant des stations météorologiques et/ou du réseau de température de l'air devraient être impliquées dans l'analyse, de sorte qu'il soit possible de détecter avec certitude la formation d'îlots de chaleur urbains.

3. Résultats

La figure 2 montre les images traitées (Landsat 8 TIRS-Terra MODIS) qui permettent simultanément une approximation des champs thermiques de surface des villes étudiées. Tout d'abord, il en ressort une nette différence de la résolution spatiale des images. Les images Landsat (100 m) montrent plus de détails que les images MODIS (1 km). Les premières permettent de distinguer les aspects thermiques spécifiques propres à l'utilisation des terres (les grandes routes, les quartiers,...). Sur certaines images MODIS, le manque de données est probablement lié à la couverture nuageuse. Il en est de même pour les images Landsat notamment pour les villes de Fortaleza et Recife. La constatation d'une différence entre la zone urbaine (valeurs plus élevées, dépassant généralement 25°C) et les zones de verdure et/ou humides (des valeurs plus faibles, en général inférieures à 25°C) est visible dans les deux résultats, révélant l'influence des substrats bâtis sur la température de surface.

Il est possible d'observer que les températures moyennes enregistrées par MODIS soient plus élevées. Les images du satellite Landsat 8 TIRS affichent des températures de surface variant en moyenne de 20°C à 34°C. Par contre, les images Terra MODIS montrent des températures variant en moyenne entre 30°C et 44°C. L'analyse des images Landsat (Fig. 2), bien que prises à des moments différents, met en évidence que les villes qui ont des températures plus élevées, sont Campo Grande, Curitiba, Brasilia, Sao Luis, Rio de Janeiro et Recife. Les villes de Fortaleza, Manaus, Porto Alegre et São Paulo montrent de températures plus basses. En revanche, dans les images Terra MODIS, les villes de Fortaleza, Brasilia, Campo Grande, São Paulo et São Luis sont celles qui se distinguent des autres.

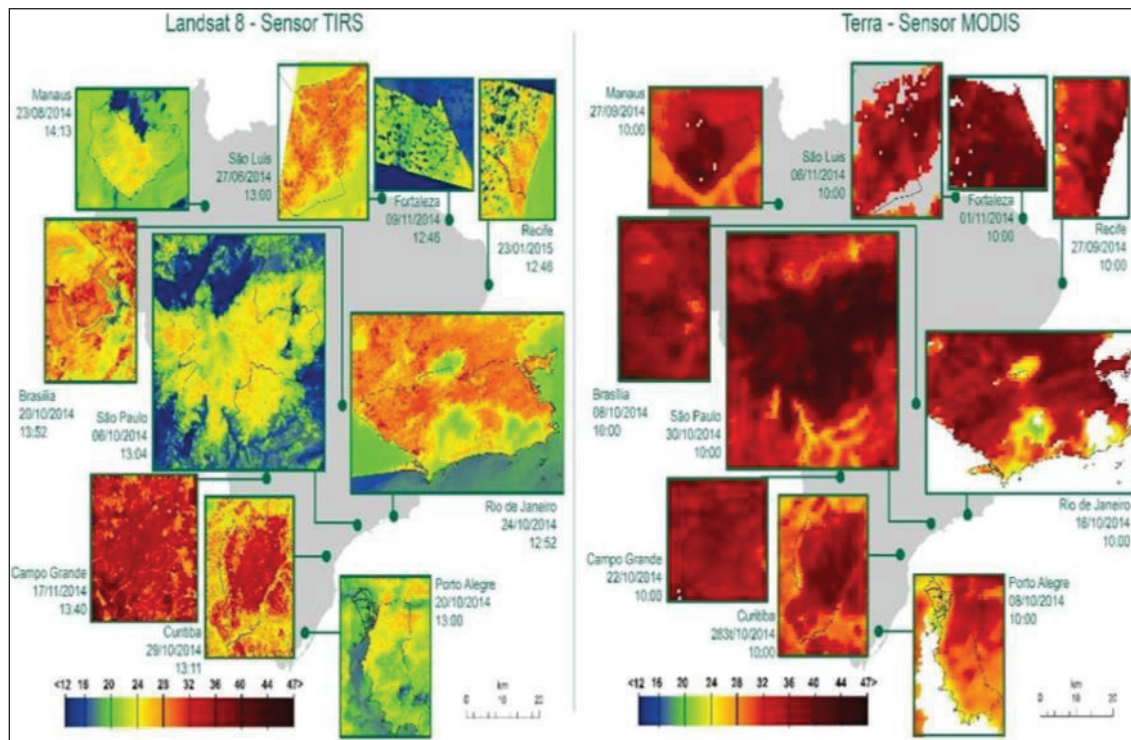


Figure 2. Thermographie de surface de 10 villes brésiliennes impliquées dans l'étude (Landsat 8 et Terra)

Les températures issues des images satellitaires peuvent renseigner sur les zones à risque de prolifération des moustiques. Ainsi, les zones ayant un risque élevé présentent des couleurs allant du vert à l'orange (fig. 2) car l'optimum climatique / écologique pour la prolifération du vecteur et pour la transmission du virus est compris entre 19°C et 30°C sous pluie intermittente (Mendonça et Roseghini, 2014).

Il ressort des images (fig. 2) que les villes avec la couleur dominante verte, ou entre l'orange et le rouge clair, seraient dans le risque moyen. Celles avec la couleur entre bleu moyen et vert ou rouge, ont un faible risque. Enfin, celles avec la couleur bleu et marron foncé ne présenteraient pas de risque de la maladie. Compte tenu de cette variation et de l'échelle de couleur appliquée aux images, il est possible de déduire que les zones avec des couleurs entre le jaune (22°C) et le rouge clair (32°C) sont favorables au risque le plus élevé.

Outre cette analyse, la variation thermique intra-urbaine doit être considérée. Cela peut être un des facteurs les plus importants concernant les informations obtenues à partir des deux capteurs. Les images confirment que la température varie en fonction de l'utilisation des terres, et les zones les plus urbanisées (bâtiments, structures et routes urbaines) ou le sol nu (agriculture ou sol exposé) ont des températures plus élevées. Par contre, dans les zones avec de la végétation ou à proximité des plans d'eau, les températures sont plus faibles le jour.

Les deux images révèlent que les zones de plus forte densité urbaine ont des températures de surface plus élevées. Les images satellitaires (fig. 2), principalement de Landsat 8, révèlent que les zones avec des valeurs intermédiaires sont celles situées entre les zones urbaines très denses et les zones couvertes par de la végétation. Ces zones sont parmi celle à risque élevé.

Conclusion

L'utilisation d'images satellitaires dans les études environnementales pose certains problèmes. Pour la thermographie de surface, comme dans cette étude, la couverture de nuages, par exemple, peut faire perturber l'analyse. La variété des satellites et les différentes caractéristiques des images peuvent produire des résultats très différents, même pour un

thème de recherche identique. La variété des calculs et l'étalonnage du capteur influe également sur les résultats, ce qui rend l'analyse restreinte, sans diminuer l'intérêt de l'utilisation des images satellitaires. Leur utilisation dans l'étude du climat urbain apporte des informations complémentaires aux données mesurées à 2 m de la surface.

Les résultats obtenus dans cette étude sont principalement basés sur les variations des températures de surface estimée essentiellement à partir de l'albédo des diverses surfaces. La thermographie de la zone urbaine aura une plus grande influence sur la prolifération du moustique vecteur de la dengue. C'est un acteur de risque de plus en plus fort, en même temps que d'autres facteurs climatiques (durée des conditions optimales de température et de précipitations), sociaux et environnementaux.

Les thermographies issues des images Landsat et MODIS montrent que les dix villes analysées ont d'excellentes conditions pour la prolifération du moustique vecteur de la dengue et dans la propagation du virus de la maladie. Dans certaines villes, comme Campo Grande, Brasília, São Paulo et Fortaleza, les images MODIS ont montré des conditions de faible ou d'absence de risque en raison des températures (au moment de la prise) bien au-dessus de l'optimum climatique pour le vecteur. Cependant, l'analyse saisonnière et journalière apparaît comme une bonne démarche pour donner suite à cette approche. Lors de l'examen des scénarios futurs de changement climatique mondial, on estime que les climats urbains des villes ici analysées seront plus favorables au développement du vecteur de la dengue.

Considérant que cette étude est complémentaire à l'analyse du climat urbain des 10 villes, il reste important de l'approfondir en intégrant des mesures de température de l'air (1,5 m) et de l'utilisation des terres afin de mieux caractériser l'interaction entre le climat urbain, la géographie locale et la prolifération de l'*Aedes aegypti*.

Bibliographie

- Besancenot J-P., 2001 : *Climat et santé*. Paris : PUF, 127 p.
- IBGE, 2012 : *Institut Brésilien de Géographie et Statistique, 2012*.
- IPCC – International Panel on Climate Change, 2015 : *AR-5 Report*. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/>. Consulté le 20/02/2017.
- Mendonça F., Dubreuil V., 2005 : Termografia de superfície e temperatura do ar na RMC (Região Metropolitana de Curitiba/PR). *Revista RA'E GA*, Curitiba, n. 9, 25-35.
- Mendonça F., Roseghini WFF., 2014 : L'îlot de chaleur urbain et la santé : Les épidémies de dengue à Maringá et a Campo Grande (Brésil). Actes du *XXIIe Colloque de l'AIC - Association Internationale de Climatologie, 2014, Dijon – France*, v. 2. 681-686.
- Monteiro C.A.F., Mendonça F., 2007 : *Clima urbano*. São Paulo: Contexto.
- PBMC – Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. 2016. *Relatório especial "Mudanças climáticas e cidades"*. <http://www.pbmc.coppe.ufrj.br/pt/>. Consulté le 25/02/2017.
- Steinmetz G. 2016 : Aspectos do clima urbano no Brasil: Uma abordagem a partir do emprego de imagens de satélite. *Anais do 24° EVINCI – Evento de Iniciação Científica*. UFPR, Curitiba/PR.
- Usman, B. 2016 : *Landsat 8 : Estimating land surface temperature using ARCGIS*. <https://www.youtube.com/watch?v=uDQo2a5e7dM> consulté le 13/01/2016.
- OMS/WHO – World Health Organisation. 2012. Neglected tropical diseases. http://www.who.int/neglected_diseases/diseases/en/ consulté le 23/02/2017.

LES VARIATIONS CLIMATIQUES ET LES INONDATIONS URBAINES CAS DE LA VILLE DE BISKRA (ALGERIE)

AZIOUNE R.¹, TATAR H.², NOUACEUR Z.³

¹Faculté des STU, UMC Algérie. E-mail : rokia.azioune@umc.edu.dz

²Laboratoire LASTERNE, Faculté des STU, UMC Algérie. E-mail : tatar_hafiza@hotmail.com

³Université de Rouen. E-mail : zeineddine.nouaceur@univ-rouen.fr

Résumé : En Algérie, les inondations des dernières années ont été dramatiques. Plusieurs agglomérations ont fait face à cet aléa aux conséquences tragiques (Alger, Batna, Ghardaia, Biskra.....). D'après les sources officielles, quelques 600 sites sont exposés à des degrés variés au risque hydroclimatique potentiel (agglomérations situées au pied des versants, ou dans les basses plaines aux embouchures des oueds). Ce travail vise à déceler l'influence de la variation climatique enregistrée dans le milieu urbain et à donner les projections de réduction des précipitations à court et long terme en utilisant les indices climatiques. C'est l'un des problèmes les plus épineux en matière de gestion urbaine. Les inondations constituent un risque qui menace l'ensemble des composantes spatiales, la population, les infrastructures, le patrimoine. Il remet en question la sécurité durable des agglomérations concernées.

Mots-clés : précipitation, variation climatique, inondation.

Abstract: *The climatic variations and the urban floods Case of the city of Biskra.* In Algeria, floods of these last years were dramatic; lots of agglomerations had faced this danger with its tragic consequences (Alger, Batna, Ghardaia, Biskra...) according to official sources, 600 sites were exposed to varied degrees of hydroclimatic potential rise (agglomerations located under the mountains, or in lowlands mouthpieces of the oueds). This work aims for detecting the influence of the climatic variation registered at the urban environment and to give the projections of reducing the precipitations in short and long term using the climatic indices. It's one of the thorniest problems in case of urban management. The floods constitute a risk that threatens all the spatial components, the population, the infrastructures, the heritage. It brings back the question of the sustainable security of the concerned agglomerations.

Keywords : Precipitation, climatic variation, flooding.

Introduction

Le risque d'inondation est parmi les défis majeurs qu'affrontent les agglomérations algériennes situées au pied des versants, dans le Tell, l'Atlas Saharien ou encore situées dans les basses plaines aux embouchures des oueds. D'après les sources officielles, quelques 600 sites sont exposés à des degrés variés au risque hydrologique potentiel.

La loi contient des prescriptions particulières en matière de prévention des inondations (Les Plans Généraux de Prévention des Risques d'Inondation (PGPRI)).

La ville de Biskra, a connu ce type de risque d'innombrables fois. Située au pied des Aurès versant Sud (Fig.1.) et à la confluence de l'oued El Hai et l'oued Djemora (l'oued Biskra), avec la présence de l'oued Z'mor et autres petits cours d'eau la traversant, elle a assisté à des crues souvent catastrophiques. Signalons celles des années 1960 (12 septembre 1963, 27 janvier 1964, septembre 1969) aux conséquences tragiques, suite à des épisodes pluvieux très intenses, celles des années 1970 (27/11/1971, 06/01/1975, 10/03/1976, 06/1/1977, 03/10/1978) qui ont entraîné la submersion systématique de plusieurs oueds spécialement l'oued Biskra, et le colmatage de la voirie et du réseau d'assainissement; rappelons encore celle du mois d'août 1989, celle de décembre 1999, celle de janvier 2003, d'avril 2004... et récemment celles de 2011, 2015 liées plus aux difficultés de drainage des eaux de ruissellement qu'aux fortes averses.

Ce travail se trouve donc inscrit dans une problématique d'aggravation des risques réels induits par des formes d'urbanisation et d'anthropisation dans une zone fortement vulnérable.

1. Méthodes et techniques

La méthodologie utilisée dans cette analyse repose sur le traitement des données statistiques, le dépouillement des archives administratives, et l'exploitation du support cartographique.

La première étape pratique a été la délimitation des BV et des sous bassins secondaires (fig01) qui ont une influence hydrologique directe ou indirecte sur la ville de Biskra et sa périphérie. Cette délimitation a été réalisée par MNT..... Les données hydroclimatiques utilisées proviennent de l'ANRH depuis 1965

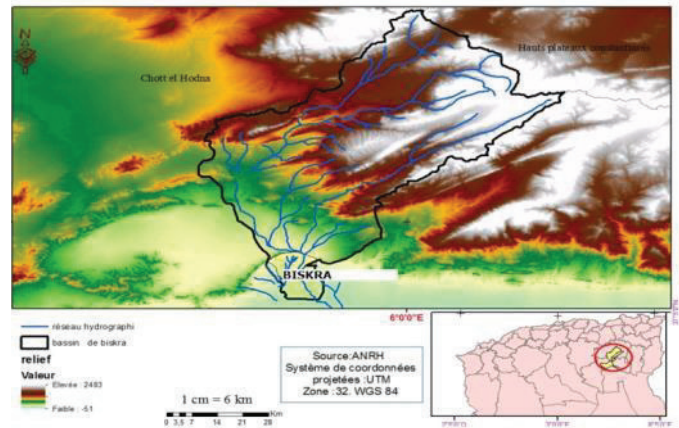


Figure 1. Situation géographique de la région d'étude

2. Historique des inondations dans la ville de Biskra

La ville de Biskra a connu plusieurs inondations, d'importance très variable. Parmi les plus forts écoulements, nous signalerons celui d'avril 1949 qui causa des dégâts sérieux aux habitants de la rive droite de l'oued. La crue, dont le débit a été estimé à 1000 m³/s environ, a une période de retour de 10.000 ans, elle a écoulé pendant trois jours sans interruption, et inondé tous les quartiers de la ville de Biskra situés sur les rives de l'oued.

Jusqu'aux années 1970 seules des inondations par débordement direct de l'oued Biskra et ses confluentes se produisaient, mais à partir des années 1980, un nouveau type d'inondation apparaît lié à une capacité insuffisante d'infiltration, d'évacuation des sols et du réseau d'assainissement lors des pluies considérées parfois normales. Ainsi depuis 1980 pas moins de 10 inondations ont eu lieu, avec pour corolaire des dégâts et des désagréments plus ou moins conséquents (tableau 1).

Tableau1. Récapitulatif des inondations de la ville de Biskra à partir de 1980 :

Dates des inondations	Quartiers, zones ou secteur touchés	Dégâts		Les caractéristiques Hydroclimatiques
		Humains (morts et blessés)	Matériels	Pluie en (mm) , durée, débit
Juin 1981	Ancienne ville oued Biskra	10 familles	02 bâtiments effondrés et 17 bâtiments endommagés à risque d'effondrement	Q=178,2 m ³ /s
Octobre 1982	Centre ville	03 blessés 02portés disparus 138 familles	Réseau routier détérioré,236 maisons endommagées ou détruites	48mm,24 h,Q=246,6 m ³ /s
Août1984	Centre ville, Sidi Barket, Bab El Darb et Majeniche.	16 blesses 40 familles	435 maisons,10 km de Câble téléphonique.21 Habitations ,5km Câble électrique	Q= 127,6 m ³ /s 03 h19
Janvier 2003	Quartiers longeant oued Biskra	11 morts	543 habitations, 2,5 Km de routes.	Q=142 m ³ /s 49mn
Mai 2004	Biskra _Elhadjeb	01 mort	8 habitations détruites	Q=64,3 m ³ /s, 48heures
Avril 2005	La vieille ville et quartiers Ouest	3 morts, 7 blessés	Effondrement de 543 habitations	Q=150 m ³ /s 25/24_Avril
Janvier 2011	Oued Biskra	01 mort, 02 blessés	Dégâts matériels importants	Q=281 m ³ /s ; 23h
Mars 2015	Oued Z'mor	05Morts,0 3 blessés 3familles	Dégâts matériels, réseau routier endommagé.	Q=83,31 m ³ /s 5h

3. Contexte Climatique

3.1. Un climat marqué par la variabilité

Les caractéristiques climatiques du bassin versant de l'oued Biskra sont étroitement liées à sa position géographique et son relief ; on relève de fortes variabilités spatiales et surtout temporelles des précipitations sous forme d'averses. Les températures et l'influence élevée de l'évapotranspiration sur le milieu.

La combinaison de ces conditions physico-géographiques et climatiques est déterminante dans le comportement hydrologique des diverses unités du bassin

3.2. Variabilité inter-mensuelle des précipitations

On relève une amplitude importante des valeurs pluviométriques entre les mêmes mois de la série étudiée, ceci est mis en évidence par le coefficient de variation. En effet, les coefficients les plus élevés sont ceux des mois d'été, avec un maximum en juillet de 4,27mm à la station de Foug El Ghrza ce maximum et de 3,57mm à Djemoura le même mois et de 2,11mm à la station de Biskra toujours au mois de juillet.

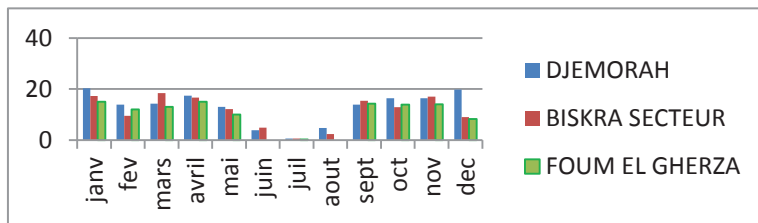


Diagramme 1. Variabilité inter-mensuelle des précipitations (1965/2013)

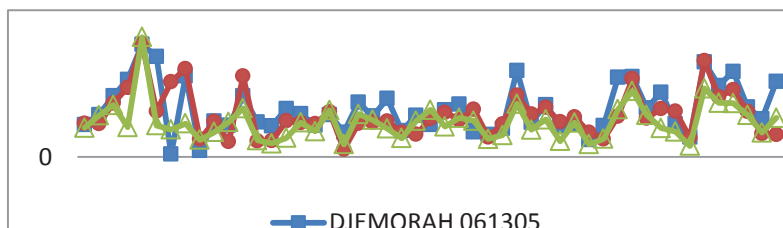


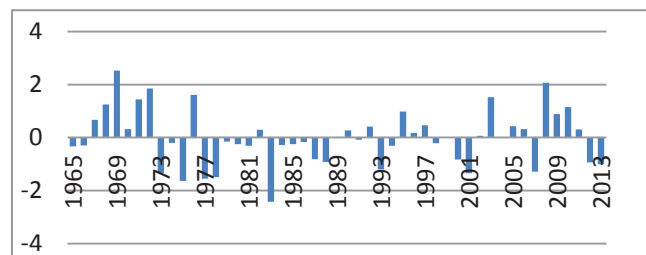
Diagramme 2. Variations inter-annuelles des précipitations 1965/2013

Sur le plan spatial, les hauteurs moyennes mensuelles de pluie de l'ensemble des stations du bassin qui suivent une coupe SO-NE, montrent clairement la grande variabilité de ces dernières. Toutefois, une variabilité relativement plus accentuée semble marquer davantage le Nord du bassin, sans doute en relation avec les caractéristiques topographiques locales.

3.3. Configuration climatique actuelle du bassin

Selon les indices climatiques la région est marquée par une forte variabilité des hauteurs des précipitations.

Diagramme 3. Indice standardisé de précipitations station de Biskra



la série du milieu d'étude. Cet indice traduit les années d'humidité extrême. Ceci permet de déterminer les années humides telles que les périodes : 1967 - 1972 et 2008-2011 (figure 3).

L'indice standardisé de précipitation a permis de mieux cerner cette dynamique pluviométrique, il est utilisé pour mieux estimer le déficit et l'excédent pluviométrique annuel de

La tendance est à la diminution moyenne des précipitations et à la sécheresse prolongée de la zone saharienne dont l'influence sur la genèse des inondations est négligeable.

4. Contexte de l'hydrologie urbaine et réseau hydrographique

4.1. Le réseau hydrographique dans la région de Biskra

Le réseau hydrographique de la région de Biskra est dans l'ensemble assez dense. De nombreux affluents et sous affluents provenant du Sud-Ouest de l'Aurès la traversent pour aller se déverser dans le chott Melghir. Ce sont des oueds essentiellement, à caractère temporaire. Ils sont le plus souvent à sec.

Du fait de la présence de bassins versants de dimensions variées une grande diversité hydrologique caractérise la région. On peut distinguer deux types de bassins, les grands bassins montagneux et les micros bassins du site urbain.

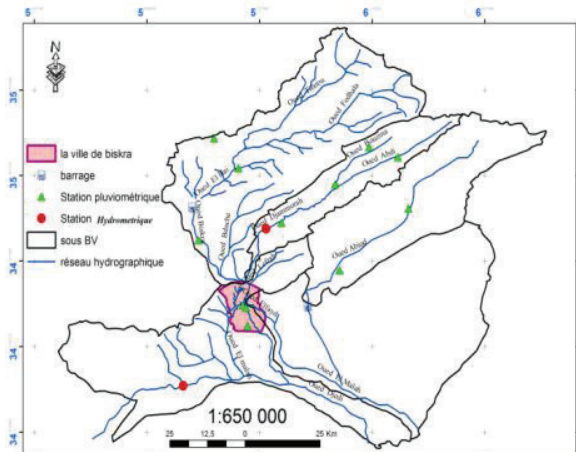


Figure 2. La carte des réseaux hydrographiques de la région

4.2. Caractérisation des débits de crues exceptionnelles

Les oueds de la région de Biskra connaissent globalement un écoulement saisonnier et épisodique. Ce type d'écoulement ne facilite pas la tâche de collecte de données brutes. Les mesures de jaugeages nécessaires sont quasiment absentes, notamment sur les petits cours d'eau. C'est là le problème fondamental de notre analyse, d'autant que la propagation des crues de l'oued Biskra est souvent très compliquée, par les apports des affluents dont " les terroirs hydrologiques du Sud-Ouest de l'Aurès " réagissent différemment d'un oued à l'autre et d'une crue à l'autre.

Tableau 2. Débit théorique exceptionnel de 2 micro bassins de la ville de Biskra

Bassin Versant	Surface	Longueur (hm)	Pente	Coefficient de ruissellement	$Q_{10}=K.I^x.C^y.A^z(4A/L^2)^t$ (m^3/s)
Oued Z'mor	147 ha	40,4	0,02	2,3	2,77
Oued Fayed	46 ha	30,6	0,03	0,5	1,5

En cas de fortes pluies, les débits de ces petits cours d'eau connaissent souvent des écoulements substantiels qui se renforcent de l'amont vers l'aval pour déclencher des crues et inonder les quartiers avoisinants. L'oued Z'mor par exemple draine vers les quartiers Ouest de la ville d'importants débits en périodes d'averses aléatoires provoquant des inondations importantes. Amplifiés par les apports liquides issus d'une voirie déficiente et des déblais de tout genre, les écoulements ne peuvent être absorbés et envahissent l'espace urbain.

4.3. Ruissellement et débits

Nous constatons que les comportements modélisés pour Biskra sont plus faibles que ceux de Djoumora, pour un même débit.

Le débit serait donc plus important « 62m³/s ». Nous avons à notre disposition, des mesures de débits en plusieurs points du sous bassin versant sur une journée, celle du 09 octobre 1982. De manière générale, nous observons, pour cette journée, un débit très élevé de l'oued Biskra. Nous pensons que le facteur topographique joue un rôle important.

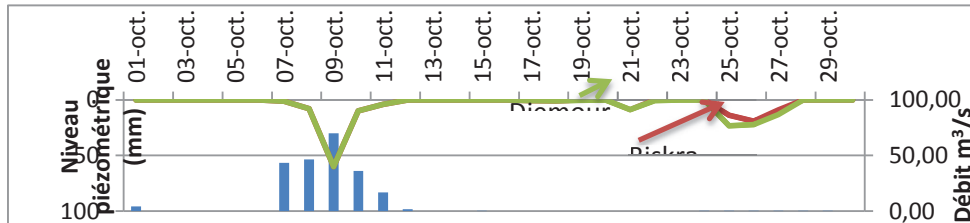
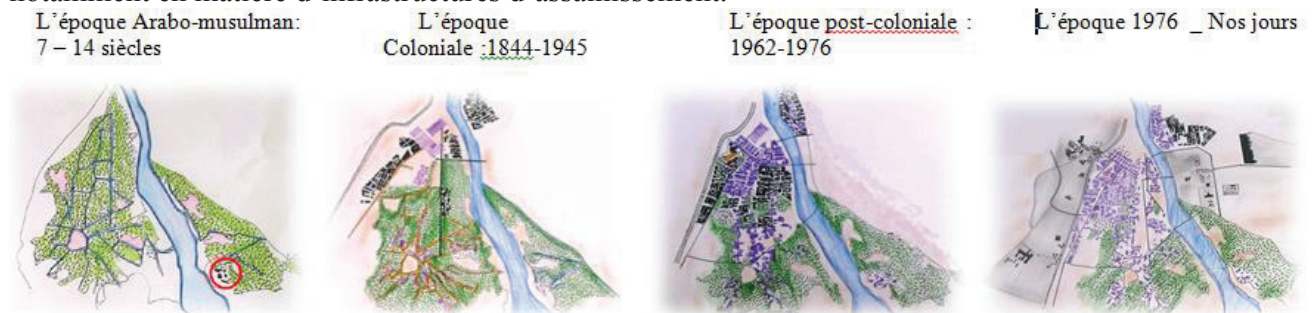


Diagramme 4. La simulation de l'événement pluie-débit d'octobre 1982

5. Les facteurs amplificateurs du risque

5.1. Une urbanisation anarchique et démesurée

En raison de l'épanouissement de ses activités agricoles et industrielles, la ville de Biskra, depuis quelques années fait face à une croissance rapide incontrôlable. Elle a connu un essor fulgurant en matière de construction de logements. Elle s'est développée de façon anarchique dans toutes les directions, et particulièrement vers le Sud, vers la palmeraie où existaient déjà les vieux noyaux traditionnels. L'imperméabilisation, conséquente immédiate du développement du tissu urbain augmente les flux du ruissellement qui peuvent entraîner des inondations et une détérioration rapide des routes, l'infiltration étant réduite à sa plus simple expression. Des 1976, l'urbanisation tentaculaire engagée vers la palmeraie, a posé de sérieux problèmes à la ville, notamment en matière d'infrastructures d'assainissement.



5.2. Un réseau d'assainissement vétuste et insuffisant

La ville est dotée en effet, d'un réseau d'assainissement relevant en totalité du système unitaire, où l'ensemble des eaux usées et pluviales sont évacuées en commun, un réseau vétuste et insuffisant qui ne couvre pas la totalité du périmètre urbain. On relève l'absence quasi-totale de réseau d'assainissement dans certains quartiers (El Alia, vieux Biskra, Sidi Ghezal....) où le recours aux fosses septiques et rejets en pleine nature constituent une atteinte à la santé publique. Le réseau comprend six (06) collecteurs principaux en béton armé (tableau). L'exutoire naturel (oued Biskra) se situe en aval, à environ 500m

6. La protection de la ville de Biskra

Sur la base de l'analyse des différents paramètres physiques et humains qui caractérisent la région de Biskra et après l'analyse des dynamiques spatiales en cours dans la ville, une certaine classification des espaces, fondée sur les critères de leur vulnérabilité au risque d'inondation (tableau) peut être proposée.

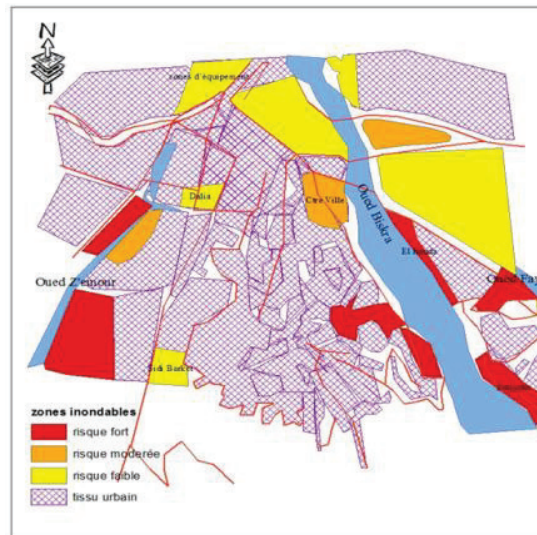


Figure 3. Classification des zones inondables.

Conclusion

Dans un premier temps, nous avons centré notre étude autour de la région de Biskra. Située, à la confluence de l'oued El Hai et l'oued Djemoura (l'oued Biskra), avec la présence de l'oued Z'mor et autres petits cours d'eau la traversant, elle est prédisposée aux inondations. Dans un contexte régional tel que celui-ci, situation à l'aval d'un grand bassin versant et présence d'une multitude de petits cours d'eau souvent à sec, mais dont les débits de crues peuvent être impressionnants, la ville a été le théâtre de nombreuses inondations aux conséquences désastreuses. L'échelle spatiale est un paramètre qu'il ne faut pas négliger dans l'analyse du risque d'inondation.

L'analyse des conditions hydrologiques dans le bassin de Biskra, montre que la forte variabilité des concentrations des précipitations dans le temps et dans l'espace, au cours de la période 1965-2013 a eu des répercussions sur ruissèlement dans le bassin versant.

Le climat est un facteur de vulnérabilité des agglomérations non protégées, y compris celles qui se situent en aval des petits BV. Ceux-ci sont rarement aménagés car on sous-estime leur importance dans la genèse des risques. La concentration des précipitations dans le temps et dans l'espace est un facteur de vulnérabilité des agglomérations non protégées, y compris celles qui se situent en aval des petits BV. Ceux-ci sont rarement aménagés car on sous-estime leur importance dans la genèse des risques.

A Biskra le risque hydro provenant des petits bassins est presque aussi important que celui provenant des grands bassins. Les contraintes précédemment signalées méritent un traitement d'urgence. Des programmes d'actions techniques en vue de restructurer les réseaux d'assainissement, l'étude de la dynamique de l'écoulement et des actions d'aménagement à l'échelle régionale, sont des

programmes prioritaires qui s'imposent pour une meilleure maîtrise des risques hydro probables dans ce domaine.

Bibliographie

Aichouri I. 2009 : *Contribution à la mise en évidence de l'intrusion marine dans la plaine d'Annaba*. Mémoire Univ BADJI MOKHTAR-ANNABA.

Beloulou L. 2008 : *Vulnérabilité aux inondations en milieu urbain. Cas de la ville de Annaba (Nord-Est Algérien)*. Thèse de doctorat d'Etat.

Brahim A, Mohamed L, Ali T, Khalid O., 2003 : Risque hydrologiques dans la region de taza (Maroc) genèse, conséquences et problèmes d'aménagement. *Géomagheb*, n°1. 47-60.

Codjo, T., E. Ogouale, M. Boko, E. Agbossou, 2017: Stratégies paysannes d'adaptation aux changements climatiques dans la commune d'ADJOHOUN. Consulté le 15 février 2017.

Djorfi S, Fougou A, Majour H, Belloulou L, Hani A, Djabri L. 2010 : Impact de la decharge publique de annaba sur la qualite des eaux de la plaine de l'oued zied 1.

El Ghachi, M., et F. Z. Morchid. 2017 : Analyse des tendances pluviométriques dans la ville de Khénifra dans un contexte de variabilité climatique. Consulté le 15 février 2017.

Hassina C. 2007 : Etude de la pollution des eaux de la plaine de Telezza due aux activite agricoles et commerciales. Magister.

Mani H, Nechem D., 2013 : Contexte geologique et hydrogeologique de la vallee de L'oued Kebir Ouest, Nord Est.

Mokhtari, N, Rachid M, Philippe L, et Laurent BOCK. 2014 : Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*.

Niazi, Saida. 2007 : Evaluation des impacts des changements climatiques et de l'élévation du niveau de la mer sur le littoral de Tétouan (Méditerranée occidentale du Maroc): *Vulnérabilité et Adaptation* ».

Vodouhe, et Euloge K. Agbossou. 2012 : « Perceptions et stratégies d'adaptation aux changements climatiques : le cas des communes d'Adjohoun et de Dangbo au Sud-Est Bénin ».

Wallez, Lucile. 2010 : Inondations dans les villes d'Afrique de l'ouest: diagnostic et éléments de renforcement des capacités d'adaptation dans le grand Cotonou ». Université de Sherbrooke.

Hichem Z. 2007 : Diagnostic pour une éventuelle rehabilitation des eaux de la seybouse la basse plaine Annaba.

LES AMBIANCES DU QUARTIER D'EL MENZAH : IMPACTS DE LA MORPHOLOGIE URBAINE ET DE LA VÉGÉTATION SUR LE VÉCU DES HABITANTS

GHARBI S.¹, BELAKEHAL A.²

¹Université de Carthage, ERA, Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme de Tunis, Tunisie, elgharbisalma@hotmail.com

²Université de Biskra, LACOMOFA, Département d'Architecture, Algérie, a.belakehal@univ-biskra.dz

Résumé – On s'intéresse dans cette recherche aux ambiances d'un quartier résidentiel spécifique étant celui d'El Menzah, œuvre de la Reconstruction Tunisienne d'après-guerre. Ce quartier à configuration urbaine et à composantes spatiales spécifiques offre à ses usagers un cadre de vie agréable et des espaces publics où est mis en valeur le partage social. En premier, une approche physique du quartier relevant de la dualité configuration spatiale et microclimat nous a permis de dégager certains effets aérauliques dans les espaces publics. La végétation, composante omniprésente dans ce lieu, permet d'ombrager les espaces extérieurs et de les tempérer. De plus, une enquête menée auprès des usagers a révélé que cette configuration urbaine dégagée, végétalisée et à masses en barres offrit à ces usagers certains avantages liés à la pratique de l'espace mais aussi d'autres désavantages relatifs à un inconfort dans quelques lieux sensibles du quartier.

Mots-Clés : quartier d'El Menzah, morphologie urbaine, végétation, usagers.

Abstract - *The ambiances of El Menzah neighborhood, impacts of urban morphology and vegetation on the lived of inhabitants.* In this research, we are interested in the ambiances of a specific residential area being that of El Menzah, the work of the post-war Tunisian Reconstruction. This neighborhood with urban configuration and specific spatial components offers its users a pleasant living environment and public spaces where social sharing is emphasized. In the first place, a physical approach to the neighborhood of the dual spatial configuration and microclimate allowed us to identify some aerodynamic effects in public spaces. The vegetation, an omnipresent component in this place, allows to shade the external spaces and to temper them. In addition, a user survey revealed that this unbundled, vegetated, bar-block urban configuration, offered these users certain advantages linked to the practice of space but also other disadvantages related to discomfort in some sensitive areas of the neighborhood.

Keywords : El Menzah neighborhood, urban morphology, vegetation, users.

Introduction

Cette recherche est focalisée sur un fragment de la ville de Tunis, celui du quartier d'El Menzah, et particulièrement El Menzah 1 dont la spécificité relève de son attachement à un contexte d'édification particulier à savoir la Reconstruction tunisienne d'après-guerre. Il fut conçu par l'équipe d'architectes et d'urbanistes de Bernard Zehrfuss et commandité par le Commissariat à la Reconstruction et au Logement. Le quartier a été conçu dans une pensée moderniste, et enserme plusieurs idéaux de la Charte d'Athènes, comme doctrine urbanistique privilégiant le dégagement urbain, la distinction entre les différents espaces de circulations et l'utilisation abondante des espaces verts. La principale fonction du quartier est résidentielle. Elle est assurée par du logement individuel mais aussi par celui collectif, dressé en immeubles en barres. A l'époque, cette typologie est nouvelle, voire inconnue, pour le paysage urbain de la Tunisie, qui n'a connu, en outre les rues sinueuses de la médina et ses maisons traditionnelles à patio, que les immeubles de rapport alignés le long des rues dans un tissu urbain colonial dense et en damier. Par ce quartier, les architectes ont voulu faire vivre aux habitants, une nouvelle expérience citadine, celle du partage des espaces extérieurs, du dégagement et de l'ouverture sur le paysage végétal. Nous cherchons à travers l'étude de ce quartier à caractériser son cadre physique et à questionner l'impact qu'a sa morphologie urbaine sur le vécu de ses usagers et ceci en se basant

sur l'étude qualitative et quantitative de la composante solaire et aéraulique mais aussi sur le volet sensible questionné par la méthode du parcours commenté.

1. Cadre de l'étude : quartier d'El Menzah

La forme urbaine du quartier est composée de plusieurs entités qui permettent d'intégrer ce quartier dans la sphère de la pensée moderniste. Le système viaire, la circulation piétonnière, les espaces verts et le cadre bâti interagissent avec un intérêt majeur porté à la question de l'ensoleillement et de l'aération, créant un espace urbain structuré.

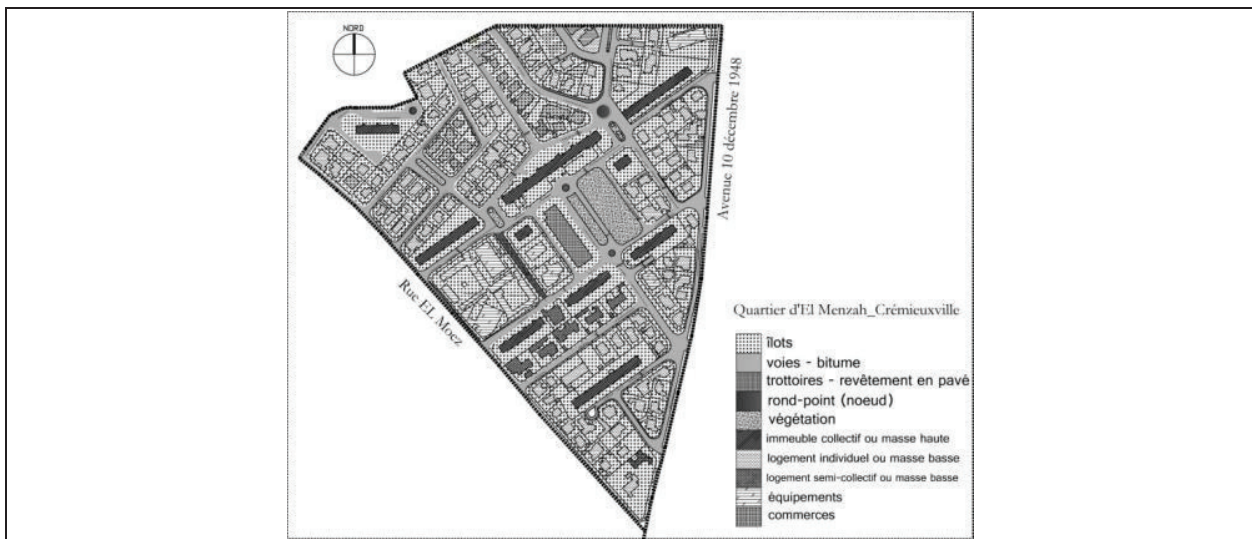


Figure 1. Composantes du quartier d'El Menzah (Source : auteurs)

1.1. La circulation

Le système viaire ou le tracé urbain suit pratiquement une trame orthogonale qui est déterminée par l'axe de l'orientation Sud-Est, Nord-Ouest. Ce tracé est guidé par une logique de hiérarchisation des voies : un axe principal distributif, des axes secondaires perpendiculaires, des bifurcations et des voies inaccessibles. Les espaces de transition urbains marquent le passage ou la graduation dans le cheminement urbain. Ce type d'espace marque la mobilité, qu'elle soit pédestre ou véhiculaire, et particulièrement les limites entre le public et le privé, le rapport entre l'individuel et le collectif ainsi que l'appropriation de l'espace. Ainsi, nous retrouvons dans le quartier des espaces de transition de type : trottoir, galerie, hall traversant (comme percement dans la barre), rue piétonne, jardin. Ces typologies d'espaces apportent un caractère de partage collectif entre les habitants.

1.2. La composante végétale

La composante végétale est prédominante dans le quartier. Elle est présente dans les espaces communs, et matérialise un îlot dédié à cette fonction. La végétation dans le quartier permet plusieurs fonctions : l'ombrage par la végétation peut influencer sur la qualité de vie, la création d'ambiance urbaine et les situations de confort thermique et visuel des usagers. La végétation permet aussi, au fil des saisons, de donner une variation dans la perception de l'espace et donc

une ambiance urbaine changeante et caractéristique au lieu. Cette variation est due aux différentes couleurs (parme, violet, blanche, jaune...) spécifiques aux arbres plantés, surtout en saison printanière.

1.3. Les immeubles en barre

Les immeubles en barre représentent une composante essentielle dans la morphologie urbaine du quartier étant donné leur forme oblongue. Dressés parallèlement suivant une double orientation sud-est/nord-ouest, ils créent par leur trame répétitive et leur aspect rationnel des points signalétiques, renforçant l'axialité suivant laquelle est pensé le quartier. Cette spécificité morphologique pourrait avoir plusieurs impacts sur la climatologie urbaine du quartier ainsi que sur le vécu des habitants.

2. Données et méthodes

Les données climatiques d'un lieu sont en relation avec trois grandes catégories (Bertolo, 1992) : Les facteurs énergétiques en relation avec le rayonnement, La lumière et Les températures, celles hydrologiques en relation avec les précipitations et l'hygrométrie et celles mécaniques en relation avec les écoulements des vents et l'enneigement. Certaines caractéristiques du quartier peuvent impacter sur ses données climatiques comme sa densité, la distance entre les masses, l'orientation, les relations des masses à fonction différente entre elles, la présence de la végétation... Pour prendre compte de ces composantes nous avons dressé un chaînage méthodologique fondé sur la simulation de l'ensoleillement à l'aide du logiciel « Solène » et sur l'analogie configurationnelle pour la ventilation urbaine confrontant les lieux supposés être donneur d'effets aérauliques à la perception usagère de l'espace urbain. Cette même perception sera appréhendée par la méthode du parcours commenté.

3. Résultats

3.1. Simulations d'ensoleillement

Dans leur conception urbaine et architecturale du quartier d'El Menzah, l'équipe de Zehrfuss a tenu compte de plusieurs données essentielles au bon ensoleillement et à la bonne aération. Ces données sont en relation avec l'orientation comme axe majeur à l'implantation des bâtiments, où les masses édifiées de plusieurs hauteurs vont ombrager les espaces publics, ou parfois les masses voisines. Le choix des concepteurs au niveau des distances entre les masses est primordial, déterminant ainsi la qualité d'ensoleillement. Les simulations numériques nous ont permis de relever les paramètres de cette réflexion, qu'elle soit définie par l'ombre portée sur l'espace urbain ou par sa projection sur les masses voisines (habitations individuelles ou immeubles collectifs). Les distances minimales entre les immeubles est de 20m. En saison hivernale, nous avons pu souligner l'effet masque que pouvait avoir l'immeuble Balkiss, le plus haut du quartier sur les habitations individuelles juste derrière. Les usagers de ces logements sont dépourvus de rayonnement solaire, indispensable en hiver pour réchauffer naturellement l'espace intérieur. Les usagers pratiquant les espaces publics derrière l'immeuble pourraient attester de l'inconfort thermique dans ces lieux.

La végétation peut jouer le rôle de masque solaire et aéraulique dans le quartier et même d'un régulateur de l'ambiance hygrothermique dans l'espace public, pouvant créer un « effet de refroidissement » par l'ombrage et en favorisant la consommation de la chaleur sous forme

latente. « Individuellement, les arbres agissent comme masque au soleil, au vent, au son, comme source d'humidité et régulateur de la température de l'air et des surfaces environnantes. Par effet cumulatif, la végétation permet la réduction de l'îlot de chaleur par l'absorption du rayonnement par la masse végétale » (Musy, 2009).

3.2. Rôle de la végétation

La densité urbaine et son intensification engendre ce qu'on appelle « l'îlot de chaleur », due à une température élevée, à la pollution... La composante végétale permet ainsi de réguler la température de l'air et les taux d'humidité. Les arbres caducs permettent, en été et grâce à leur feuillage de masquer principalement les rayons solaires et de réduire la vitesse du vent. En automne et hiver, l'arbre en faisant tomber son feuillage, laisse pénétrer les rayons solaires vers la surface réceptrice.

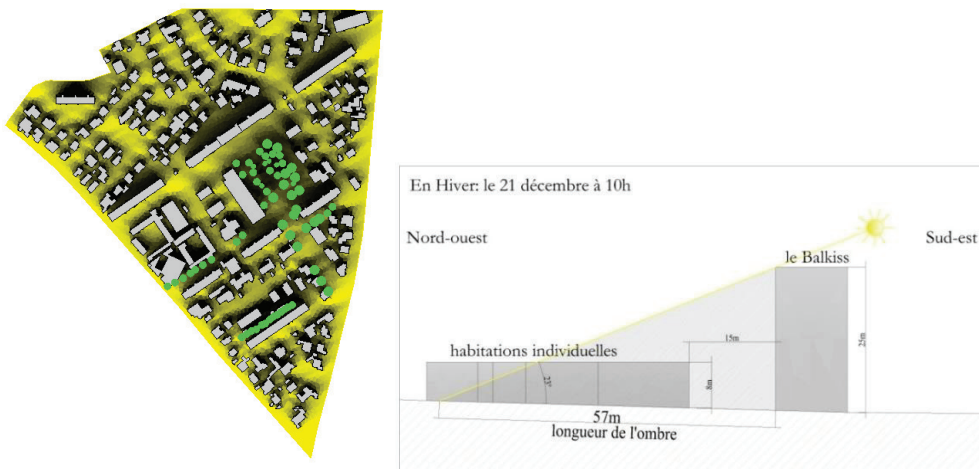


Figure 2. Zones d'ombres le 21 décembre à 10h et effet masque de l'immeuble Balkiss (source : auteurs)

La végétation ponctue plusieurs artères du quartier en plus de l'espace végétal dense au centre. Les voies les plus ponctuées d'arbres sont l'avenue d'El Menzah, la rue du Ressas et l'avenue 10 décembre 1948. Grâce à la taille de la biomasse végétale dans le quartier, la zone d'El Menzah est plutôt décrite comme un « îlot de fraîcheur ». Ce lieu attenant au complexe sportif d'El Menzah qui est fortement végétalisé (Ben Salah, 2012) présente des écarts thermiques de l'ordre de 2 à 4° par rapport aux tissus denses comme celui de la médina de Tunis. Le reste du quartier, étant de configuration pavillonnaire, il présente un îlot de chaleur d'une intensité réduite par rapport à celle détectée dans la zone médinale et les quartiers populaires denses d'Ettadhamen et Ezouhour (Carrega, Charfi, & Dahech, 2010). Le caractère « tempéré » du quartier d'El Menzah est donc due à deux composantes : le caractère dégagé du quartier et son aspect végétalisé.



Figure 3. Densité végétale dans le quartier d'El Menzah (source : auteurs)

3.3. L'analogie configurationnelle pour la ventilation urbaine

Le vent dans l'espace urbain va s'adapter aux obstacles créés par les masses bâties. Il va emprunter « *les couloirs que forment les bâtiments, les angles, les rétrécissements, les dents creuses* » et sa vitesse va être influencée par « *le relief, qu'il soit naturel ou remodelé, créant des zones d'accélération et ses dépressions* ». (Stéphane, 2010). Le comportement du vent dans l'espace urbain subit plusieurs variations dues à différents facteurs pouvant être liés « *à la rugosité du site, la nature de l'environnement et des obstacles, la direction des vents, la géométrie urbaine (densité, dimensions, forme) et la porosité des masses bâties et leur morphologie* » (Bouketta, Bouchahm, Boulfani, & El-Mounir Horra, 2014).

Les immeubles dans un tissu résidentiel jouent le rôle d'obstacle faisant ainsi dévier la trajectoire rectiligne du vent selon une ligne incurvée aussi bien vers l'horizontale que vers la verticale. De ce fait « *des resserrements locaux apparaissent entre les lignes de courant ce qui accélère fortement l'air circulant au-dessus du toit et aux angles* » (Zürcher & Frank, 2014). La forme du bâtiment va ainsi engendrer à travers ses plusieurs facettes plusieurs zones (Athamena, 2012) comme celle de dépression, de décollement ou des zones tourbillonnaires.

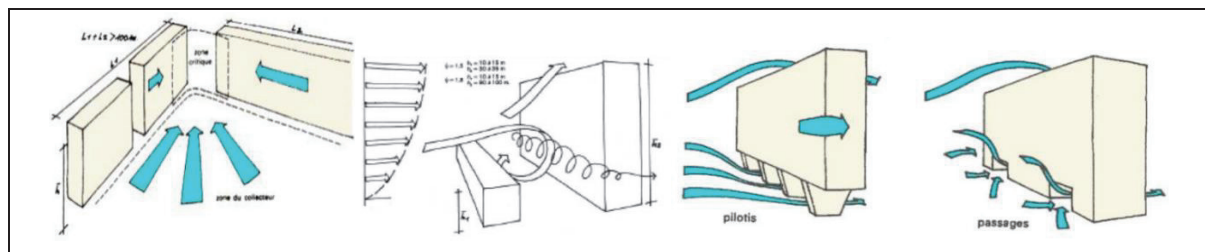


Figure 4. Effets aérauliques générés par les immeubles en barre (source : Gandemer, 1976)

En se basant sur l'étude de Gandemer, « *Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti* » (Gandemer, 1976), précisant que différents effets aérauliques peuvent avoir lieu si l'obstacle ait une hauteur de plus de 15m et/ou qu'il se présente dans une configuration à plusieurs bâtiments. Il est possible d'énoncer que pour les trois immeubles « obstacles » étudiés (le Balkiss, le Sahel et le Virgile), les deux effets Barre et Wise sont présents et ce en raison de leur morphologie en barre, leur hauteur dépassant les quinze mètres et leur emplacement longeant l'habitat individuel d'hauteur beaucoup plus réduite. Cet effet pourrait être plus présent en saison hivernale étant donné la direction des vents d'orientation Nord-Ouest. Le Balkiss présente aussi ces effets, mais en plus il illustre l'effet de trou dû aux pilotis du Grand Hall. L'angle du CITMA et du Ressas engendreraient l'effet Venturi à cause du positionnement à la perpendiculaire de ces deux immeubles.

3.4. Les habitants du quartier d'El Menzah : perception et vécu dans l'espace urbain

La méthode du parcours commenté s'est imposée, pour l'appréhension de la perception des données aérauliques, étant donné l'aspect transitoire du passage d'un espace à un autre. A l'aide des lieux d'appréhension du niveau de pression du vent déterminés préalablement, nous avons caractérisé leur ambiance aéraulique à travers la perception d'une quinzaine d'utilisateurs. Ces personnes ont pu sentir la graduation aéraulique qui s'établit en cheminant d'un espace à un autre. Les habitants confrontés à leur seule perception du cadre bâti et son interaction avec les conditions climatiques, attestent d'un effet de vent ou d'un « courant d'air » dans ces lieux. Les

habitants ressentent une dépression dans l'air engendrant une augmentation de la vitesse du vent. Ceci confirme l'hypothèse soulignant l'impact de la forme en barre et son implantation sur la ventilation en milieu urbain.

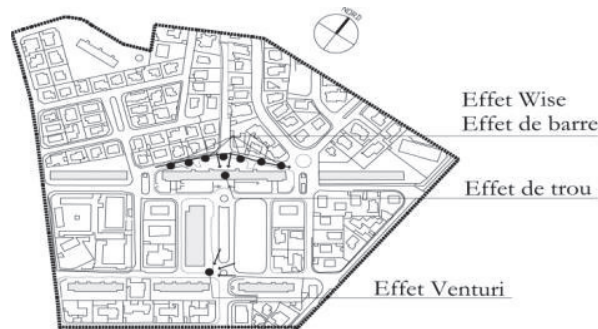


Figure 5. Effets aérauliques dans la tranche étudiée du quartier d'El Menzah (source : auteurs)

Les habitants sont très réceptifs du cadre spatial de leur quartier. Ils ont une bonne appréhension du caractère dégagé du quartier et de la dominance végétale permettant d'apporter un cadre visuel agréable. Pour eux, la végétation omniprésente dans le quartier permet d'ombrager les espaces publics et de les tempérer, engendrant un cadre agréable ou l'ambiance thermo-aéraulique est bien vécue. Ceci engendre une pratique plus récurrente des espaces extérieurs, et appelle à la promenade, à la flânerie et à la pratique de certaines rues plus que d'autres pour leur aspect très végétalisé et ombragé.

Conclusion

L'étude de la dimension physique du quartier d'El Menzah basé sur les deux dimensions solaires et aérauliques, nous a permis d'identifier dans un premier temps l'effet masque des immeubles sur les habitations individuelles se trouvant derrière et particulièrement en saison hivernale. Cette obturation peut provoquer un certain inconfort lumineux et thermique pour les habitants de cette typologie résidentielle. Nous avons aussi souligné l'effet masque de la végétation et son apport vis-à-vis de la régulation thermique dans le quartier. La densité végétale permet d'ombrager les parties publiques et d'adoucir le climat en saison estivale. La donnée aéraulique est aussi très présente dans le quartier. Nous avons ainsi, et à l'aide de supports bibliographiques, présagé les effets aérauliques présents dans le quartier se résumant aux effets de barrière, de Wise, de trou et Venturi. Ces effets sont dus à la configuration morphologique du quartier matérialisée dans la forme en barre des immeubles et leur disposition entre eux et avec les autres masses du quartier. Même si la morphologie urbaine du quartier, représentée en termes de climatologie, certains désavantages, Le quartier d'El Menzah, semble être un quartier décrit comme un «îlot de fraîcheur» et ceci est dû à son caractère dégagé et végétalisé. Les habitants semblent aussi satisfaits de leur cadre de vie, un lieu propice à la pratique des espaces extérieurs et un logement agréable en conséquence.

Bibliographie

Athamena K. 2012 : *Modélisation et simulation des microclimats urbains : étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers* Thèse de Doctorat, spécialité architecture, Ecole Centrale de Nantes, 314p.

- Ben Salah M. 2012 : *Etude exploratoire du rôle ambiantal, énergétique et microclimatique de la végétation des surfaces en milieu urbain tunisien*. Mémoire de mastère, Ecole Nationale d'Architecture et d'Urbanisme de Tunis, 205p.
- Bertolo L. 1992 : *Données Climatiques Utilisées Dans le Bâtiment*. Paris: Techniques de l'ingénieur, p.28, Vol. B, 2015.
- Bouketta S., Bouchahm Y., Boulfani W., El-Mounir Horra B., 2014 : *Optimisation de la géométrie de l'espace urbain pour une qualité de l'ambiance thermo-aéraulique en été. Cas de la ville de Jijel-Algérie. Conférence IBPSA France-ARRAS*.
- Carrega P., Charfi S., Dahech S., 2010 : *Apport de l'imagerie spatiale dans l'étude multiscalaire de l'îlot de chaleur urbain à Tunis. Actes du 23ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rennes*.
- Gandemer, J. 1976 : *Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti: guide méthodologique et conseils pratiques*. Ministère de l'Equipement, Direction de l'Aménagement Foncier et de l'Urbanisme, La documentation française CSTB, Paris, 130 p.
- Musy, M. 2009 : *Le végétal en ville, un régulateur de climat?*, Jardins, environnement et santé. *11ème colloque scientifique de la SNHF*. Paris, Société Nationale d'Horticulture de France.
- Stéphane J.-P. 2010 : *Maîtriser le vent dans les projets d'aménagement urbain. TECHN.CITÉ*, S n°200, 26-27.
- Zürcher C., Frank T. 2014 : *Physique du bâtiment : Construction et énergie*. Zurich : vdf Hochschulverlag AG, 360 p.

MONITORING DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN DE CLUJ-NAPOCA, ROUMANIE

HOLOBĂCĂI H.

Université Babeş-Bolyai, Faculté de Géographie, 5-7, rue Clinicilor, 3400 Cluj-Napoca, Roumanie, holobaca@geografie.ubbcluj.ro

Résumé : *L'investigation de l'îlot de chaleur urbain est un sujet important dans la climatologie urbaine à cause de son caractère appliqué. Dans cette étude nous présentons les observations de l'ICU qui ont permis l'identification objective des points d'observation automatique en Cluj-Napoca, Roumanie. La représentativité spatiale des observations manuelles a été assurée par la cartographie préalable des zones urbaines homogènes. Après l'identification des caractéristiques saisonnières de l'intensité de l'ICU, a été dressée la carte des zones thermiques élémentaires avec ArcGis. Les « points critiques » ont été extraits comme centroïdes des surfaces thermiques élémentaires.*

Mots-clés : îlot de chaleur urbain, monitoring, zones urbaines homogènes, Cluj.

Abstract: *Monitoring of the Urban Heat Island in Cluj-Napoca, Romania. The monitoring of the urban heat island is a very important topic in urban climatology because of the many potential applications. In this study, we present the observations of the UHI which permitted an objective identification of the automate monitoring observation points in Cluj-Napoca, Romania. The identification of the urban homogeneous zones allowed the spatial representativity of the manual observations. After the identification of the seasonal patterns of the UHI intensity, the thermal elementary zones have been mapped using ArcGis. The "critical points" are the centroids of the thermal elementary surfaces.*

Keywords: heat island, monitoring, urban homogenous zones, Cluj.

Introduction

Cluj-Napoca est une ville située au nord-ouest de la Roumanie. Troisième du pays par la population (environ 325000 habitants en 2011), elle est le principal pôle économique de la Transylvanie. Le développement urbain et la transition vers une gestion intelligente des ressources (smart city) exigent la connaissance des caractéristiques de la variabilité spatiale et temporelle de l'îlot de chaleur urbain. Cette étude présente les campagnes d'observations préliminaires qui ont eu comme but l'automatisation du monitoring de l'îlot de chaleur urbain.

1. Méthodologie

L'identification de la position optimale des capteurs de température du système automatique de monitoring a nécessité plusieurs campagnes d'observations. La préoccupation principale a été l'assurance de la représentativité spatiotemporelle. En ce qui concerne la représentativité temporelle, on a organisé des observations dans toutes les saisons. Pour optimiser les résultats, on a choisi des nuits sans nuages et sans vent (régime anticyclonique) et les mesures ont été effectuées au début de la période de stabilité (entre 23h et 1h du matin), en utilisant une correction de temps.

Nous avons utilisé des thermomètres ordinaires pour mesurer la température de l'air en 84 points. Pour assurer la représentativité spatiale, les points de mesure ont été choisis à partir de la cartographie des zones urbaines homogènes. En adaptant la méthodologie de Oke (2004) et Stewart and Oke (2012), nous avons identifié pour la ville de Cluj-Napoca 8 types de zones (Figure 1). Pour la délimitation des zones urbaines homogènes, nous avons utilisé les orthophotoplans couleur à une résolution spatiale de 5 mètres.

2. Résultats

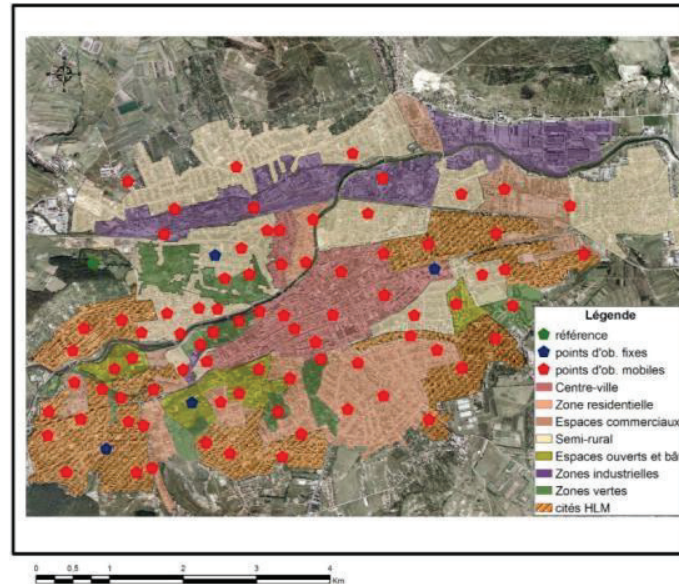


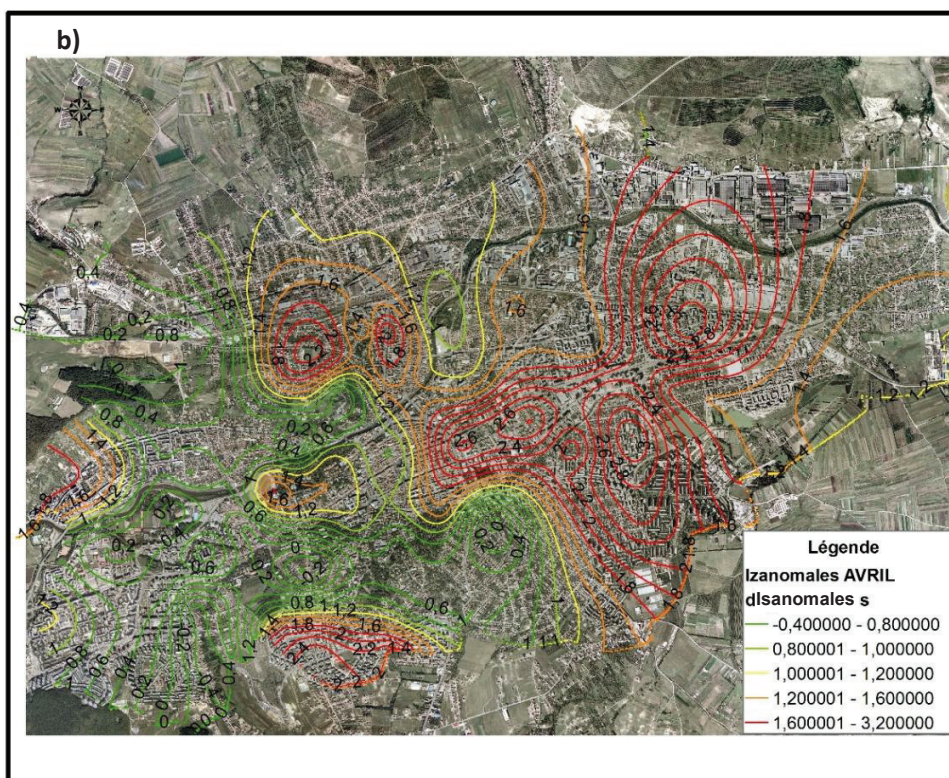
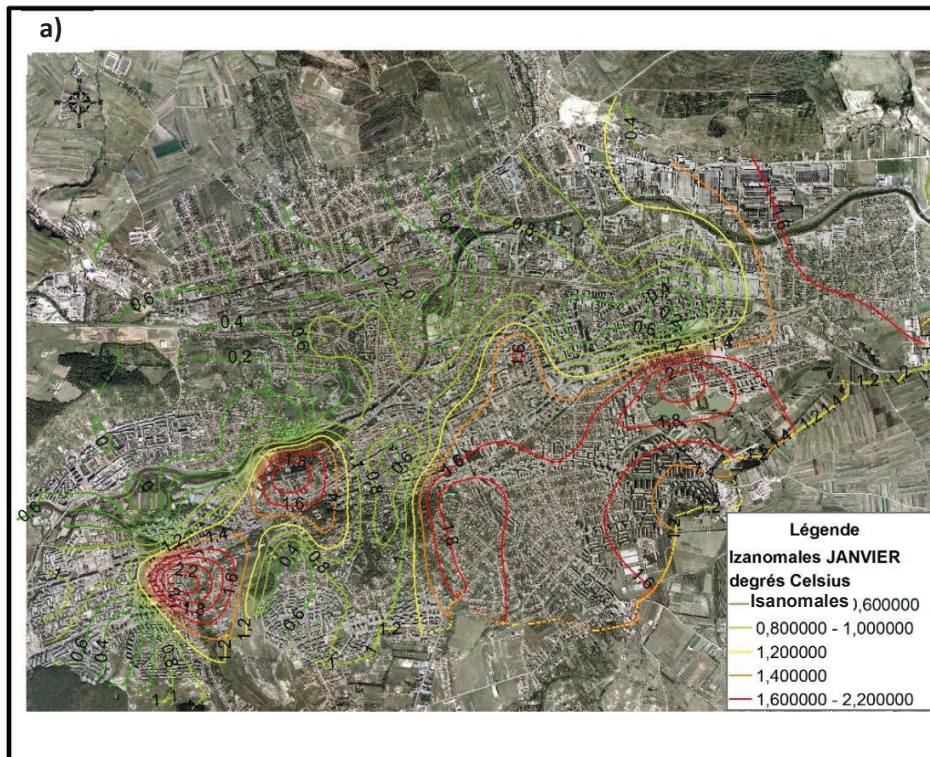
Figure 1. Les zones urbaines homogènes et les points d'observation

En utilisant le logiciel ArcGis, on a obtenu des cartes de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain pour chaque saison (Figure 2). On a calculé l'intensité de l'îlot de chaleur urbain comme différence entre la température mesurée dans le point de référence situé à l'extérieur de la ville et les températures enregistrées dans les points d'observation situés au milieu urbain. Les observations ponctuelles ont été spatialisées en utilisant une interpolation spline avec des barrières. La comparaison des cartes et le calcul de la situation moyenne à partir de toutes les mesures en utilisant l'outil « raster calculator » ont permis l'analyse des caractéristiques spatiales et l'identification des « points critiques » pour l'emplacement des capteurs automatiques de température. Cette démarche permet d'identifier la position du nombre minimal des points d'observation qui peuvent surprendre les caractéristiques spatiales de l'îlot de chaleur urbain (d'où le caractère « critique » des points).

L'intensité maximale de l'ICU est observée pendant l'été ($4,4^{\circ}\text{C}$). Les différences maximales sont moindres pendant le printemps ($3,2^{\circ}\text{C}$) et modestes pendant l'hiver ($2,3^{\circ}\text{C}$). La différence est due à la genèse radiative du phénomène, la durée d'ensoleillement est beaucoup plus importante pendant l'été par rapport à l'hiver.

En analysant les cartes saisonnières d'intensité de l'ICU, on observe une asymétrie est-ouest dans la distribution de la température. Pendant toutes les saisons, on remarque que la partie est de la ville est plus chaude que la partie ouest, et que l'intensité maximale de l'ICU est localisée dans la partie centrale-est de la ville.

A notre avis, cette distribution d'intensité de l'ICU est due à la topographie et à la morphologie de la ville qui a une forme allongée sur l'axe est-ouest parce qu'elle est enfermée au nord par le front de cuesta de Someșul Mic et au sud par les collines hautes de Feleac (figure 3). Même dans des conditions anticycloniques stables, la brise de montagne nocturne est canalisée sur la vallée de Someș et l'air chaud est poussé vers l'est.



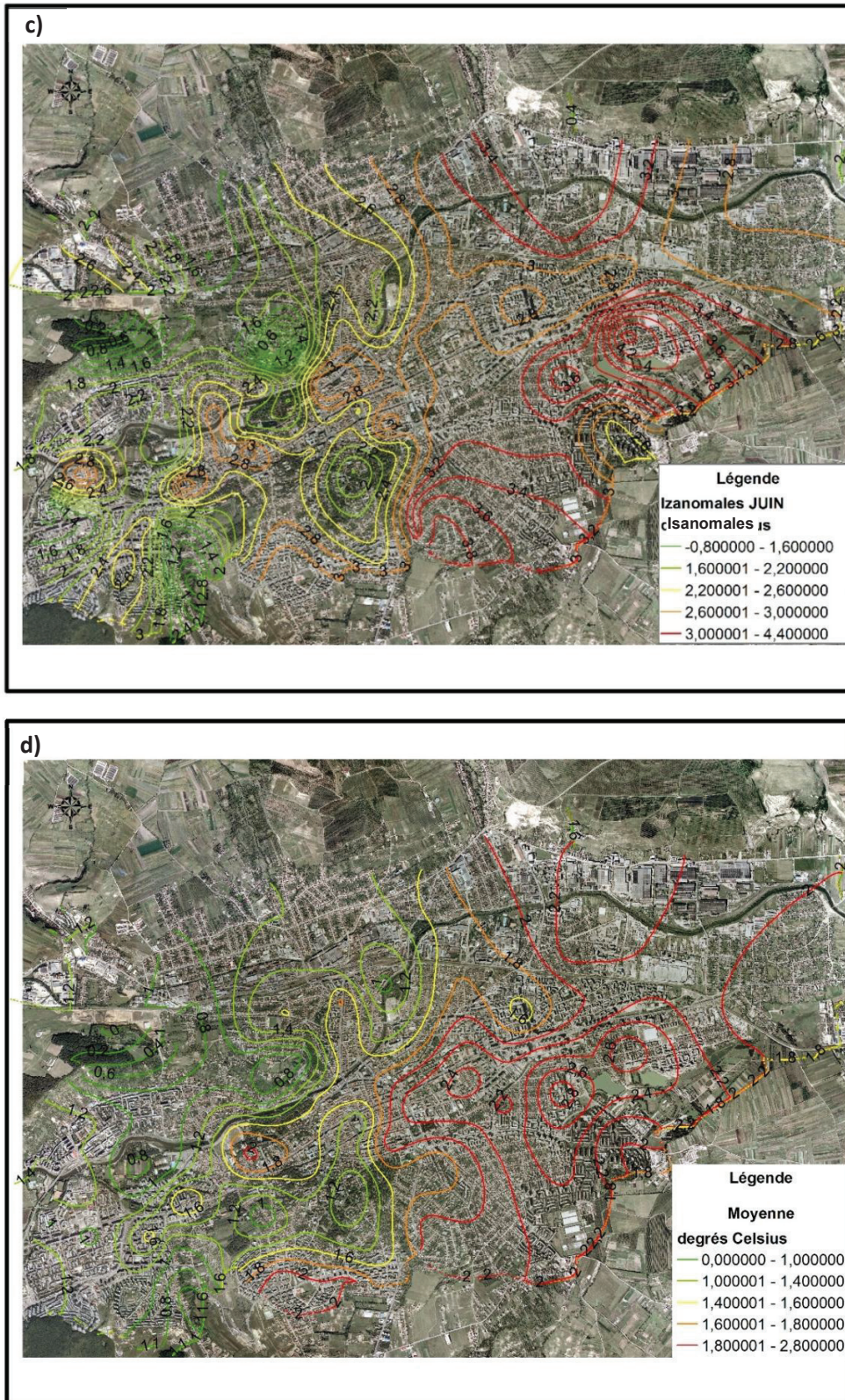


Figure 2. Intensité de l'îlot de chaleur urbain a) janvier, b) avril, c) juin, d) moyennes sur les 3 mois

Après la topographie, le deuxième facteur d'influence est le type de surface urbaine. On remarque que le relief thermique urbain n'est pas uniforme et qu'on a des formes positives et négatives. L'influence des caractéristiques de la surface urbaine est bien visible sur la carte moyenne de l'intensité de l'ICU (Figure 2d). Les formes positives sont situées au-dessus du centre-ville ou des zones imperméables et les formes négatives sont bien visibles au-dessus des zones vertes.

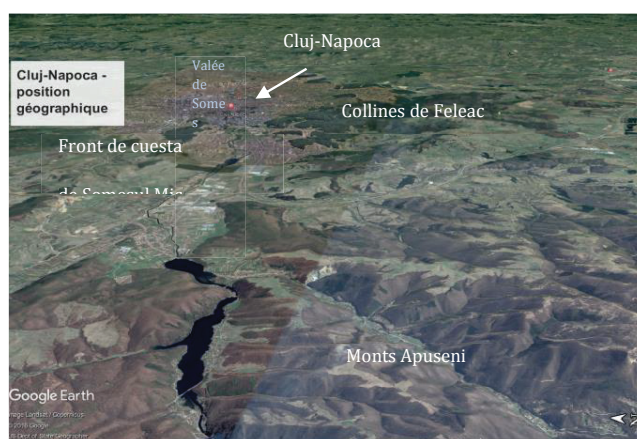


Figure 3. La topographie et la morphologie de la ville de Cluj-Napoca

L'analyse quantitative de la variabilité saisonnière de l'ICU dans les zones urbaines homogènes (Figure 4) permet l'identification de ces influences. On remarque que le centre-ville est chaud et avec une variabilité réduite dans toutes les saisons.

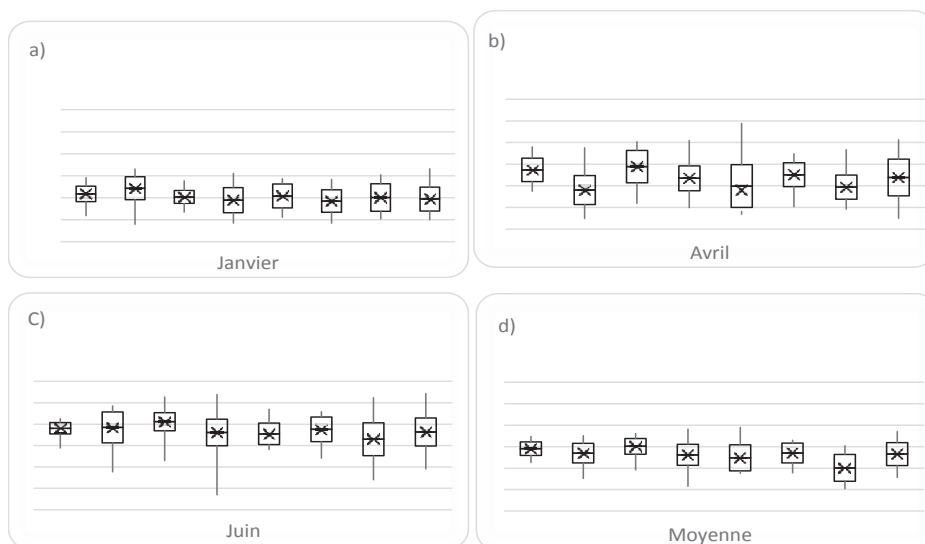


Figure 4. La variabilité de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain dans les zones urbaines homogènes (minimum, maximum, \pm déviation standard, moyenne)

Dans les classes « chaudes » sont aussi comprises les « espaces commerciaux », « zones industrielles » et « cités HLM », mais ayant une plus grande variabilité. Les classes « froides » sont : « espaces verts », « espaces ouverts et bâtiments » et « semi-rural ». Une situation suggestive apparaît pendant l'hiver (au dehors de la période de végétation) quand les zones vertes

ont une température moyenne plus élevée que les citées HLM. Dans la même saison, quand l'ICU est généré en principal par la chaleur résiduelle, la classe la plus chaude est la « zone résidentielle ».

L'identification objective des « points critiques » pour le monitoring automatique de l'ICU a été faite à partir de l'élaboration de la carte des zones thermiques élémentaires (Figure 5) en ArcGis. Les cartes saisonnières de l'ICU ont été ré-classifiées en utilisant les quantiles pour assurer la comparabilité des données spatiales ayant un intervalle total de variation inégal. Pour limiter le nombre des classes, on a utilisé trois quantiles. L'outil ArcGis « combine » a permis l'identification des zones thermiques élémentaires. Les polygones ainsi obtenus ont été simplifiés en éliminant les surfaces trop petites (< 0.1 km² dans notre cas). Les « points critiques » sont les centroïdes des surfaces thermiques élémentaires (Figure 5).

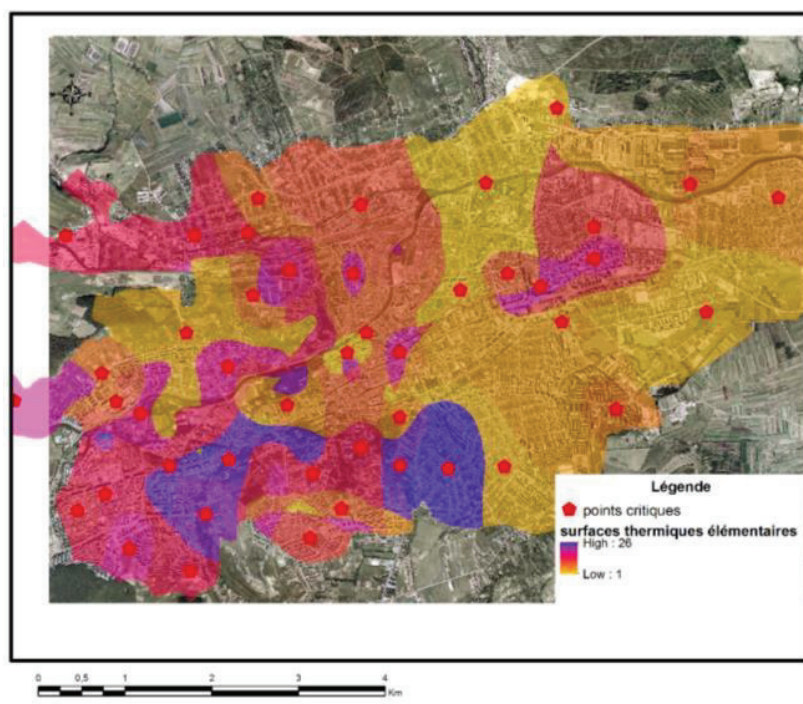


Figure 5. Zones thermiques élémentaires et les points d'observation pour le monitoring automatique de l'îlot de chaleur urbain

Conclusion

L'étude de l'îlot de chaleur urbain est très importante pour la planification et la gestion du développement urbain. C'est la représentativité spatio-temporelle des observations momentanées effectuées qui a permis l'identification des caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain. A partir de l'analyse spatiale des cartes de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain nous avons identifié 24 « points critiques » pour le monitoring automatique.

Bibliographie

Oke T., 2004 : Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. IOM Rep. 81, WMO/TD-No. 1250, 47 p. [Available online at www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/publications/IOM-81/IOM-81-UrbanMetObs.pdf.]

Stewart I., Oke T., 2012 : Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93**, 1879–1900, doi: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.

VARIABILITÉ ET TENDANCES PLUVIOMÉTRIQUES DANS TROIS VILLES DU MONDE TROPICAL: LES CAS DE SANTOS (BRÉSIL), MAPUTO (MOZAMBIQUE) ET BRISBANE (AUSTRALIE)

LINDBERG NASCIMENTO J.¹; DOUTRELOUP S.²; MUSSULMADE SAIDE J.³; DUBREUIL V.⁴; LIMA SANT'ANNA NETO J.⁵

¹Groupe de recherche GALA et étudiant de Doctorat en Géographie de l'UNESP, Rue José Levy Guedes, 585, Presidente Prudente, Brasil, juniohr@gmail.com.

²Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie, Université de Liège, 2 allée du VI Août, 4000 Liège, Belgique, s.doutreloup@ulg.ac.be.

³Astromoz, Centre Interactif pour l'Astronomie en Mozambique, Maputo, saide92jordao@gmail.com

⁴LETG-Rennes-COSTEL, UMR 6554 CNRS, Université Rennes 2, France, vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr.

⁵Département de Géographie - UNESP, Rue Roberto Simonsen, 305, Presidente Prudente, Brésil, jlsn57@uol.com.br.

Résumé – La présente étude consiste à extraire l'ensemble des informations qui peuvent nous renseigner sur les caractéristiques pluviométriques récentes dans le monde tropical. L'analyse a été basée sur l'étude de la variabilité et des tendances interannuelles des précipitations dans trois villes : Santos – Brésil, Maputo – Mozambique et Brisbane – Australie, sur la période allant de 1951 à 2015. Ces trois villes sont situées au sud du Tropique du Capricorne, et sur la côte orientale de chacun des pays. Les précipitations montrent une augmentation en juillet pour les villes de Santos et de Maputo. La ville de Brisbane ne présente pas de changement de précipitation dans la série historique. En général, les résultats représentent bien la dynamique du climat et aussi des tendances pluviométriques dans le monde tropical.

Mots-Clés : Précipitation; Variabilité; Tendances; Monde Tropical.

Abstract – *Variability and rainfall trends in three tropical cities: the case of Santos (Brazil), Maputo (Mozambique) and Brisbane (Australia).* The present study consists in extracting the information that can inform us about the recent rainfall characteristics in the tropical world. The analysis based on the study of interannual rainfall variability and trends in three cities: Santos - Brazil, Maputo - Mozambique and Brisbane – Australia, in 1951 to 2016. These three cities are located to the south of the Tropic of Capricorn, and on the east coast of each country. The results indicates an increase in precipitation in July in Santos and Maputo cities. To Brisbane city, the rainfall was not change. In general, the results sows a part of the climate dynamics and rainfall trends in the tropical world.

Keywords: Rainfall; Variability; Trends; Tropical world.

Introduction

Le monde tropical est une région de la planète qui se caractérise par un climat de faibles et moyennes conditions de prévisibilité parce que la dynamique tropical est produite par des systèmes atmosphériques de genèse différente (tropicaux et extratropicaux) (Sant'Anna Neto, 1990). Compte tenu du contexte mondial, les études qui s'intéressent aux changements de précipitations dans le monde tropical, montrent une augmentation significative principalement durant la saison des pluies (octobre à mars). Parmi ces études on peut citer celles effectuées à Bangladesh (Hasan *et al.*, 2014), Ethiopie (Addisu *et al.*, 2015), Taiwan (Yeh *et al.*, 2015), Equateur, nord du Pérou, sud du Brésil, Paraguay, Uruguay, nord et centre d'Argentine (Haylock *et al.*, 2006) et d'autres régions de Brésil (Blain *et al.*, 2005 ; IPCC, 2007 ; Debortoli *et al.*, 2012, 2015 ; Tozato, 2015 ; Nascimento, 2013).

La présente étude consiste à extraire l'ensemble des informations qui peuvent renseigner sur les caractéristiques pluviométriques récentes dans le monde tropical, en prenant l'exemple des villes côtières de Santos (Brésil), Maputo (Mozambique) et Brisbane (Australie) durant la période de 1951 à 2015. Ces trois villes sont situées au sud du tropique du Capricorne, sur la façade orientale des continents, baignées respectivement par les océans Atlantique, Indien et Pacifique.

Cette étude est comparative. Sa première partie est une description des données et des techniques utilisées. La partie suivante expose les caractéristiques pluviométriques récentes, avec une explication du contexte géographique et climatique des trois villes. Elle se concentre sur la description des principaux facteurs climatiques et sur les systèmes produisant la pluie mettant ainsi en évidence leurs différences ainsi que leurs similitudes.

2. Données et méthodes

Les données utilisées, pour la période 1951-2015¹², proviennent des réseaux de stations pluviométriques du Département National des eaux et Energie Electrique du Brésil - DNAEE, de l'Institut National de Météorologie du Mozambique – INAM, et du Bureau de Météorologie d'Australie – BM (voir Tableau 1).

Tableau 1. Stations pluviométriques utilisées dans cette recherche.

Ville	Station	Nom	Latitude	Longitude	Altitude	Institution
Santos	Posto do Saboó	DNAEE - 02316279	23°56'06" S	46°20'22" O	60 m	DNAEE
Maputo	Observatório	Observatório Meteorológico Campos Rodrigues	25°58'00" S	32°36'00" L	60 m	INAM
Brisbane	Alderley	BM station number - 40224	27°25'12" S	153°00'00" L	39 m	BM

Les données ont été soumises à l'analyse de fiabilité et de cohérence. Seules les séries historiques sans erreur et sans absence de données ont été sélectionnées. Ensuite, ces données ont été regroupées en montrant les totaux mensuels et annuels.

Toutes les valeurs ont été soumises à des tests d'homogénéité fournis par le modèle Mann-Whitney-Pettitt (Pettitt, 1979). Pour les séries qui ont au moins un moment de transition, on a appliqué une homogénéisation par la technique SNHT (*Standard Normal Homogeneity Test*) développée par Alexandersson (1986). Tout le traitement a été effectué à l'aide d'AnClim[®] (Štěpánek, 2007).

A titre de comparaison et d'analyse, la série a été représentée par la technique de normalisation et a été soumise à des mesures descriptives de la variabilité, grâce à la tendance de Mann-Kendall et à la régression linéaire (Mann, 1945). Les paramètres utilisés pour les essais étaient les suivants: hypothèse alternative $\alpha \neq 0$; niveau de signification de 5%. Ces procédures ont été réalisées dans l'application XLStat[®].

3. Les contextes géographique et climatique

3.1. Caractéristiques tropicales dans les zones côtières

En raison de la proximité de la mer, les trois villes, Santos au Brésil, Maputo au Mozambique et Brisbane en Australie, ont des caractéristiques tropicales côtières, avec la circulation atmosphérique d'origine habituelle d'est. Cela signifie que les types de temps et le climat sont

¹² La période choisie concerne à la série historique commune aux trois villes.

fortement influencés par l'océan, et par les systèmes atmosphériques qui subissent également une influence océanique, notamment à travers l'interface océan-atmosphère-continent.

Ces conditions climatiques montrent une saisonnalité pluviométrique très marquée, avec l'identification de deux saisons : une saison des pluies et une saison moins pluvieuse, voire sèche, typique du monde tropical (Figure 1).

Même si les caractéristiques tropicales côtières des trois villes présentent beaucoup de similarités, les différences sont bien plus intéressantes, dont les plus marquantes concernent les valeurs de précipitation.

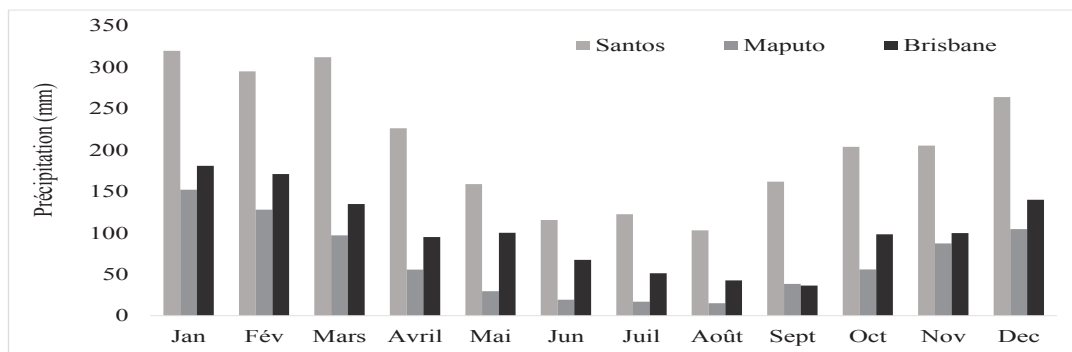


Figure 1. Variation moyenne mensuelle des pluies à Santos, Maputo et Brisbane de 1951 à 2015

Les différences climatiques sont également associées à des facteurs climatiques qui influencent la région en général, comme par exemple, les caractéristiques physiques et thermiques des océans ou la présence et la dynamique des anticyclones généralement centrés à proximité des zones étudiées, et aussi les zones de convergence océanique dans l'hémisphère sud.

Mais ces facteurs climatiques peuvent également être propres à chaque ville, comme par exemple, l'orographie ou l'affectation du sol qui peuvent modifier localement les conditions climatiques (Monteiro, 1973; Muchangos, 1999 ; Beckmann *et al.*, 1987).

3.3. Caractérisation des précipitations

La caractérisation des précipitations dans sa variabilité montre que la ville de Santos présente la plus grande pluviométrie par rapport à Maputo et Brisbane (Figure 2). À Santos, la moyenne annuelle des précipitations est de 2499,5mm/an, suivie de Brisbane (avec 1218,3mm/an) et enfin de Maputo (avec 800,3mm/an) sur la période 1951-2015 (Figure 2).

En observant d'autres paramètres statistiques (comme le minimum ou le maximum), on retrouve le même classement entre les trois villes, mais il est inversé en examinant la valeur du coefficient de variation qui est plus important à Maputo (31,5%), suivi par Brisbane (29,0%) et puis Santos (18,8%) (Tableau 2).

Ceci est dû précisément à la situation et à l'emplacement de Santos par rapport aux systèmes atmosphériques produisant de la pluie ainsi qu'aux facteurs climatiques qui diffèrent grandement à Maputo et à Brisbane.

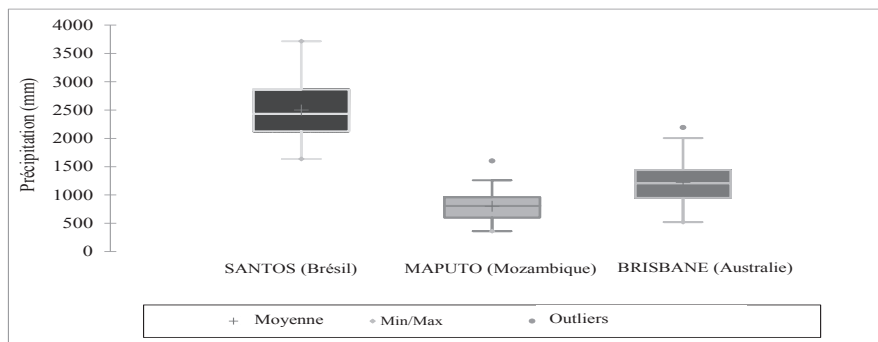


Figure 2. Différences entre le cumul annuel moyen des précipitations des villes de Santos, Maputo et Brisbane sur la période allant de 1951 à 2015.

Santos, située dans la zone côtière de l'État de São Paulo, reçoit toute l'année beaucoup d'humidité apportée par la brise de mer due à sa proximité à l'océan, par les systèmes frontaux. Elle est souvent influencée par le positionnement de l'Anticyclone Semi-stationnaire de l'Atlantique Sud (ASAS). La ville est surtout influencée par l'effet orographique de la Serra do Mar. Comme la ville est proche de la montagne, les pluies orographiques sont fréquentes et ont une variabilité annuelle faible mais les quantités de précipitations sont plus importantes que celles apportées par l'humidité de l'océan Atlantique (Bittar, 2014).

En revanche, Maputo et Brisbane ne sont pas situées au voisinage direct d'une barrière orographique. La variabilité annuelle des pluies est due aux systèmes météorologiques et aux conditions océaniques (Muchangos, 1999 ; Beckmann *et al.*, 1987). On constate que c'est la ville de Maputo qui offre la plus grande variabilité annuelle des précipitations.

Les précipitations à Santos sont associées, selon Monteiro (1973), Conti (1975) et Sant'Anna Neto (1990), au contexte régional de la zone côtière de São Paulo, qui comprend des systèmes frontaux comme les principaux producteurs de mécanismes des précipitations. De tels systèmes, lorsqu'ils sont combinés à l'effet orographique de la Serra do Mar, et à l'apparition de la brise de mer qui dépend de la position et de la force de l'ASAS, favorisent la répartition des précipitations tout au long de l'année et ne peuvent pas clairement établir qu'une saison nettement plus sèche que l'autre.

La ville de Maputo, située à 25°05' de latitude sud et 32°40' de longitude est, est géographiquement positionnée dans la baie de Maputo, limitée par la rivière Infulene, qui coule au sud de la ville vers l'océan Indien. Son altitude est de 80 m au-dessus du niveau de la mer. Dans le contexte côtier du Mozambique, les pluies sont essentiellement produites par la conjugaison de courants chauds provenant du canal du Mozambique et des vents dominants maritimes venant de l'est. Des précipitations orographiques se produisent très localement (Muchangos, 1999). Contrairement à Santos, Maputo a une importante saison sèche.

La ville de Brisbane est localisée à 27°20' de latitude Sud et à 153°00' de longitude Est dans le bassin de la rivière Brisbane qui traverse l'intérieur de la zone urbaine et se jette dans l'océan Pacifique, dans la baie de Moreton. La zone côtière est assez plate, avec des variations de 10m, mais la ville présente une importante variation altimétrique (550 m d'altitude) dans son secteur nord-ouest (Beckmann *et al.*, 1987).

La saison des pluies à Brisbane est associée à la dynamique de la mousson, aux températures de l'océan Pacifique, et, en particulier, à l'humidité de l'océan, qui parvient jusqu'à la ville par les

vents d'est, généralement associés soit à l'anticyclone du Pacifique tropical du Sud, soit à la fin de la saison de la mousson et des perturbations d'est (Beckmann *et al.*, 1987). En plus de ces systèmes, les zones de convergence de l'Atlantique Sud (ZCAS), de l'Indien Sud (ZCIS) et du Pacifique Sud (ZCPS), qui sont des systèmes de convergence dans la basse troposphère, avec l'habituelle orientation nord-sud, caractérisent aussi les précipitations dans les trois villes, principalement à l'été et au printemps (période de la saison des pluies).

3.1 Les tendances pluviométriques

En ce qui concerne les tendances pluviométriques, les trois villes fournissent deux aspects quand les données sont soumises au test de Mann-Kendall (Table 3).

Tableau 3. Calcul des tendances des précipitations selon le test de Mann-Kendall

Tendances	Santos		Maputo		Brisbane	
	p-valeur	Valeur de β	p-valeur	Valeur de β	p-valeur	Valeur de β
Jan	0,464	0,732	0,457	0,744	0,605	-0,517
Fév	0,555	-0,590	0,499	0,675	0,883	-0,148
Mars	0,973	0,034	0,851	0,187	0,158	-1,412
Avril	0,747	-0,323	0,179	-1,344	0,314	-1,007
Mai	0,654	-0,448	0,096 ⁺	-1,664	0,670	0,427
Jun	0,127	1,525	0,300	1,037	0,855	-0,182
Juil	0,023*	2,269	0,002**	3,028	0,154	-1,426
Août	0,590	-0,539	0,362	-0,911	0,454	0,749
Sept	0,188	1,315	0,081 ⁺	-1,743	0,896	-0,131
Oct	0,447	-0,761	0,379	-0,879	0,691	0,397
Nov	0,777	0,284	0,188 ⁺	1,316	0,662	0,437
Dec	0,559	0,584	0,066	1,839	0,214	-1,243
Année	0,438	0,776	0,821	-0,227	0,405	0,832

⁺p-valeur avec le niveau de significativité $\alpha=0,90$; *p-valeures avec le niveau de significativité $\alpha=0,95$; **p-valeur avec le niveau de significativité $\alpha=0,99$;

La tendance des valeurs montre : a) une augmentation de 1,18 mm en juillet à un niveau de signification $\alpha = 0,05$ à Santos ; b) Maputo a montré des tendances de précipitations ($\alpha = 0,10$) de -1,74 en septembre, de -1,66 en mai et de 1,31 en novembre, mais le plus important c'était en juillet avec +3,03mm annuel statistiquement significatif ($\alpha = 0,01$); enfin, c) Brisbane ne montre pas de tendance significative (Tableau 3).

Ainsi, l'augmentation significative des précipitations en juillet à Maputo et à Santos suggère une élévation modérée des pluies dans la saison sèche pour ces villes. Avec ces résultats, les villes côtières suggèrent un processus moins intensif de tropicalisation dans les précipitations.

Habituellement, les études menées en zone tropicale continentale ont démontré que les précipitations augmentent durant la saison humide (Tomozeiu *et al.*, 2000 ; Taxak *et al.*, 2013 ; Basistha *et al.*, 2008 ; Hasan *et al.*, 2014 ; Addisu *et al.*, 2015 ; Yeh *et al.*, 2015 ; Haylock *et al.*, 2006 ; Blain *et al.*, 2005 ; IPCC, 2007 ; Debortoli *et al.*, 2012, 2015 ; Tozato, 2015 ; Nascimento Jr, 2013). Or notre étude démontre que les précipitations des villes tropicales côtières, à l'exemple de Santos et Maputo, augmentent préférentiellement durant la saison sèche.

Sans compter qu'une grande partie de la variabilité interannuelle peut également être associée à la cyclicité et à la périodicité du passage des fronts - l'un des systèmes atmosphériques les plus importants du monde tropical (Monteiro, 1973).

5. Conclusion

En général, l'observation des précipitations montre que le contexte tropical particulièrement pluvieux à Santos, se distingue de Maputo et de Brisbane en raison de l'effet orographique de la Serra do Mar, très proche et importante dans le contexte côtier de l'État de São Paulo (Brésil). Pour cet aspect, Santos recueille le plus important cumul de précipitations avec la variabilité la plus faible des trois villes étudiées.

Les tendances positives des précipitations sont plus importantes à Santos et à Maputo en juillet, durant la saison sèche, et suggère que l'effet de tropicalisation dans les zones côtières du monde tropical diffère des régions tropicales continentales qui montrent plutôt une augmentation de la pluviométrie durant la saison humide.

Bibliographie

- Addisu S., Selassie Y. G., Fissaha G., Gedif B., 2015 : Time series trend analysis of temperature and rainfall in lake Tana Sub-basin, Ethiopia. *Environmental Systems Research*, **4** (1) 25, 1 -12.
- Alexandersson A., 1986 : A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of climatology*, **6**, 661- 675.
- Beckmann, G. G; Hubble, G. D.; Thompson, C. H. 1987 : *The soil landscapes of Brisbane and south-eastern environs*. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australia.
- Bitar, O.Y., 2014 : *Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1: 25.000 (livro eletrônico). Nota técnica explicativa*. São Paulo: IPT–Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF: Serviço Geológico do Brasil, 2014. Publicação IPT, **5**.
- Blain G. C., Picoli M. C. A., Lulu J., 2009 : Análises estatísticas das tendências de elevação nas séries anuais de temperatura mínima do ar no estado de São Paulo. *Bragantia*, **68** (3), 807-815,
- Conti, J. B., 1975 : *Circulação secundária e efeito orográfico na gênese das chuvas na região lesnordeste paulista*. Série Teses e Dissertação. **18**. Universidade de São Paulo, Instituto de Geografia.
- Debortoli, N. S., Dubreuil, V., Funatsu, B., Delahaye, F., De Oliveira, C. H., Rodrigues-Filho, Saito, C ; Fetter, R. 2015 : Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971–2010). *Climatic Change*, **132**, **2**, 251-264.
- Hasan, Z., Akhter, S., Islam, M., 2014 : Climate change and trend of rainfall in the south-east part of coastal Bangladesh. *European Scientific Journal*, **10**(2), 25 – 39.
- Haylock M. R., Peterson T. C., Alves L. M., Ambrizzi T., Anunciação Y. M. T., Baez J., Barros V. R., Berlato M. A., Bidegain M., Coronel G., Corradi V., Garcia V.J., Grimm A. M., Karoly D., Marengo J. A., Marino M. B., Moncunill D. F., Neche T. D., Quintana J., Rebello E., Rusticucci M., Santos J. L., Trebejo I, Vincent L. A., 2006 : Trends in total and extreme South American rainfall in 1960-2000 and links with sea surface temperature. *Journal of climate*, **19** (8), 1490-1512.
- IPCC. 2007 : Cambio climático: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs.
- Mann H.B., 1945 : Non Parametric Test Against Trend. *Econometrika*, **13**, 245-259.
- Monteiro, C. A. F., 1973 : *A dinâmica climática e as chuvas no estado de São Paulo: Estudo em forma de Atlas*. São Paulo: IGEOG/USP, 1973.
- Muchangos, A. *Moçambique, Paisagens e Regiões Naturais*. 1999.
- Nascimento Júnior, L., 2013 : *As chuvas no Paraná: variabilidade, teleconexões e impactos de eventos extremos*. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente.
- Pettitt A.N., 1979 : A Non-Parametric Approach To The Change-Point Problem. *Applied Statistics*, **28**, 126-135.
- Sant'anna Neto, J. L., 1990 : *Ritmo climático e a gênese das chuvas na Zona Costeira Paulista*. 168 p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, SP.
- Stepanek, P., 2007 : *AnClim - software for homogenization and time series analysis*. Department of Geography, Faculty of Natural Sciences, Masaryk University, Brno.
- Taxak A. K., Murumkar A. R., Arya D. S., 2014 : Long term spatial and temporal rainfall trends and homogeneity analysis in Wainganga basin, Central India. *Weather and climate extremes*, **4**, 50–61.
- Tozato H. C., 2015 : *Conséquences des changements climatiques sur la diversité biologique des zones humides: une analyse de politiques publiques et de gestion au Brésil et en France*. Geography. Université Rennes 2.
- Yeh, C. F., Wang, J., Yeh, H. F., & Lee, C. H., 2015 : Spatial and temporal streamflow trends in northern taiwan. *Water*, **7**(2) : 634-651.

ÉVALUATION DES EFFETS THERMIQUES DES LEVIERS D'ACTION VISANT À RÉDUIRE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN : L'EXEMPLE DE DIJON

RICHARD Y.¹, POHL B.¹, PERGAUD J.¹, ZITO S.¹, REGA M.¹, THÉVENIN T.², EMERY J.²,
VAIRET T.², DUDEK J.³, THÉVENIN D.⁴, CODET HACHE O.⁵, DODET M-F.⁵

¹ Centre de Recherches de Climatologie, UMR 6282 Biogéosciences, CNRS/Univ Bourgogne Franche-Comté

² UMR 6049 THEMA, CNRS/univ Bourgogne Franche-Comté

³ UMR 5600 Environnement Ville Société, CNRS/Univ Lyon III

⁴ CDM 21, Météo France

⁵ Service écologie urbaine, Communauté Urbaine du Grand Dijon

Résumé – *Changement climatique et îlot de Chaleur Urbain (ICU) additionnent leurs effets et concourent à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des situations caniculaires en ville. Compte tenu des enjeux de santé publique associés, plusieurs actions sont envisageables. Les principales sont la couleur des matériaux, le développement de surfaces en eau et la végétalisation. A Dijon, un réseau constitué de 60 stations fixes permet d'évaluer le potentiel de ces trois actions. L'étude de la saison chaude 2016 montre que le rôle rafraîchissant de l'eau n'intervient qu'en journée, que l'effet des surfaces claires (béton versus bitume) sur la température de l'air n'est que de quelques dixièmes de degrés, et que la végétation offre le potentiel rafraîchissant le plus important. Ce potentiel est de l'ordre de 4°C lors des situations où l'ICU est bien développé, à savoir en début de nuit, par temps chaud, ensoleillé, calme sous conditions anticycloniques.*

Mots-Clés : ICU, végétation, eau, albédo.

Abstract - *Evaluation of the thermal effects of the levers of action to reduce the Urban Heat Island: example of Dijon. Climate Change and Urban Heat Island (UHI) combine their effects and lead to increased frequencies and intensities of heat waves in urban environments. Considering the associated public health issues, several actions are possible: the color of the materials, the development of water surfaces or urban vegetation. In Dijon, a network of 60 stations makes it possible to evaluate the potential of these three actions. Analysis of the warm summer 2016 season reveals that the refreshing role of water only occurs during daytime, the effect of bright surfaces (concrete versus bitumen) on the air temperature is only a few tenths of a degree, while vegetation offers the largest refreshing potential. Its magnitude is about 4°C when the early night UHI is well developed, i.e. warm, sunny and calm weather under anticyclonic conditions.*

Keywords : UHI, vegetation, water, albedo.

Introduction

Dans un contexte de réchauffement climatique et de croissance urbaine, les effets indésirables des Îlots de Chaleur Urbain (ICU) deviennent des enjeux majeurs pour nombre d'agglomérations. Le stress thermique combinant canicule et ICU s'avère en effet être encore plus important que la somme des deux termes (Li et Bou-Zeid, 2013). Deux stratégies d'adaptation peuvent être envisagées : climatiser les bâtiments et inviter la population à rester à l'intérieur, ou bien réduire l'ICU. Pour réduire l'ICU et s'inscrire dans une politique de développement durable, trois leviers sont identifiés : jouer sur l'albédo des surfaces et renforcer la présence d'éléments végétaux et aquatiques. A noter que ces deux derniers leviers sont également identifiés dans le cadre du développement des trames vertes et bleues (Colombert et Boudes, 2012). Développer les éléments végétalisés et aquatiques permettrait en outre de favoriser la biodiversité (El Jai et Pruneau, 2015). Afin d'éviter toute mal adaptation et de procéder à des adaptations sans regret (Hallegatte, 2008), il est indispensable d'éprouver préalablement l'effet potentiel de chacune des adaptations envisagée. Le réseau de sondes thermiques déployées sur l'agglomération du Grand Dijon permet en cela de produire des informations sur lesquelles s'appuyer.

1. Données et méthodes

En 2016, le réseau MUSTARDijon (de Lapparent *et al.*, 2015) a été porté à 60 stations (Fig 1). Chaque station est constituée d'une sonde HOBO® Pro v2 placée dans un abri M-RSA fixé à 3m du sol, avec une patte prolongée, sur un candélabre (côté sud) le moins affecté possible par des ombres portées. Quatre indices sont élaborés. « *ICU* » est la différence entre la moyenne de température de quatre stations de centre-ville et celle de quatre stations rurales. « *Végétation* » est la différence de température entre un parc urbain de 33ha (Parc de la Colombière) et une zone résidentielle proche. « *Eau* » est la différence entre une station au bord de l'eau (les 7ha du port du canal de Bourgogne) et une zone résidentielle proche. Enfin « *Albédo* » est la différence entre deux stations situées à 50m l'une de l'autre, sur l'esplanade de la gare, respectivement au-dessus de béton désactivé (cheminement piéton à proximité d'une voie de tramway) de couleur claire et de bitume (parking pour véhicules) plus sombre.

Ces quatre indices sont élaborés afin de donner des ordres de grandeurs des potentiels offerts par les trois leviers que sont la végétalisation, la présence d'eau et le rôle de l'albédo. Ces potentiels sont examinés en moyenne au cours des 12 mois de l'année, ainsi qu'en valeurs maximales au cours du printemps et de l'été 2016. Ils sont mis en relation avec les conditions météorologiques fournies par Météo France. Celles-ci sont mesurées à la station de Dijon-Longvic (Fig 1) ou issues des réanalyses SAFRAN (Soubeyroux *et al.*, 2008).

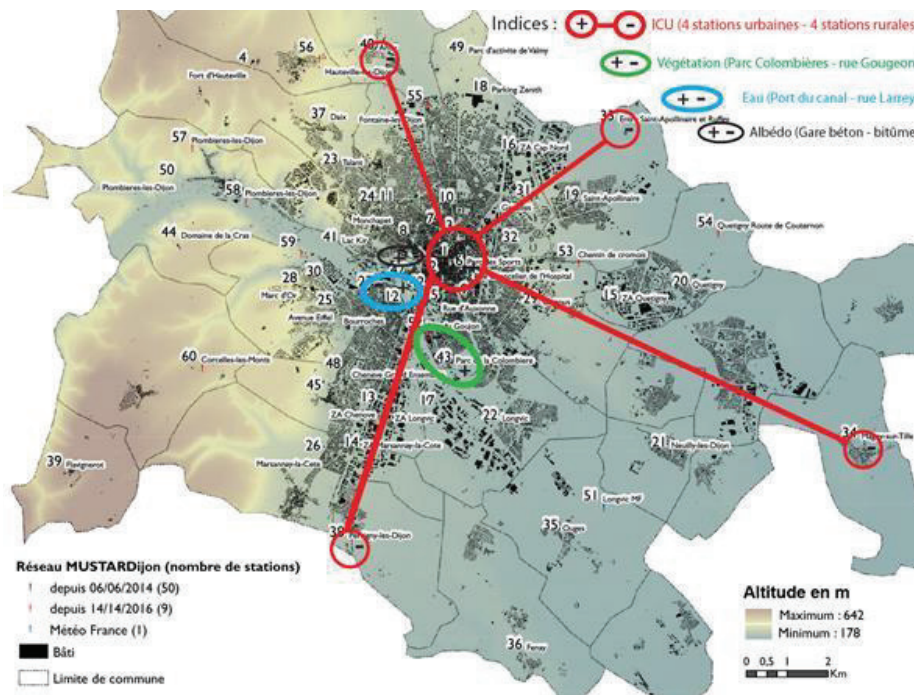


Figure 1. Le réseau de 60 stations MUSTARDijon et la détermination de 4 indices

2. Résultats

Sur deux années de mesures (01/10/2014 – 30/09/2016), les quatre indices présentent des valeurs maximales au printemps et en été (Fig 2). *ICU* y est de l'ordre de 1 à 1,5°C contre 0,5 à 1°C en automne et en hiver. Les *ICU* moyens printaniers et estivaux, compris entre 1 et 1,5°C, sont conformes à ce qui est observé dans des villes du Royaume-Uni telles qu'Édimbourg,

Plymouth, Manchester ou Bristol (Emmanuel *et al.*, 2012), plus grandes mais moins ensoleillées que Dijon. L'indice *Végétation* dépasse 0.5°C d'avril à septembre. Les effets potentiels moyens de l'eau et de l'albédo sur la température de l'air sont réduits (Fig 2). L'eau, à l'image des océans, a un effet opposé entre l'hiver (effet adoucissant) et l'été (effet rafraîchissant).

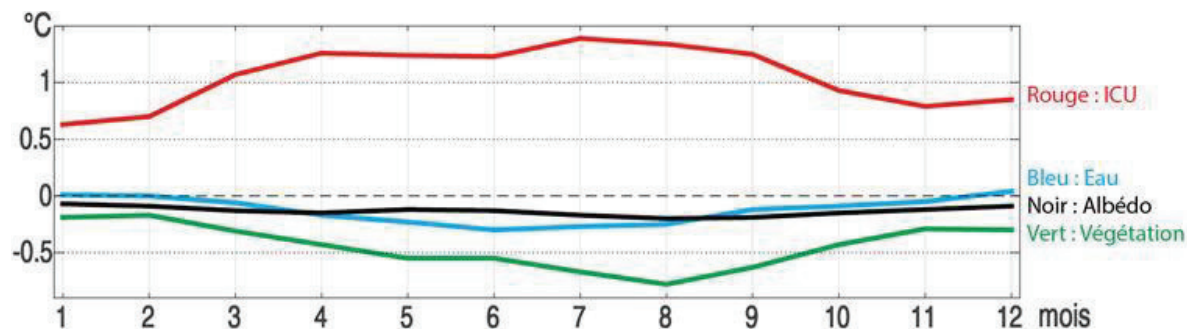


Figure 2. Moyennes mensuelles des indices (2014-2016)

Les valeurs horaires des quatre indices témoignent d'un rythme diurne marqué et caractéristique (Oke, 1982). Les contrastes sont faibles en journée. Ils deviennent soudainement forts au coucher du soleil, puis s'atténuent lentement tout au long de la nuit (Fig 3). A noter qu'en matinée, *Végétation* et *Albédo* témoignent d'effets opposés à leur propre effet moyen. L'effet de l'eau se singularise des deux autres. En effet, opposant toujours à l'image d'un océan douceur nocturne et fraîcheur diurne, la présence d'eau en ville non seulement n'atténue pas, mais tendrait même à renforcer l'ICU nocturne.

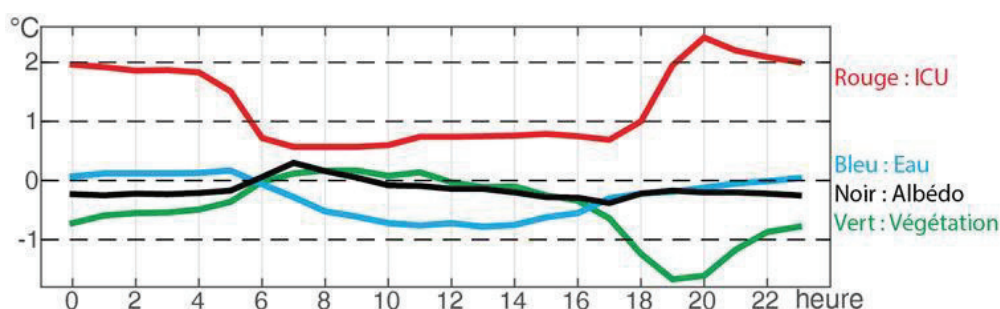


Figure 3. Moyennes horaires des indices (15 avril 2016 – 14 septembre 2016)

Sur la saison chaude 2016 (15 avril au 14 septembre), les valeurs quotidiennes des quatre indices sont élaborées en agrégeant les quatre heures (20-23h) pendant lesquelles les contrastes thermiques sont les plus forts (Fig 4). *ICU* atteint alors régulièrement des valeurs de 4°C voir même 5°C (3 fois dans la saison). Aux mêmes moments, *Végétation* dépasse 2°C et peut atteindre 3°C. Les effets d'*Albédo* et d'*Eau* restent modérés.

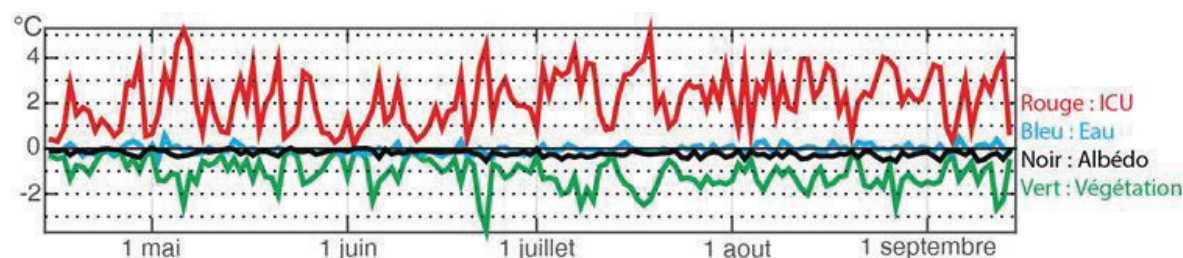


Figure 4. Valeurs quotidiennes des indices (15 avril 2016 – 14 septembre 2016)

Pour comparer les magnitudes et observer les correspondances temporelles, les valeurs horaires des quatre indices sont représentées sur une même échelle (Fig 5). *ICU* comme effets potentiels de la végétation, de l'eau et de l'albédo apparaissent comme étant intermittents. En cela les moyennes (horaires, quotidiennes ou mensuelles) sont des métriques peu appropriées lorsqu'il s'agit de réfléchir sur les aspects indésirables de l'ICU qui n'interviennent que quelques nuits d'été. Bien que non marqué par de véritable canicule, l'été 2016 a connu quelques nuits chaudes. La température nocturne a pu être inconfortable à onze reprises : les 11, 18, 19, 21, 22, 23 et 24 juillet, les 16, 27 et 28 août, ainsi que le 9 septembre. Lors de ces onze nuits, à la station Météo France de Dijon-Longvic, la température n'est pas descendue en dessous de 17°C. A cela s'ajoute un différentiel de +2 à +4°C lié à l'ICU (Fig 5a).

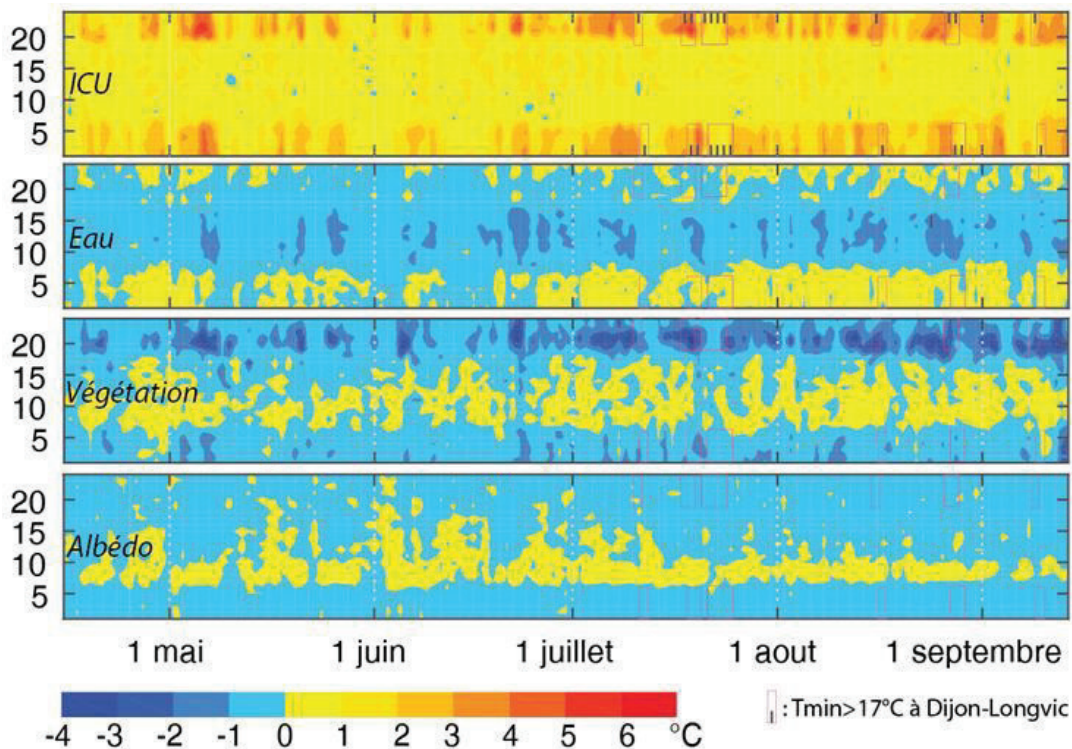


Figure 5. Valeurs horaires des indices (15 avril 2016 – 14 septembre 2016)

A noter qu'il n'y a pas systématiquement correspondance entre nuits chaudes et fort ICU. Lors de l'épisode chaud du 18-19 juillet, l'ICU est fort, de l'ordre de 4°C. En revanche, les 21-24 juillet, la température nocturne du centre-ville n'a été plus élevée que de 2°C. Lors de ces mêmes onze nuits, on peut observer l'effet de la végétation (Fig 5c). Dans le parc de la Colombière, cet effet a été maximal lors des mêmes nuits (18 et 19 juillet). En début de nuit, la température est 3 voir 4°C inférieure à celle observée à quelques centaines de mètres, non loin de la rivière également, rue du Gougeon.

Afin de comprendre le caractère intermittent de ces phénomènes, les valeurs quotidiennes des quatre indices (pour rappel : moyennes des valeurs horaires sur la tranche 20h-23h) sont corrélées aux conditions météorologiques qui ont prévalu dans l'après midi, calculées sur la tranche six-horaire 14h-19h. Pour faciliter les comparaisons, les corrélations ont été calculées sur les valeurs opposées des trois indices fraîchissants (*Végétation*, *Eau* et *Albédo*).

Le fait que les corrélations soient quasi systématiquement de même signe (hormis avec vent zonal et humidité spécifique) confirme que l'effet rafraîchissant intervient bien dans les mêmes conditions que celles conditionnant le développement d'un ICU. A Dijon-Longvic, ou au point de grille SAFRAN correspondant, ces conditions sont : forte insolation, excellente visibilité, rayonnement global et températures élevées par forte pression, fortes évapotranspirations potentielle et réelle (Fig 6). *A contrario* les valeurs de précipitation, de ruissellement, d'humidité dans le sol et d'humidité relative de l'air sont faibles. Le vent méridien est faible également. L'ensemble peut se résumer par beau temps chaud et ensoleillé par temps calme sous conditions anticycloniques. L'albédo semble avoir un comportement légèrement différent des autres indices. Mais, comme indiqué par la corrélation avec le vent zonal, ces corrélations spécifiques sont peut-être liées à des écoulements d'air à micro-échelle se produisant sur l'esplanade de la gare et non attribuables à la couleur des surfaces en tant que telle.

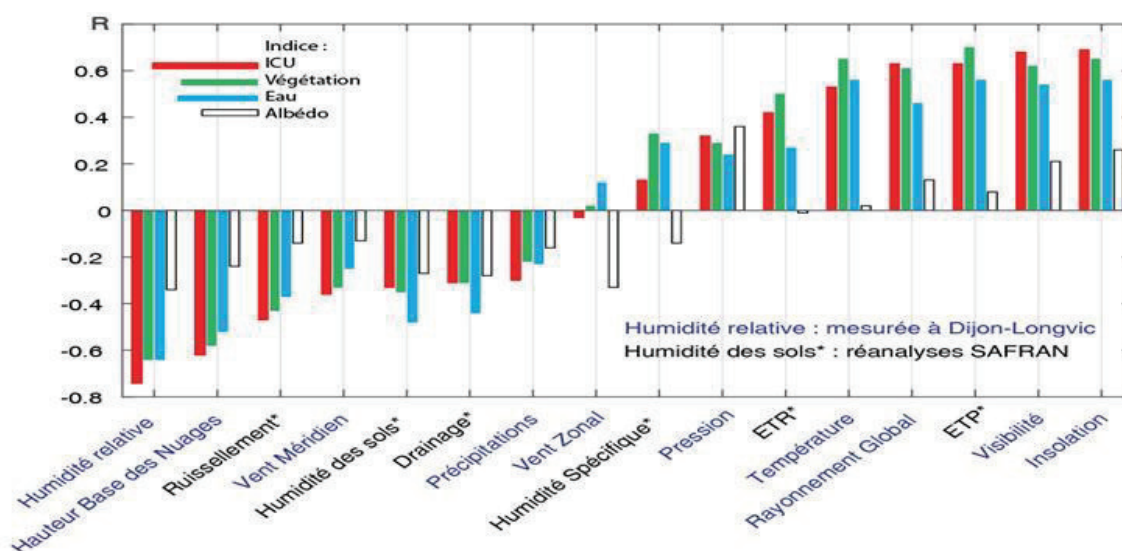


Figure 6. Corrélations entre valeurs quotidiennes (20h-23h) des quatre indices et des conditions météorologiques (14h-19h) sur la période 15 avril 2016 – 14 septembre 2016

Conclusion

Le réseau MUSTARDijon donne quelques indications en termes de leviers d'adaptation au changement climatique et de leurs potentiels respectifs. Développer la présence de l'eau, lorsque cela est possible, ne peut réduire l'ICU nocturne. L'effet rafraîchissant de l'eau est strictement diurne. Jouer sur l'albédo, en remplaçant des surfaces sombres (type bitume) par des surfaces claires (type béton désactivé), opération fréquemment réalisée par les agglomérations dans le cadre de réaffectations de voirie, permet de réduire l'ICU. Mais très peu. Ces opérations ne peuvent être envisagées comme exclusivement destinées à réduire la température et à améliorer le confort thermique. Le principal levier d'action réside dans la végétalisation. Dans un parc urbain de 33 ha l'effet de l'ICU a quasi disparu. Créer des parcs de cette taille n'est pas réaliste, mais leur présence (merci aux générations passées) permet de mesurer ce que la végétation peut apporter en ville en termes de confort thermique. Cela peut aussi donner des idées aux aménageurs pour que la végétation en ville ne se limite pas aux parcs et à quelques alignements d'arbres le long de la voirie. Cela nécessite préalablement de mieux comprendre les effets de la surface, de la hauteur

(herbacées, buissons, arbres) et de la forme (bosquets, alignements, fractal) des éléments végétaux.

Les mesures *in situ*, si rigoureuses et fiables soient-elles, posent la question de la transposabilité des résultats. Les quatre indices élaborés, s'ils décrivent bien des effets locaux, sont-ils adaptés pour définir des ordres de grandeurs applicables en tout point de l'agglomération? Pour vérifier ceci, plutôt que de multiplier à l'infini les points de mesure, on peut recourir à la modélisation. Un exercice de ce type a été réalisé concernant l'albédo (Vairet, 2016). Les résultats sont en accord avec ce qui est observé : le potentiel rafraîchissant de l'albédo est limité à quelques dixièmes de degrés. Des simulations de ce type sont en cours concernant l'effet du végétal. Une mise en eau de Dijon n'est pas programmée ! Des scénarios de croissance et d'évolution de la morphologie urbaine intégrant (ou non) plus de végétal sont en cours d'élaboration. Des travaux conduits sur Strasbourg montrent que ces évolutions devraient vraisemblablement être majeures pour infléchir de manière significative l'ICU (Kohler *et al.*, 2016).

Remerciements

Les auteurs remercient Météo-France pour la mise à disposition des données (convention avec l'université de Bourgogne), l'ADEME, la métropole du Grand Dijon et Alterre Bourgogne pour leur soutien.

Bibliographie

Colombert M., Boudes P., 2012 : Adaptation aux changements climatiques en milieu urbain et approche globale des trames vertes. *Vertigo*, Hors-série **12**.

Emmanuel R., Krüger E., 2012: Urban heat island and its impact on climate change resilience in a shrinking city: The case of Glasgow, UK. *Building and Environment*, **53**, 137-149.

de Lapparent B., Roux J., Richard Y., Pohl B., Bientz S., Codet-Hache O., Dumaitre F., Toussaint H., Tissot A.-C., Thévenin D., Thévenin T., 2015 : Mesures de la température et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain à Dijon. *Actes du XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège, 257-262.

El Jai B., Pruneau D., 2015 : Favoriser la restauration de la biodiversité en milieu urbain : les facteurs de réussite dans le cadre de quatre projets de restauration. *Vertigo*, **15**.

Hallegatte S., 2008: Adaptation to Climate change: Do not count on climate scientists to do your work, Reg-Markets Center, Related Publication 08-01.

Kohler M., Tannier C., Blond N., Aguejdad R., Clappier A., 2016: Impacts of several urban-sprawl countermeasures on building (space heating) energy demands and urban heat island intensities. A case study. *Urban Climate*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.uclim.2016.12.006>

Li D., Bou-Zeid E., 2013: Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts*. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **52**, 2051-2064.

Oke T.R., 1982: The energetic basis of the Urban Heat Island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **108**, 2-24.

Soubeyroux J.M., Martin É., Franchisteguy L., Habets F., Noilhan J., Baillon M., Regimbeau F., Vidal J.-P., LeMoigne P., Morel S., 2008 : Safran-Isba-Modcou (SIM) : Un outil pour le suivi hydrométéorologique opérationnel et les études, *La Météorologie*, **63**, 40-45.

Vairet T., 2016 : *Urbanisme et îlot de chaleur urbain : mécanisme et leviers d'action*. Mémoire de Master. Dijon, 94 pp.

ACCOMPAGNER L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DE LA VILLE : L'EXPERIENCE MENEES AVEC TOULOUSE METROPOLE

SOUBEYROUX J.-M.¹, MASSON V.², EDOUART V.³, CABANES O⁴, POUJOL, G.²

¹Météo-France, Direction de la Climatologie et des Services Climatiques, Toulouse, France, jean-michel.soubeyroux@meteo.fr

²Météo-France, Centre National de Recherche Météorologique, Toulouse, France, valery.masson@meteo.fr, guillaume.pujol@meteo.fr

³Toulouse Métropole, Toulouse, France, valerie.edouart@toulouse-metropole.fr

⁴Météo-France, Direction Interrégionale Sud Ouest, Mérignac, France, olivier.cabanes@meteo.fr

Résumé : L'environnement urbain où réside près de 80% de la population française connaît un climat local particulièrement vulnérable du fait des effets combinés de l'artificialisation des surfaces et du changement climatique. La Collectivité de Toulouse Métropole a engagé avec l'appui de Météo-France une démarche participative pour la construction de son plan d'adaptation au changement climatique. Cette communication présente les différentes composantes opérationnelles et recherche de cette action notamment sur l'observation de l'îlot de chaleur urbain et le développement de services climatiques pour la planification urbaine et l'efficacité énergétique.

Mots-clés : Ville, Services climatiques, climat urbain, ICU, changement climatique, plan d'adaptation.

Abstract : Supporting the climate change adaptation of the city: the experiment led with Toulouse Metropole : The urban environment where live 80% of the French people, know an especially vulnerable climate, both because of the effect of the artificialisation of the surfaces and the climate change. The Community of "Toulouse Metropole" has launched a participatory approach for building its adaptation plan to climate change with the support of Meteo-France. This communication presents the different operational and innovating components of this action, especially for the monitoring of the urban heat island and the development of climate services dedicated to the urban planning and the energetic efficiency.

Keywords : Cities, Climate services, Urban climate, UHI, Climate change, adaptation plan.

Introduction

Aujourd'hui, la population mondiale, en forte augmentation, se concentre de plus en plus souvent dans les villes (54% actuellement) et cette tendance est aussi observée en France où la part de citadins approche les 80% (Banque Mondiale, 2015). Par la modification du milieu naturel et en particulier l'artificialisation des surfaces, les villes modifient le climat local. Le phénomène le plus connu est l'îlot de chaleur urbain (ICU) qui se traduit par des températures plus élevées en ville par rapport à la campagne environnante (Oke, 1973). Il est particulièrement marqué la nuit car la chaleur emmagasinée dans les infrastructures urbaines durant la journée limite le refroidissement nocturne (Cantat, 2004). Parallèlement, le 5e rapport du GIEC, publié en 2013, indique une élévation de la température de surface globale de +0,85°C entre 1880 et 2012 et une poursuite de cette hausse au XXI^{ème} siècle pouvant atteindre ou dépasser +4°C selon le scénario considéré. Les effets du changement climatique se traduiront aussi par une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes tels que les vagues de chaleur, les pluies intenses et les sécheresses. La vague de chaleur de 2003 sur l'Europe Occidentale a mis en évidence les graves conséquences potentielles sur la santé humaine et notamment la surmortalité en ville (Rousseau, 2005). A terme, l'augmentation des vagues de chaleur liées au changement climatique et l'urbanisation amplifient la sensibilité à l'ICU des habitants des villes. A travers le monde, de nombreuses études sur l'ICU ont concerné les grandes métropoles, comme en France sur Paris (projet Epicea¹³) mais ce phénomène est aussi présent dans les villes de taille moyenne comme Rennes (Foissard, 2015).

¹³ <http://www.umr-cnrm.fr/spip.php?article271>

La lutte contre le changement climatique s'est traduite en France au début des années 2000 par l'obligation faite aux collectivités de plus de 50000 habitants d'établir un PCET (Plan Climat Energie Territoire) visant à la fois à réduire leur émission de gaz à effet de serre (GES) et les impacts du changement climatique sur leur territoire. La nécessité de préparer l'adaptation des villes au changement climatique a été renforcée en 2010 dans le cadre des lois Grenelle 2 avec la transformation du PCET en PCAET (Plan Climat Air Energie Territoire) et l'exigence de prise en compte du climat dans l'ensemble des documents réglementaires d'urbanisme et de planification.

L'adaptation de la ville au changement climatique est une question complexe qui nécessite en premier lieu la connaissance du climat actuel et son évolution, issue de la modélisation climatique, mais aussi l'analyse de l'exposition du territoire aux événements extrêmes (vagues de chaleur, pluies intenses, sécheresses) dans la perspective du climat futur. Une analyse spécifique du climat urbain, et notamment de l'ICU, doit être menée en fonction de la forme urbaine et ses évolutions projetées, des types de bâtiment de la ville et de ses problématiques énergétiques. En effet, les effets du changement climatique, superposés au climat urbain déjà existant, peuvent exacerber la vulnérabilité des villes (Lemonsu *et al.*, 2013). Dans ce contexte, une réflexion sur les stratégies d'atténuation des effets urbains et d'adaptation au changement climatique doit être entreprise par les acteurs institutionnels et les aménageurs urbains pour planifier la ville de demain. Les longues échelles de temps appréhendées dans les études climatiques obligent à considérer la ville comme un système dynamique où interfèrent expansion urbaine, mutation architecturale et évolution progressive des technologies et des modes de vie. Ainsi, de récents projets de recherche ont proposé des méthodologies de modélisation systémique et interdisciplinaire de la ville (Masson *et al.*, 2014) permettant de quantifier les impacts du changement climatique à l'horizon 2100 sur des villes particulières comme Paris ou Toulouse.

Prenant en compte les différentes actions de recherche menées depuis plus de 10 ans sur le climat urbain à Toulouse, la Communauté Urbaine de Toulouse, dénommée Toulouse Métropole, a souhaité associer les services de Météo-France (domaine de la recherche et de la climatologie opérationnelle) aux différentes étapes de révision de son plan climat (PCAET) pour le volet d'adaptation au changement climatique. Cette communication vise à rendre compte d'une démarche partenariale reproductible entre décideurs politiques et climatologues pour penser l'adaptation au changement climatique de la ville. La première partie de cette communication présente le contexte géographique et institutionnel de la révision du plan Climat de Toulouse Métropole. Le profil climatique de l'agglomération et la sélection des indicateurs climatiques pertinents pour le suivi du changement climatique sur le territoire sont exposés dans la seconde partie. Une action originale de définition et mise en place d'un réseau de monitoring de l'ICU ayant vocation à être gérée par Toulouse Métropole est ensuite présentée avec les premiers résultats obtenus. La dernière partie consacrée aux perspectives de valorisation de ce réseau dans le cadre du développement des services climatiques discutera l'intérêt des approches systémiques entre scientifiques et décideurs pour la production de la planification urbaine.

1. Contexte géographique et institutionnel

1.1. Présentation géographique de l'agglomération Toulousaine

Au sein d'une agglomération d'environ un million d'habitants, Toulouse Métropole regroupe 37 communes et comptait environ 750 000 habitants en 2014, la plaçant au 5^e rang des communautés urbaines en France (hors Paris) (Source INSEE 2015). La ville de Toulouse, chef-

lieu de la région Occitanie, s'est développée en bordure de la Garonne et de ses affluents, au sein d'un relief peu marqué de coteaux et terrasses, favorables aux activités agricoles. Avec l'essor de l'urbanisme sous forme de résidences pavillonnaires, le développement de la ville s'est caractérisé, à partir des années 1970, par un important étalement urbain, avec une densité de population très faible pour une ville de sa taille (à titre de comparaison, la ville de Toulouse est deux fois et demi plus étendue que la ville de Lyon pour une population sensiblement équivalente). Au-delà des effets induits, notamment la problématique des transports, cette forme actuelle très étendue de la ville influence sensiblement le climat urbain local et interroge sur son évolution dans une perspective de nouvelle politique publique visant une ville plus compacte (exigences notamment de la loi Grenelle 2¹⁴ votée en France en 2010).

1.2. La révision du Plan climat

L'élaboration d'un plan climat est l'opportunité pour une collectivité de s'engager dans la lutte contre les émissions de gaz à effets de serre en mobilisant les acteurs locaux autour d'actions concrètes et évaluables. Après un premier PCET¹⁵ approuvé en 2012, visant notamment les économies d'énergie, le développement des modes de transport doux (vélo et piétons), la qualité des logements sociaux et le traitement des déchets, Toulouse Métropole a engagé sa révision en PCAET en décembre 2015 avec une première phase de diagnostic et état des lieux et une 2^e phase d'élaboration du plan d'action.

Ce nouveau plan, devant être approuvé en 2017, dont le synoptique est présenté sur la Figure 1, affirme la poursuite des actions indispensables pour l'atténuation mais engage la collectivité dans la mise en place de mesures nouvelles pour l'adaptation du territoire au changement climatique. Ce nouveau domaine d'action implique le recueil et l'appropriation par les services techniques et les citoyens de nombreuses informations jusqu'ici limitées au monde des sciences et de la recherche

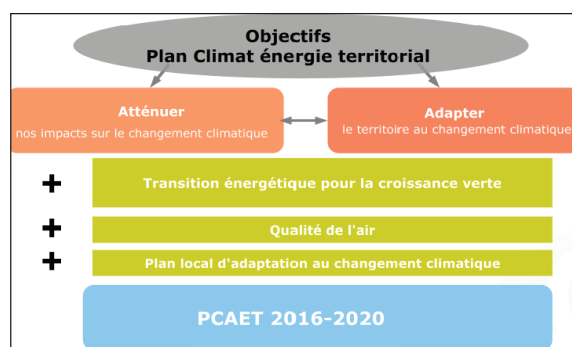


Figure 1. Présentation synoptique des domaines couverts par le futur PCAET de Toulouse Métropole (source TM).

Ainsi Toulouse Métropole a identifié trois axes pour l'acquisition de savoir préalable à l'élaboration et au suivi de son plan d'adaptation au changement climatique :

-La participation aux projets de recherche et de développement visant à caractériser le climat urbain et étudier l'impact du changement climatique sur le territoire.

-L'accompagnement de la stratégie d'adaptation à travers le développement du partenariat avec Météo-France pour la mise en place d'indicateurs de suivi du changement climatique, l'innovation dans le domaine du monitoring de l'ICU et le développement des outils de simulation ville-climat.

-Le développement des services d'observations et d'acquisition de données permettant de disposer de modèles prédictifs et d'outils d'aide à la décision à destination à la fois des citoyens et des techniciens et élus en charge des politiques publiques et la planification.

¹⁴ Loi Française n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement

¹⁵ <http://www.toulouse-metropole.fr/missions/developpement-durable/plan-climat>

2. Caractérisation et suivi du changement climatique sur l'agglomération Toulousaine

La première étape visant à l'appropriation du climat sur le territoire de Toulouse Métropole a consisté à établir un profil climatique¹⁶ soulignant les caractéristiques climatiques moyennes annuelles et saisonnières et la vulnérabilité locale aux événements extrêmes tels que les vagues de chaleur, les pluies intenses, les tempêtes ou les sécheresses.

Une sélection d'indicateurs a ensuite été définie par Toulouse Métropole pour le suivi du changement climatique et la mobilisation des acteurs. Ces indicateurs concernent les températures et les précipitations, mais aussi l'évolution des extrêmes et leurs impacts comme par exemple les besoins en chauffage et climatisation. Ils s'appuient sur les meilleures séries climatologiques et jeux de données de simulation disponibles sur le territoire, notamment issues des travaux sur l'homogénéisation (Gibelin et *al.*, 2014) et les indicateurs proposés dans la nouvelle application¹⁷ Climat^{HD} de Météo-France. La Figure 2 montre, sur Toulouse, depuis 1951, la baisse observée des besoins de chauffage (de l'ordre de 20%) et la hausse des besoins de climatisation (multiplication par 2,5).

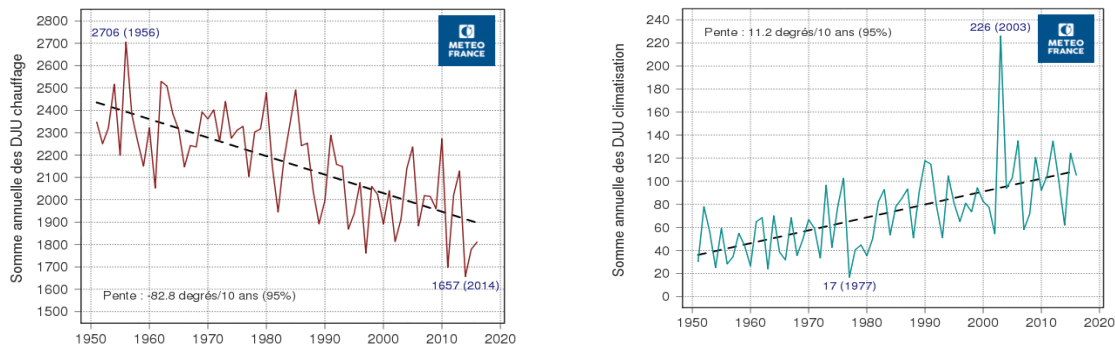


Figure 2. Evolution annuelle de degrés-jour chauffage (à gauche) et climatisation (à droite) à la station de Toulouse-Blagnac depuis 1951 (données Météo France, 1951-2014)

3. Définition et mise en place d'un réseau d'observation de l'îlot de chaleur urbain

La caractérisation et la capacité de suivi de l'ICU via la mise en place et l'exploitation d'un réseau dédié de stations automatiques est un enjeu fort identifié par la Collectivité, pour aborder les problématiques d'urbanisme et d'habitat. Ces données, utiles à la connaissance du climat local et à l'impact des aménagements ou des zones préservées pour la biodiversité (trames vertes et bleues) ont vocation à être utilisées par les différents services techniques de Toulouse Métropole mais aussi d'être mises à disposition des entreprises locales pour développer une filière de services climatiques.

Une première action, menée dans le cadre du Mastère d'Eco-Ingénierie de l'Ecole Nationale de la Météorologie (Poujol, 2016) a permis de sélectionner un capteur météorologique et un système informatique de télétransmission, répondant aux exigences budgétaires de la Collectivité (1000 € max par station installée), de qualité instrumentale et de fiabilité selon les contraintes d'installation et de maintenance définies (bâtiment public, exploitation par les services techniques de Toulouse Métropole). Après un *benchmark* sur les différents matériels utilisés dans un environnement urbain, la solution retenue se compose de la station semi-professionnelle Davis-

¹⁶ <http://www.toulouse-metropole.fr/missions/developpement-durable/plan-climat/profil-climatique>

¹⁷ <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/climatthd>

Vantage Pro2, aussi utilisée pour le réseau de la métropole de Rennes (Foissard, 2015), et d'un transmetteur de type Raspberry Pi avec une carte de communication Sigfox. L'architecture du réseau du monitoring de l'ICU (20 stations) a été définie en s'appuyant sur la complémentarité avec le réseau de stations professionnelles existant sur l'agglomération (Météo-France et Services de Prévision de Crues notamment). A terme, ces données pourront être complétées par l'apport des observations issues des réseaux de météorologues amateurs (Info Climat notamment) et l'utilisation des données météorologiques de type crowd-sourcing (provenant des véhicules, des smartphones ou de capteurs fixés sur les bus de transport public), même si la valorisation de ces données très nombreuses mais de qualité inégale reste aujourd'hui un sujet de recherche. La cartographie d'implantation des stations (Figure 3) visent à caractériser l'ICU de l'agglomération toulousaine, documenté lors de projets antérieurs, notamment la campagne de mesures Capitoul entre 2004 et 2005 (Masson et *al.*, 2008) mais aussi à suivre des zones particulières d'aménagement d'intérêt pour Toulouse Métropole. Le positionnement des stations est conçu pour favoriser l'appropriation des données par les acteurs locaux, services techniques de la ville, les établissements scolaires et les centres culturels et d'animation scientifique.

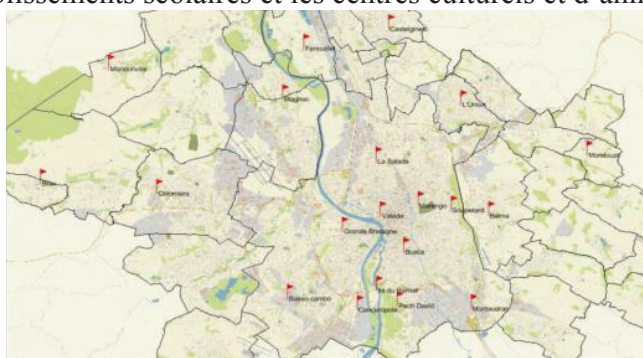


Figure 3. Réseau des 20 stations de monitoring de l'ICU sur Toulouse Métropole

Les premières installations réalisées au cours de l'été 2016 ont permis de mettre en évidence l'ICU (Figure 4) avec une intensité dépassant fréquemment 4°C (record de +5,5°C la nuit du 12 août 2016) entre le centre-ville (station Valade) et une station de périphérie (Météopole).

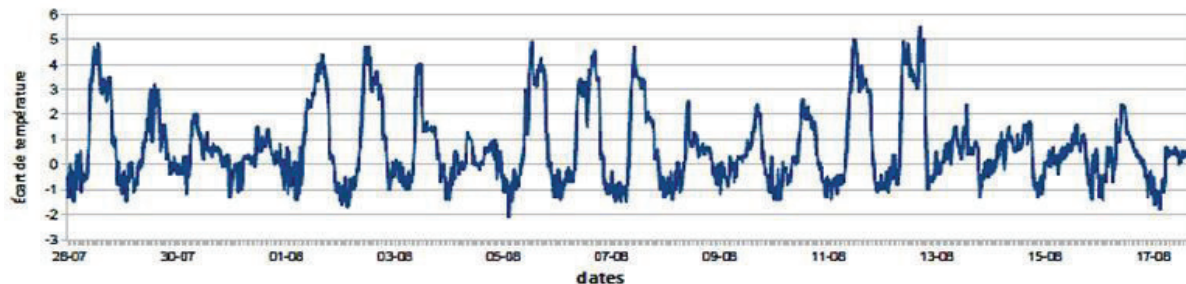


Figure 4. Différence de températures (°C) entre le centre-ville de Toulouse (station Valade) et la périphérie (station Météopole) du 28 juillet au 18 août 2016

4. Perspectives d'accompagnement et nouveaux outils pour la programmation urbaine

La poursuite de l'accompagnement de Toulouse Métropole pour l'adaptation au changement climatique visera d'abord à achever l'implémentation du réseau de monitoring de l'ICU, en documentant les événements météorologiques rencontrés mais aussi en précisant les effets à l'échelle des quartiers. Pour aborder cette micro-échelle, il sera utile de compléter ce réseau à partir de capteurs embarqués sur des moyens mobiles urbains (bus et vélo) et de favoriser les démarches participatives pour le recueil de données complémentaires et leur exploitation par les acteurs du territoire. Un premier enjeu sera ici de motiver les habitants à contribuer à la caractérisation de l'ICU comme expérimenté sur Berlin (Meier et *al.*, 2015) et de définir les

méthodologies pour assurer de manière optimale la fusion de ces données de qualité diverse pour obtenir une information homogène sur l'ICU. En parallèle à la mise en œuvre de produits à haute résolution sur l'ICU, il conviendra de déterminer les modes d'exploitation de ces données par les services de la collectivité notamment pour les exercices de planification urbaine et la gestion locale des risques notamment sanitaires pendant les vagues de chaleur comme étudié sur Paris (Pinson et al., 2015). En externe, l'enjeu sera de favoriser le développement de services climatiques répondant aux objectifs du PCAET, comme par exemple la maîtrise de la consommation énergétique via l'optimisation en temps réel du chauffage et de la climatisation des bâtiments.

Un autre volet de l'accompagnement à Toulouse Métropole concernera l'appui à la planification urbaine via le développement de la modélisation systémique et interdisciplinaire (Masson et al., 2014) assurant le couplage de modèles d'expansion socio-économique de la ville, de modèles d'évolution d'îlots urbains et de modèles de climat urbain et d'énergie du bâti dont la faisabilité a été démontrée sur Toulouse dans le cadre du projet de recherche Acclimat¹⁸. Ce projet a notamment évalué sur l'agglomération Toulousaine les effets de plusieurs scénarios systémiques définis avec les acteurs locaux, à la fois en terme d'évolution morphologique mais aussi de consommation et de la nature des espaces et d'impact et au final d'impacts sur l'ICU et la consommation d'énergie hivernale et estivale. Au final, des recommandations sur la planification ont été élaborées mais il reste à assurer leur prise en main vers les services techniques en charge de la planification urbaine. Cette capacité à transférer les informations climatiques vers le monde de l'urbanisme est aussi un enjeu important qui pourra bénéficier de projets interdisciplinaires en cours comme le projet MAPUCE¹⁹ où la ville de Toulouse a été choisie comme un des sites d'expérimentation.

Bibliographie

- Cantat O., 2004 : L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps, *Norois*, **191**, 75-102.
- Foissard X., 2015 : *L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise*. Thèse d'Etat. Université Rennes 2, 248 p.
- Gibelin A-L., Dubuisson B., Corre L., Deaux N., Jourdain S., Laval L., Piquemal J-M., Mestre O., Denetière D., Desmidt S., Tamburini A., 2014 : Evolution de la température en France depuis les années 1950 : Constitution d'un nouveau jeu de séries homogénéisées de référence, *La Météorologie*, N°**87**, DOI : 10.4267/2042/54336
- Lemonsu A., Koukou-Arnaud R., Desplat J., 2013 : Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate. *Climatic Change* 116: 679. doi:10.1007/s10584-012-0521-6.
- Masson V., Gomes L., Pigeon G., Liousse C., Pont V., Lagouarde J.-P., Voogt J., Salmond J., Oke T., Hidalgo J., Legain D., et al., 2008 : The Canopy and Aerosol Particles Interactions in Toulouse Urban Layer (CAPITOU) experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **102** (3-4), 135-157
- Masson V., C. Marchadier, L. Adolphe, R. Aguejdad, P. Avner, M. Bonhomme, G. Bretagne, X. Briottet, B. Bueno, C. de Munck, O. Doukari, S. Hallegatte, J. Hidalgo, T. Houet, J. Le Bras, A. Lemonsu, N. Long, M.-P. Moine, T. Morel, L. Nologues, G. Pigeon, J.-L. Salagnac, K. Zibouche, 2014 : Adapting cities to climate change : a systemic modelling approach. *Urban Climate*, **10**, 407-429, doi:10.1016/j.uclim.2014.03.00
- Oke, T.R., 1973 : City size and the urban heat island, *Atmospheric Environment*, Volume 7, Issue 8, 769-779, ISSN 0004-6981, 10.1016/0004-6981(73)90140-6.
- Pujol, 2016 : *Mise en place d'un monitoring de l'îlot de chaleur urbain : application sur Toulouse Métropole*, stage de fin d'étude, Ecole Nationale de la Météorologie, 54 p.
- Rousseau D., 2006 : Surmortalité des étés caniculaires et surmortalité hivernale en France, *Climatologie*, 43-54.
- Russo S., Dosio A, Graversen R., Sillman J., Carao H., Dunbar M., Singleton A., Montagna P., Barbola P., Vogt J., 2014 : Magnitude of extreme heatwaves in present climate and their projection in a warming world. *Journal of Geophysical Research*, doi 10.1002/2014JD022098

¹⁸ <http://www.cnrm.meteo.fr/ville.climat/spip.php?rubrique46>

¹⁹ <http://www.umr-cnrm.fr/vurca/spip.php?rubrique120>

LA POLLUTION AUTOMOBILE DANS LES CARREFOURS AUX HEURES DE POINTE À N'DJAMENA

TATOLOUM A.

Université de N'Djamena, faculté des sciences humaines et sociales/département de géographie(Tchad). Mail : tatoloum1@yahoo.fr

Résumé : la pollution automobile à N'Djamena inquiète, surtout dans les rues les plus fréquentées du centre-ville, où un grand nombre de piétons côtoie une circulation automobile intense. N'Djamena connaît une croissance rapide de sa population, une extension spatiale fulgurante et un afflux des automobiles privés avec l'avènement de l'ère pétrolière à partir de 2003. Ces facteurs ne sont-ils pas à l'origine de l'air vicié ? Une observation de ces lieux, des interviews des différents acteurs ont permis de montrer que la pollution à N'Djaména est fortement liée à la densité de la circulation, provoquée par les gaz issus des véhicules à moteur diesel. Aussi, cette nuisance affecte de plus en plus la santé des citoyens.

Mots-clés : carrefours, pollution de l'air, N'Djaména, population.

Abstract : Cars pollution in N'Djamena does not worry, especially in the most attended streets downtown area, where a great number of pedestrians walk with an intense motor vehicle traffic. N'Djamena does not know a fast growth of its population, a fulgurating space extension and a surge of the cars deprived with the advent of the oil era from 2003. Instead of: is not the factors at the origin of the foul air? An observation of these places, interviews of the various actors made it possible to show that pollution with N'Djamena is not strongly related to the density of circulation, caused gases of the vehicles of diesel engine. In addition, this harmful effect affects the health of the townsmen more and more.

Keywords : crossroads, automobile pollution, N'Djamena, population.

Introduction

Selon un article paru dans le journal Le MONDE du 29.09.2016 À 11h49 tiré des résultats de l'enquête de l'ONG suisse Public Eye, « des négociants suisses, en l'occurrence Vitol, Addax et Oryx ou encore Trafigura, ont mis en œuvre toute une industrie de carburant toxique en direction de l'Afrique, multipliant les profits sans égard pour les risques encourus par les populations concernées ». Une telle information ne laisserait personne indifférente quand on sait que les véhicules utilisés dans les pays africains sont de plus en plus nombreux et pour la plupart de seconde main.

Au Tchad et en particulier à N'Djamena sa capitale, la circulation est de plus en plus dense (plus de 600) véhicules par heure au rond-point de Farcha dans le 1^{er} arrondissement selon nos enquêtes du mois d'avril 2017 occasionnant des accidents dans les « bouchons » et surtout, polluant la ville par les dégagements des gaz peu respirables émanant de ces véhicules. Cette situation est le résultat de plusieurs facteurs conjuguées : l'évolution croissante de la population tchadienne et surtout de celle de N'Djamena ; l'extension de la ville ; le nombre important des véhicules notamment ceux d'occasion roulant au diesel.

La question que l'on se pose en parcourant la ville est l'impact de ces facteurs sur la qualité de l'air et la santé de la population ?

Cette étude traite de la pollution automobile aux heures de pointe dans la ville de N'Djamena (Farcha/1^{er} arrondissement et Chagoua/6^{ème} arrondissement) et a pour hypothèse de recherche : L'augmentation rapide de la population, l'extension spatiale anarchique et spontanée de la ville et le nombre important des véhicules d'occasion à moteur diesel seraient à l'origine de la pollution de l'air dans la ville de Ndjamen. Et notre communication a pour objectif d'analyser les multiples facteurs qui provoquent la pollution automobile dans la ville de N'Djamena.

1. Méthodologie

Une recension de la littérature existante, une observation de ces lieux, des interviews des différents acteurs (piétons, automobilistes, personnel soignant...) a permis d'analyser ce phénomène de pollution automobile notamment au quartier Farcha dans le 1^{er} arrondissement et au 6^{ème} sous le viaduc de Chagoua de la ville de N'Djamena. Une visite dans les structures de santé de la ville a par ailleurs rendu possible une connaissance des effets de cette pollution. La taille de l'échantillon des personnes interrogées est de 50 personnes (25 au 1^{er} arrondissement et 25 au 6^{ème}). Les séquences d'observation aux différents carrefours ont été faites aux heures de pointes suivantes :

- matins de 6h30 à 8h ;
- mi-journées de 12h 30 à 14 ;
- soirs de 17h30 à 19h.

Tableau 1. Echantillon

Farcha 1 ^{er} arrondissement			Chagoua 6 ^{ème} arrondissement			TOTAL
piétons	automobilistes	Personnel soignant	piétons	automobilistes	Personnel soignant	
10	14	1	10	14	1	50

Source : Enquête de terrain, 2017.

2. Résultats

2.1. La croissance de la population de N'Djamena

N'Djamena est située au sud-Ouest du Tchad, au confluent des fleuves Chari et Logone qui marque la frontière avec le Cameroun. La ville de N'Djamena constitue un pôle national et régional majeur, elle est la capitale politique et économique du Tchad. Peuplée aujourd'hui de plus d'un million d'habitants dont 50% ont moins de 18 ans, elle est une ville cosmopolite où viennent se brasser de multiples cultures tchadiennes et étrangères. N'Djamena est une ville chaude et semi-aride, il y pleut que 3 à 4 mois par année.

N'Djamena est devenue région en 2002, elle est divisée en 10 arrondissements et compte au total 64 quartiers.

Une cité à forte croissance démographique

En général, les villes subsahariennes connaissent une importante croissance démographique et une urbanisation rapide depuis quelques décennies. Cette importante croissance du milieu urbain est partiellement due à l'accroissement démographique naturel, mais elle est singulièrement le résultat d'une migration des campagnes tchadiennes vers les villes et surtout vers N'Djamena la capitale.

N'Djamena, réunit 40% de la population totale urbaine et connaît un taux de croissance annuelle élevé de 7%. Cette croissance rapide a pour conséquence, l'hypertrophie dans la ville.

Au niveau démographique

La ville a connu une évolution (fig. 1) très remarquable. Sa population qui était estimée à 10 000 habitants en 1937 a presque doublé en dix ans pour avoisiner les 20 000 âmes à la fin des années 1940. Dans les premières années de l'indépendance, la population de la ville a vite accru :

elle a quintuplé en 20 ans pour approcher les 130 000 habitants à la fin des années 1960 (fig. 2). L'évolution la plus remarquable s'est faite entre les années 1970 et 1990 (N'garessem, 1998). En effet, cette époque marque un tournant décisif dans l'histoire récente de la ville, et de tout le pays. La sécheresse de 1973-74, le coup d'État militaire du 13 avril 1975 ainsi que les multiples guerres civiles et frontalières ont émaillé la triste histoire du Tchad pendant plusieurs décennies, ont été à la base d'importants mouvements de population venant autant des régions méridionales et septentrionales du pays, renforçant davantage le cosmopolitisme de la ville.

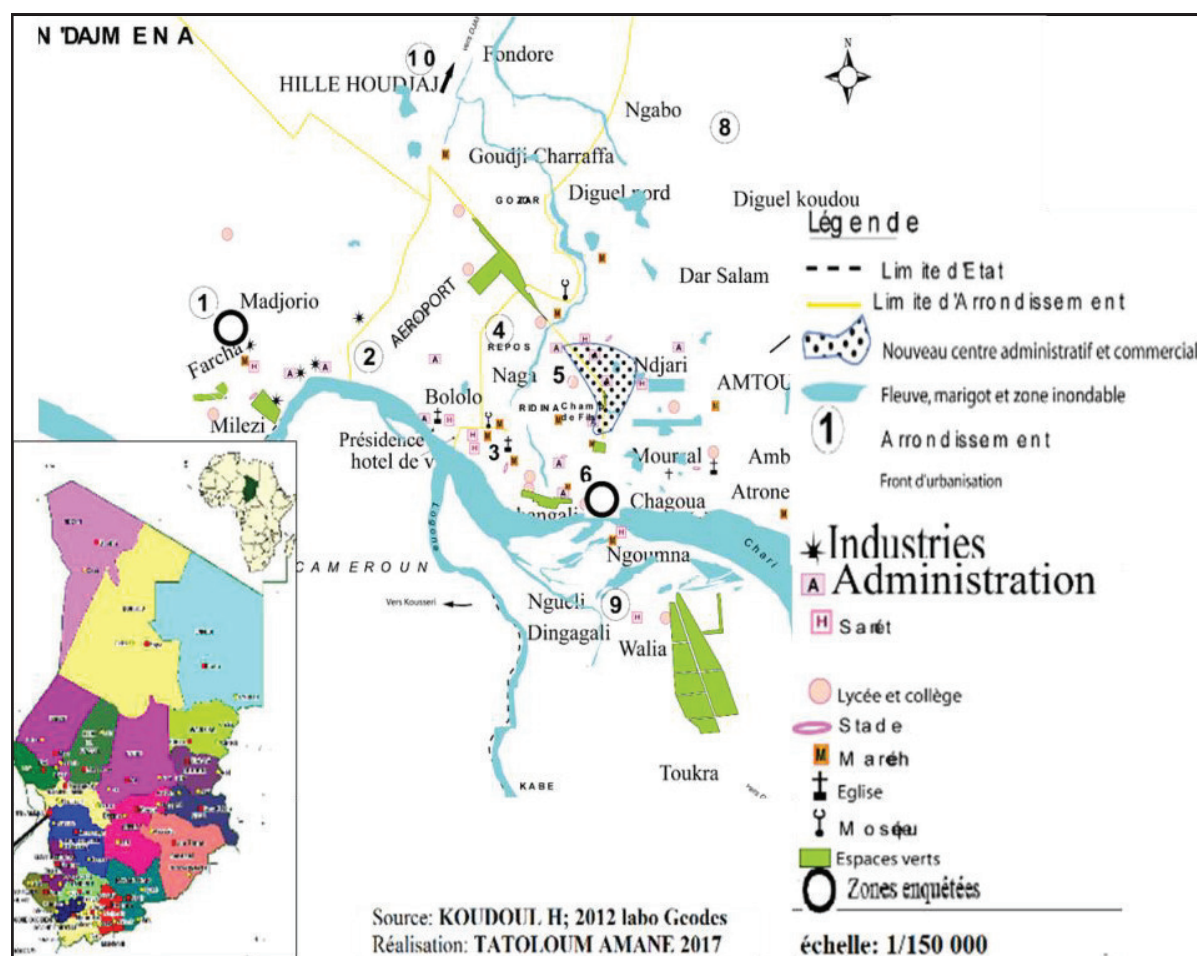


Figure 1. Carte de localisation (source Koudoul, 2012 ; Labo Geodes, Univ de N'Djamena)

Cet afflux massif de réfugiés a permis l'installation dans les années 1980 de nouveaux arrivants dans les zones dépressionnaires inondables et marginales, accessibles sur le plan foncier mais défavorables aux établissements humains. De sorte que N'Djamena, qui se localisait sur seulement quelques dizaines d'hectares à sa création, s'étend aujourd'hui sur environ 25 km (Direction des services techniques de la Mairie de N'Djamena, 2009).

De nos jours, le taux de sa croissance oscille autour de 7%, ce qui permet de projeter un doublement de cette population tous les 10 ans. N'Djamena atteindra les 2 000 000 habitants à l'approche 2020. Avec une telle rapidité de croissance, on est en mesure de se poser la question

de savoir si les infrastructures sont à même d'accueillir cette population ? Et si la qualité de l'air sera de plus en plus détériorée ?

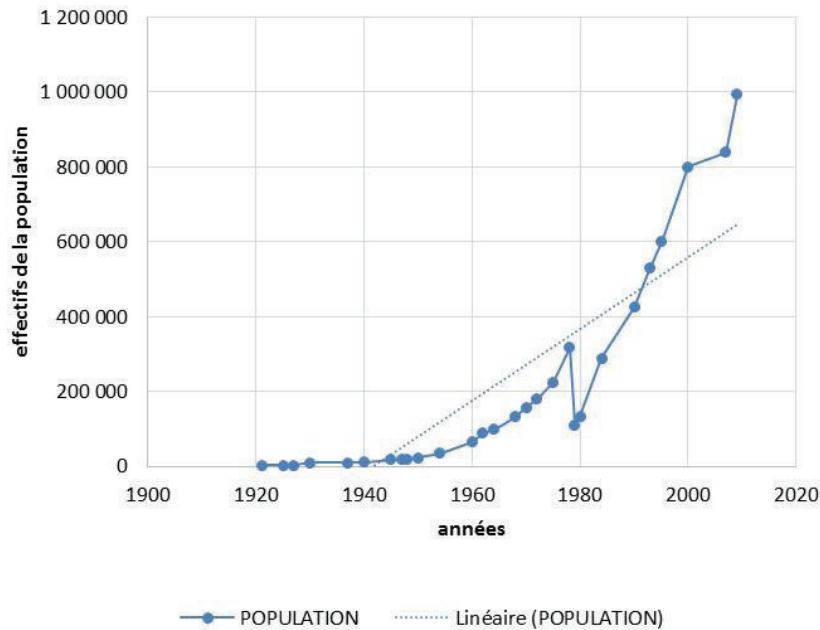


Figure 2. Évolution de la population de N'Djaména (source des données INSEED ²⁰2009)

2.2. L'extension anarchique de la ville

L'évolution spatiale de la ville s'est opérée par vagues concentriques autour du noyau de la ville. Ce noyau originel formé du quartier administratif nommé quartier résidentiel puis s'est faite avec une remarquable tendance vers les parties nord et sud-est du fait de l'aéroport qui constitue un obstacle à l'ouest et le fleuve Logone, une barrière à l'ouest.

Les quartiers dits traditionnels sont organisés suivant un plan quadrangulaire sur l'axe Sud-Nord avec la grande mosquée, comme point central. Le point actuel de la ville de N'Djaména résulte de la mise en application du plan d'urbanisme conçu par l'administration coloniale en 1945. Ce plan prévoit la division de N'Djaména en « zone industrielle, résidentielle, administrative, militaire, comprise entre le Chari et la rive occidentale d'un marigot baptisé Saint-Martin par les européens. La ville indigène dont une faible partie (Bololo et Djambalbarh) est comprise entre la ville européenne et le canal (qui en saison sèche n'est pas qu'un large fossé), s'étend sur l'autre rive. Les anciens quartiers ont disparus (Garouangakoumadji, Labito ...) ou ont été déplacés (Mardjandafak, Paris-congo) en conservant leur nom pour la plupart » (Yémadji, 1995).

2.3. L'utilisation des véhicules de seconde main

À N'Djaména, deux véhicules sur 3 sont de seconde main selon la direction de transport de surface. Et, sur 10 véhicules en circulation, 7 ont plus de 10 ans d'âge. Ces véhicules sont en

²⁰ INSEED : Institut National d'Économie et d'Études Démographiques.

général importés de l'Europe via l'Afrique de l'ouest (fig.3). En plus de ce circuit traditionnel, l'importation des véhicules au Tchad se fait ce dernier temps de Doubaï pour les grosses cylindrées et très récemment de la Libye après la guerre qui a occasionné le désordre dans ce pays voisin. Ces véhicules causent des bouchons le matin entre 7h-8h30 et de 12h-15h30 l'après-midi et en début de soirée entre 17h-18h30. Dans le 1^{er} et le 6^{ème} arrondissement de la ville, nous avons observé pendant plusieurs jours les véhicules au rond-point Nelson Mandela et voici ce qu'il en ressort :

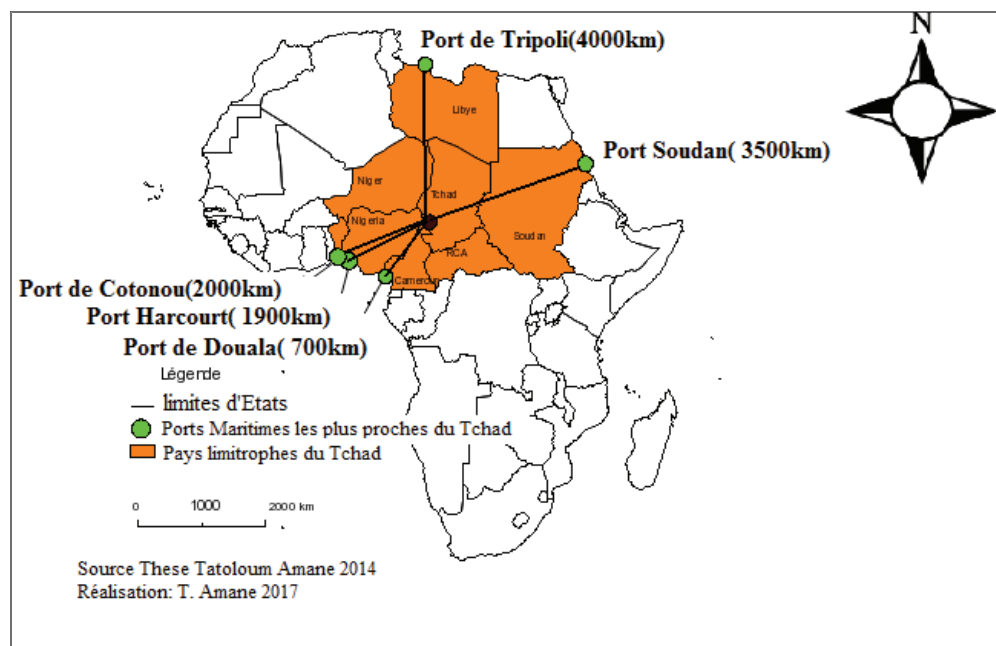


Figure 3. Carte de N'Djamena et les ports les plus proches

Tableau 2. Fréquence de passage des véhicules au rond-point de Farcha dans le 1^{er} arrondissement de N'Djamena (recensement sur le terrain en avril 2017).

moteurs à essence	Moteurs de type diesel	total
288 véhicules /h	312 véhicules /h	600 véhicules/h

Ces chiffres du 1^{er} arrondissement montrent combien le trafic est relativement dense. Il faut souligner le fait que les véhicules de types diesel sont les plus nombreux (312/h) soit 52% selon nos observations (tab.II). Les mini bus qui sont presque hors d'usage représentent le tiers de ces engins au carrefour quand on sait qu'ils sont à priori risquant vu leur âge (15ans au moins).

Sur l'avenue Charles De Gaulle, on peut mettre des dizaines de minutes pour longer le commissariat du marché. Il en est de même pour l'avenue Moboutu qui est surtout connu pour la densité de son trafic qui peut durer en moyenne 1h30 tous les matins. Les policiers sont souvent débordés. Ainsi, l'air en ces endroits est souvent difficile à respirer.

Mais les activités humaines ne sont pas les seules responsables de la présence de particules fines dans l'air. Les poussières désertiques ou encore les feux de brousse des quartiers péri urbains viennent grossir la concentration des particules fines dans l'air des villes du Sahel comme N'Djamena.

2.3 Les conséquences de cette pollution automobile

On sent qu'il y a des impacts sanitaires déjà visibles, selon nos investigations auprès des urgences de la ville, 3 patients sur 10 qui sont piétons et qui traversent le centre-ville pour arriver au travail souffrent de problèmes pulmonaires. Et le personnel soignant estime que les dégâts sanitaires sont régulièrement visibles. Selon l'OMS, en 2012, près de 700 000 personnes seraient mortes à cause de la pollution de l'air, sur le continent africain. Cependant, comme la pollution de l'air, les pathologies provoquées troubles respiratoires, asthme,... restent encore peu documentées, malgré une prise de conscience progressive.

Conclusion

N'Djamena est une ville qui connaît une extension spatiale notable suite à l'accroissement démographique. Conséquemment, certaines nuisances environnementales sont observées telle que la pollution atmosphérique issue du trafic automobile rendant difficile la respiration par endroit au centre-ville. L'observation du rond-point de Farcha nous a permis de dire que les mini bus de moteur diesel utilisés sont presque tous hors d'usage et donc susceptibles de polluer plus. Aussi, ce travail n'a pas pu mesurer de façon quantitative les polluants mais a mis un accent sur les facteurs pouvant engendrer cette pollution notamment, l'augmentation rapide de la population, l'extension rapide de la ville, l'utilisation des véhicules de seconde main et les moteurs de type diesel. La conjonction de tous ces facteurs ne peut que porter un coup à l'environnement de la ville de N'Djamena.

Bibliographie

- Essabri E. et El Omari H. 2012 : Valorisation des déchets de la ville de Settat par fermentation méthanique, *Rev. Microbiol. Ind. San et Environn.* Vol 6, 2, 164-173
- AdéléA et M Gonzalez, *LE MONDE* le 29.09.2016 à 11h49 • mis à jour le 29.09.2016 à 15h34
- Dobingar, A., 2004 : Le foncier urbain et périurbain au Tchad, *Actes du Colloque Scientifique de N'Djaména*, N'Djaména, CEFOD, 195-206.
- Lasserve, A D., et Le Roy, E., 2012 : *La situation foncière en Afrique à l'horizon 2050*, Comité technique « Foncier & développement », A Savoir 11, 158 p.
- FAO, 2012 : *Pour des villes plus vertes en Afrique, premier rapport d'étape sur l'horticulture urbaine et périurbaine*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, 116 p.
- Grisoni-Niaki, J-C., 2000 : Dynamiques foncières et immobilières. Explosion urbaine et développement local à Cotonou. *Les Annales de la Recherche urbaine n°86*, [en ligne], [02/10/2013], http://www.annalesdelarechercheurbaine.fr/IMG/pdf/Grisoni-Niaki_ARU_86.pdf
- Klitgaard, R., Maclean-Abaroa, R., et Lindsey Paris, H., 2006 : *Villes corrompues. Du diagnostic aux remèdes*, Paris, Nouveaux Horizons, 152 p.
- Piermay, J.L., 1993 : *Citadins et quête du sol dans les villes d'Afrique Centrale*, Paris, Harmattan, Collection Villes et Entreprises, 1954, 579 p.
- YapiDiahou, A., 1990 : L'État et les municipalités en Côte d'Ivoire : Un jeu de cache-cache ? [en ligne], [05/04/2013], http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/pleins_textes_5/b_fdi_30-30/31487.pdf
- Mbaye N. G., 1998 : *Croissance urbaine et problèmes de l'habitat à N'Djaména*. Thèse de doctorat du 3^{ème} cycle en géographie à l'institut de géographie intertropicale en Côte d'Ivoire.
- KoudoulHyemouya, 2012 : carte de N'Djaména, labo Geodes.
- Yémadji, 1995 : L'eau et la vie urbaine à N'Djaména, thèse de doctorat 3^{ème} cycle, Université de Cocody, Abidjan Côte d'Ivoire, 40-41.

BIOCLIMATS HUMAINS ET HORAIRES DANS LES ECOLES DU DEPARTEMENT DES COLLINES AU BENIN: EST-IL PERTINENT DE MAINTENIR LES HORAIRES DANS LES ETABLISSEMENTS SCOLAIRES ?

HOUSSOU C. S.¹; VISSIN E. W.¹; MEDEOU F. K.¹; BOKO N. P. M.¹

¹Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Écosystèmes et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi (Bénin), [christpasse@yahoo.fr ; exlaure@gmail.com; kmedeouf@yahoo.fr; boko2za@yahoo.fr]

Résumé - Cette étude vise à mettre en exergue les ambiances bioclimatiques pendant les heures de cours des écoliers (CI et CM2) dans le département des Collines au Bénin. Cette étude a été menée à l'aide des méthodes de calcul d'indices bioclimatiques (THI et K), des données de température, de vent et d'humidité relative à l'échelle tri-horaire sur la période 1990-2015 sur la station synoptique de Savè au Bénin. Les résultats montrent quels types de temps bioclimatiques entre 12h et 15h et entre 15h et 18h sont défavorables pour les études; contrairement aux horaires de 6h à 9h et de 9h à 12h pendant lesquelles les ambiances sont favorables. On peut retenir, sous réserve de la perception des enseignants et de celle des apprenants, que les horaires de l'après-midi ne sont pas favorables pour le rendement des classes des écoliers.

Mots clés : Bénin, ambiances bioclimatiques, horaire.

Abstract - human bioclimates and schedules in schools in the department of the Collines in Benin: is it relevant to maintain the schedules in school establishments? This study aims to highlight the bioclimatic environments during school hours (CI and CM2) in the Department of Hills in Benin. This study was carried out using the bioclimatic index calculation methods (THI and K), the temperature, wind and relative humidity data on the tri-hourly scale over the period 1990-2015 years on the synoptic station of Savè in Benin. The results show that the bioclimatic time types between 12h to 15h and 15h to 18h are unfavorable for the studies; unlike the schedules from 6am to 9am and 9am to 12pm during which the atmospheres are favorable. It is possible to retain, subject to the perception of teachers and learners, that the afternoon schedules are unfavorable for the performance of the classes of the schoolchildren.

Keywords : Benin, bioclimatic atmospheres, timetable.

Introduction

De nombreuses études en bioclimatologie montrent que les conditions météorologiques ont non seulement des effets sur la santé des hommes mais aussi sur le mode vestimentaire, le loisir et plus encore sur les heures de travail (Alie *et al.*, 1995 ; Vogt et Metz, 1992 ; Gun, 1995 ; Ganemet *al.*, 2006; Hémon et Jouglà, 2004). Les études sur les heures de travail ne sont pas assez importantes en Afrique, en particulier au Bénin où s'amplifient les situations d'inconfort thermique, à cause des effets du réchauffement climatiques (Houssou, 1998 ; Médéou *et al.*, 2014 ; Boko *et al.*, 2016). Par conséquent, les incertitudes sont importantes et les verrous de connaissances restent nombreux, alors qu'une connaissance des différents facteurs d'influence est nécessaire pour préserver les performances des travailleurs et des apprenants voire des écoliers.

Cet article vise à mettre en exergue l'évolution des ambiances bioclimatiques dans le département des Collines au Bénin puis étudier les relations entre la sensation de confort pour les apprenants et ces ambiances. Ce diagnostic va permettre la mise sur pied de stratégies de gestion pour atténuer l'intensité et/ou les impacts du réchauffement climatique.

Le secteur d'étude, qu'est le Département des Collines (figure 1) a été choisi pour la présente étude parce qu'il est situé dans une zone de transition climatique entre le climat béninois au sud et le climat soudanien au nord du Bénin.



Figure 6. Situation géographique et subdivision administrative du secteur d'étude

Le département des Collines est situé entre 7° 27' et 8° 46' de latitude nord, et entre 1° 39' et 2° 44' de longitude est. Il regroupe les communes de Savè, de Dassa-Zoumè, d'Ouessè, de Glazoué, de Savalou et de Bantè et couvre une superficie d'environ 13 899 km² (INSAE, 2004).

2. Données et méthodes

➤ Données utilisées

Les données utilisées sont les statistiques climatologiques (températures minimale et maximale, humidité relative et vitesse du vent) à l'échelle tri-horaire sur la période de 1990 à 2015 au niveau de la station de Savè. Ces données sont extraites des fichiers de l'ASECNA-Savè. Les plages horaires choisies sont 6 heures, 9 heures, 12 heures, 15 heures et 18 heures, parce qu'elles sont plus proche de façon générale des horaires officiels d'entrée et de sortie dans l'ensemble des établissements du milieu d'étude. Notons que les horaires sont uniques pendant toute l'année pour les établissements à savoir de 8h à 12h pour la matinée et de 15h à 17h pour la soirée.

➤ Méthode de traitement des données

La méthode de traitement des données s'articule autour de la détermination des ambiances bioclimatiques. Celle-ci a été réalisée par le biais de deux indices : l'indice thermo-hygrométrique (THI) et l'indice du pouvoir réfrigérant de l'air (K).

La formule de l'indice thermo-hygrométrique (THI) de Thoms (1959) est comme suit :

$$THI = [T - (0,55 - 0,0055U\%)(T - 14,5)]$$

avec T (°C) = la température de l'air et U (%) = l'humidité relative.

Le tableau I montre les échelles d'interprétations des valeurs issues des calculs de cet indice.

Tableau II. Echelles d'interprétation du THI

THI (°C) CONDITIONS	INTERPRETATIONS
THI < 0	ambiance très froide, voire glaciale
0 ≤ THI ≤ 15	ambiance fraîche
15 ≤ THI ≤ 20	ambiance relaxant, confortable, (refroidissement relaxant)
20 ≤ THI ≤ 26	ambiance chaude plus ou moins supportable
26 ≤ THI ≤ 29	ambiance très chaude inconfortable
THI > 30	ambiance torride

Source : Thoms, 1959.

Le K est un indice mis au point en la formule de l'indice du pouvoir réfrigérant de l'air (Siple et Passel, 1945) et qui est stipulé comme suit :

$$K = (10,45 + 10\sqrt{v-V}) (33 - T)$$

avec K le pouvoir réfrigérant de l'air, V la vitesse du vent et T la température ambiante.

Le tableau II montre les échelles d'interprétations des valeurs issues des calculs de cet indice.

Tableau III. Echelles d'interprétation du K

K (Kcal/h/m²) CONDITIONS	INTERPRETATIONS
K < 0	ambiance torride
0 ≤ K ≤ 150	ambiance très chaude inconfortable
150 ≤ K ≤ 300	ambiance chaude plus ou moins supportable
300 ≤ K ≤ 600	ambiance confortable, (refroidissement relaxant)

Source : Siple et Passel, 1945.

Tous les calculs statistiques classiques ont été réalisés sous Excel 2013. Quant au calcul d'indice bioclimatique, il a été réalisé grâce au logiciel BioKlima © v 2.6. Le logiciel peut être téléchargé à partir de : www.igipz.pan.pl/klimat/blaz/bioklima.htm.

3. Résultats

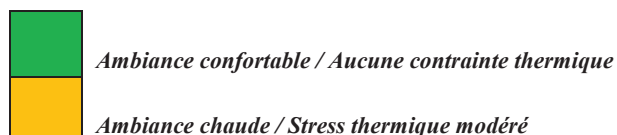
L'ambiance bioclimatique varie selon l'heure, le mois et l'année. Les indices bioclimatiques estimés aux pas de temps tri-horaire, mensuel et annuel permettent d'obtenir les résultats suivants.

- Ambiances décrites par l'Indice Thermohygro-métrique (THI)

Le tableau III présente les ambiances thermiques décrites par l'Indice Thermohygro-métrique à l'échelle tri-horaire.

Tableau IV. Indice Thermohygro-métrique à l'échelle tri-horaire dans le Département des Collines

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
6h	21,5	24,3	25,2	25,8	25,6	25,3	25,2	24,0	25,5	25,3	25,8	22,2
9h	23,7	25,4	26,5	27,6	28,4	27,5	25,6	24,6	26,2	27,5	28,1	25,7
12h	30,0	31,1	32,5	32,3	33,4	31,4	28,9	27,8	30,1	31,8	33,2	32,4
15h	33,2	34,6	36,0	36,5	35,1	32,9	30,9	30,9	31,2	33,6	35,6	34,0
18h	30,1	31,5	32,4	32,7	32,6	30,6	31,8	29,5	31,3	30,3	31,9	29,6



Sources: Résultats de calcul, 2016.

A 6 heures du matin, les valeurs de THI décrivent une ambiance confortable pendant tous les mois. Ce confort thermique se poursuit jusqu'à 9 heures entre décembre et février, puis en juillet et août. Les plus faibles valeurs de THI ont été obtenues à 6 heures respectivement en janvier, décembre, août et février puis à 9 heures en janvier (harmattan et saison sèche). De mars à mai et en novembre, le stress thermique est modéré aux environs de 9 heures et devient fort entre 12 et 18 heures (début saison des pluies). Dans ces conditions, les apprenants éprouveraient une sensation chaude à 9 heures et très chaude entre 12 et 18 heures. En réalité, les mois de novembre, mars, avril et mai sont les plus éprouvants tandis que les mois de juillet, août et septembre apparaissent plus favorables du point de vue thermique. Au cours de l'année, les valeurs de THI sont globalement plus élevées à 15 heures traduisant une sensation thermique fortement chaude.

En janvier, le niveau de stress thermique se trouve globalement modéré et caractérisé par un temps chaud. Les mois de février sont caractérisés par un stress thermique modéré avec une légère évolution vers un stress thermique fort. Les mois de mars se retrouvent dans un stress thermique globalement modéré mais sont plus chauds que les mois de février puisque les valeurs de THI se trouvent entre 29,4 °C pour le minimum et 33,5 °C pour le maximum. En avril, le temps est légèrement moins chaud qu'en mars et les valeurs limites de THI se retrouvent entre 29,3 °C et 33,2 °C. Tous les mois de mai ont enregistré un stress thermique modéré traduisant une légère chaleur. La situation est presque identique pendant les mois de juin, juillet, août et septembre, avec des valeurs de THI qui sont légèrement moins élevées que celles de mai. Ces quatre mois sont moins chauds que le mois de mai.

En octobre, les valeurs de THI sont comprises entre 26,6 °C et 30,4 °C, ce qui traduit un stress thermique modéré ou une sensation de légère chaleur. Pendant les mois de novembre, les valeurs limites établies entre 27,4 °C pour le minimum et 31,6 °C pour le maximum commandent une ambiance plus chaude que celle d'octobre.

➤ Ambiances bioclimatiques décrites par le pouvoir réfrigérant de l'air

Le tableau IV présente les ambiances thermiques décrites par le pouvoir réfrigérant de l'air (K) à l'échelle tri-horaire.

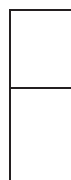
Tableau V. Pouvoir réfrigérant de l'air à l'échelle tri-horaire sur la période 1990-2015 dans le Département des Collines

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
6h	320	325	175	181	218	27,3	326	325	326	325	137	321
9h	306	226	277	183	285	278	26,5	326	272	265	282	322
12h	217	224	126	150	150	148	147	148	147	148	146	144
15h	216	130	123	150	150	138	123	121	139	146	145	273
18h	318	324	325	132	132	289	281	283	218	219	229	204



Ambiance torride

Ambiance confortable, (refroidissement relaxant)



Ambiance chaude plus ou moins supportable

Ambiance très chaude inconfortable


L'examen des informations du tableau IV permet de conclure qu'aucun mois ne présente exclusivement une ambiance confortable ou inconfortable. L'ambiance confortable est ressentie pendant la matinée à 6 heures aux mois de janvier, février, juillet, août, septembre, octobre et novembre et à 9 heures en décembre et février. Cette ambiance devient légèrement éprouvante aux environs de 9 heures en mars, octobre, novembre et éprouvante en avril puis très éprouvante entre 15 et 18 heures. Pendant le bimestre janvier-février, l'ambiance légèrement éprouvante entre 6 et 9 heures passe à très éprouvante entre 12 et 15 heures. Par contre, de juin à septembre, l'ambiance thermique légèrement éprouvante entre 6 et 9 heures devient éprouvante de 12 à 18 heures. Du reste, on retient que les horaires de 12 à 18 heures sont éprouvantes pour l'organisme humain et par conséquent défavorables au travail.

***Incidences des ambiances bioclimatiques sur la performance des apprenants**

Les ambiances bioclimatiques observées sont globalement éprouvantes. Selon de nombreuses études, le travail sous une forte température ambiante peut moduler les habilités et les capacités lors de l'exécution de certaines tâches. En effet, les performances psychologiques peuvent être modifiées suite à une exposition à la chaleur. Les effets de la charge thermique de l'environnement sur l'organisme varient selon l'intensité de la radiation solaire (tableau V). L'examen des données du tableau V montre une gradation des effets de la charge thermique selon que la température augmente. Outre la chaleur, la faible vitesse du vent engendre une forte sensation de touffeur, ce qui prédispose l'organisme à la fatigue dans le Département des Collines.

Par ailleurs, l'inconfort physique, associé à une augmentation de la température corporelle, peut modifier l'état émotif des apprenants (irritabilité, rage), et ainsi rendre intenable une salle de classe par les enseignants surtout dans l'après-midi ou les ambiances sont généralement chaudes. Autrement dit, le travail effectué sous une ambiance chaude et très chaude s'avère nuisible pour la santé et la performance, du fait que l'organisme doit fournir plus d'effort pour rétablir l'équilibre homéostatique. De plus, l'exposition à un environnement chaud modifie des paramètres physiologiques tels que la ventilation pulmonaire, la vasodilatation, la sudation et le débit sanguin. La vasodilatation cutanée peut provoquer des altérations dont l'une des manifestations extrêmes est la syncope de chaleur. Celle-ci survient généralement après une longue période d'immobilité dans une ambiance chaude.

Tableau V. Effets de la charge thermique de l'environnement sur l'organisme

Température (° C)	Effets
35 – 40	Limite de la tolérance à la chaleur
 <p>Lorsque la température augmente...</p>	Baisse de la performance
	Augmentation de la contrainte cardiaque et circulatoire
	Fatigue et risque d'épuisement thermique
	Augmentation des erreurs
	Perte d'efficacité lors de tâches requérant une grande concentration
	Irritabilité
	Baisse de la concentration
	Perte d'efficacité lors des tâches mentales
	Inconfort
20 – 26	Zone de confort

Source : Médéou, 2015 et modifié, 2016.

Conclusion

En somme, dans le Département des Collines, les valeurs de THI traduisent des ambiances globalement chaudes. Le mois de mars a été le plus chaud tandis que le mois d'août a été le moins chaud au cours de la période 1990-2015. A partir de la combinaison des paramètres climatiques, on retient que les horaires de l'après-midi peuvent être préjudiciables aux apprenants.

Il ne faut, cependant, pas perdre de vue que les effets des ambiances sur les écoliers peuvent aussi dépendre des problèmes comme la distance parcourue (trajet) pour venir dans l'établissement, l'âge de l'apprenant, le moyen de déplacement (pied, moto ou voiture), l'état de santé, etc.

Nous recommandons dans les limites du possible, que les autorités compétentes, à divers niveaux, puissent tenir compte des horaires « bioclimatiquement » favorables pour les études dans les cours primaires à prendre des mesures nécessaires.

Bibliographie

- Alie R., Dufresne D., Nadeau D. et Prud'homme C., 1995 : *Formation sur la contrainte thermique : Exposition à la chaleur*. 111 p.
- BioKlima©2.6., software package, <http://www.igipz.pan.pl/Bioklima-zgik.html>
- Boko N. P. M., Houssou C. S., Medeou F. K., 2016 : Ambiances bioclimatiques et santé des populations dans la commune de Glazoué (Benin). In *Colloque en hommage aux professeurs Michel BOKO et Fulgence AFOUDA*. Cotonou, Bénin, Vol.1, 99-110.
- Ganem Y., Pomaian J. L., Laborde L., Brasseur G., 2006 : Ambiances thermiques : travailler au froid. In *Document pour le Médecin du travail*, **107**, 17 p.
- INSAE, 2004 : *Cahiers des villages et quartiers de villes des communes du Département des Collines*. Cotonou, 48 p.
- Gun R. T., 1995 : Effects of thermal, personal and behavioural factors on the physiological strain, thermal comfort and productivity of Australian shearers in hot weather. *Ergonomics*, **7**, 1368-1384.
- Hémon D., Jouglé E., 2004 : *Surmortalité liée à la canicule d'août 2003*. Rapport remis au ministre de la santé et de la protection sociale. Paris: INSERM, 76 p.
- Houssou C.S., 1998 : *Les bioclimats humains de l'Atacora (Nord-Ouest du Bénin) et leurs implications socio-économiques*. Thèse unique de géographie Dijon, 332 p.
- Médéou K. F., Boko N. P. M., Jendritzky G., Ogouwalé E. et Houssou S. C., 2014 : Ambiances thermiques du mois d'août et sensations associées dans la Commune de Savè au Bénin (Afrique de l'Ouest). In *XXVIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*. Dijon, France, 675-680.
- Siple P. A., Passel C. F., 1945 : Measurement of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. *Proceedings of the American Philosophical Society*, **89**, 177-199.
- Thom E. C., 1959 : The discomfort index. *Weatherwise*, tome **12**, 57-60.
- Vogt J. J., Metz B., 1992 : Ambiances thermiques. In *Scherrer J - Précis de physiologie du travail*. Notions d'ergonomie. 2^{ème} édition, Paris, Masson, 585 p.

EFFET DE L'ORIENTATION DES OUVERTURES SUR LE CONFORT THERMIQUE DANS LES SALLES DE CLASSE .CAS CLIMAT CHAUD ET ARIDE (BISKRA, ALGÉRIE)

AFREN R.¹, BENABBAS M.², DJAGHROURI DJ.³

¹Doctorante en architecture, Université Mohamed Kheider ; Biskra, Algérie, Laboratoire LACOMOFA. Mail : afren-maissa07@hotmail.fr ; tel : 0699 18 58 80

²Enseignant, Université Mohamed Kheider ; Biskra, Algérie, Laboratoire LACOMOFA. Mail : Benabbas.moussadek@gmail.com ; tel : 0554621535

³Doctorante en architecture, Université Mohamed Kheider ; Biskra, Algérie, Laboratoire LACOMOFA. Mail : djamila-djaghrouri@outlook.fr ; tel : 0555 46 04 31

Résumé – La question du confort thermique estival pose le problème du contrôle de l'ensoleillement dans les bâtiments. Si la pénétration du soleil dans le bâtiment permet de limiter la consommation relative au chauffage, elle risque en été de provoquer une surchauffe et un inconfort thermique important, surtout sous des conditions climatiques spécifiques aux régions arides et chaudes. Pour le confort thermique dans les salles de classe où la densité d'occupation est très élevée et où sont utilisées, dans un but fonctionnel, de larges baies vitrées, le problème qui se pose souvent, est celui de la surchauffe surtout en mi- saison et en été. Cependant l'évaluation des aspects positifs et négatifs de la paroi transparente exige une grande attention à plusieurs éléments ; comme l'orientation des fenêtres et le type de protection solaire, la dimension de la fenêtre, la position de la fenêtre, le type de vitrage et le cadre. L'orientation d'une façade est le paramètre clé des interactions visuelles, thermique et acoustique ; cependant au niveau thermique cela, se traduit par l'ensoleillement disponible, la pression du vent et l'humidité de l'air. Le but de cet article est d'évaluer le confort thermique dans les typologies, les plus récurrentes, des bâtiments scolaires d'enseignement moyen, dans le contexte climatique et environnemental de la ville de Biskra, Algérie. L'enquête par questionnaire et les campagnes de mesures in-situ sont les moyens utilisés pour répondre à la problématique. Les principaux résultats obtenus révèlent une insatisfaction à l'égard de l'ambiance thermique chez les occupants et que la qualité environnementale n'est pas prise en considération dans la conception de ces bâtiments.

Mots-clés : Paroi transparente, Climat chaud et sec, Confort thermique, Orientation, Salle de classe.

Abstract – The issue of summer thermal comfort raises the problem of controlling sunlight in buildings. When the sun heat affect the building it limits the energy consumption for heating however, in summer; it can cause overheating and thermal discomfort, especially under climatic conditions specific to the arid and hot regions. For thermal comfort in classrooms, where the density of occupancy is very high and where the functional use of large bay windows is used, the problem that often arises is that of overheating, especially from midseason to the end of summer. However, the evaluation of the positive and negative aspects of the transparent part requires great attention to several elements; Such as, window orientation, type of sun protection, window size, window position, glazing type and frame. The orientation of a façade is the key parameter of visual, thermal and acoustic interactions; however at the thermal level we should also consider sunlight, wind pressure and humidity of air. Our study is to evaluate the effect of window orientation on comfort in classrooms in the climatic and environmental context of Biskra city. The Survey by the questionnaire and the in-situ measurement campaigns are the means used to understand the problem. The main results revealed dissatisfaction with the thermal environment of the occupants and that openings in the facades are the main sources of discomfort because their features are ignored in the design process of these buildings.

Keywords : Openings, Hot and dry climate, Thermal comfort, Orientation, Classroom.

Introduction

La question du confort thermique estival pose le problème du contrôle de l'ensoleillement dans les bâtiments. Si la pénétration du soleil dans le bâtiment permet de limiter la consommation relative au chauffage, elle risque en été de provoquer une surchauffe et un inconfort thermique important, surtout sous des conditions climatiques spécifiques aux régions arides et chaudes.

De ce fait, dans les bâtiments scolaires, le confort a un impact sur les performances intellectuelles et le comportement des élèves (MOUJALLED *et al.*, 2006). Pour le confort thermique dans les salles de classes où la densité d'occupation est très élevée et où sont utilisées,

dans un but fonctionnel de larges baies vitrées, le problème qui se pose souvent, est celui de la surchauffe surtout en mi- saison et en été.

L'étude de Wong et Khoo (2003) a été menée dans les salles de classe d'une école secondaire à Singapour. Ces salles sont ventilées mécaniquement par des ventilateurs. Il est recommandé que les longues façades du bloc de salles de classe devraient donner sur le Nord et le Sud. Cette orientation permettrait également l'augmentation du potentiel d'utilisation de la ventilation naturelle pour créer un environnement thermique acceptable. Givoni (1998) suggère que l'inertie est une recommandation nécessaire pour la construction durable d'un bâtiment en climats chauds à grand écart diurne.

D'autres études, comme celle d'Appah-Dankyi et Koranteng (2012) a concentré une grande partie de son travail sur l'évaluation du confort thermique d'un bâtiment éducatif dans le climat chaud et humide à Accra, Ghana; dans ce cas, il est recommandé que les futurs bâtiments scolaires devront faire appel à des principes de conception durables (forme, orientation, ombrage, surfaces de fenêtres, hauteurs des salles, etc.) en outre, l'installation des ventilateurs à faible consommation d'énergie dans les salles de classe est avantageuse afin de promouvoir la santé et faciliter l'apprentissage (Appah-Dankyi et Koranteng, 2012).

Relativement à la recherche bibliographique et les expériences pratiques sur plusieurs sites et après des discussions informelles avec les élèves des établissements in situ, il apparaît que le phénomène de surchauffe se produit durant la majorité de l'année scolaire et ceci même pendant la saison hivernale. Dans notre contexte, les salles de classe sont des espaces où les surchauffes liées aux apports solaires risquent de survenir très rapidement, en raison de la forte densité d'occupation, entraînant des apports internes importants (40 élèves et plus). Cependant l'évaluation du confort thermique exige une grande attention vis-à-vis de plusieurs éléments tels que la forme du bâtiment, l'orientation des fenêtres et le type de protections solaires, sans omettre la dimension de la fenêtre.

Le but de cet article est d'étudier le confort dans les salles de classe sous le climat de Biskra, durant la journée la plus chaude du mois de Septembre de l'année 2016, selon les prévisions météorologiques de Biskra à partir d'*accuweather*, en date du 1 Septembre 2016, sachant que la période estimée convenable pour la campagne de mesures, où les conditions climatiques sont les plus rapprochées de la période estivale, tout en ayant l'occupation des salles de classe par les élèves, est le mois de Septembre.

1. Les caractéristiques climatiques de la ville de Biskra

La ville de Biskra est située au Sud-est de l'Algérie à une latitude de 34°51'01" Nord et une longitude de 5°43'40" Est (Fig.1). Biskra appartient à une région aride où prédomine un climat chaud et sec avec des hivers froids et des étés chauds. La température maximale atteint 43°C durant le mois de Juillet et la température minimale diminue à 7°C en hiver durant le mois de janvier. La température moyenne annuelle est de 21.7°C alors que l'humidité moyenne annuelle est de 46 %. Des précipitations très faibles sont enregistrées avec un maximum de 20mm/an, et une moyenne annuelle d'environ de 8.8mm /an. Les directions des vents dominants sont Nord-ouest en hiver, Sud-est en été à une vitesse de 6 à 10 m/s (Fig.2).

Selon Givoni (1998), pour assurer le confort hygrothermique sous un climat chaud aride, les bâtiments doivent être adaptés aux conditions d'été et cela partant du principe que les exigences d'hiver seront satisfaites par un bâtiment où le confort est assuré en été. Dans cette étude, on se limitera donc à la présentation des résultats obtenus durant la période chaude.



Figure 1. Situation de la wilaya de Biskra (Source : DPAT, 2005)

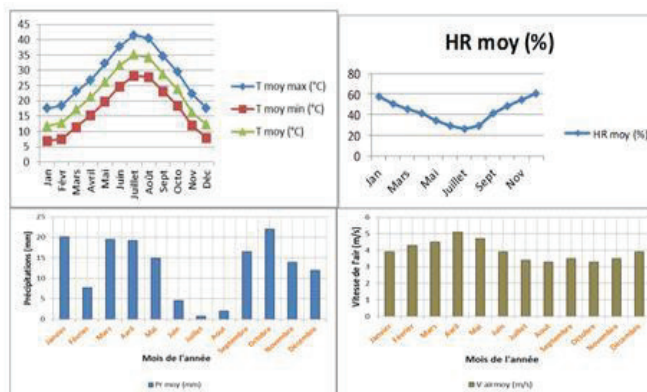


Figure 2. Les données climatiques de la ville de Biskra (2003-2013) (Source : Auteur 2015, établi sur la base des données obtenues de la station météorologique de Biskra)

2. Méthodologie et outils de travail

L'investigation s'est basée sur les deux méthodes : objective et subjective. La première se traduit par une campagne de mesures *in situ* des paramètres physiques (température de l'air, humidité relative et vitesse de l'air) dans les typologies les plus répandues des bâtiments scolaires à Biskra. Tout le travail est exécuté à l'aide du Testo 480, appareil qui permet de prendre des mesures efficaces en changeant de sondes.

L'expérimentation s'est déroulée au mois de Septembre, qui correspond au mois le plus chaud de l'année scolaire à Biskra. En effet, les élèves prennent généralement leurs vacances en fin Mai et reprennent au début Septembre. Cette campagne s'est effectuée en présence des élèves, dans leurs conditions de travail habituelles et sans aucun équipement de rafraîchissement afin d'évaluer la capacité de ces bâtiments à offrir un minimum de confort pendant la période chaude.

La deuxième est basée sur un questionnaire (perception, acceptabilité et la préférence thermiques sur l'échelle de sensation thermique selon la norme de l'ASHRAE-55), ainsi que sur les niveaux d'humidité et de la vitesse de l'air dans la zone occupée.

3. Description du modèle d'étude

L'étude des typologies des bâtiments scolaires d'enseignements moyens à Biskra a fait ressortir principalement deux types de plan. Il s'agit des typologies proposées par le ministère de l'Éducation nationale (1982) à savoir : la typologie de plan à coursive et la typologie de plan à corridor central. Ces dernières partagent des caractéristiques communes, tandis qu'elles diffèrent dans la configuration spatiale des salles de cours et leur orientation. Les bâtiments choisis sont :

3.1. La typologie du plan à corridor latéral (C.E.M Abbas Abed –el Karim –Biskra)

Le CEM en (R+2) est situé dans le côté Est de la ville de Biskra « Hai El-Idari ». Son plan de masse est composé principalement de trois blocs avec un grand patio central de forme rectangulaire (voir figure 3). Nous avons choisi comme corpus d'études plusieurs salles en fonction de leur orientations respectives ; Nord, Sud et Ouest, avec de grandes ouvertures (voir figure 4).



Figure 3. Vues sur CEM Abbas Abed –el Karim de la typologie : plan à corridor latéral. Source : auteur, 2015.



Figure 4. Aménagement de la salle de cours de la typologie : plan à corridor latéral. Source : auteur, 2015.

3.2. La typologie du plan à corridor central : (CEM Mohamed zin ben Madani- Biskra)

Le CEM en (R+1) est situé du côté Est de la ville de Biskra. Il a été construit en 1981, ses salles de cours sont orientées au Nord et au Sud, de part et d'autre d'un corridor central (cf. figure 5), éclairée chacune latéralement d'un côté par rapport à l'extérieur (figure 6). Son plan de masse est composé d'un seul bloc de forme parallélépipédique.



Figure 5. Vues sur CEM Ahmed zin ben Madani de la typologie : plan à corridor central. Source : auteur, 2015.

4. Présentation et description du protocole d'investigation

4.1. Déroulement et mesures

La campagne de mesures effectuée au mois de septembre, correspond au mois le plus chaud de l'année scolaire à Biskra, pendant une seule journée (le jeudi 15 Septembre 2016). Nous avons commencé la prise des mesures à 6h00 du matin jusqu'à 20h00. L'intervalle entre deux mesures consécutives est de deux heures (figures 7. 8. 9).

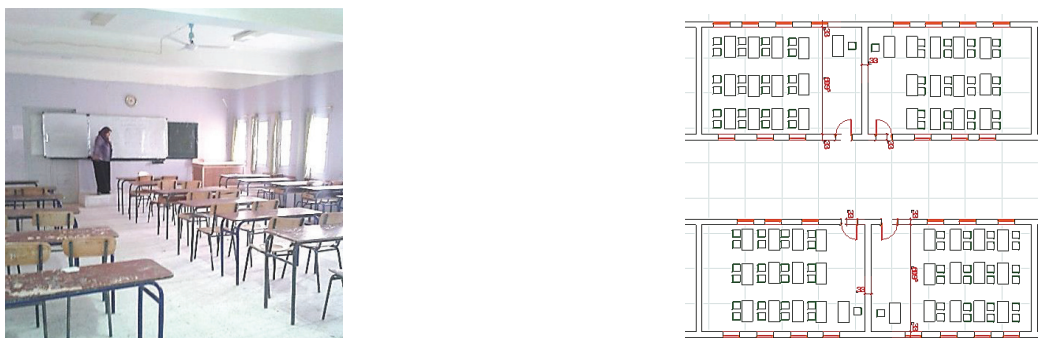


Figure 6. Aménagement de la salle de cours de la typologie : plan à corridor central. Source : auteur, 2015.



Figure 7. L'emplacement de l'auteur pour prendre les mesures du climat extérieur. CEM Abbas Abed –el Karim – Biskra. BISKRA. Source : auteur, 2016.

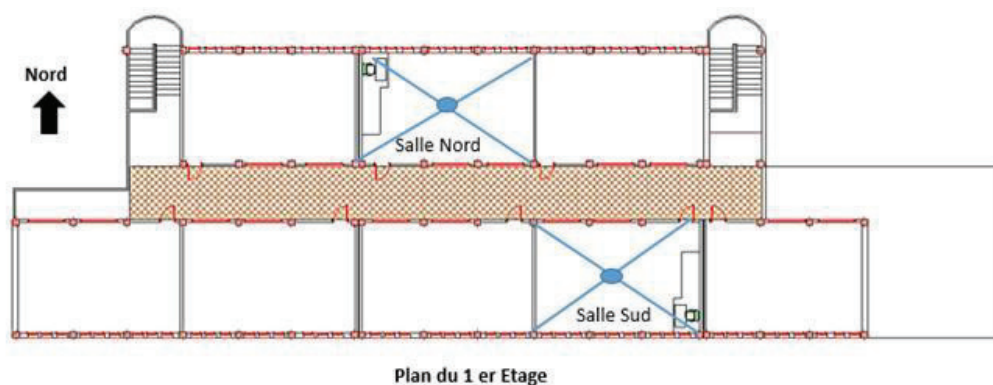


Figure 8. L'emplacement des salles et des points de prises de mesures pour la typologie du plan à corridor central. Source : auteur, 2016.

Cette campagne s'est effectuée en présence des élèves, dans leurs conditions de travail habituelles. Les paramètres qui ont été mesurés sont : 1. Températures ambiantes à l'intérieur des salles de cours ; 2. Températures extérieures ; 3. Humidités relatives à l'intérieur des salles de cours ; 4. Humidités relatives extérieures ; 5. Vitesse de l'air à l'intérieur des salles de cours et à l'extérieur, tout le travail est exécuté à l'aide du Testo 480, appareil qui permet de prendre des mesures efficaces en changeant de sondes (voir figure 7).

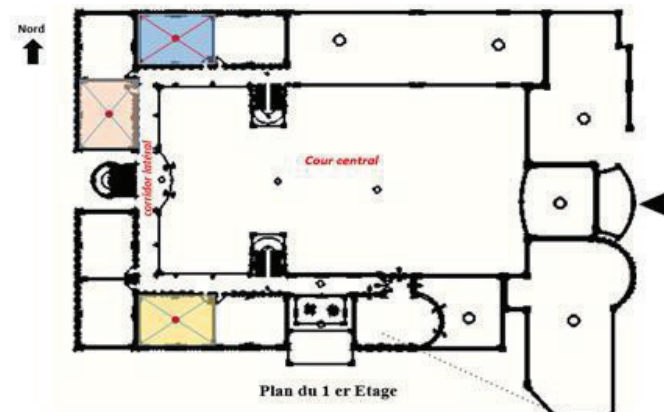


Figure 9. L'emplacement des salles et des points de prises de mesures pour la typologie du plan à corridor latéral. Source : auteur, 2016.

4.2. L'enquête par questionnaire

Le questionnaire est segmenté en quelques objectifs partiels qui prétendent à tirer certaines informations, comme suit :

- a) Informations personnelles, cette partie vise à identifier le sexe et l'âge ;
- b) Evaluations et préférences des paramètres de l'ambiance thermique à savoir :
 - La sensation thermique (la température) ;
 - L'humidité ;
 - Le courant d'air
- c) Détermination des facteurs d'inconfort dus aux paramètres de l'ambiance thermique ;
- d) Refroidissement : nécessité du refroidissement au cours de la journée.

4.1.1. Choix de l'échantillon

Les questionnaires sont destinés à deux populations du même espace, durant la campagne de mesure, à savoir les enseignants et les élèves, pour évaluer leur perception du confort thermique, en deux périodes ; la matinée, vers 11h30 et l'après-midi juste avant la sortie du collège, vers 15h30.

4.1.2. Déroulement de l'enquête

L'enquête s'est déroulée le jeudi 15 Septembre 2016, durant la campagne de mesures *in-situ*, sur les deux cas d'étude. Cette journée s'est caractérisée par une température élevée et une faible vision causée par un vent de sable. Les températures variaient entre 26,7 °C min, 41 °C max, et le taux d'humidité relative entre 15 % min, 25 % max.

5. Résultats et interprétation

5.1. L'évaluation objective

Cette partie est destinée à explorer les données des campagnes de mesures effectuées, le traitement des données a été fait en utilisant le logiciel Microsoft Excel et les résultats de l'investigation sont présentés à l'aide des graphes comme suit :

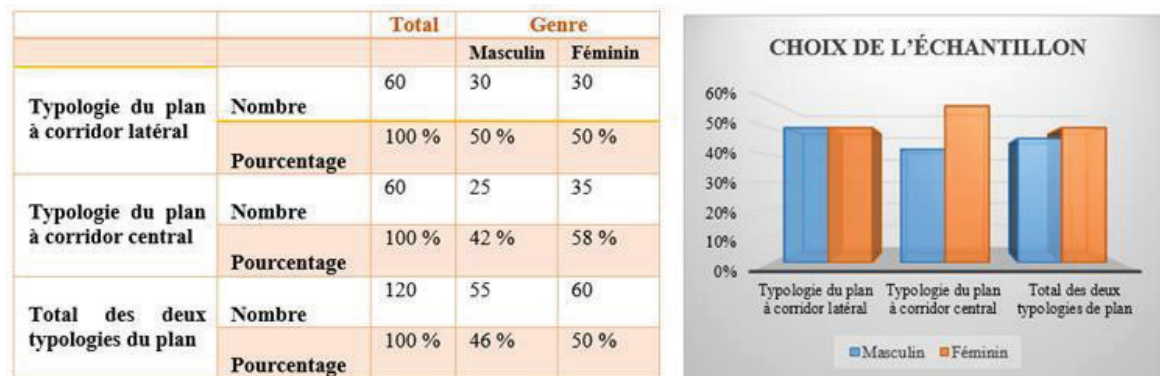


Figure 10. Tableau récapitulatif du nombre et des caractéristiques des personnes enquêtés. Source : auteur, 2016.

5.2. Température

D'après la Figure 11, la température intérieure des salles est supérieure à la température extérieure avant l'occupation de la salle car la porte était fermée durant toute la nuit ce qui provoque le cumul de chaleur à l'intérieur de la salle.

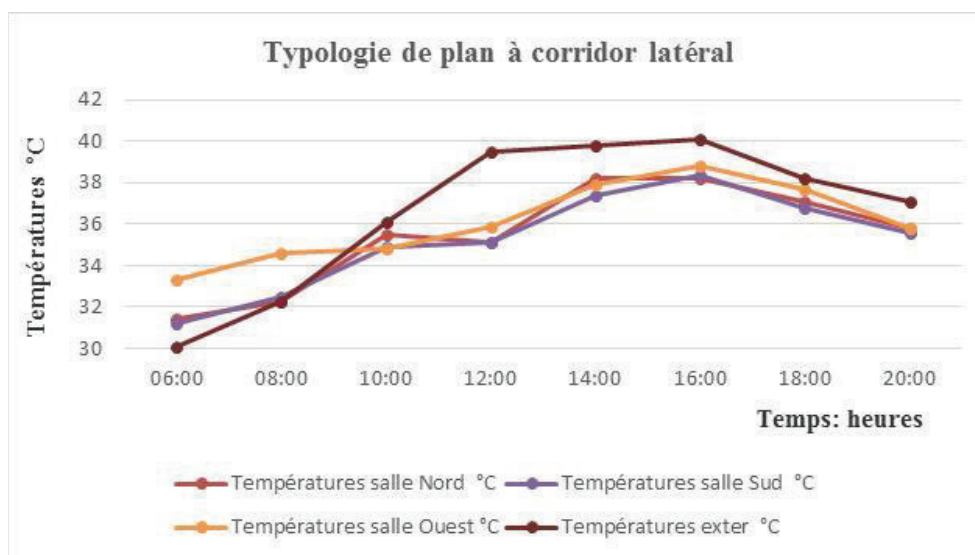


Figure 11. Variation des températures intérieures et extérieures dans la typologie du plan à corridor latéral.

Après l'entrée des élèves à 8h00, et avoir laissé la porte et quelques fenêtres ouvertes, malgré l'augmentation des températures intérieures, ces dernières restent toujours inférieures aux températures extérieures aux environs de 9h30, l'écart maximal entre la température intérieure et extérieure est de 3.6°C enregistrée à 12h00 (La mesure des températures a été faite toujours à l'ombre).

La courbe des températures intérieures évolue lentement de 33°C à 08h00 vers 37,6°C à 14h00. Cela peut s'expliquer par la courte durée d'ensoleillement des façades pendant la matinée. Quant à l'après-midi, la température augmente rapidement pour atteindre sa valeur maximale de 38.8°C à 16h00, dans ce cas le plus défavorable.

La lecture de Figure 12 fait ressortir qu'à partir des environs de 09h45, les températures intérieures des deux salles sont inférieures aux températures extérieures, et atteignent la maximale allant jusqu'à 38 °C, valeur qui dépasse la limite supérieure du confort thermique, estimée à 35 °C (Eleftheria et Jones, 2006).

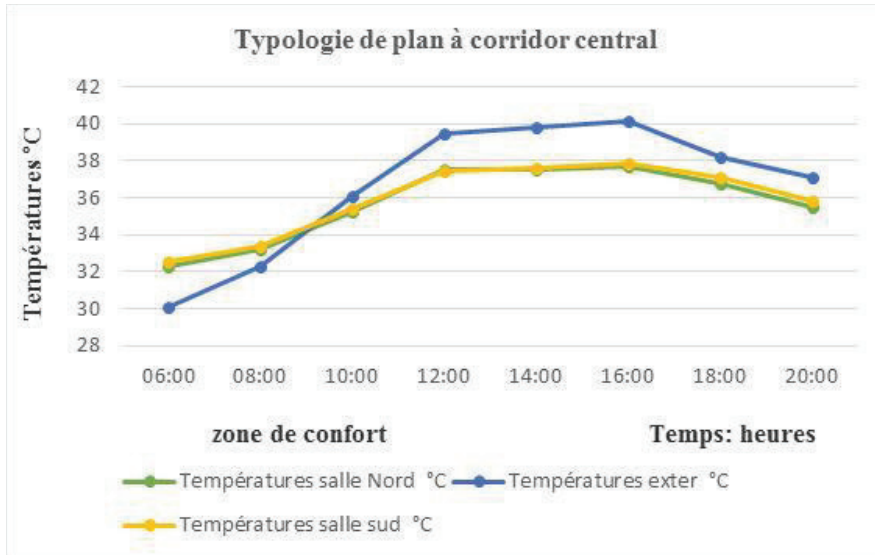


Figure 12. Variation des températures intérieures et extérieures dans la Typologie du plan à corridor central.

5.2.1. Humidité relative

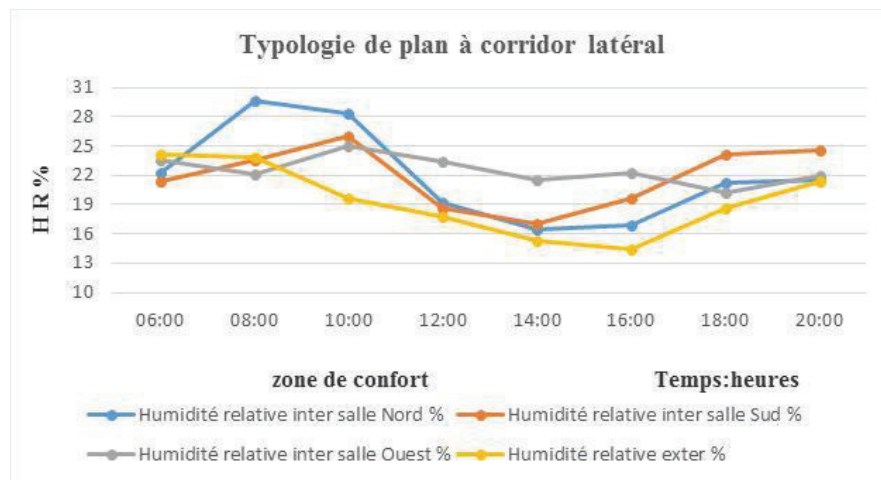


Figure 13. Variation des humidités relatives intérieures et extérieures dans la typologie du plan à corridor latéral.

Les valeurs d'humidité extérieure sont réduites par rapport aux autres, en général, celles des salles de cours sont supérieures à celles de l'extérieur à partir des environs de 8h30, ceci ne peut s'expliquer que par les apports respiratoires des élèves. L'écart maximal des taux intérieurs et extérieur est de 5, 85% (Figure 13).

D'après la Figure 14, le taux d'humidité relative des deux salles est presque identique, sauf dans le cas de la salle orientée au Nord qui est plus élevée vers 08 heures du matin (graphe 4) et qu'un écart conséquent est visible vers 16 heures entre l'humidité relative extérieure et celle des

deux salles, à ce point précis la différence d'humidité relative entre les deux salles est de 1% au profit de la salle orientée Sud.

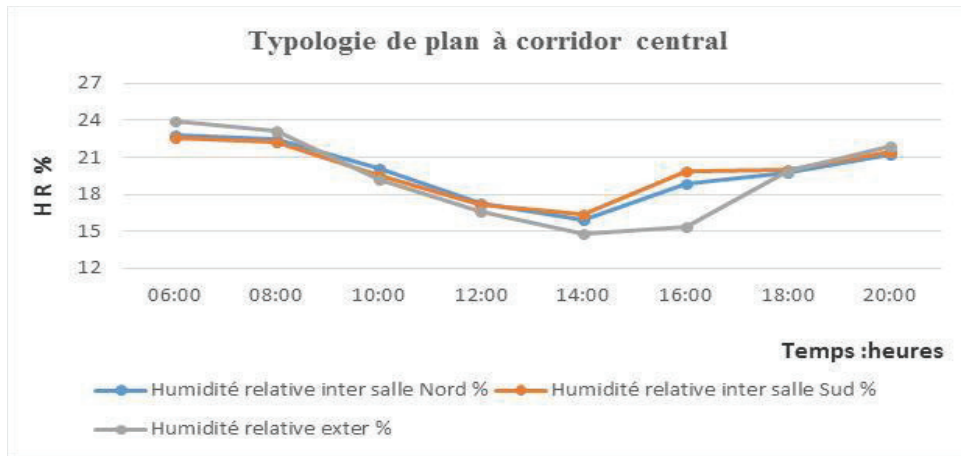


Figure 14. Variation des humidités relatives intérieures et extérieures dans la typologie du plan à corridor central.

5.3. L'évaluation subjective

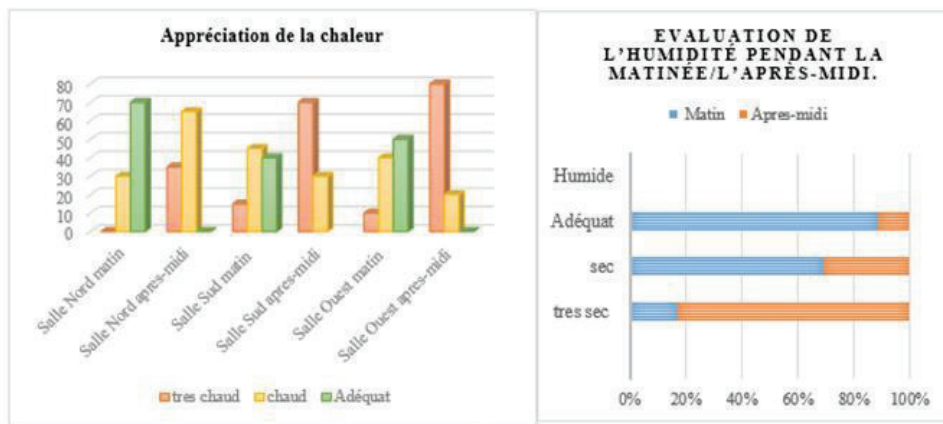


Figure 15. Les Graphes représentant la sensation par rapport à de la température et l'humidité relative dans la typologie du plan à corridor latéral, Auteur 2016.

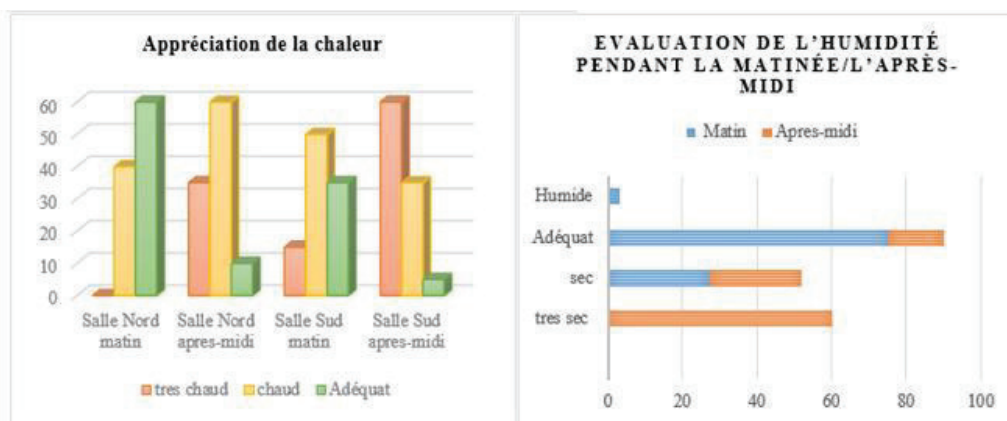


Figure 16. Les Graphes représentant la sensation par rapport à de la température et l'humidité relative dans la typologie du plan à corridor central, Auteur 2016.

A partir du questionnaire, le pourcentage réel d'insatisfaits par rapport à l'environnement thermique est évalué. Pendant la matinée, les paramètres de l'ambiance thermique, tel qu'évalués par la plupart des sujets interrogés, sont admissibles à l'exception de la chaleur (Figure 15). Ainsi, pour les deux orientations évoquées, les élèves situent l'ambiance entre inconfortable et légèrement confortable avec des nuances en faveur des salles orientées Nord/Sud (Figure 16).

Pendant l'après-midi, l'état d'inconfort est accentué notamment dans les salles orientées au Sud et à l'Ouest. Les élèves des salles orientées au Nord manifestent donc plus de satisfaction que les élèves des salles orientées au Sud et à l'Ouest.

Le facteur d'inconfort le plus signalé est relatif à l'augmentation de la température suivie par l'ensoleillement. Les situations d'inconfort sont dues selon les enquêtés en premier lieu à une surchauffe et à un ensoleillement intense, notamment pour l'orientation Ouest. Ces résultats confirment ceux obtenus dans la campagne de mesures.

6. Synthèse

Les résultats du présent travail montrent que la température intérieure d'une salle de classe dont les ouvertures ne présentent aucune occultation, est gouvernée par le rayonnement entrant par une surface vitrée importante ainsi que le rayonnement absorbé par toute la paroi.

Dans les conditions du déroulement de la campagne de mesures, il n'y a pas de moyens de refroidissement assouplissant les conditions thermiques des bâtiments. Leur conception architecturale est le seul moyen pour atteindre le confort.

Dans la typologie du plan à corridor latéral, les températures intérieures varient entre 33.3°C et 38.8°C, l'écart maximal entre les températures intérieures et extérieures est de 5.5 °C. En comparant ces résultats à la zone de confort définie par le diagramme psychométrique, nous pouvons conclure que l'ambiance thermique présente un inconfort pendant toute la journée.

De même, dans la typologie de plan à corridor central, les températures intérieures dans les deux salles varient entre 32.5 °C et 37.9 °C (moins de surfaces exposées à l'ensoleillement), mais dépassant, à longueur de journée, la limite du confort thermique.

Les valeurs de l'humidité relative se situent dans les deux typologies entre 15.9 % et 29.7%. Le troisième paramètre qui est la vitesse du vent n'est pas prise en considération dans ce contexte vu ses valeurs négligeables et par conséquent son très faible impact sur les phénomènes étudiés.

Conclusion

En conclusion, la quantification des paramètres physiques présentés ci-dessus montre la défaillance des deux typologies étudiées dans la procuration du confort thermique pendant la période chaude pour les quatre orientations.

La quantification des deux paramètres physiques comparés aux plages du confort thermique permet de conclure, qu'en période d'été, les températures des salles restent assez importantes dans les deux typologies et pour les quatre orientations. On assiste à une élévation des températures intérieures au même titre que celles de l'extérieur avec un faible écart dans la plupart du temps.

En final, on retient de cette évaluation que les deux typologies d'architectures étudiées présentent des carences en termes de confort thermique durant la période estivale pendant toute la journée. Nous signalons que la typologie du plan à corridor central peut offrir des conditions plus modérées du fait qu'elle se caractérise par une conception plus compacte et moins ouverte que la

typologies du plan à corridor latéral. Par ailleurs, les résultats de l'enquête aux appréciations des gens enquêtés (Enseignants et élèves) confirment l'effet de l'orientation et les matériaux à grande inertie thermique sur leurs sensations, dans le cas des orientations Nord-Sud comparativement aux orientations Est-Ouest. Ce résultat s'approche aussi de ceux de nombreux chercheurs qui reconnaissent que le confort intérieur est gouverné par l'orientation des baies non occultées et les protections solaires qui sont efficacement recommandées, les orientations Nord-Sud sont intéressantes si le Sud est bien traité en matière de protections solaires.

De gros progrès ont été réalisés sur le plan technique pour optimiser les échanges énergétiques par le biais des façades. La vérification de l'efficacité des protections solaires est l'objet d'un autre travail de recherche.

Bibliographie

Appah-Dankyi J., Koranteng C., 2012 : An assessment of thermal comfort in a warm and humid school building at Accra, Ghana. *Pelagia Research Library*, disponible sur www.pelagiaresearchlibrary.com

Bouchahm G., 1987 : Passive design for schools in the Constantine region of Algeria'. Master's Degree in architecture, Masckintosh School of Architecture, Glasgow University.

Bouchahm G., Bourebia F., 2010 : L'impact de l'orientation des parois transparentes sur le confort thermique dans une salle de classe à Constantine ; D - N°31.

Bugnard P.P., 2004 : Quelles formes de salles de classe pour quelles pédagogies. *L'architecture scolaire, Bulletin CIIP*, N° 15.

Eleftheria A., Jones P., 2006 : Green Roofs and Green Walls : Could they Mitigate the Heat Island Effect. Vol. 3, 60-67.

Giovani, 1998 : Effectiveness of Mass and Night Ventilation in Lowering the Indoor Daytime Temperatures. *Part I : 1993 Experimental periods, Energy and Buildings*, Vol. 28, N°1, 25 – 32.

Liebard A. De Herde, 2005 : *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique, concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Ed. Le Moniteur, Paris.

Moujallad B., Cantin R., Guarracino G., 2006 : Contraintes du confort d'été lors de la réhabilitation d'un lycée Climamed. Ecole Nationale des travaux Publics de l'Etat. Département Génie Civil et Bâtiment – URA CNRS 1652, Laboratoire des Sciences de l'Habitat (LASH). France, p. 2.

Theulier F., 1989 : *Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat. Une approche de l'étude du confort Thermique*. Université Paul Sabatier, Toulouse III, France.

Wong N.H., Khoo S.S., 2003 : Thermal comfort in classrooms in the tropics. *Energy and Buildings* N°35.

Webographie

Bensimon C., 1971 : L'innovation pédagogique et le bâtiment scolaire » disponible sur : http://environnement.pedagogique.aep.perso.sfr.fr/Articles/innov_peda_bat_scol_ben_simon.pdf consulté le 01/08/2016.

Chahwane L., 2011 : *Valorisation de l'inertie thermique pour la performance énergétique des bâtiments. Thèse de doctorat de l'université de Grenoble, 21/10/*, Spécialité : Génie Civil et Sciences de l'Habitat. Disponible en ligne sur www.halshs.archives-ouvertes.fr/.../36032_CHAHWANE_2011_archivage.pdf consulté 12/01/2016

Musset M., 2012 : De l'architecture scolaire aux espace d'apprentissage : au bonheur d'apprendre ?, *Dossier d'actualité veille et analyses*, N°7, Mai, Disponible en ligne : <http://ife.ens-lyon.fr/vst/DA/detailsDossier.php?parent=accueil&dossier=75&lang=fr> consulté le 10/08/2016.

LE ROLE DE LA VÉGÉTATION DANS LA CREATION D'UN MICROCLIMAT URBAIN. CAS DE LA VILLE DE BISKRA

DJAGHROURI DJ.¹, BENABBAS M.¹, AFREN R.¹

Université Mohamed Kheider ; Biskra, Algérie, Laboratoire LACOMOFA. Mail : djamila-djaghrouri@outlook.fr ; Benabbas.moussadek@gmail.com ; afren-maissa07@hotmail.fr.

Résumé : Ce travail vise à étudier et analyser l'effet de la végétation urbaine sur le microclimat dans les espaces extérieurs. La méthode appliquée dans ce contexte fait appel à l'observation et à des mesures in situ. Un choix de cas réel en milieu urbain a été fait, suite à un constat de regroupement d'étudiants au sein de cet espace, sis au campus de l'Université Mohamed Kheider Biskra (climat semi-aride et sec), en période chaude. Le champ de l'observation et l'investigation, ont retenu la dimension climatique ainsi que les paramètres d'ambiances d'ensoleillement, d'humidité relative, de température ambiante et de vitesse relative de l'air, bien que cette dernière a peu d'influence, les résultats abouti confirment le rôle de l'ombrage par la végétation sur la modération du microclimat, en créant une ambiance urbaine attrayante, aconfort thermique des usagers, plus convenable.

Mots-clés: végétation, microclimat, climat aride, facteurs climatiques.

Abstract : *The role of vegetation in the creation of a urban microclimate. Case of Biskra city.* This work aims to study and analyze the effect of urban vegetation on microclimates, therefore the thermal comfort in outdoor spaces. The method applied in this context uses observation and in situ measurements. A choice of real case in urban areas was made following a finding of student grouping within this space, located at the campus of Biskra University (Semi-arid and dry climate), in hot weather. The field of observation and investigation, retained the climate dimension and the sunshine moods settings, relative humidity, ambient temperature and relative velocity of the air, although, the latest has little influence, the results confirm the leading role of the vegetation' shadow on microclimate moderation, creating an attractive urban atmosphere and a more convenient thermal user comfort.

Keywords : vegetation, microclimate, rude climate, climaticfactors.

1. Introduction

Les villes, en période estivale, développent de plus en plus certains problèmes liés au phénomène «d'îlot de chaleur urbain», celui-ci est dû principalement aux transformations des tissus urbains qui ont tendance à devenir incessamment asphaltés, au détriment des espaces vert et des espaces végétalisés, affectant ainsi le confort thermique des usagers par l'induction de hautes températures accablantes (Vinet, 2000).

On apprend que ces espaces souffrent de problèmes de surchauffe estivale très sensibles, surtout dans les zones arides, c'est le cas de la ville de Biskra, Algérie. Dans de telles villes, la question du confort thermique des espaces urbains n'est pas essentiellement liée au contexte climatique de la ville, mais aussi à la conception urbaine et architectural, qui dans la plus part du temps, ne s'adapte pas au climat (Nikolopoulou, 2003).

C'est pourquoi on doit intégrer la notion du microclimat dans chaque opération de conception ou d'intervention sur la ville et surtout, de donner à la végétation, par le biais de ces interventions, plus d'importance au vu de ces apports modérateurs du microclimat.

L'objectif de ce travail consiste à vérifier si la végétation a un impact sur le climat urbain dans une région aride du sud Algérien, dans ce cas, il s'agit d'un espace végétalisé au sein de l'université de Biskra, celui-ci est retenu suite à un constat de regroupement d'étudiants sous l'ombre de ses arbres durant les périodes les plus chaudes en fin d'années scolaires.

L'évaluation du micro climat de cet espace est concrétisée suite à un travail sur terrain, où la température, l'humidité et la vitesse de l'air furent surveillés simultanément durant la période

estivale (été 2015), dans cinq stations, une à l'intérieur complètement découverte et qui sera notre station de référence, alors que le reste des stations dans le terrain sont à végétation variable allant de la moins couverte jusqu'à la plus densément couverte.

Les mesures sont prises par instrument mobile multifonctions (Testo 480) à intervalles de deux heures, de 6h00 du matin jusqu'à 20h00 et ce, pendant cinq jours successifs du mois de juillet, en l'absence d'étudiants, à partir du 22 du mois en question, seulement les résultats du jour le plus chaud (23 Juillet) ont été commentés.

La comparaison entre les données des stations situées à l'intérieur du couvert végétal et celle en dehors, en tant que référence, nous a donné, par comparaison, des résultats très significatifs quant à l'influence de la végétation sur le climat urbain (Bollaut, 2012).

2. Les caractéristiques climatiques de la ville de Biskra

La ville de Biskra est située au Sud-est de l'Algérie à une latitude de $34,51^{\circ}$ Nord et une longitude de $5,43^{\circ}$ Est (Fig1).



Figure 1. Situation de la wilaya de Biskra (Source : DPAT, 2015)

Biskra appartient à une région classée aride où prédomine un climat chaud et sec avec des hivers froids et des étés chauds. La température maximale atteint 42°C durant le mois de Juillet et la température minimale diminue à 7°C en hiver durant le mois de janvier. La température moyenne annuelle est de $21,7^{\circ}\text{C}$ alors que l'humidité moyenne annuelle est de 46%. Des précipitations très faibles sont enregistrées avec un maximum de 20mm/an, et une moyenne annuelle d'environ de 8.8 mm /an. Les directions des vents dominants est Nord-ouest en hiver, Sud-est en été à une vitesse de 6 à 10 m/s. Dans cette étude, on se limitera donc à la présentation des résultats obtenus durant la période chaude.

3. Présentation du travail de terrain

Une campagne de mesures de paramètres physiques pendant cinq journées consécutives parmi les plus chaudes de l'année. Parmi ces cinq journées on maintiendra la plus chaude. Nous montrons les différences microclimatiques à travers la place, et cela au niveau des cinq points de mesure qui ont chacune ses propres caractéristiques environnementales et morphologiques, nous comparerons ensuite les résultats des mesures entre eux.



Figure.2. L'appareil de mesures (Le Testo 480). (Source: Auteur 2015) ►

3.1. Variables climatiques mesurées

Les variables environnementales qui sont importantes pour le confort thermique humain englobent le rayonnement solaire, les températures des surfaces, de la température de l'air, et de la vitesse du vent et de l'humidité relative de l'air, il s'agit de mesurer des facteurs climatiques ayant une incidence sur le confort thermique, à savoir (Herrington, 1978; Akbari 1992) : la température de l'air en °C ; l'humidité relative de l'air en % ; la vitesse de l'air en m/s .

3.2. L'appareil de mesure

Tout le travail est exécuté à l'aide du Testo 480, appareil qui permet de faire des mesures efficaces en changeant deux sondes, la première sonde pour mesurer la température en degrés Celsius et l'humidité relative en %, la deuxième sonde pour mesurer la vitesse de l'air, en m/s (Fig. 2).

4. Campagnes de mesure

Trois campagnes de mesures des éléments climatiques ont été effectués sur le site de la placette en question, la première campagne de mesures a été effectuée le 22 juillet 2015, la seconde et la troisième durant les jours qui suivent. Les trois campagnes de mesures ont été effectuées dans des journées à conditions météorologiques typiques de la saison estivale avec un temps ensoleillé, peu venté et ciel dégagé. Les mesures sont prises à un intervalle horaire régulier de deux heures, à partir de 06h00 du matin jusqu'à 20h00 du soir, ce qui nous permet d'obtenir les valeurs à longueur de la journée de tous les paramètres climatiques considérés (Tair, Hr, Vvent) au sein de l'espace lui-même, ceci nous permettra de comparer les mesures des (05) points, chaque mesure durait entre 2 à 5 minutes, ce qui est favorable à la stabilité des paramètres météorologiques (Bennadji,1999).

4.1. Choix des points de mesure

Le choix des points de mesure dans la placette à l'université Mohamed Kheider s'est effectué selon une certaine logique, afin de répondre aux hypothèses, et donc au sujet de la problématique, pour cela les mesures ont été effectuées en cinq (05) points repartis sur la placette, ou chaque point présente des caractéristiques physiques et environnementales différentes des autres, et les critères de classification les plus importants sont : la présence de végétation, les obstacles aux courants d'air et l'exposition au rayonnement solaire particulièrement, par conséquent les stations sont réparties comme suit : (Fig. 3).



Figure. 3. Répartition des stations de mesures sur la placette pendant la période estivale. (Source : Auteur, 2015)

- Station S1 : (partie nord de la place) : pas de masque solaire des constructions, pas de masque de végétation, sol nue en terre, couloir de vent important. Dans toutes les directions.
- Station S2 : le masque solaire des constructions, présence faible de végétation, sol nu.
- Station S3 : (partie centrale de la place) la présence du masque solaire des constructions alentours, la végétation est très dense, le sol en terre nue.
- Station S4 : (partie sud de la place) : inexistence du masque solaire (constructions) pas d'obstacle pour la ventilation, la végétation est dense, sol couvert d'herbe, irrigué.
- Station S5 : (partie sud de la place) : existante d'un masque solaire faible (construction et végétation) couloir de vent assez important, sol pavé.

4.2. Présentation des mesures enregistrées

Pour la présentation des mesures, le choix se porta sur la journée du 23 juillet 2015 vu que cette journée est la plus représentative de la saison, car il faisait chaud avec un ciel complètement dégagé et avec peu de vent, contrairement aux deux autres qui sont un peu plus fraîches que la normale, les résultats des mesures climatiques seront comparés entre eux d'une part et avec les résultats de la station de référence (station 01) d'autre part.

4.3. Comparaison des différents paramètres climatiques mesurés des 05 stations

Une fois l'analyse des données pour chaque station effectuée, on peut procéder à la comparaison entre les cinq stations et pour chaque paramètre enregistré (T, Hr et Vvent), et bien qu'en favorisant la température, on doit garder un œil sur les autres paramètres, vu leur interaction les uns avec les autres et cela pour détecter les différences microclimatiques au sein de la place et pour chaque station.

4.3.1. La température

Tout d'abord on remarque une certaine homogénéité, pour les courbes de températures des cinq stations c'est à dire qu'elles augmentent graduellement pendant la première partie de la journée, de 06h00 à 14h00 où elles atteignent leur maximum, pour ensuite décroître en fin de journée. Les valeurs minimales sont enregistrées à 06h00 du matin pour toutes les stations (Fig.4).

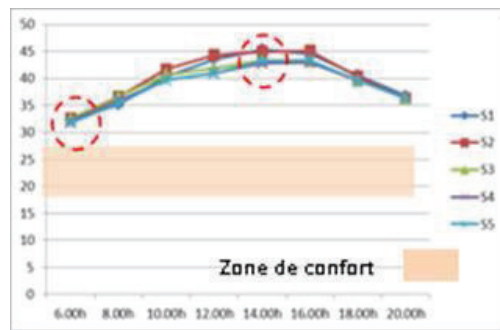
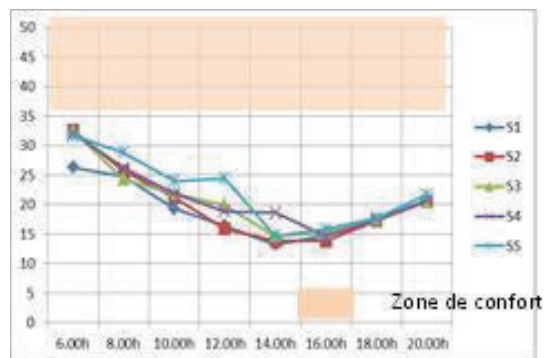


Figure 4 : Comparaison entre les températures mesurées des 05 stations. (23.07.2015) (Source : Auteur)

4.3.2. L'humidité

La station S1 présente les valeurs les plus basses d'humidité par rapport aux autres stations, suivie de la station S2 et cela pendant toute la journée, sauf pour quelques rares périodes (de 10h30 jusqu'à 13h00) et de (14h30 jusqu'à 18h00), cela s'explique par les mêmes intervenants cités en haut pour la température en cette zone.



Pour la station S5 on peut distinguer deux périodes :

-La première s'étale de 06h00 à 13h00, dans cette période cette zone enregistre les humidités les plus hautes de la place (après celle enregistrées en S4, entre 13h00 et 15h00). Cela est dû en premier lieu à la végétation qui est plus dense qu'en S1 et S2 donc l'effet de l'évapotranspiration est plus important en cette zone. Ajouter à cela l'écoulement de l'eau en station S3, S4 et S5, il faut dire que les déversements sur le sol sont aussi fréquents pour garder ce dernier humide aussi longtemps que possible.

- l'effet d'ombre des constructions voisines et des couronnes d'arbres contribuent à garder l'air des stations S3, S4 et S5 assez humide, avec prédominance de S5 (Fig.5).

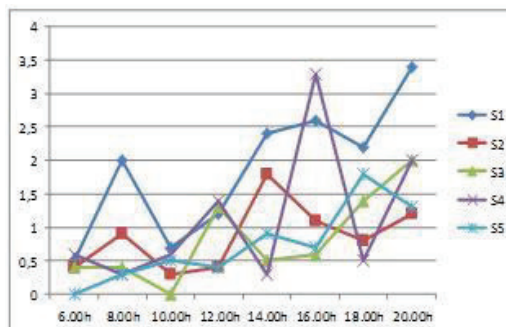


Figure 5: Comparaison entre les humidités mesurées des 05 stations. (23.07.2015) (Source : Auteur)

4.3.3. Vitesse des vents

Le vent est un élément très aléatoire et ne répond à aucune logique, surtout à micro- échelle, cela se confirme pour nos relevés ou on remarque que pour une seule station la vitesse des vents oscille de manière aléatoire entre des hauts et des bas contrairement aux températures et humidités.

Dans l'ensemble on remarque que la station S1 est la plus ventée pendant presque toute la journée, par rapport au reste des stations. La station S3 et S5 et même S4 semblent être situées dans la zone la moins ventée du site ce qui explique que cette zone garde son air plus humide que les autres zones, car l'humidité produite par l'évaporation et l'évapotranspiration n'est pas transférée ailleurs par l'effet du vent.

4.4. Les différences de températures entre la station de référence S1 et les autres stations (S2, S3, S4, et S5)

La station S1, station de référence, est la station la plus découverte et la plus exposée au soleil, et normalement elle devrait être la plus chaude, mais on a constaté qu'elle présente des périodes durant lesquelles elle est plus fraîche que certaines des autres stations (S2 et S3).

Au-dessus de l'axe 00, les valeurs sont plus fraîches que la station S1, alors qu'en dessous, les valeurs sont, plus tôt, plus chaudes que la station S1.

On voit que pendant la grande majorité du temps la station S1 (station de référence) reste la plus chaude, elle est complètement découverte, sauf dans le cas de S2 et S3.

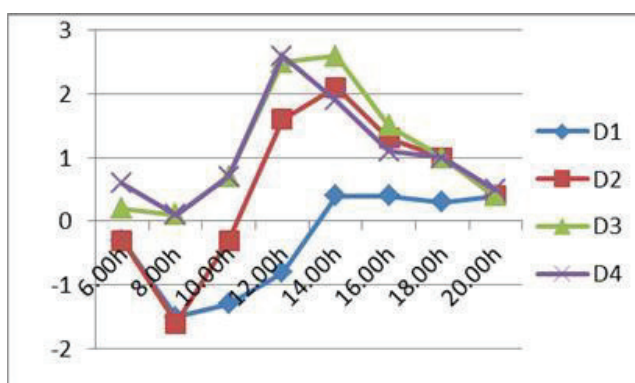


Figure 6 : Ecart de température entre la station S1 et (S2, S3, S4, S5) pendant la période estivale. (Auteur, été 2015).

- Par rapport à la station S2 elle est moins chaude jusqu'à 13h00, ou la situation s'inverse, jusqu'à la fin du jour, avec toutefois une légère différence.
- Par rapport à S3 le même phénomène se produit mais durant un temps plus court, c'est aux environs de 10h00 que le phénomène s'inverse avec un écart maximal de 2°C, aux environs de 14h00. Autrement dit que la durée de fraîcheur de la station S1 par rapport aux autres stations surtout S2 et S3 diminue au fur et à mesure qu'on se rapproche de la végétation ou S4 et S5 sont toujours plus fraîches que S1, avec des écarts se rapprochant de 3°C aux heures les plus chaudes (entre 12h30 et 14h30) (Fig.6).

Conclusion

Les courbes de température et d'humidité semblent avoir un parcours assez régulier sauf qu'on note certaines hausses ou baisses soudaines qui sont expliquées par deux facteurs probablement; d'une part le vent qui influence considérablement les transferts de chaleur ou de fraîcheur d'une partie du site vers un autre, surtout qu'on a constaté la présence de couloir de vent très important et qui change de direction selon l'heure de la journée, d'autre part, la présence de certains éléments physique et biologique, a une influence assez importante sur les paramètres relatifs au microclimat, en particulier, la présence de l'eau dont l'effet est enregistré sur l'humidité relative (à un degré moindre que la végétation mais qui est présent quand même), et dont l'influence est enregistrée avec un écart moyen de 2% et un écart max qui est de 6% à 10h00 entre la station S4 (cet effet -bien entendu- est jumelé avec celui de la végétation qui est elle aussi une source très importante d'humidité). En comparant aussi avec l'étude de [Jörg Spangenberg (2007)] l'humidité relative était d'environ 10% plus élevée dans S4 et S5 que dans les stations S1 et S2. Cela s'explique toujours par la haute densité de la végétation des deux stations S4 et S5., par rapport aux autres.

Bibliographie

- ABC Groupe, 1997 : Morphologie, végétal et microclimats urbains. *Plan urbain*. Ministère de L'Équipement, 131-133.
- Bennadji A., 1999 : *Adaptation climatique et /ou culturelle dans les zones arides, cas des pays de culture arabo-musulmane*. Thèse de doctorat. Université de province, 206 p.
- Bollaut O., 2012 : *Le rôle de la végétation et l'eau dans la création d'un microclimat urbain, cas de la place d'Ain El Fouara à Sétif*. Mémoire de magistère. Université Mentouri de Constantine, 345 p.
- Belarbi R, Faucon P, 2007 : Toitures Végétalisées. *Colloque*. Université de la Rochelle. France, 1-10.
- Bolund P, Hunhammar S., 1999 : Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, vol. **29**, 293-301.
- Escourrou G., 1981 : *Climat et environnement. Les facteurs locaux du climat*. Masson, Paris, 63-65.
- Gao W, Sugiyama H, and Ojima T, 1995 : Field study of effect of street and its trees on thermal environment of sidewalks. *Journal of Architecture and Planning Environment Engineering*, n° **469**, 73-84.
- Liébard A, De Herde A., 2005 : *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique*. Edition le Moniteur Paris, 368 p.
- Nikolopoulou M, Steemers K, 2003 : Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and Buildings*, n°**1**, vol. 35, 95-101.
- PLEA International, 2007 : *Passive and Low Energy Architecture*, Singapore, 423-430, 437-443.
- Spangenberg J, Shinzato P, Johansson E, and Duarte D, 2007 : The Impact of Urban Vegetation on Microclimate in Hot Humid Sao Paulo. In *PLEA*, 289-297.
- Vinet J, 2000 : *Contribution à la modélisation thermo aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs*. Thèse de doctorat. Université de Nantes, 242 p.
- Izard, J. L., 2000 : In <http://www.marseille.archi.fr>

Thème : Variabilité et aléas climatiques

FREQUENCE ET DIVERSITE DES TYPES DE CLIMATS ANNUELS AU BRÉSIL POUR LA PERIODE 1961 - 2015

DUBREUIL V.¹, FANTE K.P.², PLANCHON O.¹, SANT'ANNA NETO J.L.²

¹LETG-Rennes-COSTEL, UMR 6554 CNRS, Université Rennes 2, France, vincent.dubreuil@uhb.fr
olivier.planchon@uhb.fr

²Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente, Brésil, karimefante@hotmail.com,
joaolima@fct.unesp.br

Résumé : Cet article propose d'utiliser la classification de Köppen pour définir des Types de Climats Annuels (TCA) pour un ensemble de 208 stations, représentatives de la diversité climatique du Brésil. Les données moyennes mensuelles de températures et de précipitations pour la période 1961-2015 ont permis d'établir la fréquence des TCA pour chacune des stations. Le traitement statistique et cartographique de ces informations permet de préciser les limites des climats du Brésil. Cette approche permet d'envisager une étude fine des transitions entre les types de climats tropicaux (essentiellement Aw, Am et Af) et ceux du sud, subtropicaux et tempérés (Cwa et Cfa notamment) et de discuter des limites climatiques.

Mots-clés : Classification climatique, Köppen, Brésil, Type de climat annuel.

Abstract : *Frequency and diversity of "Annual Climate Types" in Brazil for the 1961-2015 period* – This article proposes to use the Köppen classification to define "Annual Climate Types" (ACT) for a set of 208 stations, representative of the climatic diversity of Brazil. The average monthly temperature and precipitation data for the period 1961-2015 allow to establish the frequency of ACTs for each station. The statistical and cartographic treatment of this information makes it possible to define the limits of the climates of Brazil. This approach allows us to propose a detailed study of the transitions between the tropical climates types (mainly Aw, Am and Af) and those of the south, subtropical and temperate (Cwa and Cfa in particular) and discuss these climatic limits.

Keywords : Climate classification, Köppen, Brazil, Annual Type of Climate.

Introduction

Parmi les nombreuses classifications des climats élaborées depuis la fin du XIX^e siècle, celle de W.P. Köppen, est une des plus célèbres et une des plus utilisées dans le monde, et à ce titre a donc fait l'objet d'un nombre considérable de publications. Elle a été mise au point en 1900 (Köppen, 1900 et 1901) à partir des cartes mondiales de la végétation disponibles à l'époque, l'auteur cherchant à faire correspondre les données climatiques avec les limites des grands domaines végétaux. Partant d'une combinaison simple des données de températures et précipitations moyennes mensuelles, elle est souvent considérée comme la première tentative de classification climatique quantitative du climat (Thorntwaite, 1933 ; Trewartha, 1937 ; Kottek *et al.*, 2006 ; Rubel et Kottek, 2010). Plusieurs auteurs (Hantel, 1989 ; Essenwanger, 2001) ont proposé des adaptations des seuils et limites proposés par W. Köppen et, plus récemment, de nombreuses études ont repris cette manière d'aborder le climat pour illustrer son évolution actuelle et future (Kottek *et al.*, 2006 ; Rubel et Kottek, 2010). Reprenant les seuils et limites proposées par Köppen et ses successeurs, plusieurs auteurs ont également essayé de corriger l'aspect statique de cette classification en l'appliquant non pas sur des normales climatiques mais pour chaque année. L'expression «*Type de Climat Annuel*» (TCA) a ainsi été employée pour définir l'ambiance climatique d'une année donnée (Brisse *et al.*, 1982). La classification de W. Köppen a été appliquée de la sorte par quelques auteurs pour définir ces TCA sur le Nord-Ouest Argentin (Planchon et Rosier, 2005) ou sur la France (Quénol *et al.*, 2008 ; Eveno *et al.*, 2016).

Au Brésil, de nombreux travaux ont également utilisé cette classification de Köppen (parmi d'autres) même si, dans ce pays comme ailleurs, son caractère statique a été critiqué par plusieurs auteurs (Monteiro, 1971). C'est avec la seconde classification de Morize (1922) que l'on voit apparaître la méthode de Köppen dans une classification climatique brésilienne. Son utilisation à l'échelle de ce pays-continent permet d'envisager une étude fine des

transitions entre les types de climats tropicaux et ceux du sud, subtropicaux et tempérés ; le Nordeste du Brésil permet, lui, d'opposer les climats chauds à pluies d'hiver, aux régions arides et semi-arides de l'intérieur. La simplicité de mise en œuvre et l'intérêt pédagogique évidents de la classification de Köppen a fait que son utilisation ne s'est pas cantonnée à la climatologie. Ainsi, au Brésil, elle a pu être utilisée aussi bien pour la définition des régions agro-climatiques (Rolim *et al.*, 2007) que pour la cartographie des grandes divisions forestières (Araujo *et al.*, 2012) ou floristiques (Torres *et al.*, 1997). Alvares *et al.* (2013) ont utilisé la classification de Köppen pour une cartographie détaillée des types de climats de l'ensemble du Brésil, à partir des données de près de 3000 stations pour la période 1950-1990. Cependant, toutes ces approches restent établies sur l'utilisation de données moyennées sur une période, sans tenir compte de la variabilité interannuelle du climat. Aucun travail, à notre connaissance, n'a jusqu'à maintenant envisagé une approche globale des TCA à l'échelle de l'ensemble du Brésil et c'est donc ce que propose de réaliser cet article à partir des données de plus de 200 stations couvrant la période 1964-2015.

1. Données et méthodes

1.1. Utilisation de la classification de Köppen pour l'identification des Types de Climats Annuels

Dans cette étude, il s'agit donc d'appliquer la méthode de Köppen non pas aux moyennes calculées sur une longue période mais pour chaque année prise indépendamment, définissant ainsi un «*Type de Climat Annuel*» (TCA) pour chaque année considérée. Dans un second temps, une approche en terme de fréquence permet de préciser pour chaque station la proportion de TCA et sa correspondance (ou non) avec le type de Köppen. Avant de détailler la méthode, rappelons que si l'essentiel du Brésil se trouve dans l'hémisphère Sud, une petite partie se trouve également dans l'hémisphère nord avec opposition des saisons d'été (DJF dans l'hémisphère sud) et d'hiver (JJA dans l'hémisphère sud). Pour les stations proches de l'équateur, les notions de saisonnalité des précipitations (As ou Aw) devront être abordées de manière très relative. Par convention également, l'été (hémisphère sud) correspond aux mois de janvier et février de l'année *n* et du mois de décembre de l'année *n-1*, afin de tenir compte de la chronologie réelle de l'année. Les seuils définis pour les TCA sont les mêmes que ceux proposés originellement dans la classification de Köppen et reposent sur les données de températures et précipitations observées pour chaque mois et chaque année. L'approche classique distingue les climats en fonction de leurs régimes thermiques (A, C, D, E et sous types a, b, c, d, h et d) et pluviométriques (BW, BS et sous types f, m, s et w).

1.2. Données utilisées

Pour cette étude, les données de températures et de précipitations moyennes mensuelles ont été utilisées pour l'ensemble des années couvrant la période de 1961 à 2015, soit 55 années complètes. Le choix de la plus longue période possible résulte de la disponibilité des données pour un nombre suffisant de stations couvrant l'ensemble du territoire brésilien, mais aussi de la volonté de prendre en compte l'ensemble des TCA possibles, une période plus courte (typiquement 30 années) pouvant exclure certaines années particulières (par exemple les grandes sécheresses du Nordeste du début des années 1960). L'ensemble des données utilisées ont été compilées à partir de différentes sources : les séries principales proviennent de la banque de données BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa) de l'INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) du Brésil, disponibles en ligne. Des données manquantes ont été obtenues (en ligne également), auprès du service hydrologique (Hidroweb) de l'ANA (Agência Nacional de Águas) du Brésil : ces données concernent principalement les précipitations ou les recherches par stations voisines de la même commune

ont permis de combler la plupart des lacunes. Enfin, certaines données complémentaires ont été acquises à partir des bases de données internationales du GHCN (Global Historical Climatology Network) et du NCDC (National Climatic Data Center) de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Près de 350 séries ont ainsi été récoltées couvrant partiellement ou totalement la période considérée. Plusieurs séries ont été éliminées en raison de lacunes trop importantes ou de discontinuités majeures détectées à la suite de tests d'homogénéités statistiques de ruptures des séries (Pettitt). Enfin, signalons que certaines séries (Centre-Ouest, Para) ne couvrent que la période récente, postérieure à la période de mise en valeur de ces régions au début des années 1970 (Dubreuil *et al.*, 2004 ; Delahaye *et al.*, 2015). Au final ce sont 208 stations qui ont été retenues avec un choix délibéré de privilégier une couverture homogène du territoire brésilien afin de compenser la sous-représentation en données de l'ouest et du nord du pays. Il est ainsi possible d'aborder une nouvelle approche des climats du Brésil à partir de la méthode des TCA.

2. Résultats

2.1. Les climats moyens

La figure 1 propose une représentation cartographique du type de Köppen moyen, calculé sur l'ensemble de la période, pour les 208 stations.

Certains types sont largement représentés, notamment le type Aw (climat chaud à pluie d'été) regroupant près de la moitié (95) des stations et formant un ensemble compact centré sur les plateaux et cerrados (savanes) de l'intérieur du Brésil ; si on devait retenir un type de climat «brésilien», il s'agirait sans doute de celui-ci ! Trois autres grands types de climats se détachent ensuite. Le type Am (climat chaud de mousson) arrive en second avec 33 stations réparties au sud et à l'est de l'Amazonie ainsi que sur le littoral oriental de Recife à Vitória. Plus au sud, deux stations s'y rattachent, de peu, Ivinhema-MS et Maringá-PR (respectivement 19,9 et 18,9°C de moyenne en juin). Le type Af, représenté par 28 stations, correspond aux climats chauds et pluvieux toute l'année de l'ouest de l'Amazonie, de la région de l'embouchure de l'Amazone, mais également, comme pour le type Am, de certaines stations de la côte est (Salvador) et du Sudeste, là aussi à l'extrême limite méridionale des climats tropicaux : 19°C de moyenne en juin à Iguape-SP, 18,1°C à Guaíra-PR. Le dernier climat de type «A», concerne le littoral du Nordeste, célèbre pour sa nuance sèche estivale «As»; on le retrouve du littoral du Piauí jusqu'à Aracajú pour seulement 10 stations. Vers l'intérieur, du Ceará au nord du Minas Gerais, le type semi-aride «BSh» concerne également 10 stations. Aucune des stations retenues ne correspond au type BWh, les stations les moins arrosées (Petrolina-PE et Paulo Afonso-BA) recevant chacune près de 500 mm annuels.

Au sud du Brésil, les climats de type «C» ne représentent que 32 stations, presque autant que le seul type «Am», rappelant que le Brésil est bien majoritairement dans le monde tropical. Le type le plus représenté est le type «Cfa» (21 stations) du Rio Grande do Sul à São Paulo ; en altitude, dans le Santa Catarina notamment ou à Campos do Jordão-SP, il cède sa place à la nuance fraîche du type «Cfb» (4 stations). Les climats de type Cwa regroupent 6 stations de l'intérieur méridional du Minas Gerais, une seule station (Barbacena) représentant la nuance d'altitude de type «Cwb». Aucune station, même les plus méridionales, n'ont été rattachées aux types «Csa» ou «Csb», montrant, qu'en moyenne, ces régions restent relativement bien arrosées l'été. L'approche fréquentielle va permettre de nuancer cette première analyse.

2.2. La fréquence des TCA

Les stations pour lesquelles le TCA le plus fréquent correspond au type de climat moyen de Köppen sont majoritaires puisque c'est le cas pour 169 soit près de 76% des cas ! Pour 13 d'entre elles (6,3%) le climat de Köppen représente même 100% des TCA, à chaque fois le type "Aw". Cependant, pour un nombre significatif de stations (24% donc presque un quart), le TCA le plus fréquent ne correspond pas au climat de Köppen moyen : dans 32 cas (15%), le climat moyen n'est que le deuxième TCA le plus fréquent et pour 10 cas (5%) il n'arrive qu'en troisième position voire en quatrième (3 cas) ou cinquième position (2 cas, Iguape-SP et Paranaguá-PR, où le type Af ne représente respectivement que 2% et 4% des cas). Guáira, dans le Paraná, détient une sorte de record avec 2% de TCA en «Af», soit en septième position ! Enfin, dans le registre des curiosités, signalons le cas de Caravelas-BA où le type moyen de Köppen «Af» n'a jamais été observé et Vitória da Conquista, dans la Bahia également, où pas moins de 8 types de TCA sont représentés !

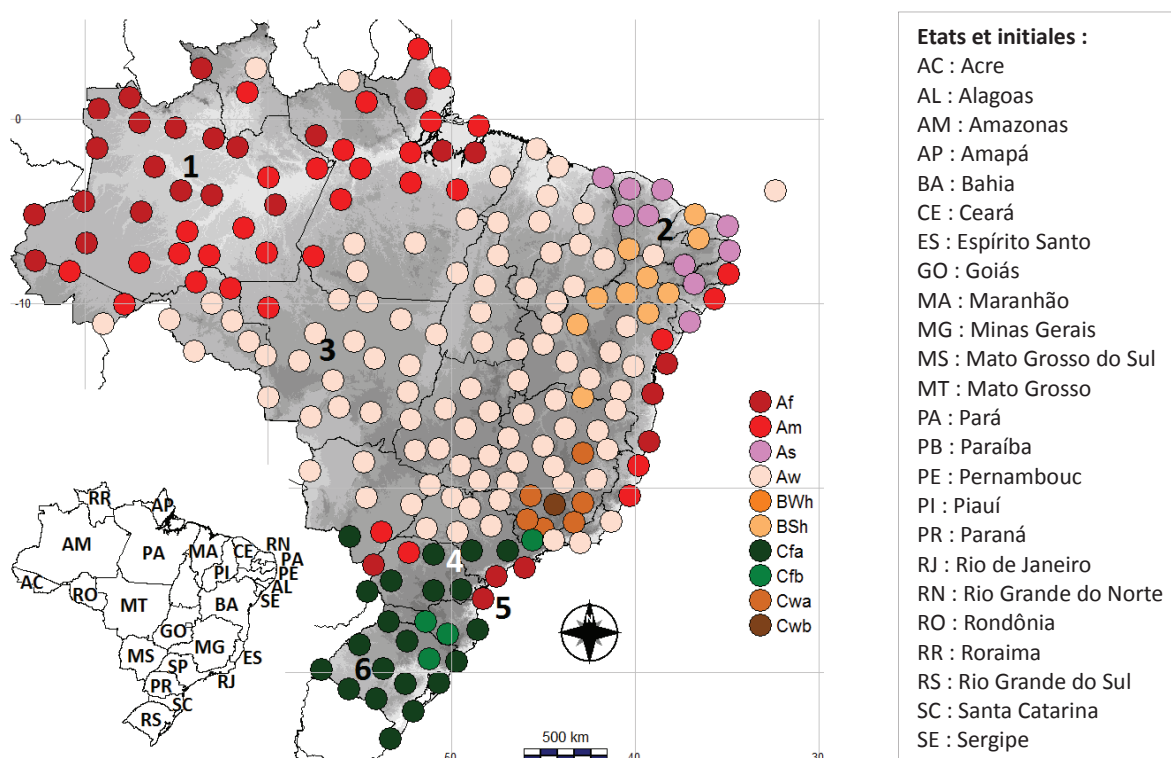


Figure 1. Types de climats de Köppen au Brésil pour les moyennes de la période 1961-2015 et liste et abréviations des noms des Etats brésiliens utilisés dans le texte. Stations de référence : 1: Tefé ; 2: Quixeramobim ; 3: Porto dos Gauchos ; 4: Avaré ; 5: Paranaguá ; 6: Santa Maria. Grands types de climats de Köppen : **Af**, climat chaud sans saison sèche; **Am**, climat chaud de mousson; **As**, climat chaud à pluie d'hiver; **Aw**, climat chaud à pluie d'été; **BWh**, climat aride et chaud; **BSh**, climat semi-aride et chaud; **Cfa**, climat tempéré sans saison sèche et à été chaud; **Cfb**, climat tempéré sans saison sèche et à été frais; **Cwa**, climat tempéré à été chaud et humide; **Cwb**, climat tempéré à été frais et humide;

Au-delà de ces exemples «extrêmes», quelques configurations types méritent l'attention : en Amazonie méridionale, beaucoup de stations partagent leurs TCA entre le type «Am» et le type «Af», marquant la transition entre les climats tropicaux humides et ceux à longue saison sèche (par ex. Tefé : Fig. 2.1.). À l'intérieur du Nordeste, les types «Aw», «As» et «BSh», voire «BWh» marquent la forte variabilité interannuelle des précipitations (et leur provenance) dans cette région (Quixeramobim : Fig. 2.2.). Le centre et le centre-ouest du Brésil ne connaissent quasiment que les années de type «Aw» (Porto dos Gauchos : Fig. 2.3.).

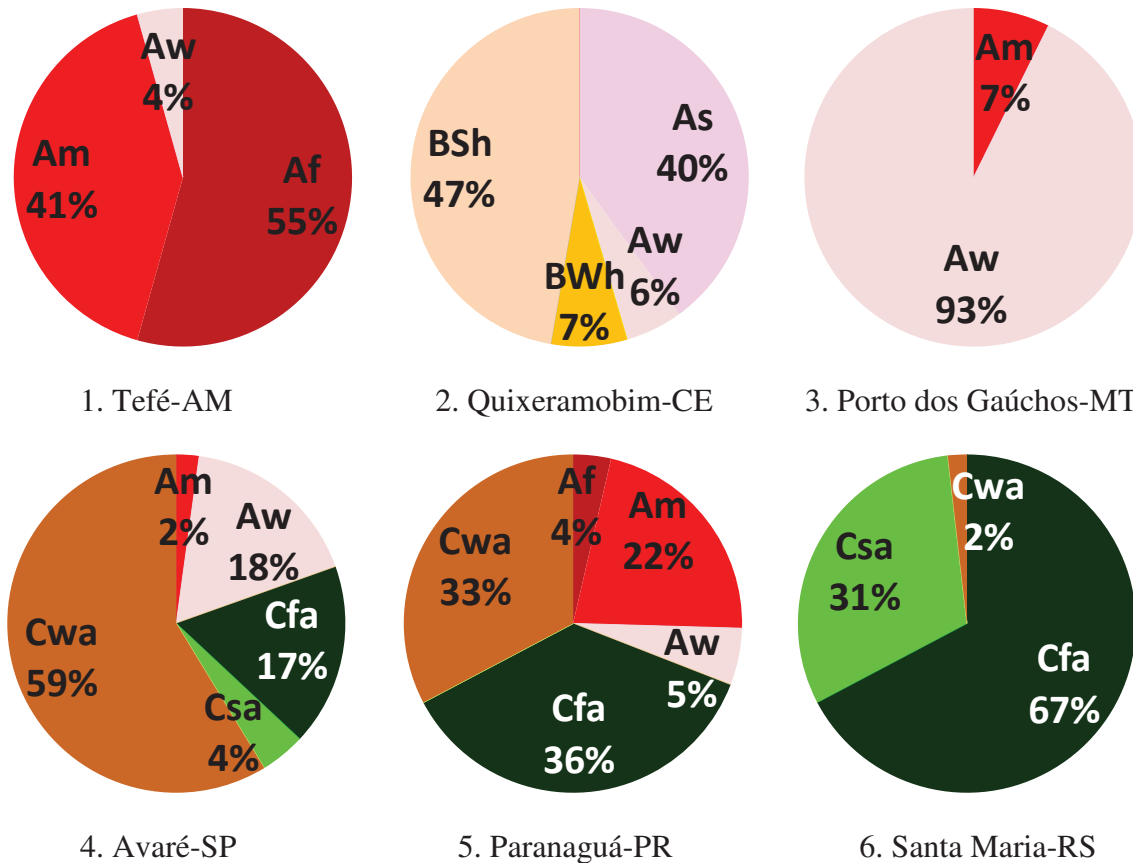


Figure 2. Quelques exemples de fréquences de TCA (1961-2015). Localisation des stations sur la figure 1.

Du Minas Gerais au Paraná, la proportion des types «Aw» décline progressivement au profit des types «Cw», marquant la transition vers les climats tempérés mais au régime des pluies marqué par la tropicalité (saison sèche hivernale ; Avaré : Fig. 2.4. ; Paranaguá : Fig. 2.5.). Enfin, du Paraná au Rio Grande do Sul, le type tempéré sans saison sèche « Cfa », cède peu à peu du terrain au type « Csa » (climat chaud à été sec) montrant la plus grande fréquence vers le sud de la sécheresse estivale (Santa Maria : Fig. 2.6.), sans que l'on puisse trouver de type moyen « méditerranéen », même si les TCA « Csa » sont majoritaires à Santa Vitória do Palmar-RS.

Conclusion

Plus d'un siècle après sa mise au point, la méthode de classification des climats de Köppen permet toujours d'aborder le thème des limites climatiques de façon intéressante à condition de dépasser la version initiale établie sur des valeurs moyennes. L'approche par les Types de Climats Annuels (TCA) renouvelle la méthode en prenant en compte explicitement la variabilité interannuelle du climat : elle montre que le type de climat moyen de Köppen n'est pas toujours celui qui est réellement observé dans une station donnée. Ainsi, au Brésil, pour un quart des 208 stations étudiées ici, le type moyen n'est pas le plus fréquent.

Il est ainsi possible d'aborder une nouvelle approche des climats du Brésil à partir de la méthode des TCA. Cette approche implique de nouvelles perspectives à la fois sur le plan spatial et temporel. Sur le plan spatial, la faible densité du réseau de stations utilisées ici ne permet pas de prendre en compte de façon suffisamment précise le rôle du relief et donne une image sans doute trop uniforme des climats de l'intérieur du Brésil. Des données satellitaires concernant les précipitations pourraient être incluses dans la démarche mais cela réduirait la période d'étude à celle des séries satellitaires. Sur le plan temporel, en revanche, la longueur

de la plupart des séries utilisées ici permet d'envisager une étude de l'évolution des TCA au cours du temps pour voir, par exemple, si dans un contexte de changement climatique les fréquences respectives des types tropicaux et tempérés ont significativement évolué.

Bibliographie

- Alvares C.A., Stape J.L., Sentelhas P.C., De Moraes Gonçalves J.L., Sparovek G., 2013 : Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, **22** (6), 711-728. DOI 10.1127/0941-2948/2013/0507
- Ana, 2016 : *HidroWeb, Sistema de Informações Hidrológicas*. <http://hidroweb.ana.gov.br/>
- Araujo R.F., Matricardi E.A.T., Nappo M.E., 2012 : Zoneamento ecológico de pequena escala para espécies florestais tradicionais no Distrito Federal. *Floresta*, **42**, 421-430.
- Brisse H., Grandjouan R., De Ruffray P., 1982 : Les types de climats annuels, un mode d'expression des gradients climatiques intégrant les variations interannuelles. *La Météorologie*, VIe série, **31**, 39-81.
- Delahaye F., Kirstetter P.E., Dubreuil V., Machado L.A., Vila D., 2015 : A consistent gauge database for daily rainfall analysis over the Legal Brazilian Amazon. *Journal of hydrology*, **527**, 292-304.
- Dubreuil V., Jallet A., Ronchail J., Maitelli G., 2004 : Estimation des précipitations par télédétection au Mato Grosso (Brésil). *Annales de l'AIC*, **1**, 133-156.
- Essenwanger O. M., 2001: Classification of Climates. *World Survey of Climatology* 1C, General Climatology. Amsterdam, Elsevier, 102 p.
- Eveno M., Planchon O., Oszwald J., Dubreuil V., QuénoI H., 2016 : Variabilité et changement climatique en France : analyses au moyen de la classification de Köppen et des « types de climats annuels ». *Climatologie, sous presse*.
- GHCN-M, 2016 : *Global Historical Climatology Network-Monthly*, version 2 database : <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/gHCN/v2/>
- INMET, 2016. *Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa*. «Fonte : Dados da Rede do INMET». <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/inicio.php>
- Köppen W., 1900 : Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Geogr. Zeitschrift*, **6**, 657-679.
- Köppen W., 1901 : Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Meteorologische Zeitschrift*, **18**, 106-120.
- Kottek M., Grieser J., Beck C., Rudolf B., Rubel F., 2006 : World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.*, **15**, 259-263.
- Monteiro C.A.F., 1971 : Análise rítmica em climatologia. *Climatologia*, 1, São Paulo, USP/IG, 1-21.
- Morize H., 1922 : *Contribuição ao estudo do clima do Brasil*. Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura, 116 p.
- Planchon O., Rosier, K., 2005 : Climat et variabilité climatique dans le Nord-Ouest de l'Argentine : problèmes posés et analyse durant la deuxième moitié du vingtième siècle. *Annales de l'Association Internationale de Climatologie*, **2**, 55-76.
- QuénoI H., Planchon O., Wahl L., 2008 : Méthodes d'identification des climats viticoles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, **51**, 127-137.
- Rolim G.S., Camargo M.P.B., Lania D.G., Moraes J.F.L., 2007 : Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite e sua aplicabilidade na determinação de zonas agroclimáticas para o estado de São Paulo. *Bragantia*, **4**, 711-720.
- Rubel F., Kottek M., 2010 : Observed and projected climate shifts 1901-2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorol. Z.*, **19**, 135-141.
- Thornthwaite C.W., 1933 : The climates of the Earth. *Geogr. Rev.*, **23**, 433-440.
- Torres R.B., Martins F.R., Kinoshita L.S., 1997 : Climate, soil and tree flora relationships in forests in the state of São Paulo, southeastern Brazil. *Rev. Bras. Bot.*, **20**, 41-49.
- Trewartha G.T., 1937 : *An introduction to weather and climate*. New York, McGraw-Hill Book Company, 373 p.

CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES FACTEURS DES TEMPÊTES DE SABLES DU 21 JUILLET ET DU 14 AOÛT 2013 DANS LA RÉGION DE GAFSA AU SUD-OUEST TUNISIEN : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

AL ATRACH M-M. ¹, EL MELKI T. ²

¹FLAH-Université de la Manouba, UR «BICADE», (alatrach_mm@hotmail.fr)

²FLAH-Université de la Manouba, UR «Géomatique et Géosystèmes», (lmlkitfik@gmail.com)

Résumé : Les tempêtes de sable ou de poussières caractérisent les régions arides et semi-arides des zones tropicales et subtropicales du globe. Les étendues désertiques et subdésertiques de l'Afrique du Nord comptent parmi les régions affectées par ces phénomènes. La Tunisie, faisant partie de ce domaine, subit assez fréquemment ce genre de tempêtes. La genèse de celles-ci dépend de deux types de facteurs : des facteurs environnementaux induits par les conditions climatiques ambiantes et des facteurs météorologiques. Sur le plan climatique, la sécheresse du milieu détermine la vulnérabilité du sol et l'abondance d'un matériel fin facilement mobilisable par le vent. En second lieu, les activités orageuses d'origine thermoconvective (mésos-échelle) fréquentes dans la région déterminent des vents forts- soufflant en rafales - capables de soulever le sable et les poussières : (Haboob). Les situations météorologiques du 21 juillet et du 14 août 2013 ayant eu lieu dans la région de Gafsa au Sud-ouest tunisien, étaient favorables à ce genre de phénomènes.

Mots clés : tempêtes de sable (Haboob), méso-échelle, orage, Gafsa (Sud-ouest de la Tunisie).

Abstract : Sand storms or dust storms characterize the arid and semi-arid regions of the tropics and subtropics in the globe. The desert and sub-desert areas of North Africa are among the regions affected by these phenomena. Tunisia, as a part of this field, suffers quite frequently from this kind of storms. Two kinds of factors determine their genesis: Environmental factors induced by the ambient climatic conditions and meteorological factors. Firstly, the environment dryness determines the soil vulnerability and the abundance of fine material that can be easily mobilized by the wind. Secondly, the thermoconvective stormy activities (meso-scale phenomena), frequent in the region, determine strong winds - blowing in gusts - lift up sand and dust: (Haboob). The meteorological situations of the 21th July and 14th August 2013 in the region of Gafsa in the Southwest of Tunisia were favorable for the triggering of such phenomena.

Keywords: sandstorms (Haboob), meso-scale, thunderstorm, Gafsa (Southwest).

Introduction

Les régions du Sud-ouest tunisien, notamment celle de Gafsa (34°25' de latitude nord et 08°47' de longitude Est), (Fig. 1), constituent les régions les plus touchées par les phénomènes de sable en Tunisie (Dahech et Beltrando, 2012). Juillet, août et septembre constituent la période de l'année qui connaît la fréquence d'occurrence la plus élevée des tempêtes de sable communément connues par le terme "Mur de sable" ou "Haboob" (Nouaceur, 2008). Les épisodes orageux du 21 juillet et du 14 août 2013 ont déterminé deux exemples typiques de ces lithométéores de méso-échelle. Les courants turbulents, forts et soutenus, induits par les orages qui ont touché la région au cours de ces deux jours, ont mobilisé les sables desséchés et les poussières abondantes dans la région d'« El îtha » (Fig. 1). Celle-ci, se localise au nord de la ville de Gafsa. Elle est serrée entre les vallées des oueds « Elkbir » et « Sidi Aïch », avant leur confluence au niveau de la ville de Gafsa pour donner naissance à l'oued « Bayèche ». Le présent travail constitue une contribution à l'étude des conditions environnementales et atmosphériques qui ont déclenché ces deux événements.

1. Contextes climatique et environnemental

La région de Gafsa se situe sur les marges méridionales du domaine méditerranéen. En dépit d'un rythme annuel moyen d'allure méditerranéenne pour les précipitations et les températures, la région de Gafsa appartient à l'étage bioclimatique aride (interface des nuances : inférieure et supérieure). Le diagramme ombrothermique (Figure 2, gauche) ne montre aucun mois humide ($P \text{ mm} \geq 2 \times T^{\circ}\text{C}$).

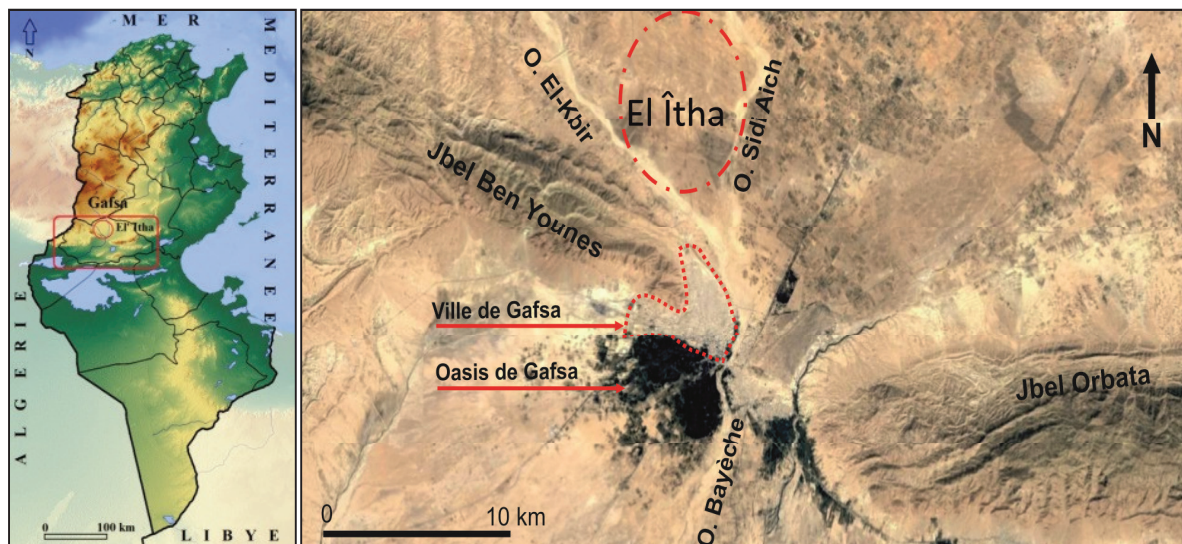


Figure 1. Localisation de la zone d'étude (Source du support de l'image de droite : Google Earth)

Le bilan hydrique climatique (P mm- ETP mm) de l'année (agricole : septembre à août) 2013 montre (Fig.2, droite) que la région de Gafsa souffre d'un déficit chronique. Effectivement, la première décade de septembre (S1), exceptionnellement pluvieuse, est seule à avoir un bilan positif n'excédant pas 7 mm.

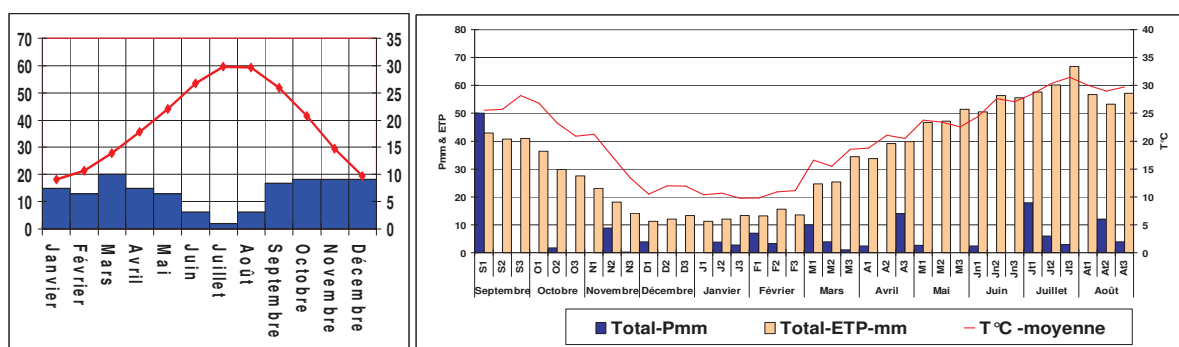


Figure 2. Gauche : Diagramme ombrothermique de Gafsa (1961-1990). Droite : températures²¹, précipitations²² et ETP (Oudin²³, 2005) décennales moyennes au cours de l'année 2013 (Sources : voir notes de bas de page)

Dans ces conditions hydriques drastiques, le couvert végétal est réduit à des touffes d'herbes, éparées, même dans les bas-fonds profitant d'un surplus hydrique de ruissellement. Le sol est fragilisé par un rayonnement solaire intense et par la thermoclastie : les amplitudes thermiques étant très fortes. Ainsi fragilisées, les composantes du sol sont mises à la disposition du vent.

Le nom de la région d'« El Îtha », source de sables dans les deux cas de cette étude, désigne des sols asséchés, de texture sableuse et à granulométrie variée. Ce matériel fin est

²¹ <https://www.wunderground.com/history/>

²² [https://rp5.ru/Archives_météo_à_Gafsa_\(aéroport\),_METAR](https://rp5.ru/Archives_météo_à_Gafsa_(aéroport),_METAR)

²³ Oudin, L., et al., 2005: -Which potential evapotranspiration input for a rainfall-runoff model? Part 2 - Towards a simple and efficient PE model for rainfall-runoff modeling-. *Journal of Hydrology* 303(1-4), 290-306. -Nb : à défaut de données de rayonnement et d'évaporation (Piche), cette méthode ne demandant que les températures journalières et la latitude de la station a été adoptée. Cette approximation peut être acceptée, l'objectif n'étant pas spécifiquement agroclimatique.

facilement mobilisable par les rafales descendantes engendrées par les nuages orageux. C'est le cas des orages du 21 juillet et du 14 août 2013 (photos 1 : 1a et 1b).

2. Contexte aérologique

La région de Gafsa compte parmi les régions fréquemment affectées par des orages (fig. 3, gauche): 16.7 cas/an en moyenne durant la période 1976-2005 (Latrach, 2013). Une grande partie de ces orages sont associés à des lithométéores variés : 17 cas/an en moyenne (fig. 3, droite). Il est à noter, toutefois, que tous les orages ne déterminent pas des lithométéores et que tous les lithométéores ne sont pas forcément associés à des orages. En partie, ces orages sont de types thermoconvectifs. La surchauffe du substrat continental, minéral et quasi-dénudé de tout couvert végétal en dehors des îlots d'oasis, conjuguée à l'effet de vallée topographique (Figure 1) entre les *Jbel Ben Younes* et *Jbel Orbata*, détermine des orages thermoconvectifs locaux ou amplifie les orages d'origine continentale allogène. Tel est le cas des orages du 21/07/2013 et du 14/08/2013 (Fig. 4), objets de cette étude.

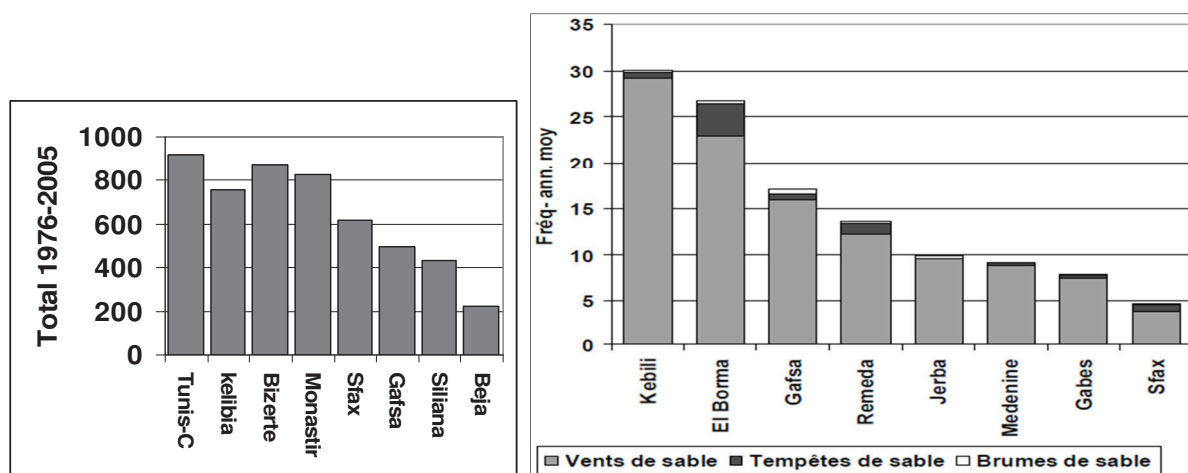


Figure 3. Gauche : Totaux interannuels des jours d'orages dans quelques stations tunisiennes durant la période : 1976-2005²⁴ (source : Latrach, 2013). Droite : fréquences interannuelles moyennes des lithométéores dans le Sud tunisien, durant la période : 1990-2000²⁵ (source : El Melki, 2010)

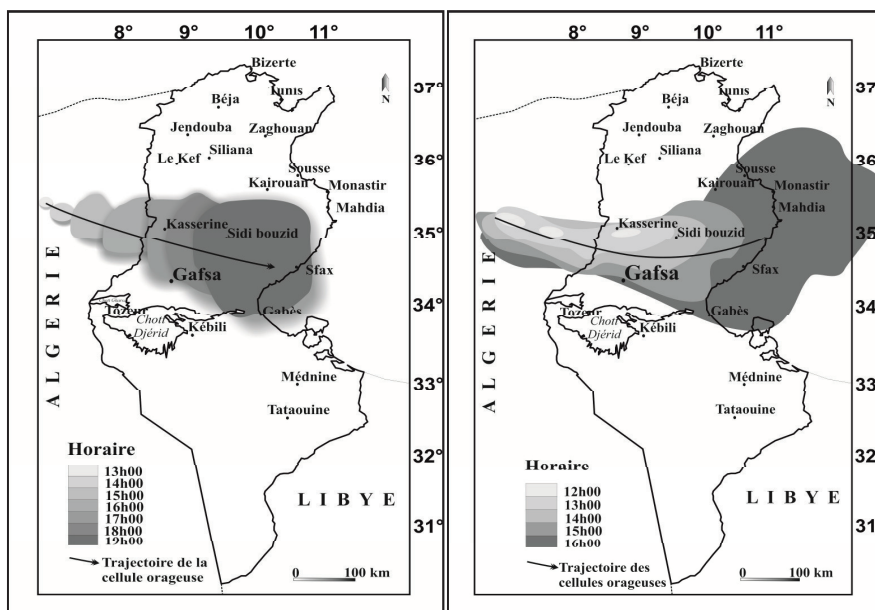
Les premières cellules orageuses ont pris naissance en Algérie vers 13:00 (heure locale) le 21 juillet 2013 et à 12:00 (heure locale) le 14 août 2013 sur les hauts reliefs de l'Atlas saharien. La surchauffe des vallées intra-montagneuses a créé des cellules thermoconvectives qui se sont déplacées par la suite d'ouest en est conformément à la circulation zonale des latitudes moyennes. Le déplacement s'est accompagné d'une importante et progressive extension spatiale des cellules orageuses qui ont abordé la région de Gafsa du côté Nord-ouest et ont dominé par la suite de vastes régions en Tunisie centrale : les régions des *Hautes Steppes*, des *Basses Steppes* et du *Sahel* de Sousse, ainsi qu'une partie de la Méditerranée orientale (fig. 4). Sur le flanc sud de ces cellules orageuses, les rafales descendantes ont provoqué des tempêtes de sables (la masse d'air en place est très épaisse et convective (se réchauffe par la base). Les propriétés thermodynamiques de la troposphère au niveau de la ville de Gafsa montrent une masse d'air instable (Figures 5a et 5b : d'après le modèle "NOAA-GFS²⁶") : la CAPE est assez importante et le niveau d'équilibre thermique (EL) est très haut. Ainsi, les ascendances thermoconvectives peuvent atteindre les hautes couches de la

²⁴Source des données brutes : Tableaux Climatologiques Mensuels (T.C.M.) de l'Institut National de la Météorologie (I.N.M.) de Tunisie.

²⁵Source des données brutes : T.C.M. de l'I.N.M. de Tunisie.

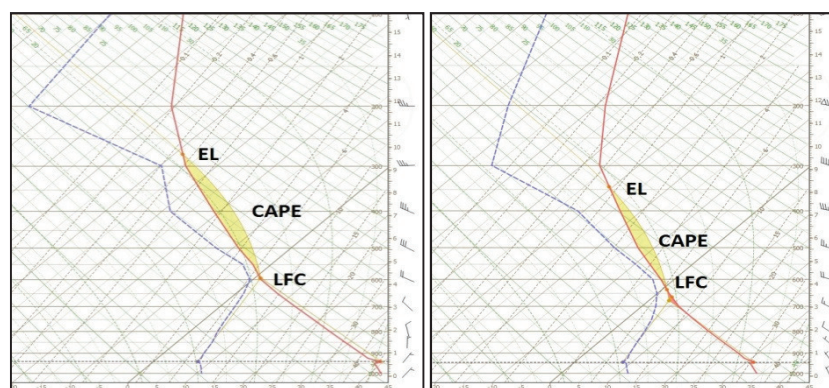
²⁶Source des données : <http://nomads.ncdc.noaa.gov/data/gfsan/>

troposphère. Les températures maximales²⁷ relatives aux 21 juillet et au 14 août 2013 sont respectivement de 44°C et 37°C. Ces propriétés sont très opportunes à la formation des Cumulonimbus (Cb) : nuages d'orages.



Figures 4. Évolution spatiotemporelle des orages du 21/07/2013 (Gauche) et du 14/08/2013 (droite) dans la région de Gafsa (D'après les images infrarouge du site : <http://archives.meteo60.fr/archives-sat/>)

Le Cumulonimbus (Cb) présente le type de nuages le plus développé dans le sens vertical. Alors que sa base frôle presque la surface terrestre, son enclume (sommet) va souvent au-delà de la tropopause (El Melki, 2014). Une épaisseur de plus de 10 000 m de nuages suppose des courants ascendants (effets de l'instabilité) forts et soutenus ; ces derniers sont compensés, dans le nuage lui-même par des courants descendants aussi forts. Ces derniers sont d'autant plus forts que le sommet du Cb est plus élevé que le niveau d'équilibre thermique (« El » : Equilibrium level) de la masse d'air en place.



Figures 5a et 5b. Radiosondages de Gafsa du 21/07/2013 (à gauche) et du 14/08/2013 (à droite) (Source : modèle NOAA-GFS(<http://nomads.ncdc.noaa.gov/data/gfsanl/>))

Les tempêtes de sable, s'organisent à l'avant du Cumulonimbus, où les dits courants descendants (Down burst) créent des vents forts qui se rabattent sur sol (Vukovic, 2014). Au contact du sol, un front de rafales (Gust front) remue le sable et le soulève (Rolled up winds) (Fig.6). Le front de rafales présente ainsi la face avant du mur de sable : le **Haboob**

²⁷<https://www.wunderground.com>

(photo 1). Ainsi se forment les phénomènes de sable, si l'environnement s'y apprête, comme dans la région d'El Îtha située au nord de Gafsa (Fig. 1).

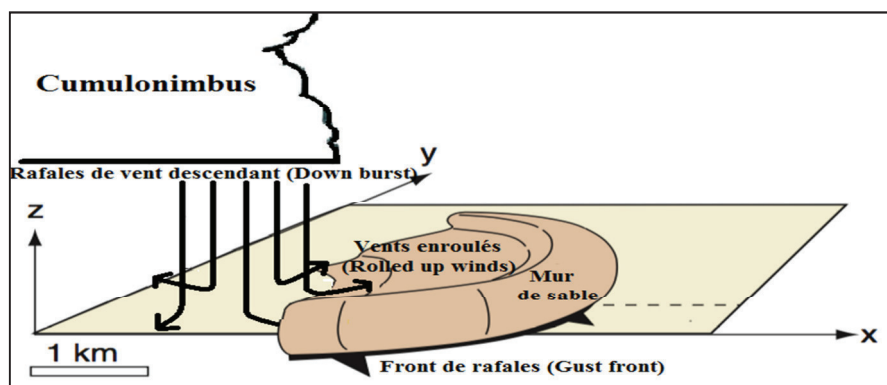


Figure 6. Mécanisme de formation des tempêtes de sable associées aux orages. (Source de l'image du support : <https://www.eoas.ubc.ca/courses/downbursts-gustfronts.html>)

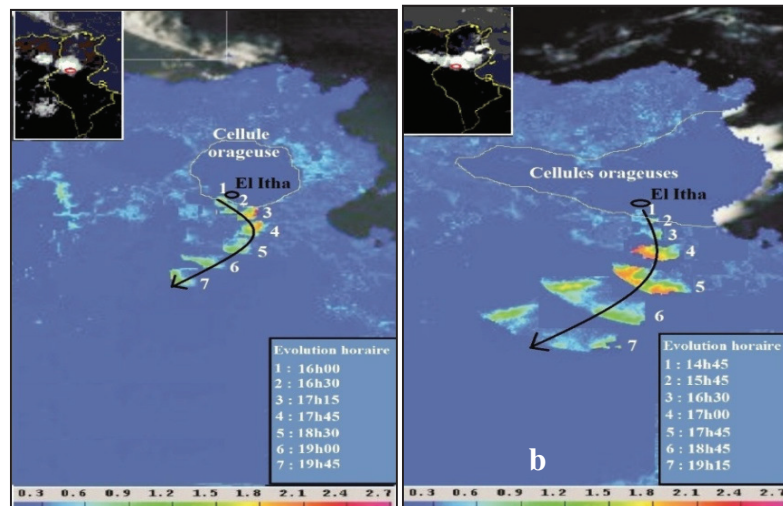
3. Suivi des trajectoires et de l'extension spatiale des tempêtes de sable du 21 juillet et du 14 août 2013 dans la région de Gafsa

Au total, les tempêtes de sable se forment à l'avant des systèmes nuageux orageux. Tel est le cas des orages du 21 juillet et du 14 août 2013 dans la région de Gafsa. Les images satellitaires, infrarouges et visibles, permettent une étude diachronique à fine échelle temporelle des trajectoires de ces phénomènes, des variations spatiales de leurs intensités et de leurs superficies ainsi que celles des cellules orageuses qui les déterminent.



Photos 1 (à gauche), 1a et 1b. Arrivée du mur de sable de la région d' « El Îtha » vers la ville de Gafsa le 21/07/2013 à 16h 00 (a) et le 14 août 2013 à 14h 45 (b) ; (Clichés : Latrach M.M.)

Ce travail (Fig.7) a été établi à partir des images SEVERI déterminant l'épaisseur de transparence (optical thickness) de l'atmosphère. Au départ les deux tempêtes de sables abordent la région de Gafsa par le secteur Nord-ouest. Cependant, au niveau de la ville de Gafsa, en franchissant le col topographique séparant Jbel Ben Younes et Jbel Orbata (Figure 1), elles décrivent une déviation vers la droite et déclinent vers le Sud-ouest (Figures 7a et 7b). Les champs barométriques (absence de basse pression) ne permettent aucune explication d'échelle synoptique. Ils'agirait, d'un effet topothermique (zones de forte convection liées à la surchauffe des fonds de vallées). Un effet purement mécanique (canalisation des flux horizontaux par les vallées topographiques) n'est pas à exclure.



Figures 7a et 7b. Images SEVIRI (épaisseur de transparence : optical thickness) des trajectoires des tempêtes de sable du 21/07/2013 (a) et 14/08/2013 (b) dans la région de Gafsa (Source : <http://nascube.univ-lille1.fr/>)

La combinaison des deux effets n'est pas à écarter non plus ! Une fois soulevés par les courants des rafales descendantes, les sables et poussières seraient transportés par des courants aériens déconnectés de ceux du Cumulonimbus. Chercher à valider ces hypothèses relève de la physique de l'atmosphère et dépasse le cadre de cette étude.

Conclusion

Les nuisances liées à ce type de temps sont variées : une très mauvaise visibilité gênant le trafic routier, principalement, et aérien. Une charge atmosphérique importante en particules fines (photos 1a et 1b) est très nocive pour la santé humaine et les végétaux. Obstruant les stomates des plantes, elle peut causer des baisses sensibles de productivité...

Ce type de phénomènes n'est pas encore classé dans la catégorie des risques majeurs pour l'Homme et pour ses activités ; et ce, en dépit des problèmes variés qu'il détermine. L'intégration des différents types d'information, concernant cet aléa, disponibles en ligne dans un système d'informations géographiques (SIG), permettrait un suivi détaillé de ses fréquences d'occurrence, de ses variations spatiales et de ces retombées diverses.

Bibliographie

- Latrach M.M., 2013 : *La grêle en Tunisie : diagnostic et gestion d'un risque agricole émergent*. Géographie. Université Paul Valéry - Montpellier III, 395p.
- Dahech S. et Beltrando G., 2012 : Les vents de sable dans le Sud tunisien. *La Météorologie*, n°79, 40-50.
- El Melki T., 2010 : Contribution à l'étude des lithométéores en Tunisie. In : *Climat, Société et Dynamique des paysages Ruraux en Tunisie* (Ouvrage collectif coordonné par CHERIF A. & HENIA L.), 46-88.
- Nouaceur Z., 2004 : Les vents de sable en Afrique saharienne et subsaharienne. *The Annals of Valahia University of Târgoviște, Geographical Series*, Tome 4-5, 108-118.
- Nouaceur Z., 2008 : Brume sèche, brume de poussière, chasse-sable et tempête de sable. *Norwis-Environnement, aménagement, société*, 191, 12 p.
- Vukovic A. et al..., 2014 : Numerical simulation of "an American haboob"- *Atmpsheric chemistry and physics*, 14, 3211-3230.

ANALYSE DE LA SÉCHERESSE HYDROLOGIQUE EN MILIEU CONTINENTAL TEMPÉRÉ ET EN MILIEU MÉDITERRANÉEN EN ITALIE, PENDANT LA PÉRIODE 1981-2010

PULINA M.A.¹, ACQUAOTTA F.^{2,3}, FALZOI S.², FRATIANNI S.^{2,3}

¹Dipartimento di Agraria – Università di Sassari, Viale Italia 39, 07100 Sassari, Italie. pulina@uniss.it

²Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Torino, via Valperga Caluso 35, 10125 Torino, Italie

³Centro Interdipartimentale Sui Rischi Naturali in Ambiente Montano e Collinare, Università di Torino, Italie

Résumé : Une étude de trente ans (1981-2010) sur la tendance de la sécheresse hydrologique a été conduite dans deux régions italiennes, Piémont et Sardaigne, avec différentes caractéristiques climatiques (climat continental tempéré et méditerranéen). A cet effet, nous avons examiné les données journalières de 13 stations thermo-pluviométriques installées uniformément dans les zones examinées, et nous avons aussi évalué les tendances des indices dérivés SPI (Standardized Precipitation Index) et SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index). On a ensuite considéré les similitudes et les différences entre les indices des deux régions analysées. Dans les deux zones, il y a dans la plupart des stations une tendance statistiquement significative à l'augmentation de l'indice SPI et à la diminution de l'indice SPEI, la tendance des valeurs moyennes des deux indices n'est par contre significative dans aucun des deux milieux climatiques considérés.

Mots-Clés : Sécheresse hydrologique, SPI, SPEI, indices climatiques.

Abstract : Analysis of hydrological drought in continental temperate and Mediterranean environment during the period 1981-2010. A thirty-year (1981-2010) study of the hydrological drought trend is realised in two Italian regions, Piedmont and Sardinia, with different climatic features (Temperate continental climate and Mediterranean climate). For this purpose, we have examined the daily data of 13 meteorological stations uniformly installed in the two areas, and the trends of the SPI (Standardized Precipitation Index) and SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) have been also evaluated. The similarities and differences between the indices of the two Regions were then considered. In most stations of both zones, there is a statistically significant trend with an increase in the SPI index and a decrease in the SPEI index. Nevertheless, the mean values trend of the two indices is not significant in any of the two environmental areas considered.

Keywords : Hydrological drought, SPI, SPEI, climate indices.

Introduction

La sécheresse est un risque naturel lié à une plus faible quantité de précipitations par rapport à la normale, qui, lorsqu'elle se produit pendant la saison ou pendant des périodes prolongées, est insuffisante pour répondre à la demande de l'activité humaine et de l'environnement (WMO, 2006). Contrairement à l'aridité, définie comme une condition permanente, la sécheresse est un événement temporaire qui s'alterne avec des périodes à plus fortes précipitations.

La sécheresse est l'un des impacts les plus importants du changement climatique sur les systèmes naturels et socio-économiques. Peu d'autres événements extrêmes sont économiquement et écologiquement aussi destructeurs que la sécheresse, ce qui nuit à des millions de personnes dans le monde chaque année (Dai, 2011). Ses effets se manifestent après de longues périodes où la pluviométrie est faible. Il est donc difficile de quantifier objectivement ses caractéristiques en termes d'intensité, d'amplitude, de durée et d'étendue spatiale (Vicente-Serrano *et al.*, 2010).

Ce travail vise à comparer les conditions de "sécheresse hydrologique" qui a trait aux effets de l'absence des précipitations sur les ressources hydriques, dans deux régions climatiques différentes en Italie, respectivement le climat continental tempéré (Piémont) et le climat méditerranéen (Sardaigne). On a considéré des indices standardisés, qui ont permis la comparaison des conditions de sécheresse entre les deux milieux différents et la vérification

des possibles tendances de la sécheresse pendant les trente années 1981-2010, en vue du changement climatique en cours. Dans cette étude préliminaire, l'accent est mis en particulier sur l'impact que le changement climatique pourrait avoir sur les ressources hydriques souterraines et de surface.

1. Matériels et méthodes

1.1. Régions d'étude

L'étude a été menée dans deux régions italiennes avec des climats différents: le Piémont et la Sardaigne (figure 1). Situé en Italie continentale, le Piémont se trouve au pied des Alpes d'ouest, entre 44 ° 02 ' et 46 ° 26' N et entre 06 ° 49 ' et 08 ° 32' E. Bien que la région soit relativement peu étendue, elle est caractérisée par une topographie variée, mais à dominance montagneuse. Les Alpes, avec la plupart des sommets de plus de 2500 m, marquent la frontière avec la France à l'ouest et la Suisse au nord. Les zones de collines, qui bordent la partie ouest de la vallée du Pô, complètent le cadre territorial de la région. Le gradient altitudinal (de 100 m à 4000 m s.n.m.) influence fortement le climat régional, montrant de grandes variations de température et des précipitations sur une faible distance. Le climat est *continental tempéré* (Cf, selon la classification de Köppen). La température annuelle est de 11-12 °C dans la zone de plaine et de 1°C dans les régions montagneuses au-dessus de 2400 m. Les totaux annuels des précipitations sont compris entre 500-700 mm dans les plaines et 2000 mm dans les vallées alpines intérieures. Le régime pluviométrique se caractérise par une allure bimodale classique, avec deux pics au printemps et en automne, et un minimum en hiver.

La Sardaigne, deuxième île de la Méditerranée par sa superficie, est comprise entre 38° 53' et 41° 15' N et entre 8° 08' et 9° 48' E. La topographie se caractérise principalement par des collines et des plateaux, mais aussi par des zones plates à l'ouest et par des zones montagneuses à l'est, avec des pics supérieurs à 1300 m. L'altitude moyenne est de 334 m s.n.m. Le climat est typiquement *méditerranéen* (Csa, selon la classification de Köppen), avec des hivers doux et relativement pluvieux et des étés chauds et secs. Les températures annuelles moyennes sont fortement influencées soit par la distance par rapport à la mer, soit par l'orographie. Les valeurs varient entre 16-17 °C dans les plaines de l'ouest (Campidano et Nurra) et 10-12 °C dans les régions montagneuses de l'est (Gennargentu, Limbara).

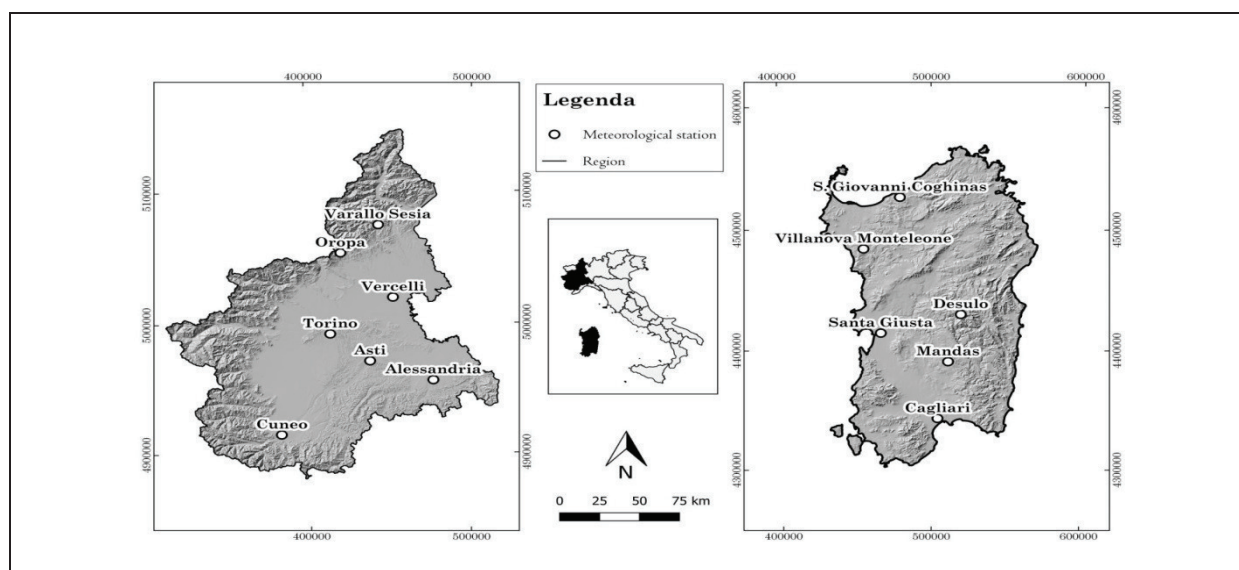


Figure 1. Localisation des régions d'étude et des stations considérées.

Les précipitations moyennes annuelles sont inférieures à 500 mm dans les zones de plaine, alors qu'elles dépassent 1300 mm sur les plus hauts sommets. Le maximum pluviométrique est enregistré normalement en décembre, avec des valeurs moyennes dépassant 200 mm dans les zones montagneuses.

1.2. Données météorologiques

Les données climatiques utilisées pour le Piémont sont celles des stations thermo-pluviométriques du Service Hydrographique et Marégraphique National (SIMN). On a considéré les stations d'Alessandria (AL), Asti (AT), Cuneo (CN), Oropa (BI), Torino (TO), Varallo (VC) et Vercelli (VC) (Tableau 1). Les stations sont réparties uniformément dans la région (Figure 1) et leur altitude varie entre 90 m et 1000 m s.n.m. Les stations de montagne dont l'altitude est supérieure à 1000 m ont été exclues de l'analyse afin de rendre compatible les sites considérés avec ceux de la Sardaigne.

Les données climatiques utilisées pour la Sardaigne proviennent principalement du réseau des stations thermo-pluviométriques du Secteur Hydrographique de la Région Sardaigne R.A.S. On a considéré les stations suivantes : Desulo (NU), Mandas (CA), San Giovanni Coghinis (SS), Santa Giusta (OR) et Villanova Monteleone (SS). La station de Cagliari/Elmas (CA) appartient au réseau de l'Aéronautique Militaire Italienne (Tableau 1). L'altitude des stations (Figures 1 et Tableau 1) est comprise entre 10 et 920 m s.n.m ; leur localisation est représentative des différentes conditions géographiques et topographiques de l'île.

Pour toutes les stations on a considéré les données journalières des précipitations (P) et de la température maximale (Tx) et minimale (Tn) concernant la période 1981-2010.

1.3. Méthodologie

Un contrôle de qualité (QC) a été conduit sur les séries journalières des données en utilisant le package R *ClimPACT2* (Alexander et Herold, 2016), visant à mettre en évidence les lacunes, les valeurs aberrantes et les valeurs erronées. En effet, cet algorithme détecte les valeurs incorrectes, telles que $P < 0$ mm ou $T_x < T_n$, et fournit une série de représentations graphiques, diagrammes en boîte sur une échelle mensuelle et annuelle, pour évaluer les discontinuités présentes dans la série (Acquaotta *et al.*, 2016). Les outliers sont identifiés grâce au calcul des seuils estimés sur les caractéristiques statistiques de la série (Fortin *et al.*, 2016).

Afin de caractériser la sécheresse hydrologique dans les deux régions, nous avons utilisé des indices dérivés: l'indice standardisé de précipitation *SPI* (*Standardized Precipitation Index* ; McKee *et al.*, 1993) et l'indice standardisé de précipitation – évapotranspiration *SPEI* (*Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index* ; Vicente-Serrano *et al.*, 2010). *SPI*, basé uniquement sur la précipitation cumulée mensuelle, grâce à une approche probabiliste de l'événement de précipitation, quantifie un déficit ou un surplus de pluie par rapport aux valeurs moyennes, à différentes échelles de temps (1, 3, 6, 12, 24 et 48 mois). La série de pluie est adaptée à une distribution gamma, ensuite elle est transformée en une distribution normale ayant une moyenne nulle et un écart type égal à 1. L'indice *SPI* indique le nombre d'écart-types par lequel un événement particulier s'écarte des conditions normales. En considérant les précipitations et la température, le *SPEI* combine la nature multi-temporelle de *SPI* avec la sensibilité aux variations de la demande d'évapotranspiration, calculée sur la base de la variabilité thermique.

Dans cette étude, nous avons analysé les deux indices à l'échelle de 12 mois afin de finaliser l'analyse de la sécheresse hydrologique. Pour chaque indice on a calculé la tendance et la signification statistique au 95%, soit pour chaque station (Tableau 1), soit pour chaque région (Figures 2a et 2b).

2. Résultats

L'Indice de Précipitation Standardisé calculé pour les 7 stations du Piémont n'a montré aucune tendance homogène (Tableau 1). En effet, les séries de Cuneo, Turin et Vercelli présentent une tendance à la hausse statistiquement significative, tandis que pour celle d'Oropa la tendance est à la baisse et statistiquement significative. Les séries d'Alessandria, Asti et Varallo Sesia, ainsi que l'indice SPI moyen ne montrent aucune tendance.

La période avec le plus grand nombre de mois consécutifs humides ($SPI > 0$) (Figure 2a) s'étend de juillet 1992 à avril 1997, 58 mois, alors que la période avec le plus grand nombre de mois consécutifs secs ($SPI < 0$) est estimée à partir de décembre 2004 à juin 2008, 43 mois. En moyenne, des périodes humides s'alternent avec des périodes sèches de six mois.

Au contraire, la tendance de l'indice SPEI est à la baisse et statistiquement significative dans toutes les stations considérées (Tableau 1). La diminution maximale, -0,004, est calculée pour la station d'Oropa, suivie par Asti et Cuneo, -0,003. L'indice SPEI moyen montre une tendance à la baisse, -0,002, mais statistiquement non significative. On observe la période humide la plus longue entre juillet 1992 et avril 1997, 58 mois, alors que la période sèche la plus longue est enregistrée de novembre 2004 à novembre 2008, 49 mois (Figure 2a).

Pour ce qui concerne la Sardaigne, l'indice SPI (Tableau 1) montre une tendance à l'augmentation statistiquement significative, 0,002, seulement dans 2 des 6 stations considérées, à Santa Giusta et à Desulo, tandis que l'indice des autres stations et le SPI moyen n'ont pas de tendance significative dans les trente années considérées.

Tableau 1. Liste des stations météorologiques analysées dans le Piémont et la Sardaigne, leur altitude, localisation géographique et tendances des indices calculés, SPI et SPEI. En gras les tendances statistiquement significatives ($p \text{ value} \leq 0,05$).

	Station	t. m s.n.m	Lat N	Lon E	SPI	SPEI
Piémonte	Alessandria	90	4955808	476651	0	-0.002
	Asti	117	4970569	437876	0	-0.003
	Cuneo	575	4914085	382681	0.002	-0.003
	Oropa	1180	5053196	420664	-0.003	-0.004
	Torino	239	4991497	413680	0.003	-0.001
	Varallo Sesia	453	5074366	443680	0	-0.001
	Vercelli	135	5019297	452240	0.002	-0.002
Sardaigne	Cagliari	21	4342672	504315	<0.001	<0.001
	Desulo	920	4429509	519699	0.002	0.002
	Mandas	491	4390215	511294	<0.001	<-0.001
	S. Giovanni Coghinis	210	4526143	479570	<0.001	-0.003
	Santa Giusta	10	4414049	466626	0.002	<-0.001
	Villanova Monteleone	567	4483757	455470	<- 0.001	-0.002

La valeur moyenne du SPI (Figure 2b) reste constamment au-dessus de 0 pour une période maximale de 34 mois, d'avril 1984 à janvier 1987 et pendant 30 mois consécutifs, d'octobre 2003 à mars 2006. Les valeurs sont inférieures à 0 pour un maximum de 40 mois, à partir de septembre 1997 à décembre 2000 et pendant 25 mois consécutifs, à partir de novembre 1988 à novembre 1990. En ce qui concerne la sévérité de la sécheresse, selon la classification de McKee *et al.* (1993), au cours de la période 1981-2010 on a eu neuf mois "sévèrement secs" et 2 mois "extrêmement secs" (de janvier à mars 2002).

La tendance de l'indice SPEI (Tableau 1) est statistiquement significative dans 3 des 6 stations considérées: positive pour Desulo (0002), négative pour les stations de Villanova Monteleone (-0.002) et San Giovanni Coghinias (-0,003). L'indice moyen montre une tendance à la baisse (<-0.001), mais non significative. L'analyse du graphe de la distribution de l'indice moyen (Figure 2b) montre une plus longue période humide de mai 1984 à janvier 1987 (33 mois) et une plus longue période sèche à partir de décembre 1997 à décembre 2000 (37 mois au total).

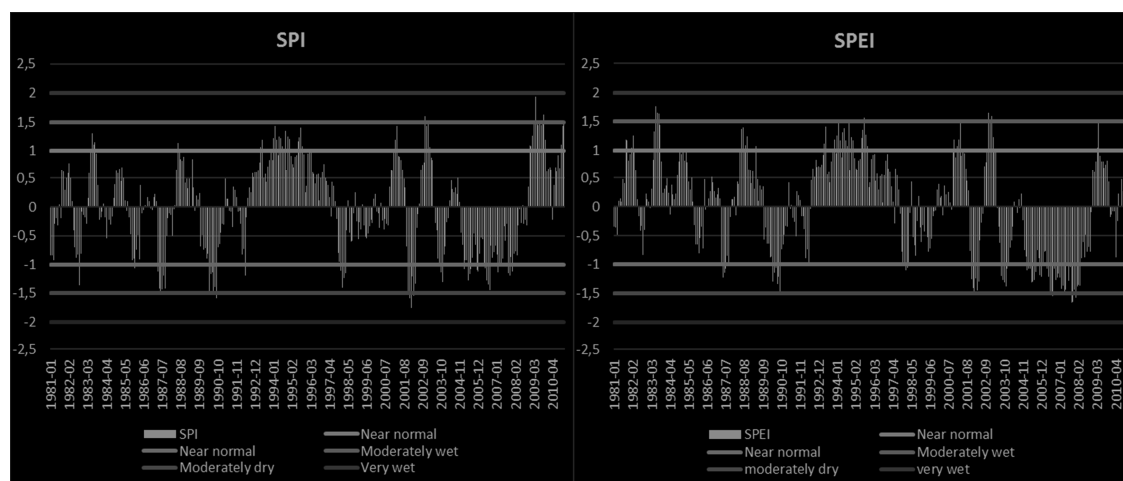


Figure 2a. Indices SPI et SPEI moyens des stations du Piémont. Les lignes noires et grises indiquent les valeurs critiques des indices.

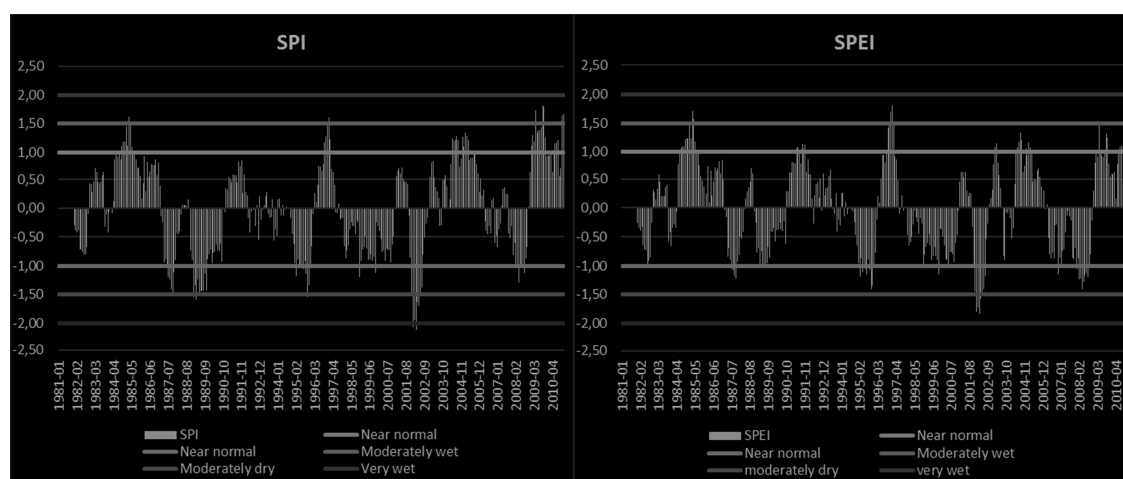


Figure 2b. Indices SPI et SPEI moyens des stations de la Sardaigne. Les lignes noires et grises indiquent les valeurs critiques des indices.

Conclusion

L'analyse de la tendance de la sécheresse hydrologique au cours de la période 1981-2010 dans des milieux différents, continental tempéré et méditerranéen, a été conduite à partir des séries thermo-pluviométriques de sept stations du Piémont et de six stations de la Sardaigne. Pour chaque station on a calculé l'indice standardisé de précipitation *SPI* et l'indice standardisé de précipitation – évapotranspiration *SPEI*. Des indices moyens ont été calculés pour chaque région considérée.

Des similitudes et des différences ont été détectées entre les deux milieux. Les tendances des indices sont plus définies en Piémont. En particulier, le trend de *SPEI* est statistiquement significatif dans toutes les stations considérées, celui de *SPI* dans quatre des sept stations. Au contraire, en Sardaigne les indices montrent une tendance nette seulement dans environ la moitié des stations considérées. Pourtant la tendance des valeurs moyennes des indices n'est pas significative dans l'un des deux milieux climatiques considérés.

La durée moyenne de la période "humide" est plus longue en Piémont, où nous avons 58 mois consécutifs avec des valeurs de *SPI* supérieures à 0 (de juillet 1992 à avril 1997) par rapport aux 34 mois consécutifs de la Sardaigne (d'avril 1984 à janvier 1987). La durée des périodes "sèches" est presque la même dans les deux régions, 43 mois avec des valeurs de *SPI* inférieures à 0 dans la première (de décembre 2004 à juin 2008) et 40 mois consécutifs (à partir de septembre 1997 à décembre 2000) dans la deuxième région.

En somme, pour une analyse plus détaillée et une comparaison plus précise des conditions de sécheresse, il est souhaitable d'étendre cette méthodologie à des séries instrumentales plus longues et de l'appliquer à une échelle plus fine, dans le but soit d'étendre l'analyse à d'autres caractéristiques de la sécheresse, telles que l'intensité, soit d'obtenir des signaux de changement climatique à une plus grande résolution spatiale et temporelle dans les deux milieux.

Bibliographie

- Acquaotta F., Fratianni S., Venema V., 2016 : Assessment of parallel precipitation measurements networks in Piedmont, Italy. *Int. J. Climatol.*, **36**, 3963–3974. Doi DOI: 10.1002/joc.4606.
- Alexander L., Herold N., 2016 : *ClimPACT2 Indices and software*. User manual available online : [www :http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml](http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml).
- Dai A., 2011 : Drought under global warming: a review. *Climate Change*, **2(1)**, 45-65.
- Fortin G., Acquaotta F., Fratianni S., 2016 : The evolution of temperature extremes in the Gaspé Peninsula, Quebec, Canada (1974–2013). *Theor. Appl. Climatol.* **1-10**. Doi 10.1007/s00704-016-1859-x.
- McKee T.B., Doesken N.J., Kleist J., 1993 : The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints Eighth Conf. on Applied Climatology. Anaheim, CA, *Amer. Meteor. Soc.*, 179–184.
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I., 2010 : A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index–SPEI. *J. Clim.*, **23**, 1696–1718, doi:10.1175/2009JCLI2909.1.
- World Meteorological Organization, 2006 : *Drought monitoring and early warning : concepts, progress and future challenges*. N° 1006.

LE RÉCHAUFFEMENT DANS LES ALPES DU SUD (1959-2015)

DOUGUÉDROIT A.

Aix Marseille Univ, Univ Nice Sophia Antipolis, Avignon Université, CNRS, ESPACE, Nice, France, 29 avenue Robert Schuman, 13621 Aix en Provence, France [annick.dougedroit@univ-amu.fr]

Résumé – Une méthode d'analyse de la diminution des températures moyennes annuelles avec l'altitude distinguant deux cas, adrets et fonds de vallée, et une analyse de cette diminution par cette méthode ont été réalisées en 1970 sur des séries de températures 1959-1965 des Alpes françaises du Sud. L'objectif de la recherche est d'évaluer les différences de température associées au réchauffement en comparant les résultats précédents à ceux obtenus par la même méthode pour des températures de la période 2009-2015 dans la même région. Les températures des adrets se sont réchauffées plus que ceux des fonds de vallée de jour, mais pas à la fin de la nuit. Les problèmes posés par les données récentes d'un certain nombre de minima nous ont obligé à diminuer le nombre de stations utilisées pour les minima par rapport aux températures maximales.

Mots-clés : Diminution des températures avec l'altitude, Adrets, Fonds de vallée, Réchauffement, Alpes françaises du Sud.

Abstract – warming in the french southern alps (1959-2015)

A method for analyzing annual mean temperature decrease with altitude by using a difference between South facing slopes and valley bottoms and an analysis of this decrease by this method has been done on the 1959-1965 temperature series of the French Southern Alps. The object of this research is the evaluation of temperature differences connected with warming by a comparison between these previous results with results obtained for recent temperatures (2009-2015) in the same region. South facing slopes have more warmed than valley bottoms during days than during nights. Those minima of recent data are less numerous than maxima ones.

Keywords : Temperature decrease with altitude, Southern facing slopes, Valley bottoms, Warming, French Southern Alps.

Introduction

Les Alpes du Sud situées à l'extrémité méridionale et méditerranéenne de la chaîne des Alpes attirent en général peu l'attention des chercheurs qui focalisent plutôt leurs recherches sur les Alpes franco-suisse plus septentrionales et le plus souvent sur les précipitations et la neige (Beniston, 2000). L'étude menée à la fin des années 1960 (Douguédroit et de Saintignon, 1970) qui portait à la fois sur l'établissement de la méthode de calcul de la décroissance des températures en montagne et son application sur l'estimation des gradients des températures dans les Alpes françaises du Sud peut servir de base à une estimation du réchauffement dans cette région par rapport à la période actuelle. La comparaison a été menée avec une méthode identique et des séries de données aussi proches que possible de celles du siècle dernier.

L'intérêt de la comparaison entre les années 1960 (1959-1965) et actuelles (2009-2015) est renforcé par la position chronologique des premières avant le début du réchauffement rapide actuel daté pour l'Europe dans les années 70 (IPCC, 2013). Elle permet ainsi de préciser l'importance du réchauffement récent.

1. Méthode et données

L'originalité principale de la méthode utilisée réside dans la mise en évidence, dans une région homogène d'un point de vue thermique, de l'existence de plusieurs relations linéaires entre température et altitude qui dépendent de différentes positions topographiques possibles en montagne (Douguédroit et de Saintignon, 1970).

1.1. Une région thermiquement homogène

La distribution relativement lissée des conditions thermiques, à la différence de celle des précipitations, permet de définir des ensembles régionaux que l'on peut considérer, dans certaines conditions, comme homogènes. Les massifs montagneux avec leurs limites

topographiques relativement nettes en représentent des exemples souvent les plus faciles à définir. C'est le cas des Alpes françaises du Sud. La limite orientale des Alpes françaises du Sud, celle de la frontière franco-italienne, est arbitraire. Côté sud et ouest, sa netteté fort variable dépend de l'existence de versants terminaux plus ou moins abrupts. Côté nord a été retenue celle qui était habituelle en 1970, la ligne des grands cols définie par E. Bénévent comme la limite entre Alpes françaises du Nord et du Sud (Bénévent, 1926). A l'intérieur de telles limites ces dernières sont considérées alors comme un ensemble thermique homogène.

En 2017 on peut se poser, sous l'effet du changement climatique, la question de la pertinence actuelle de cette limite septentrionale. Mais, comme ce dernier décale en Europe les isothermes vers le nord, il ne pourrait que faire de même pour cette limite, agrandissant ainsi vers le nord l'espace thermique correspondant aux Alpes françaises du Sud. Cette question n'a pas été étudiée puisque, au sud de la limite traditionnelle, nous sommes toujours bien dans les Alpes du Sud.

1.2. Plusieurs relations linéaires entre température et altitude

En montagne la relation température – altitude, considérée comme linéaire, est une régression linéaire du type $Y = aX + b$ soit $T = T_0 - bZ$ avec T = température mesurée, $T_0 = T$ au niveau de la mer, b le gradient et Z l'altitude de T . Cette relation dépend de la position topographique des points de mesure. Quatre positions topographiques principales peuvent être définies : versants à orientation générale sud appelés ici « adrets » (A), à orientation générale nord ou « ubacs », fonds de vallées avec leurs inversions thermiques de fin de nuit (FV) et sommets. Seuls les premiers et troisième types, représentés par un nombre suffisant de postes pour une étude statistique, ont fait l'objet de la mise au point de la méthode en 1970 dans le cas des Alpes françaises du Sud.

1.3. Les données

Les stations (La Météorologie Nationale, 1970) ont été réparties entre les seuls 2 groupes représentés dans les Alpes françaises du Sud en 1970, adrets et fonds de vallée. La liste optimale fut constituée alors de 44 stations, soit 2 fois 22. Nombre de postes et durée de mesures s'expliquent alors par l'état du réseau des stations de la Météorologie Nationale mis sur pied en 1951 avec des stations préexistantes à la guerre 1939-45 et de nouvelles. La plupart des stations ne mesurant alors que les seules températures maximales (TX) et minimales (TN) de la journée, à partir desquelles pouvaient être calculées des températures moyennes (TM), seules les régressions de ces 3 types de données ont été calculées pour l'ensemble de la région. La période la plus « longue » possible retenue fut de 7 ans, sachant que les moyennes correspondantes sont très proches de celles de 1946-1965 pour les stations existant pendant cette période (Fig.1). L'étude a été menée à partir des moyennes mensuelles et annuelles mais seules les dernières ont été retenues dans l'article de présentation de la méthode en 1970.

La situation s'est révélée bien différente en 2016-2017. Nous avons tenu à conserver la même durée de mesures, fixée à 2009-2015, et la même extension de la région, sans le Diois où il n'y avait dans les années 1960 que la station de Lus-la-Croix-Haute. Sur les 44 stations de 1970, seules 10 fonctionnent encore en 2015, sur les 48 recensées en 2016 (plus 2 du Diois) soit moins qu'en 1960 (Météo-France, 2017). Comme pour la série 1959-1965 les moyennes annuelles sont seules utilisées ici.

Parmi ces stations se trouvent représentées les 4 positions topographiques citées plus haut : deux ubacs (Les Orres et Péone - Valberg) et six stations (St Martin d'Entraunes, Le Mas-Col de Bleine, Caussols, Rimplas, Peille-Mt Agel, Sospel-Mt Barbonnet et Levens-Mt Arpasse)

situées très près de sommets ou sur les lignes de crête, sans pouvoir être plus précis en l'absence de certains fichiers météorologiques (Météo-France, 2016), ne seront pas étudiés ici. Restent 40 stations dont 21 adrets et 19 fonds de vallée. Leur distribution spatiale n'est pas identique à celle de 1959-1965 (Fig. 1). Les TN (températures minimales de fin de nuit) présentent une grande dispersion, certaines étant trop ou pas assez chaudes par rapport à la majorité d'entre elles. Les fichiers permettant de remarquer des particularités locales non optimales en fin de nuit pour l'installation de postes (Météo-France, 2016 et 2017) nous ont fait en éliminer certaines du calcul des TN dont le nombre de cas est alors inférieur à celui des adrets.

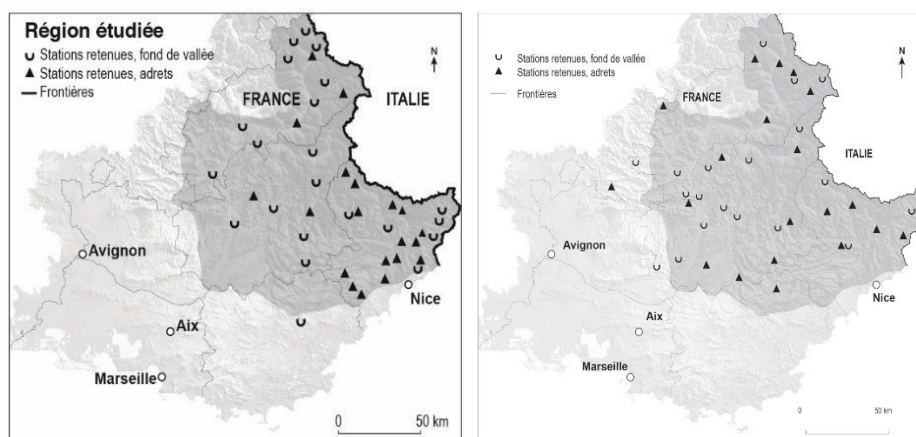


Figure 1. Région des Alpes françaises du Sud retenue (en gris foncé) et localisation des stations. En 1970 à gauche et en 2017 à droite

2. La décroissance des températures moyennes annuelles le long des adrets

Les résultats montrent de notables différences entre les cas des adrets et des FV (Tab. 1). Les adrets ont des gradients de l'ordre de $0,6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ dans les 2 cas, avec une augmentation de $1,2^{\circ}\text{C}$ en 2009-2012 par rapport à 1959-65, soit une montée des isothermes de 200m d'altitude. En revanche les températures des TN varient peu avec un gradient plus faible pendant la seconde période qui fait se recouper les 2 courbes. Aussi les écarts entre les 2 périodes des températures moyennes s'accroissent-elles avec l'altitude.

Tableau 1. Résultats des 2 séries pour les adrets. Gradient : pour 100m. T0 : Température « au niveau de la mer » de l'équation de régression. Différence au niveau de la mer : entre la seconde et la première série. R : Coefficient de corrélation.

Températures	Séries	Gradient	T0	Différence	R
TX	1959-1965	0,61	21,6	-	0,97
TX	2009-2015	0,59	22,8	1.2	0,96
TN	1959-1965	0,55	10,4	-	0,92
TN	2009-2015	0,52	9,9	- 0.5	0,91
TM	1959-1965	0,60	16,2	-	0,97
TM	2009-2015	0,55	16,3	0.1	0,96

2.1. Températures maximales moyennes annuelles sur les adrets

Les températures TX, soit le maximum journalier moyen annuel, « au niveau de la mer », sont supérieures de $1,2^{\circ}\text{C}$ en 2009-2015 par rapport à 1959-65, ce qui représente une différence de 200 mètres environ (gradient de l'ordre de $0,6^{\circ}\text{C}$), en soulignant au passage le niveau élevé des corrélations dans les tableaux 1 et 2. Elles ont notablement augmenté en 50 ans, plutôt 40 si l'on rapporte le début du réchauffement dans les années 70 (IPCC, 2013), ce

qui correspond aussi avec l'évolution des TX de Saint-Auban, station de référence de Météo-France (non représentée ici). Cet écart à T0 diminue légèrement à cause de la différence de gradient entre les 2 séries jusque vers 2000 mètres d'altitude, niveau des plus hautes stations (Tab.1 et Fig.2).

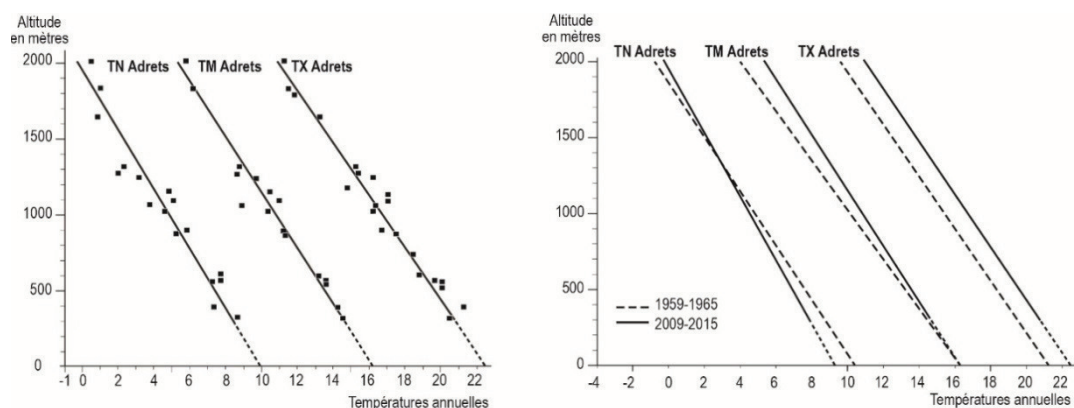


Figure 2. Décroissance des températures moyennes annuelles en fonction de l'altitude sur les adrets : 2009-2015 à gauche, les deux séries (1959-1965 et 2009-2015) à droite

En dessous de 350-400m, on arrive dans le climat méditerranéen dont la relation de son réchauffement avec celui des Alpes du Sud reste à étudier.

2.2. Températures minimales moyennes annuelles sur les adrets

Les TN des adrets présentent une grande dispersion (Fig. 3). Les 4 d'entre eux trop chauds ou froids ont été éliminés. Pendant la seconde période le gradient des TN moyens annuels est plus faible que pendant la première, ce qui aboutit à des « températures à T0 » inférieures à celles de la première période. L'écart entre les 2 séries s'accroît à peine avec l'altitude ; il reste très faible, même vers 1500m d'altitude. Le réchauffement nocturne apparait bien inférieur à celui diurne, même si sa valeur ne peut être proposée qu'avec une grande prudence à cause des incertitudes pesant sur les mesures des TN relevées de nuit (Tab.1 et Fig.2 et 3).

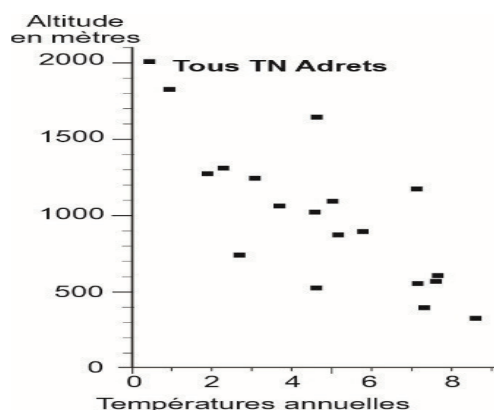


Figure 3. Les températures minimales moyennes annuelles de tous les adrets

2.3. Températures moyennes annuelles sur les adrets

Sous l'influence de la courbe des TN, les courbes des TM se rapprochent à T0 et présentent un écart croissant avec l'altitude qui se rapproche vers 2000m de celui noté pour les températures maximales (Tab.1 et Fig.2).

3. La décroissance des températures moyennes annuelles en altitude dans les fonds de vallée

3.1. Températures maximales moyennes annuelles dans les fonds de vallée

Ce sont les valeurs les plus fiables comme pour les adrets. Le gradient des maxima est plus faible, 0,51 en 2009-2015 qu'en 1959-1965 (0,59). L'écart de 0,8°C à T0 s'accroît avec l'altitude mais reste toujours inférieur à celui des températures maximales des adrets.

Tableau 2. Résultats des 2 séries pour les fonds de vallée. Légende identique à celle de Tab. 1.

Températures	Séries	Gradient	T0	Différence	R
TX	1959-1965	0,59	21,2		0,98
TX	2009-2015	0,51	22,0	0,8	0,98
TN	1959-1965	0,64	8,8		0,97
TN	2009-2015	0,55	8,2	- 0,6	0,89
TM	1959-1965	0,61	14,8		0,97
TM	2009-2015	0,55	15,1	0,3	0,96

Le réchauffement diurne apparaît plus faible dans les couloirs des vallées que sur les versants plus longtemps exposés au soleil. Il se créerait alors un décalage dans l'importance du réchauffement diurne, donc de la remontée des isothermes, entre les deux types de positions topographiques, les adrets et les fonds de vallée (Tab.2 et Fig.3).

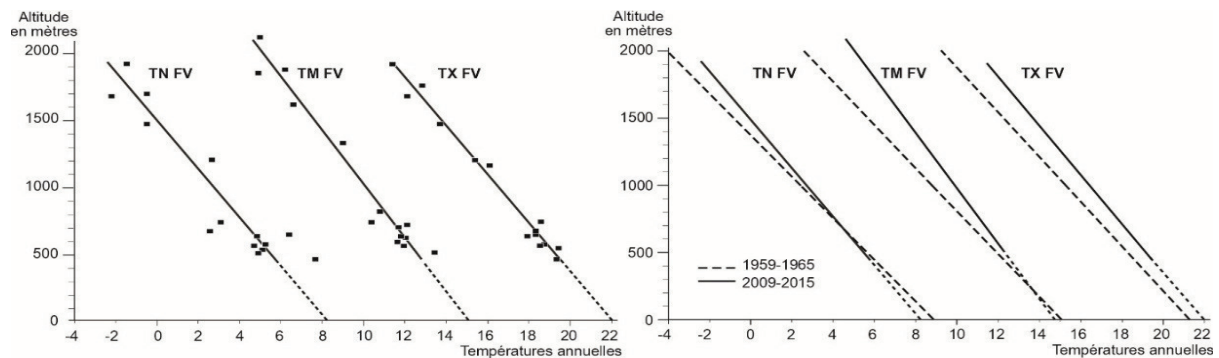


Figure 3. Décroissance des températures moyennes annuelles en fonction de l'altitude dans les fonds de vallée

3.2 Températures minimales moyennes annuelles dans les fonds de vallée

Les TN des FV sont encore plus dispersés que ceux des adrets (Fig. 4). Cinq n'ont pas été retenus pour les mêmes raisons que ceux des adrets. Parmi les plus chauds, on trouve, sans explication connue, celui de Saint-Auban, station de référence de Météo-France à 458m d'altitude dans la vallée de la Durance. La distribution spatiale des stations de FV montrait en 1959-65 l'existence de certaines plus froides que les autres (Marcoux, Guillaumes, Saint-André les Alpes et Val des Prés) toutes les quatre dans la partie occidentale des Alpes du Sud (non montré ici) qui sont en 2009-15 plus représentées que l'est ; mais cela n'explique pas pourquoi Saint-Auban est plus chaude que ses voisins au début du 21^{ème} siècle. Les courbes des 2 séries sont presque confondues sauf vers 1500m et au-delà (Tab.2 et Fig.5).

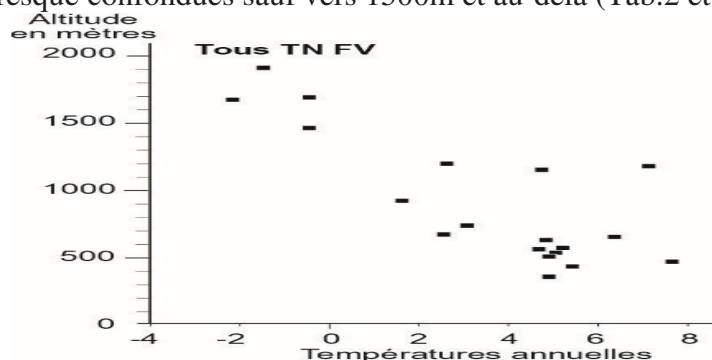


Figure 4. Les températures minimales de tous les fonds de vallée

Le réchauffement des TN des fonds de vallée entre les deux séries apparaît bien faible.

3.3 Températures moyennes annuelles dans les fonds de vallée

Moyenne des deux résultats précédents, elle subit surtout l'effet du faible gradient des TN par rapport aux moyennes 1959-65 et le contrecoup des questions posées plus haut à leur sujet (Tab.2 et Fig.3 et 4).

Conclusion

La comparaison entre les températures des adrets et des fonds de vallée des Alpes françaises du Sud à l'échelle des moyennes annuelles confirme bien l'existence d'un réchauffement entre 1959-65 et 2009-15 mais en montre aussi les inégalités. Il est plus important à la fois de jour (TX : maxima) sur les adrets que dans les fonds de vallée (une montée des isothermes de l'ordre de 200m au lieu de 100) et de fin de nuit (TN : minima) lors de laquelle il est presque nul. Cette étude n'est pas totalement satisfaisante. Les données de la série des stations disponibles dans les Alpes françaises du Sud en 2009-2015 posent des problèmes sérieux pour nombre de minima aussi bien en position d'adret que de fond de vallée, problèmes qui se posaient moins, semble-t-il, pendant la période 1959-1965. Il conviendra de revoir les localisations des stations par rapport à leur environnement immédiat pour pointer une éventuelle influence sur certaines températures. Doit également être posée la question d'un possible effet du changement de la distribution spatiale entre les deux séries et des instruments de mesure (Fig. 1).

Cette recherche va être continuée dans 2 directions. D'une part nous comptons procéder à une comparaison mensuelle entre les 2 séries grâce aux moyennes mensuelles de la série 1959-1965 dont nous disposons. D'autre part nous voulons la prolonger par l'étude des températures de son piedmont méditerranéen pour préciser les relations entre les 2 régions sur ce plan thermique.

Bibliographie

Bénévent E. 1926 : Le climat des Alpes françaises du Sud. *Mémorial de L'Office National Météorologique de France*, **14**, 436 p.

Beniston, M.,2000: Environmental Change in Mountains and Uplands. Arnold/Hodder and Stoughton/Chapman and Hall Publishers, London, UK, and Oxford University Press, New York, USA. 172 pp.

Douguédroit A., de Saintignon M.-F.,1970 : Méthode d'étude de la décroissance des températures en montagne de latitudes moyennes : exemple des Alpes du Sud. *Revue de Géographie Alpine*. LVIII, 3, 453-472

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

La Météorologie Nationale, 1970 : Stations : Données mensuelles.

Météo-France, 2016 : Données publiques – Informations sur les stations - Fiches de poste.

Météo-France, 2017 : Publiothèque. Stations : Données mensuelles et Historiques.

EVOLUTION DES TEMPÉRATURES AU PROCHE-ORIENT. RELATION AVEC LES PARAMÈTRES D'ALTITUDE (TEMPÉRATURES ET HAUTEURS DU GÉOPOTENTIEL 500 hPa)

TRABOULSI M.^{1,2}, HAJ HASSAN Z.¹, MHANNA H.¹

¹Université Libanaise, Faculté des Lettres, Corniche Mazraa, Beyrouth Liban.

²Archéorient UMR 5133. Maison de l'Orient et de la Méditerranée CNRS-Université Lyon 2. 7, rue Raulin, 69007 Lyon. traboulsim@yahoo.fr ; zaynab-h-h@hotmail.com ; housseinmhanna81@hotmail.com

Résumé—Ce travail propose l'étude de l'évolution des températures de surface au Proche-Orient durant la période 1970-71/2009-2010. Les données utilisées sont celles des températures mensuelles et saisonnières pour huit stations réparties sur quatre pays du Proche-Orient (Liban, Syrie, Jordanie et Israël). Des tendances significatives à la hausse ont été mises en évidence durant tous les saisons et mois (hormis le mois de janvier). L'étude de la relation entre ces augmentations et les paramètres d'altitude – températures et hauteurs du géopotential 500 hPa – fait ressortir des corrélations significatives avec l'augmentation des deux paramètres. Les configurations de ces paramètres, obtenues par des ACPR, sont similaires dans la plupart des cas.

Mots clés : Proche-Orient, températures, tendance, géopotential 500 hPa, température d'altitude.

Abstract -Evolution of temperatures in the Middle East. Relationship with altitude parameters (temperatures and 500 hPa geopotential height). The study of the evolution of surface temperatures in the Middle East during the 1970-1971 / 2009-2010 period is proposed. The monthly and seasonal temperatures for eight stations spread over four countries in the Middle East (Lebanon, Syria, Jordan and Israel) are computed. Significant increasing trends were evident during all seasons and months (except January). The study of the relationship between these increases and the altitude parameters, temperatures and 500hPa geopotential heights revealed significant correlations with the increase of both parameters. The configurations of these two parameters obtained by RPCA, are similar in most cases.

Keywords : Middle East, temperatures, trend, 500 hPa geopotential height, temperature at 500hPa.

Remerciements : Je tiens à remercier Caroline Norrant, Maître de conférences à l'université de Lille 1 pour ses conseils.

Introduction

Les études menées sur la région proche-orientale (Traboulsi, 2014) ont montré que, du point de vue thermique, le Proche-Orient connaît depuis les années 1990 un réchauffement climatique incontestable qui est associé à une tendance à la hausse des hauteurs du géopotential 500 hPa. Ce résultat est concordant avec les rapports du GIEC. Les conférences de Paris (2015) et de Marrakech (2016) qui avaient pour but la limitation du réchauffement climatique sont révélatrices de l'inquiétude de la communauté mondiale de cette situation de dérèglement climatique. Les recherches portant sur les précipitations ont également montré une évolution. Celle-ci se traduit par une tendance générale à la baisse des précipitations annuelles, même si elle n'est pas significative partout (Traboulsi, 2016), cette tendance est matérialisée par la prédominance de conditions de stabilité atmosphérique moins pluvieuses.

Ce travail propose l'étude de la tendance des températures de surface proche-orientales et leurs causes à travers l'analyse des tendances des paramètres d'altitude, pression et températures au niveau de 500 hPa, sans oublier que ces deux paramètres sont liés par les lois de la physique (Barry et Chorley, 2009). L'explication de l'évolution des températures de surface est mise en évidence par l'étude des corrélations entre elles et celles des paramètres d'altitude. Les configurations des températures et des hauteurs du géopotential 500 hPa, aux

tendances significatives, en lien avec l'augmentation des températures de surface seront également présentées dans ce travail.

1. Données et méthodes

1.1. Données

Pour cette étude, nous utilisons les données mensuelles et saisonnières des températures de surface des 8 stations réparties sur quatre pays du Proche-Orient, Liban, Syrie, Jordanie et Israël (figure 1) pour la période allant de 1970-71 à 2009-2010 (40 ans x 12 mois x 8 stations). Ces données concernent les stations suivantes : Beyrouth-AIB et Tripoli (Liban) ; Damas Aéroport et Palmyre (Syrie) ; Irbid et Queen Alia Aéroport (Jordanie) ; Har Kenaan et Beit Dagan (Israël). Les données du Liban, de la Syrie et de la Jordanie proviennent des services météorologiques de ces pays, alors que les données d'Israël proviennent du Knmi (<http://climexp.knmi.nl/>). Même si le nombre des stations est limité par la disponibilité des données, elles représentent les différentes régions de la zone d'étude (Traboulsi, 2004).

Pour l'étude de la pression et des températures d'altitude (niveau 500 hPa), nous avons utilisé les données de réanalyses NCEP/NCAR obtenues sur une maille de $2^{\circ}5'$ mais utilisées sur une maille en losange de $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ (Barnston *et al.*, 1987). Ces données, sélectionnées sur une fenêtre s'étendant de $20^{\circ}N$ à $70^{\circ}N$ en latitude et de $60^{\circ}W$ à $60^{\circ}E$ en longitude, sont utilisées au pas de temps mensuel de 1970 à 2010.

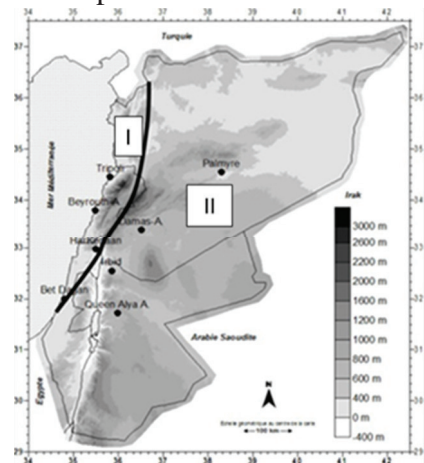


Figure 1. La zone d'étude.

1.2. Méthodes

Dans un premier temps, nous avons appliqué une Analyse en Composantes Principales avec Rotation type Varimax (ACPR) sur les températures mensuelles, saisonnières et annuelles (saison pluvieuse). Cette technique a été appliquée aussi sur les paramètres d'altitude (138 points de grille en variables et 40 années en observations) afin de dégager des configurations de ces paramètres. Dans un deuxième temps, nous avons calculé les tendances des scores des températures de surface ainsi que celles des paramètres d'altitude en lien avec la hausse des températures de surface. Ces tendances sont calculées par régression linéaire et testées significatives par le test Mann Kendall au seuil de 5 %. Dans un troisième temps, nous avons essayé de chercher le lien statistique entre les paramètres d'altitude : des corrélations linéaires ont été établies entre les paramètres d'altitude en points de grille et les scores des températures de surface, puis entre les scores de ces paramètres et les scores des températures de surface. Elles ont été testées significatives au seuil de 5 % par le test de Bravais-Pearson ($r \geq 10.321$).

2. Tendances des températures de surface et des paramètres d'altitude

2.1. Tendances des températures de surface

L'ACPR appliquée sur les températures de surface nous a permis d'individualiser deux à trois régions de même covariabilité thermique (tableau 1), représentées respectivement par deux et trois facteurs qui expliquent 85 % à 95 % de la variance totale. Dans le cas de deux facteurs, le Proche-Orient est divisé en deux, les régions littorales (I) et l'intérieur (II) (figure 1), ou bien le nord-ouest du Proche-Orient et le sud-est (durant les mois de printemps, d'été et

toutes les saisons). Alors que les trois facteurs représentent la région littorale du Proche-Orient, la région sud-ouest englobant le sud-ouest de la Syrie, la partie centrale d'Israël et le nord-ouest de la Jordanie, et enfin la région, baptisée sud-est, qui couvre la partie sud-est du Proche-Orient (sud-est de la Syrie et de la Jordanie et le sud d'Israël). Une régression linéaire simple, appliquée sur les scores des ACPR, a permis de déceler des tendances des températures à la hausse, significative au seuil de 5 % (tableau 1) selon le test Mann Kendall ($K_{test} \geq 1,96$) dans les régions littorales et sud-est durant l'automne et l'hiver (sauf en janvier) alors que cette tendance est significative dans le Nord-ouest du Proche-Orient au printemps, dans toute la région en été et notamment dans les régions littorales durant la saison d'hiver et pluvieuse (d'octobre à mai). D'après ce qui précède, on peut constater que toute la région proche-orientale connaît une tendance à la hausse des températures de surface d'une façon significative. La tendance moyenne varie entre 1,2° et 2,9°.

Tableau 1. Nombre de facteurs et variance expliquée des ACPR sur les températures de surface aux tendances significatives

	Nombre de facteurs	Variance totale expliquée en %	Facteurs (par région) dont les scores ont une tendance significative et variance expliquée	Test Mann Kendall sur les scores de la CP1	Tendance moyenne En degrés
Septembre	3	89,9	(région littorale) 35,6 % (région sud-est) 19,6 %	4,68 2,37	2,4 1,5
Octobre	3	94,6	(région littorale) 53,3 % (région sud-est) 20,1 %	2,63 3,82	1,3 2,1
Novembre	3	93,3	(région littorale) 29,1 % (région sud-est) 18,2 %	3,31 2,67	1,7 1,3
Décembre	3	94,1	(région littorale) 31,2 % (région sud-est) 23,3 %	2,37 2,63	1,3 1,5
Janvier	3	89,2	Tendance non significative		
Février	3	94,4	(région littorale) 23,5 %	2,03	1,2
Mars	2	93,9	(région nord-ouest) 75,9 %	1,98	1,4
Avril	2	87,3	(région nord-ouest) 70,9 %	2,21	1,2°
Mai	2	85,5	(région nord-ouest) 67,3 %	2,91	1,6
Juin	2	84,9	(région intérieure) 45,8 % (région littorale) 39,0 %	3,61 4,38	1,8 2,2
Juillet	2	89,9	(région intérieure) 57,4 % (région littorale) 32,5 %	2,21 4,35	1,4 2,3
Aout	2	92,8	(région intérieure) 51,6 % (région littorale) 41,2 %	2,95 3,89	1,7 2,0
Saison pluvieuse	2	92,4	(région littorale) 39,1 %	4,82	2,4
Automne	2	86,3	(région sud-est) 31,5 %	6,26	2,9°
Hiver	2	93,6	(région littorale) 42,7 %	3,37	1,8
Printemps	2	90,2	(région nord-ouest) 68,2 %	3,42	2,0
Été	2	94,8	(région intérieure) 58,6 % (région littorale) 36,1 %	3,79 4,24	2,1 2,2

2.2. Tendance des hauteurs du géopotential 500 hPa

Les ACPR appliquées sur les hauteurs du géopotential 500hPa, montrent des configurations aux tendances significatives (figure 2) avec, dans la plupart des cas, un pôle d'augmentation sur le Sahara et toute la Méditerranée et une diminution sur l'Atlantique. Nous retrouvons la même configuration Atlantique tropical-Sahara et Proche-Orient dans la première configuration de toutes les saisons (automne (F1), hiver (F2), printemps (F1), été (F1) et saison pluvieuse (F1)) ainsi que pour la plupart des mois (Septembre, Octobre, avril, juin, juillet et août). La deuxième configuration montre un pôle d'augmentation de pression d'altitude sur la Russie, sur la Méditerranée occidentale ou sur l'Atlantique du Nord-Ouest (figures non montrées). Nous retrouvons ces configurations dans des études antérieures

(Norrant, 2004, Norrant *et al.*, 2010) mais qui sont en lien avec la diminution des précipitations en méditerranée.

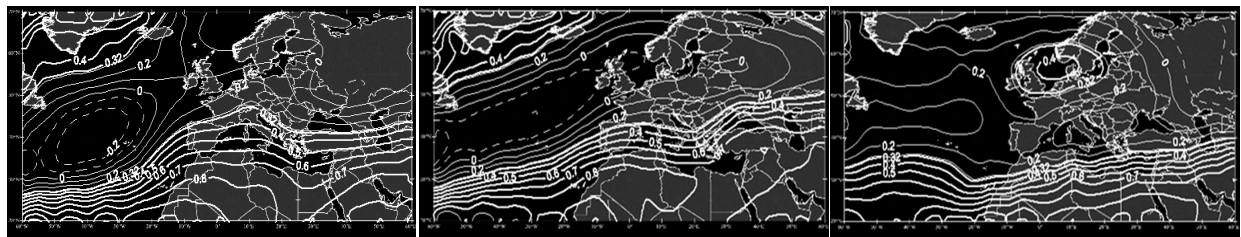


Figure 2. Exemples de configurations des hauteurs du géopotiel 500 hPa durant (de gauche à droite) le printemps, la saison pluvieuse et le mois de septembre

2.3. Tendence des températures du géopotiel 500 hPa

Les configurations des températures d'altitude significatives associées à l'augmentation des températures de surface, que ce soit à l'échelle saisonnière ou mensuelle, sont représentées par un pôle positif s'étendant de l'Atlantique tropicale-Sahara au Proche-Orient, de l'Atlantique tropical à la Méditerranée ou bien du Nord de l'Europe-Russie au Proche-Orient, mais dans plusieurs cas. Toutes les configurations obtenues pour les températures d'altitude montrent bien la présence d'un pôle positif sur le Proche-Orient et la Méditerranée orientale, sur l'Europe occidentale et la Méditerranée occidentale ou sur le Sahara (figure 3). Ces configurations sont présentes dans une étude antérieure (Norrant, 2013) expliquant la diminution des précipitations en Méditerranée.

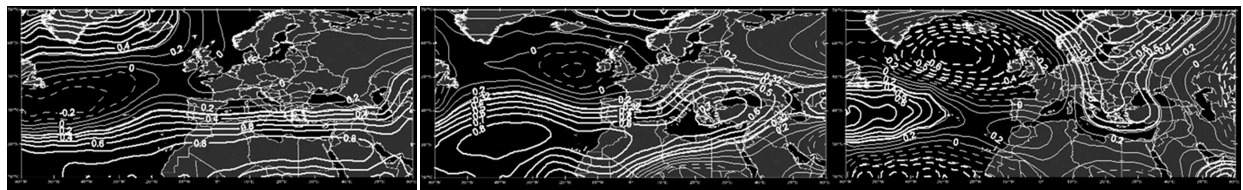


Figure 3. Exemples de configurations des températures du géopotiel 500hPa durant (de gauche à droite) le printemps, l'automne et le mois d'avril

2.4. Tendence des paramètres d'altitude (données brutes en points de grille)

Les hauteurs du géopotiel 500 hPa montrent une tendance à la hausse, significative au seuil de 5 % (voire 1 %) selon le test Mann Kendall, durant toutes les saisons (figure 4) au-dessus du Proche-Orient et de la Méditerranée orientale. Cette tendance est évaluée à +30 mgp. La tendance à la hausse est également remarquée pour tous les mois elle est aussi significative statistiquement au-dessus de notre zone d'étude sauf aux mois d'avril et novembre. Les températures d'altitude présentent aussi une tendance à la hausse significative au seuil de 5 % pendant toutes les saisons (sauf l'hiver). Cette tendance à la hausse, est évaluée de +1 à +1.5°C en moyenne sur la Méditerranée orientale au printemps, en été et en automne et durant la saison pluvieuse. A l'échelle mensuelle cette tendance est significative durant le mois de décembre, de mai, des trois mois d'été et de septembre.

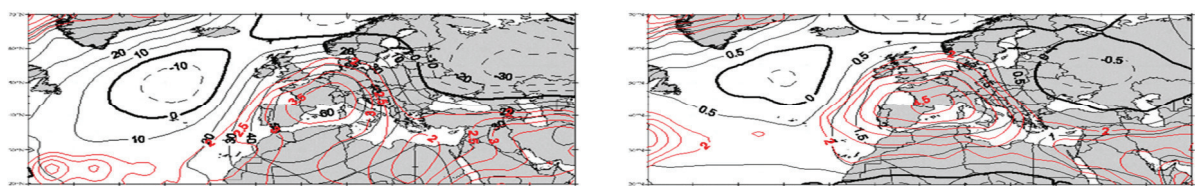


Figure 4. Exemple de tendance moyenne des paramètres d'altitude du géopotiel 500 hPa pendant le printemps (hauteurs à gauche (en mgp), températures à droite (en degrés), lignes rouges représentent les ktest \geq 1.96).

Le calcul des corrélations entre ces deux paramètres pour chaque point de grille (138 points) pour les mois et saison concernés et sur la période 1970-71/2009-10 a montré des coefficients positifs significatifs sur l'ensemble de la fenêtre d'étude à toutes les échelles temporelles. Le coefficient de corrélation dépasse 0.70 durant les mois et saisons intermédiaires voire 0.8 à 0.9 au printemps et durant la saison pluvieuse sur la région proche-orientale. En hiver, cette corrélation se situe entre 0.6 et 0.7. Plus faible en été, elle oscille entre 0.4 et 0.7 sur la région proche orientale (figures non montrées).

3. Relation entre températures de surface et paramètres d'altitude

3.1. Relation entre les scores des températures de surface et les hauteurs du géopotential 500 hPa

A l'échelle saisonnière, les corrélations entre les scores des températures de surface (ayant une tendance significative) et les hauteurs du géopotential 500 hPa sont particulièrement fortes en été et au printemps sur le Proche-Orient, avec une variance commune respectivement de 64 % et 49 %. Cette variance est plus faible en hiver (36 %) et en automne (20 %). Cette corrélation est matérialisée par un pôle positif sur le Proche-Orient (ou sur la Grèce et l'Anatolie en été) significatif au seuil de 5 % (figure 5). A l'échelle mensuelle, une relation statistique importante apparaît entre ces deux variables avec une variance commune qui atteint également 64 % durant les mois d'été et de printemps, alors qu'elle est plus faible aux mois d'hiver. A savoir, que cette relation est plus forte dans les régions littorales (ou le nord-ouest du Proche-Orient) que dans les régions intérieures.

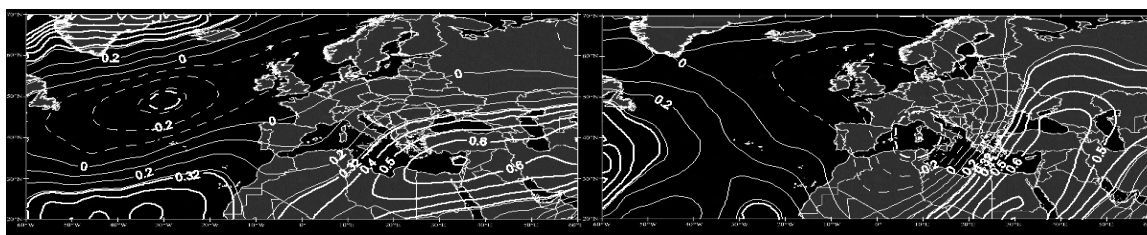


Figure 5. Exemples de corrélation entre les scores des températures de surface et les hauteurs du géopotential 500 hPa durant le printemps (à gauche) et le mois de décembre (à droite) (1970-71/2009-10). Lignes continues : corrélation positive ; lignes discontinues : corrélation négative ; les valeurs significatives sont en gras.

3.2. Relation entre les scores des températures de surface et les températures du géopotential 500 hPa

Les corrélations positives entre ces deux variables apparaissent sous forme de pôles positifs, que ce soit à l'échelle saisonnière ou mensuelle, centrés sur le Proche-Orient. Les corrélations sont relativement fortes au printemps (49 % de variance commune) alors qu'elles sont plus faibles en hiver (36 %), en été (25 %) et en automne (10 %). Les corrélations mensuelles, positives, sont fortes aux mois de printemps (64 %), plus faibles pendant certains mois d'automne et d'été (16 à 10 % aux mois de novembre et juin) et non significatives pendant d'autres mois de ces deux saisons (juillet, août, septembre et octobre). Ces faibles corrélations nous laissent s'interroger sur le rôle de la Méditerranée qui joue le rôle de modérateur thermique dont les températures ne sont pas explorées dans cette étude.

Conclusion

L'étude des températures de surface au Proche-Orient (1970-71/2009-10) présente une tendance à la hausse presque généralisée aux échelles spatiale et temporelle et significative au seuil de 5 % (selon le test Mann Kendall). Les configurations des hauteurs du géopotential 500 hPa, associées à la hausse des températures de surface, sont représentées dans la plupart

des cas par un pôle positif s'étendant de l'Atlantique tropical-Sahara au Proche-Orient, alors que celles des températures du géopotential 500 hPa sont souvent matérialisées par un pôle positif sur le Proche-Orient. Ces configurations sont présentes dans des études antérieures mais qui sont en lien avec la diminution des précipitations (Norrant, 2004, 2010, 2013).

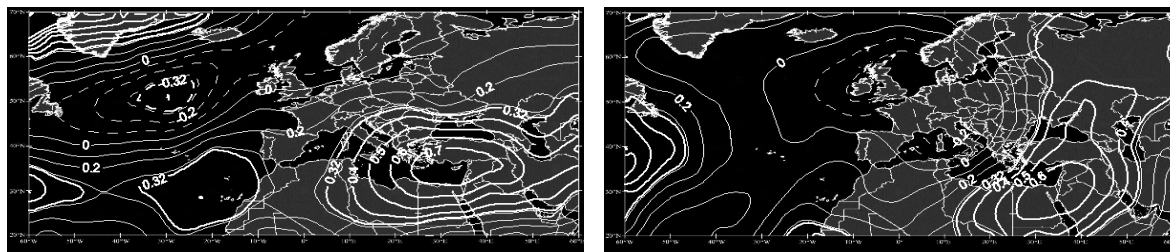


Figure 6. Exemples de corrélation entre les scores de températures de surface et les températures du géopotential 500 hPa au printemps (à gauche) et en décembre (à droite). Même légende que pour la figure 4.

L'étude des corrélations entre les scores des températures de surface et les paramètres d'altitude, aux points de grille, montre un lien statistique significatif positif. La hausse significative des hauteurs et des températures du géopotential 500 hPa au-dessus du Proche-Orient est corrélée significativement et positivement avec la hausse significative des températures de surface ce qui est conforme aux mécanismes de la circulation atmosphérique régionale et à la modification de cette circulation. Ces corrélations sont plus élevées à l'échelle saisonnière particulièrement au printemps et en été notamment pour les hauteurs du géopotential (variance faible en été et en automne pour les températures d'altitude). D'autres pistes de recherches sont à explorer afin d'expliquer la faible variance entre les températures de surface et les paramètres d'altitude dont les températures de la Méditerranée.

Bibliographie

- Barnston A.G., Livezey R.E., 1987 : Classification, seasonality and persistence of low frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, **115**: 1825-1850.
- Barry R.G., Chorley R.J., 2009 : *Atmosphere, weather and climate*. Routledge, 536 p.
- GIEC 2013 : *Les éléments scientifiques. Contributions du Groupe de travail I au Cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat. Résumé à l'intention des décideurs*, 18 p. .
- Norrant C., 2004 : *Tendances pluviométriques indicatrices d'un changement climatique dans le bassin méditerranéen de 1950 à 2000. Etude diagnostique*. Thèse de doctorat, Université Aix-Marseille I, 263 p.
- Norrant C., Douguédroit A., 2005: Diminution significative des précipitations en Grèce et modifications de la circulation atmosphérique: le cas de janvier de 1951 à 2000. *Actes du 18^{ème} colloque de l'AIC*, « Climat urbain, ville et architecture », Gênes, 7-11 sept. 2005, 169-172.
- Norrant-Romand C., Douguédroit A., 2010 : Types de circulation atlantico-européens et régimes de temps pluvieux en Méditerranée, *Bulletin de l'Association des Géographes Français (BAGF)*, **2010-2**, 234-244.
- Norrant C., 2013 : Relation entre les températures d'altitude et la diminution des précipitations régionales dans le bassin méditerranéen (1950-2000). *Hannon*, revue de géographie libanaise, **26**: 40-60.
- Sneyers R, 1990: *On the statistical analysis series of observation*. WMO, Technical Note n° 143, Geneve.
- Traboulsi M., 2004 : *Les précipitations au Proche-Orient : Variabilité spatio-temporelle et relation avec la dynamique de l'atmosphère (1960-61/1989-90)*. L'Atelier National de Reproduction des Thèses, Lille 3, 233 p.
- Traboulsi M., 2014 : Les fortes chaleurs au Proche-Orient (1970-2010) : exemple de réchauffement climatique. *Actes du XXVII^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Dijon, 2-5 juillet 2014, p. 753-758.
- Traboulsi M., 2016 : Evolution des précipitations au Proche-Orient. Relation avec les paramètres d'altitude (températures et géopotential 500 hPa). *Actes du XXIX^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Besançon, 6-9 juillet 2016, p. 375-380.

INVESTIGATION DANS LES EFFETS POTENTIELS DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LES PROPRIETES DE LA TROPOSPHERE OUEST-MEDITERRANEENNE A L'ECHELLE ANNUELLE A PARTIR DES RADIOSONDAGES ET DES REANALYSES

EL MELKI T.

Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités - Université de La Manouba – Tunisie, UR 11ES41 : Géomatique et Géosystèmes, FLAH –Manouba, [lmlkitfik@gmail.com].

Résumé : Les effets du réchauffement global commencent à être visibles dans maintes composantes du système climatique. L'objectif de cette étude est d'identifier la nature et l'importance des tendances climatiques dans la troposphère ouest-méditerranéenne. Les données de base utilisées sont les radiosondages de six stations météorologiques de la région et les données des réanalyses du « NCEP-NCAR CDAS-1 » de la « NOAA » (2.5° x 2.5° de latitude/longitude) pour la fenêtre : 20° à 65° de latitude nord et 35° ouest à 45° est de longitude (627 points de grille) pour la période 1980-2016. Les premiers résultats de l'étude confirment la tendance au réchauffement dans la région étudiée.

Mots-clés : Réchauffement global, Troposphère ouest-méditerranéenne, Tendances, Radiosondages, réanalyses.

Abstract- Investigation into the potential effects of global warming on the West-Mediterranean Troposphere properties at the annual scale based on radio-sounding and reanalysis data. Effects of global warming are beginning to be visible in many components of the climate system. This study aims to identify the nature and the importance of climatic trends in the western Mediterranean troposphere. The database used is formed by the radio-soundings data of six meteorological stations in the region and by the NOAA NCEP-NCAR CDAS-1 reanalysis data (2.5° x 2.5° latitude / longitude) for the window: 20° to 65° north latitude and 35° west to 45° east longitude (627 grid points) for the 1980 to 2016 period. The first results of the study confirm the tendency to warm up in the studied region.

Keywords : Global warming, West-Mediterranean Troposphere, Trends, radio-soundings, reanalysis.

Introduction : objectif de l'étude

Le réchauffement global induit, notamment, par l'effet de serre anthropique signifie que d'avantage d'énergie est stockée dans le système climatique. Théoriquement, ce fait induit des changements dans les propriétés et les mouvements de la troposphère aux échelles globale et régionale. Des indices de ces changements sont présentés dans cette étude.

L'objectif ici est de chercher, à travers les données des radiosondages des stations météorologiques et des réanalyses de la Méditerranée occidentale, les aspects de l'évolution de ces propriétés. Des travaux antérieurs (El Melki, 2012 & 2016) ont montré que certains changements dans la troposphère tunisoise ont commencé à être perceptibles.

1. Période de l'étude, données de base et méthodologie

La période (1980-2016) de l'étude est suffisamment longue (37 années) pour caractériser des tendances chronologiques valides. Les données de base sont des données de radiosondages²⁸ et des données de réanalyses²⁹. Un radiosondage comporte deux parties : le corps du radiosondage et les indices du radiosondage. Le corps du radiosondage (format : « Text List ») est formé par les niveaux significatifs (variables d'un radiosondage à l'autre) et standards (fixes pour tous les radiosondages : 1000, 850, 700, 500, 300, 200 hPa ... etc.) de pression atmosphérique. Les trois niveaux standards de pression (pour la comparaison) les plus proches du substrat terrestre (850, 700 et 500 hPa) sont retenus. Ils sont les plus propices à refléter les interactions du couple « substrat-troposphère ». Parmi les paramètres figurant

²⁸<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

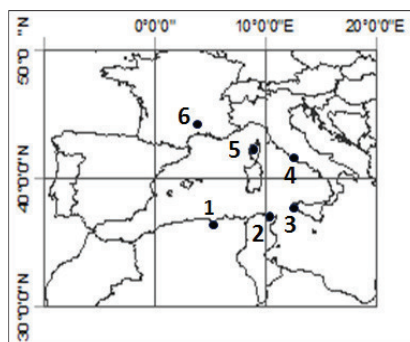
²⁹<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/.Intrinsic/.PressureLevel/>

dans le corps du radiosondage, sept ont été retenus : les **altitudes** en mgp (mètre géopotentielle) des niveaux de pression indiqués, la **température** de l'air ambiant ($^{\circ}\text{C}$), le **rapport de mélange** (humidité absolue, en g/Kg), la **température du point de rosée** ($\text{Td}^{\circ}\text{C}$), l'**humidité relative** (U%), la **vitesse** et la **direction** du vent.

Les indices du radiosondage (24 indices) constituent la deuxième section d'un radiosondage. La majorité de ces indices, focalisent sur les propriétés thermodynamiques des masses d'air en place: énergie potentielle disponible à la convection (CAPE), indices d'orages...etc. certains caractérisent l'état hygrométrique de la masse d'air : tel est le cas de « l'eau précipitable de la colonne sondée » (*Precipitable water [mm] for entiresounding*). Ce paramètre exprime toute la quantité d'eau (mm) disponible dans la masse d'air sondée.

Les deux sections du radiosondage permettent la caractérisation des propriétés thermiques, hygrométriques et thermodynamiques de la troposphère d'un lieu à un moment donné. Les stations météorologiques retenues sont indiquées ci-dessous (Fig. 1 ; Tab. 1) :

Tableau 1 (Droite). Coordonnées des stations météorologiques de l'étude.



Propriétés des stations de radiosondages	Identifiant de la station (OACI)	Numéro de la station (OACI)	Latitude, degré.	Longitude, degré.	Altitude, m.
Alger	DAAG	60390	36.68	3.21	29
Tunis-Carthage	DTTA	60715	36.83	10.23	4
Trapani	LICT	16429	37.9	12.5	14
Rome (LIRE-P. Di M.)	LIRE	16245	41.65	12.43	32
Ajaccio Nap. Bonap.	LFKJ	7761	41.9	8.8	9
Nîmes-Courbessac	LFME	7645	43.86	4.4	62

Figure 1 (Gauche). Localisation des stations météorologiques de l'étude.

L'absence (dans la source en ligne citée dessus) de radiosondages pour les zones littorales marocaines et espagnoles de la Méditerranée est à noter en premier lieu. En second lieu, il est bien admis que les données climatiques de surface d'une station météorologique ne sont vraiment représentatives que de son propre site. C'est le cas aussi des radiosondages surtout pour les basses couches proches du substrat. Ceci a été vérifié pour Tunis-Carthage et Trapani, par exemple. C'est la raison du recours à des données spatialisées : les données des réanalyses du [« NCEP-NCAR CDAS-1 » de la « NOAA »]³⁰ disponibles en ligne³¹. La base des données utilisées couvre toute la région synoptique comportant la Méditerranée occidentale : Atlantique nord-oriental, Sahara et Afrique du nord, Méditerranée, Europe et Asie occidentale. La grille des données ($2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ de latitude/longitude) correspond à la fenêtre : 20° à 65° de latitude nord et 35° ouest à 45° est de longitude (Total de 627 points). Voir plus large permet *souvent* de mieux comprendre. Les paramètres retenus sont : l'**altitude** (mgp) des niveaux standards de pression retenus (850, 700 et 500 hPa), la **température** de l'air ambiant ($^{\circ}\text{K}$) et l'**humidité relative** (%). Certaines des variables de la réanalyse sont « fortement influencées par les données observées (température de l'air et vent dans les couches supérieures, par exemple), alors que d'autres sont influencées aussi bien par les données observées que par le modèle lui-même, tel est le cas par exemple, de l'humidité et de la température de surface » (Kalnay et al., 1996). La confrontation des deux sources de données peut s'avérer fructueuse.

³⁰ MONTHLY Intrinsic Pressure Level from NOAA NCEP-NCAR CDAS-1: Climate Data Assimilation System I; NCEP-NCAR Reanalysis Project.

³¹ <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/.Intrinsic/.PressureLevel/>

Pour assurer la continuité temporelle des saisons le calcul des **moyennes saisonnières** puis annuelles a été effectué en considérant décembre de l'année N-1 avec janvier et février de l'année N. Par souci d'obtenir les tendances les plus proches de la réalité. Le test « K », de Mann-Kendall a été appliqué pour caractériser les tendances : présence, nature (positive ou négative) et valeur. Une tendance est considérée **significative** si : « K » $\geq +1.92$, ou « K » ≤ -1.92 . Les résultats sont présentés sous forme de **tableaux de synthèse** pour les radiosondages (portée spatiale ponctuelle) et sous forme de cartes d'isolignes d'égaux valeurs de tendances) pour les réanalyses (données continues dans l'espace).

2. Principaux résultats

Les radiosondages permettent de déceler certaines tendances positives et négatives, significatives au seuil 95%, affectant les propriétés de la troposphère ouest-méditerranéenne. La température de l'air présente le paramètre le plus affecté et la station d'Ajaccio B.N. est la plus touchée (Tab. 2).

Tableau 2. Synthèse des tendances (K, Mann-Kendall) significatives, positives : (+) et négatives : (-), des paramètres des radiosondages (1980-2016) dans quelques stations météorologiques ouest-méditerranéennes.

N°:	Stations	Identifiant	850 hPa						700 hPa						500 hPa									
			Altiude (m _{gp})	T°C	Td°C	U%	MIX-R	ddd°	ff-Knt	Altiude (m _{gp})	T°C	Td°C	U%	MIX-R	ddd°	ff-Knt	Altiude (m _{gp})	T°C	Td°C	U%	MIX-R	ddd°	ff-Knt	
1	Alger	DAAG	(+)																					
2	Tunis-Carthage	DTTA		(+)								(-)	(-)					(+)		(-)	(-)	(-)		
3	Trapani	LICT			(+)	(+)	(+)					(+)	(+)	(+)								(+)		
4	Rome (LIRE-P. DI M.)	LIRE		(+)								(+)												
5	Ajaccio N.B.	LFKJ	(+)	(+)		(+)	(+)	(+)	(+)			(+)	(+)					(+)		(-)	(-)			
6	Nîmes-Courbessac	LFME	(+)	(+)								(+)						(+)		(-)				

Avec : T°C : température de l'air ambiant, Td°C : température du point de rosée, U% : humidité relative de l'air, MIX-R (Mixing ratio) : humidité absolue, ddd° : direction du vent en degrés, ff-Knt : vitesse du vent en nœuds.

Afin de vérifier si les tendances observées des températures ne sont pas dues à des raisons autres que « *atmosphériques/naturelles* », un test de rupture (Pettitt, sous Khronostat) a été appliqué aux séries chronologiques des températures moyennes annuelles pour les trois niveaux de pression spécifiés. L'absence de rupture est confirmée pour toutes les stations de l'étude sauf Ajaccio B.N. : en 1996 (à 850hPa, aux seuils 99, 95 et 90%) et en 2005 (à 700hPa, aux seuils 95 et 90% ; et à 500hPa, au seuil 90%). Ne disposant pas des moyens pour le faire, les raisons de ces ruptures restent à identifier.

Quoiqu'il en soit, pour le reste des stations et des paramètres des radiosondages (fortement influencés par les températures : altitudes géopotentielle, Td°C, U%), les tendances observées **peuvent être considérées** déterminées par des évolutions purement atmosphériques. Les tendances révélées par les réanalyses (Fig. 2, 4 et 5) confirment l'importance spatiale de ces modifications.

2.1. Tendances des températures annuelles moyennes et des taux annuels moyens d'humidité relative des géopotentiels 850, 700 et 500 hPa.

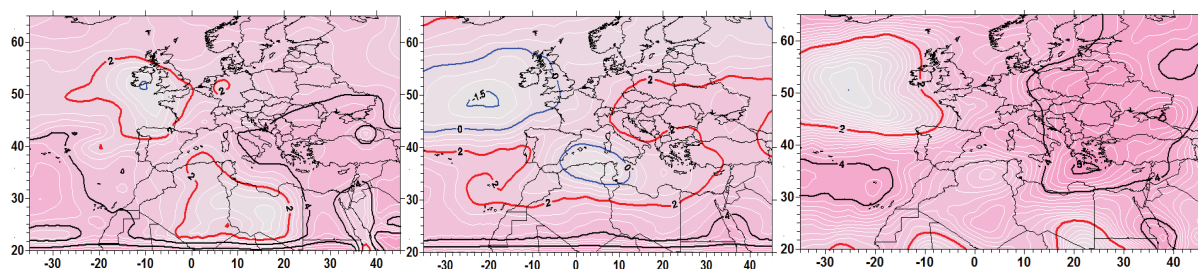


Figure 2. Isolignes des tendances (K, Mann-Kendall) des températures annuelles moyennes des géopotentiels (depuis la gauche) 850, 700 et 500hPa (1980-2016) dans la région synoptique de la Méditerranée occidentale (Source des données : *Notes de bas de page 3 et 4*).

Ces trois cartes (fig. 2) confirment la tendance, positive et significative des températures. Le réchauffement de la troposphère ouest-méditerranéenne est net aux niveaux 850 et 500hPa (K, de Mann-Kendall compris **entre +2 et +4**). Le premier niveau (± 1200 mgp), se situe au-dessus de la couche limite planétaire réchauffée par le substrat terrestre, ce qui **exclu** la contribution **directe** d'effets urbains à ce réchauffement. Il en est de même pour le niveau 500 hPa (± 5600 mgp) très souvent dominé par des dorsales barométriques liées aux anticyclones subtropicaux (AST), persistants et dynamiques, commandant les remontées tropicales chaudes. De surcroît, ces remontées proviennent de régions dont la tendance au réchauffement est à la fois positive et significative. Pour ces deux niveaux, la tendance au réchauffement présente un caractère d'échelle régionale si non globale. Au niveau 700hPa (± 3100 mgp), la totalité de la Méditerranée occidentale affiche l'absence d'une tendance significative des températures : les Baléares, l'est algérien et la quasi-totalité de la Tunisie présentent une tendance négative non significative, alors que le reste de la Méditerranée occidentale présente une tendance positive non significative aussi. Des éléments d'explication sont à chercher dans les propriétés de la circulation atmosphérique méditerranéenne (flux et masses d'air). La Méditerranée occidentale est connue pour être le siège d'une activité cyclonique importante (hiver et intersaisons) synonyme d'une forte convergence de masses d'air, entre autre, polaire. Ce dernier, est connu par sa densité élevée (comparée à celle du tropical chaud) et ses coulées souvent peu épaisses sur la Méditerranée méridionale, notamment. Il glisse sous l'air tropical persistant en altitude et n'occupe le niveau 500hPa que rarement (El Melki, 2014). Ceci est aussi bien en saison chaude que froide (Fig. 3). Sur la Méditerranée, mer connue pour être très chaude, l'air polaire se réchauffe vite par la base ; et, ses basses couches se dénaturent rapidement sur le plan thermique au contact du substrat chaud, d'où la tendance positive au réchauffement du niveau 850. Les effets de ce réchauffement par la base gagnent en altitude progressivement et n'atteignent pas souvent le niveau 700hPa (Fig. 3) ; qui connaît de ce fait des tendances faibles et plutôt négatives sur la Méditerranée.

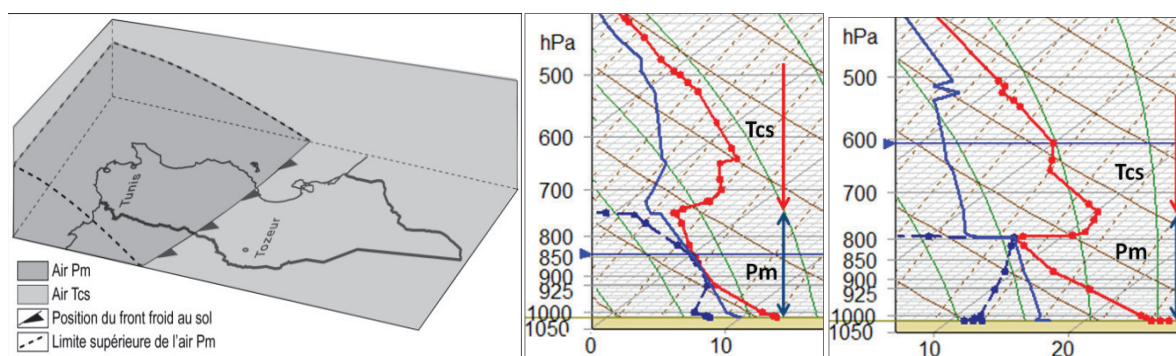


Figure 3. Gauche : schématisation d'une mince advection d'air Polaire maritime (Pm) en Tunisie septentrionale (source : El Melki, 2014). L'air Tropical continental saharien : Tcs, domine la Tunisie méridionale et surplombe l'air Pm en Tunisie septentrionale. Centre et droite : advections minces d'air Pm du 29-01-2015 à 12h00mn et du 19-06-2015 à 09h00mn. (Source des données brutes: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)

De surcroît, la zone des tendances négatives des températures observée au niveau 700hPa correspond, assez bien, à l'aire des dépressions majeures ouest-méditerranéennes. Ce même constat est valide dans l'aire de la dépression d'Islande en Atlantique est-septentrional. Ceci pourrait signifier une recrudescence des circulations méridiennes nordiques pour les deux aires dépressionnaires, ce qui serait lui-même, une conséquence du réchauffement global.

Des températures plus élevées déterminent souvent des taux d'humidité relative plus bas sans pour autant être synonymes d'une baisse d'humidité absolue. Dans ce nouveau contexte thermique méditerranéen, les taux d'humidité présentent souvent des tendances **négatives** et **localement significatives** à tous les niveaux spécifiés de pression (Fig.4).

Les modifications des propriétés thermiques et hygrométriques de la troposphère doivent déterminer, théoriquement, des changements sur le plan thermodynamique. Exception faite de la vitesse du vent, tous les autres paramètres des radiosondages sont plus ou moins affectés par des tendances significatives induites par le réchauffement global (Tab. 1), y compris les altitudes des niveaux 850 et 500 hPa. Les données des réanalyses vont dans le même sens.

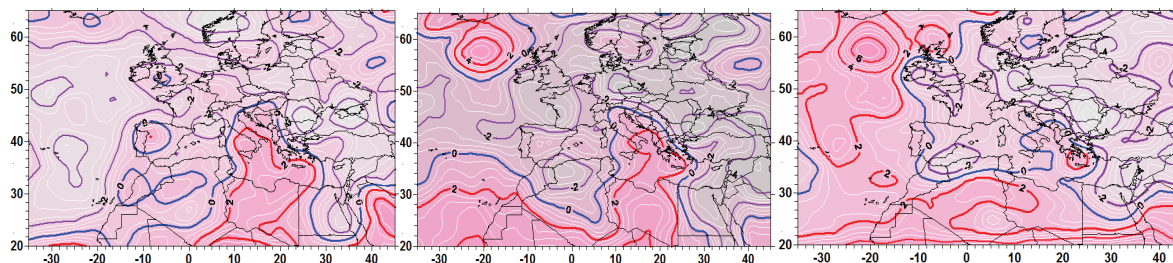


Figure 4. Isolignes des tendances (K, Mann-Kendall) des taux annuels moyens des humidités relatives des géopotentiels (depuis la gauche) 850, 700 et 500hPa (1980-2016) dans la région synoptique de la Méditerranée occidentale.

2.2. Tendances des altitudes annuelles moyennes des géopotentiels 850, 700 et 500 hPa.

Les altitudes annuelles moyennes des géopotentiels indiqués (Fig. 5) ne montrent pas en Méditerranée occidentale des tendances significatives aussi nettes que celles des températures. La quasi-totalité de la Méditerranée et l'aire de la dépression d'Islande présentent au niveau 850hPa une tendance négative non significative. L'isoligne de tendance nulle (valeur=0) contourne ces deux régions avec l'Ibérie. Ce fait est certainement lié, entre autres facteurs, au réchauffement des basses couches de la troposphère (fig.2) favorisant la cyclogenèse et la convergence des masses d'air, y compris les infiltrations d'air polaire froid et **dense**, ce qui serait à l'origine de cette tendance à la baisse du géopotentiel dans lesdites aires. Dans ce contexte, et contrairement à la dépression d'Islande (permanente, déterminée par des facteurs d'échelle spatiale très sensiblement plus importantes que celles de la Méditerranée occidentale, affectée par des coulées d'air polaire très souvent plus épaisses car plus proche des sources de ce dernier) qui garde la même tendance négative mais non significative à tous les niveaux de pression spécifiés (effet des infiltrations polaires profondes), la tendance vers la baisse du géopotentiels'affaiblit en Méditerranée au niveau 700hPa (très petite aire sur le bassin oriental) et disparaît au niveau 500hPa. Les advections polaires sont très souvent minces en Méditerranée (fig. 3) et sont loin d'avoir la même ampleur (plans horizontal et vertical) dans les deux régions. D'autre part, la proximité de l'aire des AST (tendance positive et significative) peut influencer, vers la hausse, le géopotentiel ouest-méditerranéen.

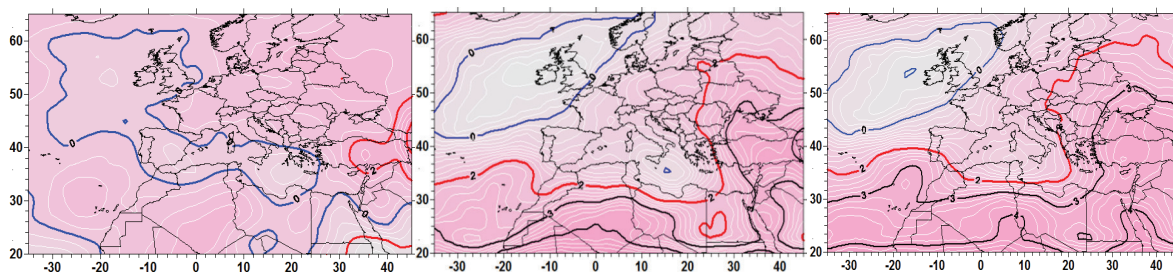


Figure 5. Isolignes des tendances (K, Mann-Kendall) des altitudes (mgp) des géopotentiels (depuis la gauche) 850, 700 et 500hPa (1980-2016) dans la région synoptique comportant la Méditerranée occidentale.

Les variations des altitudes d'un géopotentiel donné sont **théoriquement** synonymes d'une évolution vers la stabilité (tendance (+)) ou vers l'instabilité (tendance (-)) verticales. Du fait que la troposphère ouest méditerranéenne se réchauffe plus par la base (fig. 2, et paragraphe : 2.1.), l'effet du réchauffement global sur les altitudes géopotentielle y diminue sensiblement avec l'altitude (Fig. 5). Dans ce contexte, les coulées nordiques doivent être alors souvent

minces, ce qui **concorde** aussi avec la réalité souvent observée (fig. 3 ; El Melki, 2014). De ce fait l'impact de cette évolution sur le régime des précipitations serait **faible ou nul**. Il est à noter cependant, que la température de l'air, élément et facteur majeur du climat, est loin de toujours être le facteur unique ou le plusdéterminant. Les éléments d'un système interagissent. D'où la nécessité de multiplier les observations. Les indices des radiosondages fournissent alors un complément d'informations.

2.3. Synthèse des tendances des indices des radiosondages.

La plupart des indices des radiosondages³²(21/24) présentent des expressions (équations) différentes des propriétés thermodynamiques (degré de stabilité) de la colonne d'air sondée. La plupart de ces indices (18/21) sont affectés (Tab. 3) par des tendances significatives positives ou négatives au moins au niveau de l'une des stations de l'étude, confirmant les résultats dégagés à partir des (corps des) radiosondages et des réanalyses. Trois sur trois des indices caractérisant les propriétés hygrométriques de l'air sont affectés aussi, par des tendances significatives ((+)/(-)) au moins au niveau d'une seule des stations de l'étude.

Tableau 3. Synthèse des tendances (Test Mann-Kendall) significatives (positives : (+) et négatives : (-)) des indices des radiosondages (1980-2016) dans quelques stations météorologiques de la Méditerranée occidentale.

N°:	Stations	Identifiant de la station (OACI)	Propriétés thermodynamiques															P. hygrométriques								
			Showalter Index	Lifted Index	LIFT computed using virtual temperature	SWEAT Index	K Index	Cross totals index	Vertical totals index	Totals totals index	Convective Available Potential Energy	CAPE using virtual temperature	Convective Inhibition	CINS using virtual temperature	Equilibrium Level	Equilibrium Level using virtual temperature	Level of Free Convection	LFCT using virtual temperature	Temp [K] of the Lifted Condensation Level	Pres [hPa] of the Lifted Condensation Level	Mean mixed layer potential temperature	Mean mixed layer mixing ratio	Precipitable water [mm] for entire sounding			
1	Alger	DAAG																						(+)		
2	Tunis-Carthage	DTTA	(-)	(-)	(-)		(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)	(-)
3	Trapani	LICT		(-)			(+)	(+)	(+)																	(+)
4	Rome (LIRE-P. Di M.)	LIRE	(-)	(-)	(-)	(+)		(+)		(+)				(-)		(+)	(+)	(+)					(+)	(+)		
5	Ajaccio Nap. Bonap.	LFKJ		(-)	(-)	(+)	(-)		(+)					(-)	(-)					(-)	(+)					
6	Nimes-Courbessac	LFME			(-)	(+)	(-)		(+)											(-)	(+)					

Conclusion

Les propriétés thermiques, hygrométriques et thermodynamiques de la troposphère ouest-méditerranéenne commencent à refléter, assez clairement déjà, certains impacts du réchauffement global. Ces impacts prennent des aspects variés d'une station météorologique à l'autre (facteurs géographiques variés). L'adoption d'un outil d'investigation plus élaboré (ACP) qu'une statistique élémentaire permettrait de mieux définir/mesurer les interactions du couple « substrat-troposphère » ouest-méditerranéen. Ces interactions doivent présenter des aspects saisonniers différenciés. Un second volet de cette étude permettrait, dans ces conditions, de mieux caractériser les tendances climatiques ouest-méditerranéenne sur des bases théoriques plus approfondies (analyse multivariée) et à des échelles temporelles fines.

Bibliographie

- El Melki T., 2012 : Précipitations annuelles à Tunis Carthage et indices de radiosondages. *Publications de l'AIC*, XXV, 261 - 266.
- El Melki T., 2014 : *Climatologie dynamique de la Tunisie*. Publication de la Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités, Université de la Manouba, Tunis. 326 p.
- El Melki T., 2016 : Précipitations saisonnières à Tunis-Carthage et indices de radiosondages. *Publications de l'AIC*, XXIX, 249 - 254.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, A. Leetmaa, B. Reynolds, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K. C. Mo, C.

³² Une description détaillée de ces indices est disponible ici : <http://weather.uwyo.edu/upperair/indices.html>

EXTREMES HYDROLOGIQUES ET INONDATIONS DANS LA COMMUNE D'ATHIEME AU BENIN : DIAGNOSTICS ET GESTION

BESSAN M. V.¹, VISSIN E. W.¹, OGOUWALE E.¹, AGBOSSOU E. K.², OZER P.³

¹Laboratoire Pierre Pagny Climats, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, 03 BP 1122, Jéricho, Bénin. modesbessan@yahoo.fr

¹Laboratoire Pierre Pagny Climats, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, 03 BP 1122, Jéricho, Bénin. exlaure@yahoo.fr, ogkelson@yahoo.fr

²Institut National de l'Eau (INE), Université d'Abomey-Calavi Bénin, 01BP 526, euloge.agbossou@gmail.com

³Département des Sciences et Gestion de l'Environnement, Université de Liège, Campus d'Arlon, Avenue de Longwy 185, B-6700 Arlon, Belgique, pozer@ulg.ac.be

Résumé : Autrefois qualifiées de naturelles, les inondations dans la Commune d'Athiémé semblent survenir à un rythme accéléré et sont plus dévastateurs. Cette étude analyse les véritables causes des inondations et évalue leurs modes de gestion. La méthodologie utilisée est focalisée sur l'examen des pluies et débits quotidiens de 1960 à 2012, la caractérisation des événements extrêmes à partir d'indices hydrologiques et la détermination des périodes de retour des inondations par la distribution de Gumbel. Des entretiens auprès des personnes ressources des institutions ont permis d'évaluer les politiques publiques de réduction des inondations. Il ressort que les pluies et débits qui ont engendré des inondations sont souvent normaux avec des périodes de retour de moins de 6 ans. Les inondations sont alors amplifiées par des facteurs anthropiques, la dégradation de l'environnement et surtout l'inefficacité voire l'inexistence de mesures publiques de réduction.

Mots-clés : Extrêmes hydrologiques, inondation, politiques publiques, Athiémé

Abstract : *Hydrological extremes and flooding in the commune of Athieme in Benin: diagnostics and management*

Once described as natural, the flooding in the Commune of Athieme seem to occur at an accelerated rate and are more devastating. This research analyzes the real causes of the floods and evaluates their management systems. The methodology used focuses on examining daily rainfall and flows from 1960 to 2012, characterizing extreme events from hydrological indices, and determining the periods of flooding return by Gumbel distribution. Interviews with resource persons of the institutions enabled the assessment of public policies of reduce flooding. It is clear that the rains and flows that have caused flooding are often normal with a return period below 6 years. Flooding are then amplified by anthropogenic factors, environmental degradation and, above all, the inefficiency or even the lack of public policies to reduce them.

Keywords : *Hydrological extremes, flooding, public policies, Athieme*

Introduction

La commune d'Athiémé au Bénin est confrontée aux inondations annuelles dont la fréquence et l'ampleur des dégâts commencent à effrayer les populations et même les décideurs politiques (Houessou, 2009). Selon l'UNDAC (2010), ces inondations ont engendré d'énormes dégâts en 2010 telles la perte de 60% des produits agricoles et d'élevage, la destruction des routes et des habitations, des incidences sanitaires, des pertes en vies humaines, etc. Les causes de ces inondations font de plus en plus objet de discussions entre les acteurs. Pour la majorité des autorités politiques et même des populations, les crues du fleuve Mono et le barrage de Nangbéto en seraient les principaux responsables. Par contre, pour la Communauté Electrique du Bénin (CEB) et Coyne et Bellier (1998), les variabilités climatiques en seraient l'origine. Pour Ago *et al.*, (2005), les pressions anthropiques et la poussée démographique expliquent mieux l'ampleur et la fréquence élevée des inondations. Face à cette polémique sur les causes des inondations, cette étude vise à déterminer les facteurs amplificateurs des inondations dans la commune d'Athiémé.

1. Présentation du milieu d'étude

La commune d'Athiémé est située au sud-ouest du Bénin entre 6°25' et 6°43' de latitude nord et entre 1°32' et 1°48' de longitude est (figure 1). Elle couvre une superficie de 238 km² et regorge de cours et plans d'eau (fleuve Mono, Lac Toho, etc.). Sa population est en pleine croissance et est passée de 39.481 habitants en 2002 à 56.247 habitants en 2013 (RGPH4).

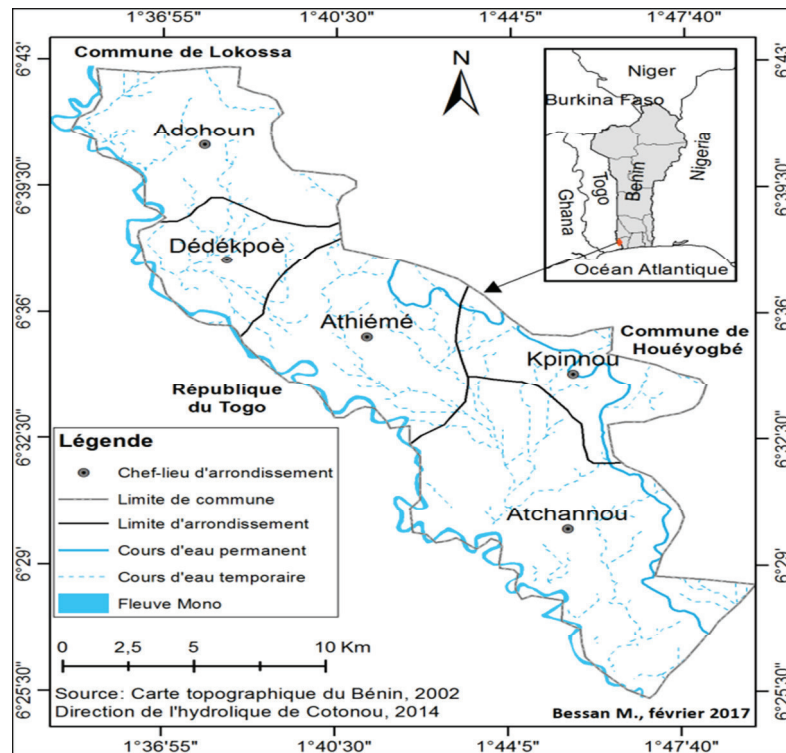


Figure 1. Situation géographique de la commune d'Athiémé

2. Données

Les données utilisées sont les hauteurs de pluies quotidiennes et les débits journaliers des stations pluviométrique et hydrométrique d'Athiémé sur la période de 1960 à 2012. Ces données ont été obtenues à l'ASECNA Bénin (pluies) et à la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE Bénin) pour les débits. Elles sont complétées par des données socio-économiques collectées dans la Commune pour l'analyse de la gestion des inondations.

3. Méthodes

3.1. Analyse des évènements hydrologiques (pluviométriques et hydrométriques)

La détection des anomalies pluviométriques et hydrométriques a été réalisée grâce au calcul de l'indice normalisé (I_n) qui traduit un excédent ou un déficit hydrologique. L'indice (I_n) est une variable centrée réduite qui peut être positif ou négatif et s'exprime par la formule (Servat *et al.*, 1999) : $I_n = \frac{X - \bar{X}}{\sigma(x)}$ avec X = la valeur de la variable ; \bar{X} = la moyenne de la série ; $\sigma(x)$ = Ecart-type de la série. Si $I_n \geq 2$, on est en période extrêmement humide ; si $1,5 < I_n \leq 1,99$, la période est fortement humide ; si $1 < I_n < 1,49$, la période est modérément humide et si $0 < I_n < 0,99$ la période est normalement humide (McKee *et al.*, 1993).

Les événements pluvieux extrêmes ont été analysés sur la base d'indices que sont : le total pluviométrique (PTOT), le nombre total de jours humides (pluies journalières ≥ 1 mm, PJ), la pluie maximale enregistrée en 1 jour (P_{x1J}) et les quantiles : 95^{ème}, 99^{ème} et 99,5^{ème} percentiles (Hountondji *et al.*, 2011). Pour les débits, le total hydrométrique (DTOT), les débits caractéristiques de crue (DCC) et les débits maximaux (Dmax) ont été calculés. Des tests d'homogénéité de Pettitt (1979) et de Buishand (1984) ont été ensuite appliqués sur ces séries pour mettre en évidence d'éventuelles ruptures. Enfin, l'existence d'une tendance linéaire (à la hausse ou à la baisse) et sa significativité sont déterminées à partir de la statistique t de Student.

3.2. Identification des périodes de retour (PR)

La distribution de Gumbel a été appliquée aux pluies et aux débits journaliers pour caractériser les périodes de retour (PR) des inondations. Un événement est qualifié de très exceptionnel si sa PR est au-delà de 100 ans, d'exceptionnel si la PR est dans l'intervalle de 30 à 100 ans, de très anormal si la PR est comprise entre 10 à 30 ans, d'anormal si la PR est située entre 6 à 10 ans et de normal si la PR est moins de 6 ans (Vandiepenbeeck, 1997).

3.3. Enquête de terrain

Une enquête a été conduite au près des institutions aux niveaux national et communal pour évaluer les politiques publiques de gestion des inondations. A cet effet, un choix raisonné basé sur les données des Plateformes Nationale et Communale de Réduction des Risques de Catastrophes et d'Adaptation aux Changements Climatiques a permis de sélectionner 22 institutions actives et d'interviewer 50 personnes ressources, membres des dites institutions.

4. Résultats

4.1. Evolution des précipitations et des débits annuels

La figure 2 montre une légère tendance à la baisse des pluies de 1960 à 2012 et une légère tendance à la hausse des débits de 1960-2011. Soumises au test *t* de Student, aucune de ces tendances n'est significative. Mais l'étude des indices a permis d'identifier 19 années humides sur chaque série. Ainsi, on distingue pour les pluies, 3 années (1963, 1968, 2000) extrêmement humides, une année fortement humide (2007), 5 années modérément humides (1962, 1978, 1991, 1999, 2010) et 12 années normalement humides. Les périodes de hauts débits sont les décennies 1960-1968 et 1998-2008, caractérisées respectivement par des pluies excédentaires et une fluctuation de périodes pluvieuses humides et sèches.

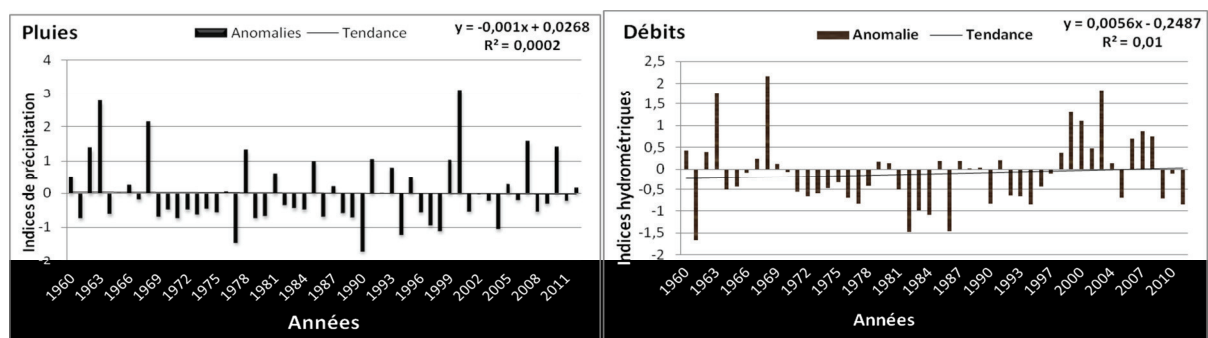


Figure 2. Evolution des indices annuels de pluies (1960-2012) et de débits (1960-2011) à Athiémé

Les tests d'homogénéité de Pettitt (1979) et Buishand (1984) appliqués à ces deux séries n'ont détecté aucune rupture.

4.2. Tendances de quelques événements pluviométriques extrêmes

La figure 3 présente la tendance des pluies maximales enregistrées en un jour (P_{x1J}) et des événements pluvieux extrêmes (pluies $\geq 99^{\text{ème}}$ percentile : P_{99p}). Elle révèle une tendance générale à la baisse qui est statistiquement non significative ($p > 0.05$) pour les pluies maximales journalières ($p=0.656$) de même que pour les jours de pluies extrêmes ($p=0.242$). La pluie maximale quotidienne sur la période 1960-2012 à Athiémé est de 151 mm. Elle a été enregistrée le 18/09/1986, qui correspond à une année normalement sèche ($0 \leq I_n \leq -0,99$). D'après les enquêtes de terrain, aucune inondation n'a été enregistrée en cette année.

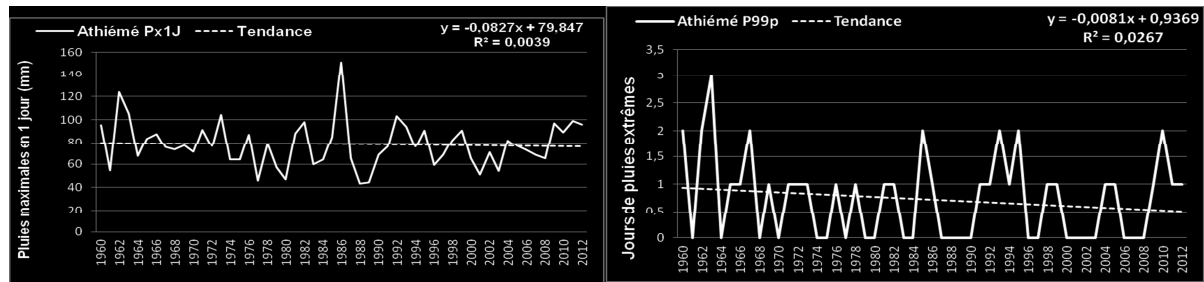


Figure 3. Tendance des pluies maximales journalières et des jours de pluies extrêmes de 1960 à 2012 à Athiémé

Les événements extrêmes quant à eux, ont été définis à partir du seuil de 73.8 mm de pluies et la fréquence de pluies extrêmes la plus élevée a été enregistrée en 1963 (3), année extrêmement humide ayant causé d'inondations destructrices.

4.3. Tendance de quelques événements hydrométriques extrêmes

La figure 4 montre l'évolution des débits maximaux annuels et des débits caractéristiques de crue de 10 jours (DCC_10j) de la période 1960 à 2011 à Athiémé.

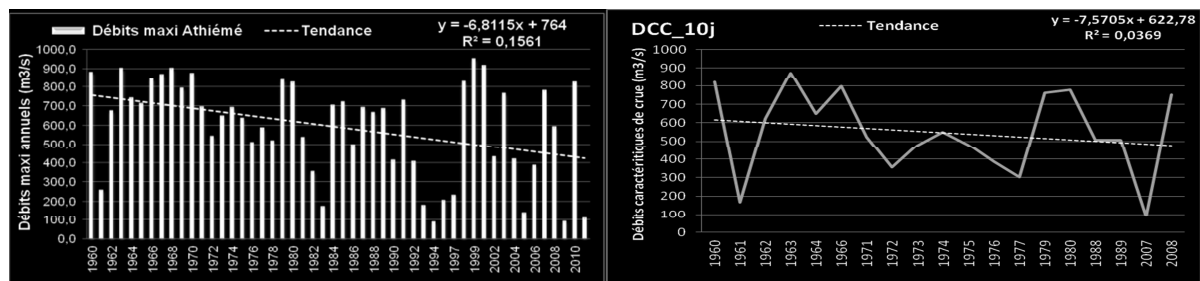


Figure 4. Variation des débits maximaux et des débits caractéristiques de crue de 10 jours (DCC_10j) à Athiémé

Les débits maximaux annuels présentent une tendance importante à la baisse qui est significative car la probabilité p du test t de Student est de 0,0049. Par contre, la baisse observée au niveau des débits caractéristiques de crue au bout de 10 jours d'accumulation des eaux de ruissèlement est aussi prononcée mais n'est pas statistiquement significative. Les débits les plus élevés ont été enregistrés en 1963 (899.9 m³/s), 1999 (951 m³/s), 2000 (915.3 m³/s), et 1968 (899.3 m³/s) et les crues les plus élevées ont été observées en 1960, 1963, 1968, 2008. Ces années correspondent à celles humides, qui ont enregistré des inondations ; ce qui signifie que les débits et les crues participent à l'enclenchement des inondations. Par ailleurs, les débits caractéristiques de crue ont connu une baisse de 1970 à 1980 qui correspond à une période déficitaire sur le plan pluviométrique. Ce qui démontre l'existence d'une corrélation entre pluies et débits.

4.4. Périodes de retour (PR) des pluies et débits maximaux

Dans l'objectif de vérifier si les inondations destructrices enregistrées sur la période 1960-2012 à Athiémé grâce aux enquêtes de terrain (1963, 1995, 1999, 2000, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012) sont dues aux pluies et aux débits maximaux, les dates exactes (jours, mois et années) de ces événements hydrologiques et leurs périodes de retour ont été identifiés. Le résultat est présenté dans le tableau 1 ci-dessous.

Il ressort qu'aucune des années ayant connu d'inondations destructrices n'a enregistré de pluie à caractère exceptionnel. Outre l'année 1963, ayant connu une pluie de 105 mm (très normale, PR=10.5ans), les autres années d'inondation présentent des pluies pour la majorité normales (PR<6ans). Une analyse analogue effectuée avec les débits indique que les inondations dévastatrices à Athiémé sont causées par des pluies et débits majoritairement

anormaux (PR entre 6 et 10 ans). On retient que les inondations destructrices enregistrées n'ont pas pour causes majeures les pluies et débits maximaux.

4.5. Politiques publiques de gestion des inondations

Les politiques publiques de réduction des inondations au niveau communal prennent en compte un cadre juridique constitué de la loi N°97-029 du 15 janvier 1999 portant organisation des communes en République du Bénin et ses décrets et arrêtés d'application. Le cadre institutionnel comprend la plateforme Communale de Réduction des Risques de Catastrophe et d'Adaptation au Changement Climatique (PCRRC-ACC) dont la présidence est assurée par le maire. Pour être opérationnel, ce cadre institutionnel s'appuie sur des stratégies telles la prévision, les mesures normatives et réglementaires pour l'occupation des zones à risques, l'information-sensibilisation-éducation et alerte des populations, les outils de planification (le plan de contingence communal et le Schéma Directeur d'Aménagement Communal).

Tableau 1. Période de retour (PR) des pluies et débits maximaux des années d'inondations recensées

Années d'inondations	Px1J (mm)	PR (années)	Qualification de l'évènement	Dates exactes	Catégorie d'années
1963	105	10.5	Très anormale	17/06/1963	Extrêmement humide $I_n \geq 2$
1995	91	5	normale	22/04/1995	Normalement humide $0 < I_n < 0,99$
1999	91	5	normale	24/04/1999	Modérément humide: $1 \leq I_n \leq 1,49$
2000	65	1	normale	23/08/2000	Extrêmement humide $I_n \geq 2$
2004	82	3	normale	21/06/2004	Modérément sèches $-1 \leq I_n \leq -1,49$
2005	76	2.5	normale	14/09/2005	Normalement humide $0 < I_n < 0,99$
2006	72	2	normale	28/03/2006	Normalement sèches $0 \leq I_n \leq -0,99$
2007	68	1	normale	12/05/2007	Fortement humides: $1,5 \leq I_n \leq 1,99$
2008	65	1	normale	26/01/2008	Normalement sèches $0 \leq I_n \leq -0,99$
2009	97	6.5	anormale	29/09/2009	
2010	89	4	normale	05/08/2010	Modérément humide: $1 \leq I_n \leq 1,49$
2011	99.2	7.5	anormale	10/07/2011	Normalement sèches $0 \leq I_n \leq -0,99$
2012	96.1	6	Anormale	20/06/2012	Normalement humide $0 < I_n < 0,99$

Mais les enquêtes de terrain ont révélé que ce dispositif communal est défaillant et totalement déséquilibré à Athiémé. En effet, le mécanisme de prévention actuel est précaire et théorique (système d'observation du climat vétuste, non application et ignorance des textes juridiques, mauvaise politique d'aménagement du territoire, etc.). Pour preuve, la commune ne dispose que de 1200 mètres linéaires de caniveaux non entretenus et de 600 mètres de pavés concentrés au centre, ce qui ne suffit pas à drainer les eaux de pluie. La gestion des urgences est caractérisée par une insuffisance du mécanisme de coordination et de communication et par le déplacement de quelques sinistrés dans les écoles, églises, etc., la distribution de vivres et autres. Enfin la gestion post-catastrophe est quasi-inexistante. Cette situation qui révèle l'inefficacité des politiques publiques s'ajoute à la précarité des stratégies endogènes des populations pour mieux justifier l'accroissement de la vulnérabilité des populations de Athiémé face aux inondations.

Discussion

Les résultats révèlent que les extrêmes pluviométriques et hydrométriques sont en baisse alors que les inondations dévastatrices sont en nette augmentation à Athiémé. Or la pluie et l'effet conjugué des débits constituent les facteurs naturels sans lesquels on ne saurait parler d'inondation. On constate aussi qu'à Athiémé, les débits ont un effet déclencheur des inondations plus prononcé que les pluies. Ceci est lié à la topographie de la commune (située à basse altitude entre 10 et 25 m, elle reçoit et concentre les eaux de pluies provenant du

bassin supérieur du fleuve Ouémé situé à plus de 600 m d'altitude). Mais, ces facteurs naturels ne sont pas les véritables causes de la fréquence élevée des inondations et de l'intensité des dégâts observée de nos jours. En effet, ces facteurs sont accentués par des paramètres physiques tels le réseau hydrographique dense avec un système de drainage très faible, des sols hydromorphes quasi-imperméables, etc. qui prédisposent le milieu aux inondations. A ces derniers, s'ajoutent des éléments socio-économiques et politiques (croissance démographique, forte destruction du couvert végétal, accroissement des terres agricoles, occupation des zones humides, précarité des mesures endogènes de lutte contre les inondations, insuffisance et inefficacité des politiques publiques de gestion des inondations, système d'aménagement du territoire inapproprié, etc.) qui accentuent les inondations et amplifient les dégâts observés. Tout ceci est couronné par les impacts des lâchers du barrage de Nangbéto érigé en amont du fleuve Mono au Togo qui favorise un écoulement permanent en période d'étiage. Des auteurs (Sene et Ozer, 2002 ; Hangnon *et al.*, 2015) sont parvenus à la même conclusion en ce qui concerne les véritables causes des inondations ces dernières décennies en Afrique de l'Ouest.

Conclusion

Les extrêmes hydrologiques (pluies et débits maximaux) ne sont pas les causes majeures de la fréquence élevée des inondations et de l'amplification de leurs dégâts dans la commune d'Athiémé. Celles-ci sont plutôt dues aux actions humaines, aux défaillances dans l'aménagement du territoire et dans les politiques de gestion.

Bibliographie

- Ago E. E., Petit F. et Ozer P. 2005 : Analyse des inondations en aval du barrage de Nangbetto sur le fleuve Mono (Togo et Bénin). *Geo-Eco-Trop*, **29**, 1-14
- Buishand T. A. 1984 : Tests for detecting a shift in the mean of hydrological time series. *Journal of Hydrology*, vol. 73, **1**, 51-69.
- Coyne et Bellier 1998: Etude d'environnement de l'aménagement hydroélectrique d'Adjarala (Togo-Bénin) : Impacts hydrobiologiques sur le système fluvio-lagunaire. *Résumé. CEB, Banque Mondiale*, 59 p.
- Hangnon H. Y., De Longueville F. et Ozer P. 2015: Précipitations extrêmes et inondations à Ouagadougou : quand le développement urbain est mal maîtrisé. *Actes du 28e Colloque de l'AIC*. Liège, Belgique, 497-502
- Houessou A. P. V. 2009 : Conséquences de la non maîtrise des eaux des bassins hydrographiques du Bénin: Athiémé disparaît sous les eaux du Mono. *INFO Magazine d'information sur l'eau et l'environnement*, 6-7
- Hountondji Y.C., De Longueville F., Ozer P., 2011 : Trends in extreme rainfall events in Benin (West Africa), 1960-2000. *Proceedings of the 1st International Conference on Energy, Environment and Climate Change*, 26-27 August 2011, Ho Chi Minh City, Vietnam. <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/96112>.
- Mckee T. B. Doesken N. J., Kleist J. 1993 : The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Preprints, 8th Conference on Applied Climatology*. 17-22 January, Anaheim, CA, 179-184.
- Pettitt A.N. 1979 : A non-parametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, **28**, **2**, 126-135.
- Sene S., Ozer P., 2002 : Évolution pluviométrique et relation inondations-événements pluvieux au Sénégal. *Bulletin de la société géographique de Liège*, **42**, 27-43
- Servat É., Paturel J. E., Lubès-Niel H., Kouamé B., Masson J. M., Travaglio M. et Marieu B. 1999 : De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 12, **2**, 363-387
- Undac, 2010 : *Rapport de la mission d'évaluation rapide des effets de l'inondation par l'équipe UNDAC dans le Mono*. Bénin. PNUD. 50 p.
- Vandiepenbeeck M. 1997 : Bilan climatologique saisonnier. Hiver 1997 : Une période de froid remarquable. *Cielet Terre*, **113**, 65-66.

ETUDE DES VARIATIONS CLIMATIQUES A LA REGION NORD-OUEST DU MAROC, DEBITS DE PROJET "BASSIN D'OUED BEHT"

SEBBAR A.¹, HSAINE M.¹, FOUGRACH H.¹, HAMA S.², AJEDDOU M.², BADRI W.¹

¹Faculté des Sciences Ben M'Sik, Université Hassan II- de Casablanca, Laboratoire Ecologie et Environnement. Mail : sebbar202@gmail.com.

²Direction de la Météorologie Nationale (DMN), B.P. 8088 Casa-Oasis ; Casablanca, Maroc. Mail : saad91hamma@gmail.com

Résumé - Ces dernières années, les sécheresses et les inondations qui ont touché l'Afrique du Nord ont été marquées par des intensités et des extensions très remarquables. Dans ce cadre, nous nous proposons, d'étudier la variabilité climatique de la région nord-ouest du Maroc et de prédéterminer les débits de projet dans le bassin d'oued Beht sur la période 1970-2013. Ainsi, d'une part, nous avons identifié les différentes configurations climatiques pour la zone étudiée, d'autre part, une analyse quantitative et tendancielle des régimes pluviométrique et thermique, a été effectuée. Enfin, pour prédéterminer les débits de projet du bassin d'oued Beht, nous avons appliqué des deux méthodes ; la méthode Gradex et la méthode rationnelle.

Mots-Clés : Variabilité climatique, tendance, débits, Maroc

Abstract - Study of the climatic variations in the northwest region of Morocco, flows of project "pond of Beht river. These last years, the droughts and the floods which affected North Africa were marked by intensities and very noticed extensions. In this context, we suggest us studying climatic variability in the northwest region of Morocco and predetermining the flows of project in the pond of Beht river over the period 1970-2013. On one hand, we identified the various climatic configurations of the studied zone, on the other hand, a quantitative and trend analysis of the pluviometric and thermal diets was made. Finally, the application of both methods ; Gradex and rational has allowed us to predetermine the flows of project of the pond of Beht river.

Keywords : Climatic variability, trend, flows, Morocco.

Introduction

Ces dernières années, des variations climatiques sans précédent ont été observées en Afrique du Nord. Ces événements caractérisés par une augmentation des précipitations et une multiplication des événements climatiques extrêmes pourraient s'intégrer dans cette dynamique globale de changement climatique (GIEC, 2007 ; Karrouk, M. S., 2007). Cette nouvelle tendance s'exprime déjà par une hausse des températures confirmée dans plusieurs pays (Badri *et al.*, 1994 ; Sebbar *et al.*, 2012 ; Nouaceur, 2012). Le Maroc qui fait partie des pays de la rive sud méditerranéenne, n'a pas échappé à cet évolution (Sebbar *et al.*, 2011). En effet, au Maroc, les signes de ces variations s'avèrent encore plus significatives au cours des années (2009, 2010, 2013 et 2014) (Sebbar *et al.*, 2014).

Dans ce cadre, nous avons exploité les données de 12 stations sur la période 1970-2013, afin d'étudier la variabilité climatique de la région nord-ouest du Maroc et ce d'une part, pour déceler les différentes configurations climatiques de la zone d'étude et comprendre la dynamique de ce changement, d'autre part, pour prédéterminer les débits de projet au niveau du sous bassin d'oued Beht pour anticiper les inondations qui menacent cette région.

1. Zone d'étude et base de données

La région nord-ouest du Maroc intègre une partie du bassin de Sbou, l'Ouest du bassin de Loukkos et la partie nord du bassin de Bouregreg. Située au nord-ouest du pays, limitée à l'Ouest par l'océan Atlantique et par la chaîne du moyen Atlas à l'Est et par la mer Méditerranée au Nord. La zone d'étude est caractérisée, par une altitude qui varie entre 4 m à Kenitra et 1660 m à Ifrane et peut atteindre jusqu'à 2428 m en haute montagne. Cette région reçoit des cumuls pluviométriques annuels allant de 408 mm à Casablanca jusqu'à 1062 mm à Chefchaoun (fig. 1). Ces cumuls diminuent du nord vers le sud hors relief, et inversement

pour les températures. Ces dernières varient en moyenne de 18°C à 31°C respectivement de la côte vers l'intérieur. Il convient de signaler suite à sa position géographique, cette région est soumise à plusieurs influences: l'océanité, l'altitude, la latitude et l'exposition des versants. En effet, le climat régnant est, globalement, de type méditerranéen à influence océanique allant du semi-aride à l'humide.

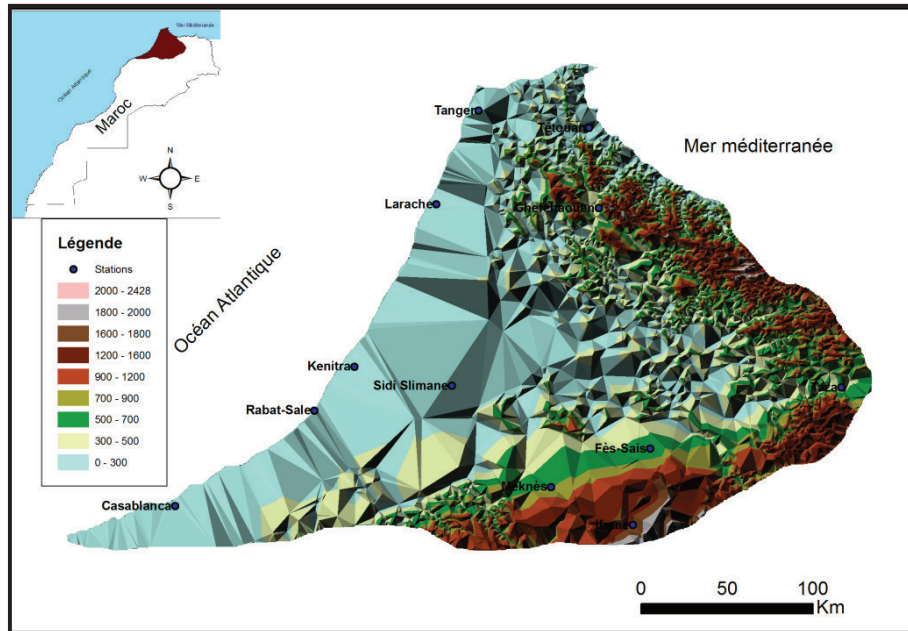


Figure 1. Localisation des stations étudiées et l'altitude en (m)

La base de données utilisée dans ce présent travail provient de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN). Elle se compose des données mensuelles, saisonnières et annuelles des températures maximales et minimales moyennes, et des cumuls pluviométriques. Nous avons retenu 12 stations pour la période 1970-2013. Le choix des stations s'appuie sur trois critères : 1) des séries d'observations complètes (si la série présente une à deux années de données manquantes, nous avons rétabli les valeurs saisonnières et mensuelles par la méthode de Laborde et Mouhous, 1998, tandis qu'avec trois années consécutives continues de lacunes, la série a été écartée) ; 2) une répartition spatiale relativement uniforme ; 3) des stations issues de réseaux professionnels.

1.1. Traitement et analyse des données

Compte tenu de l'exposition de chaque bassin versant, et du climat dominant, le comblement des données manquantes a été réalisé, d'une part, à partir de la pluviométrie et en fonction de l'altitude, d'autre part, entre stations principales (de références) et stations secondaires appartenant au même domaine climatique. De la même manière, nous avons procédé à des corrélations au pas de temps mensuel, puis annuel entre toutes les stations pluviométriques mises à notre disposition deux à deux. L'homogénéité des séries a été vérifiée et ajustée par l'application du test d'homogénéité normal standard (SNHT) (fig. 2) disponible dans le logiciel AnClim (Stèpànek, 2005). La méthode du double cumul (fig. 3) a été utilisée pour confirmer les résultats obtenus avec AnClim. Par ailleurs, on considère une variation climatique lorsqu'une rupture est vérifiée dans les stations voisines, tandis qu'un changement qui ne se manifeste que dans la station choisie, n'est pas considéré comme une variation climatique (Sebbar et al., 2013).

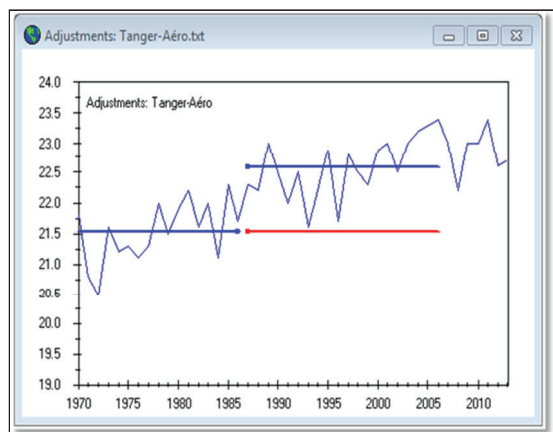


Figure 2. Homogénéité des pluies annuelles: Tanger.

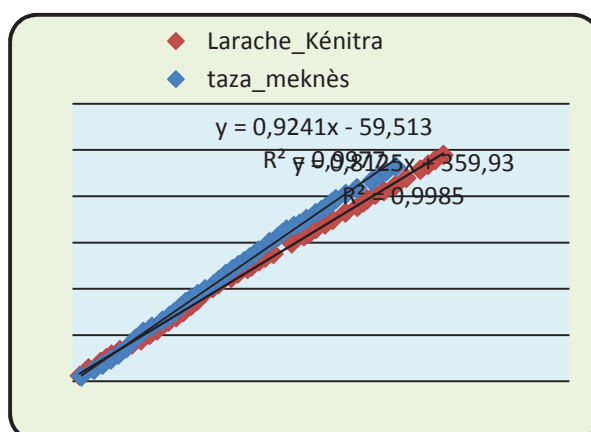


Figure 3. Double Cumul entre stations : Taza, Meknès, et Larache, Kenitra

1.2. Méthodologie

Dans un premier temps, nous avons calculé les écart-types et les coefficients de variations afin de quantifier la variabilité climatique (Tab., 1), puis établi et analysé les tendances linéaires des séries annuelles des précipitations et celles des températures maximales et minimales, ainsi, nous avons opté pour le test non paramétrique sur les rangs de Mann Kendall (Sneyers, 1990) au seuil de 95%. Par la suite, déceler les différents étages climatiques de la zone d'étude, en calculant les indices climatiques à savoir ; l'indice de De Martonne et le coefficient d'Emberger (indices classiques) et l'indice d'aridité (UNEP, 1997), ce dernier, est un indicateur du degré d'aridité du climat à un endroit donné par rapport à la demande évaporative de l'atmosphère ($AI = P/ETP$) (Moukhtari *et al.*, 2013). En vue d'effectuer un zonage climatique de la région, nous avons appliqué une Analyse en Composantes Principales (ACP) avec la normalisation de Kaiser sur 44 ans pour 23 paramètres des 12 stations pour un seuil de signification $p < 0,05$. Ces paramètres sont : Latitude (Lat) ; Longitude (Long) ; Altitude (Alt) ; Pluies mensuelles (P_{mois}) ; Pluies saisonnières (P_{saison}) ; Pluies annuelles (P_{an}) ; Températures maximales (T_{max}) ; Températures minimales (T_{min}) ; Amplitude thermique (M-m)

La deuxième partie a été consacrée à la prédétermination des débits de projet sur le bassin d'Oued Beht. Pour ce faire, nous avons délimité le bassin versant en question grâce au logiciel ArcGIS, avant de générer ses caractéristiques, déterminer le temps de concentration par la méthode de Passini. Pour l'ajustement des précipitations maximales journalières annuelles au niveau du bassin, nous avons appliqué la loi de Gumbel. Le calcul des débits de projet a été effectué par la méthode rationnelle et celle du Gradex.

2. Résultats et discussion

2.1. La variabilité climatique de la région nord-ouest du Maroc

D'après le tableau 1, il ressort que l'ensemble des stations retenues, présentent des coefficients de variation annuels (Cv) qui varient entre 28,3 % à Chefchaouen et 35,6 % à Casablanca. Ils sont faibles, pour les stations situées en montagnes, alors qu'ils sont relativement élevés sur les côtes et au Sud de la zone d'étude. Cela montre que l'irrégularité pluviométrique est d'autant plus élevée que l'aridité est plus importante. D'autre part, le calcul des indices climatiques ($Q2$: coefficient d'Emberger ; Id : indice de De Martonne ; AI : indice d'aridité UNEP) a permis d'identifier trois types de climat ; semi-aride, subhumide et l'humide (fig., 4).

Tableau 1. Stations retenues et leurs caractéristiques (1970-2013).

Stations	Long (Dg Déc.)	Lat (Dg Déc.)	Alt (m)	Pluies annuelles (mm)	Ecart type σ (mm)	Cv (%)	Q ₂	I _d	AI	Type de climat
Tanger	-5,54	35,43	15	702	227	32	49	25,2	0,87	Subhumide
Larache	-6,60	35,90	66	679	232	34	118	24,5	0,85	Subhumide
Kenitra	-6,35	34,18	4	556	168	30	91	20	0,69	Subhumide
Rabat-Sale	-6,45	34,20	74	527	181	34	91,2	19,2	0,67	Subhumide
Casablanca	-7,40	33,60	56	408	145	36	78,5	14,6	0,51	Semi-aride
Sidi Slimane	-6,30	34,13	50	417	123	30	49	14,1	0,46	Semi-aride
Chefchaouen	-5,18	35,10	287	1066	513	28	122	39	1,34	Humide
Tétouan	-5,19	35,34	40	668	226	34	111	23,5	0,80	Subhumide
Fès-Sais	-4,58	33,55	571	503	156	31	56	18,6	0,64	Semi-aride
Meknès	-5,31	33,52	556	527	154	29	63,7	19,3	0,65	Semi-aride
Taza	-4,01	34,13	509	592	193	33	66,2	21	0,68	Subhumide
Ifrane	-5,10	33,30	1663	970	299	31	110	44,5	1,59	Humide

(Q₂ : coefficient d'Emberger ; I_d : indice de De Martonne ; AI : indice d'aridité UNEP.

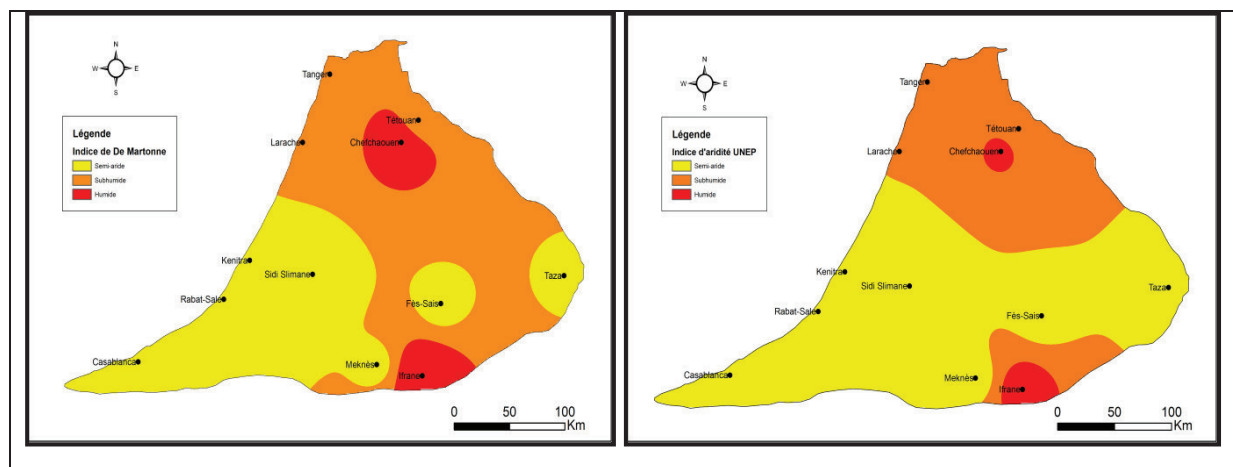


Figure 4. Indice de De Martonne et Indice d' Aridité UNEP à la région Nord-Ouest du Maroc

La figure 5 montre les résultats obtenus par l'ACPR avec un degré de signification au alentour de 79 % de la variance totale entre les paramètres et leurs composantes.

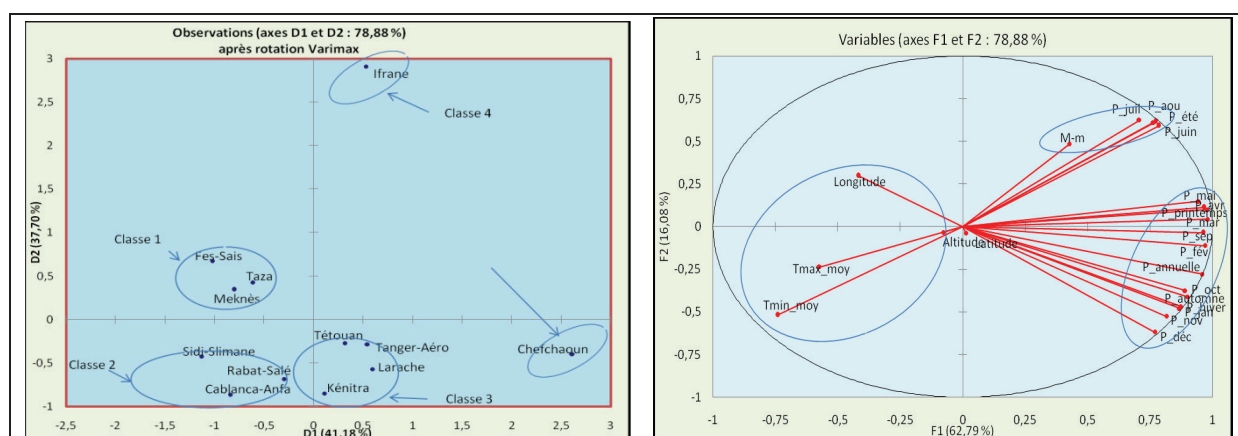


Figure 5. Résultats de l'ACPR-VARIMAX, à la région Nord-ouest du Maroc pour la période 1970-2013

Ceci nous renseigne sur les différentes configurations climatiques de la zone d'étude, à savoir 4 classes. La classe 1, représente respectivement les stations du plateau central et les

stations côtières méridionales de la zone d'étude, avec un climat semi-aride, alors que la classe 3, regroupe les stations côtières du tangérois avec un climat subhumide. La classe 4, représente respectivement les hautes altitudes au Moyen Atlas et au Rif avec un climat humide.

2.2. Prédétermination des débits de projet.

Après avoir délimité le sous-bassin versant d'oued Beht (fig. 6), nous nous sommes intéressés à l'application des méthodes hydrométéorologiques pour ressortir les débits de projets. Par ailleurs, toute étude ou projet qui a pour but le dimensionnement d'un ouvrage ou la gestion d'un bassin versant nécessite la connaissance ou l'estimation des débits de projet de différents temps de retour. La méthode que nous avons adoptée pour estimer les débits de pointe, dont les périodes de retours sont inférieures à 100 ans, est la méthode rationnelle alors que, les périodes de retours supérieures à 100 ans, nous avons opté pour la méthode dite Gradex.

Après ajustement des pluies maximales selon la loi de Gumbel (fig. 6) et prédétermination des débits max (Tab. 2), ainsi on a décelé d'éventuelles situations de retour qui présentent des menaces d'inondation alarmantes.

D'une part, pour une période de retour de 5 ans ou de 10 ans, apparait des situations de retour dont le débit max dépasse $400 \text{ m}^3/\text{s}$, tandis que pour 50 ans correspond a un débit max aux alentours de $650 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tab. 2). D'autre part, pour les périodes qui dépassent 100 ans, les débits max peut atteindre $2000 \text{ m}^3/\text{s}$.

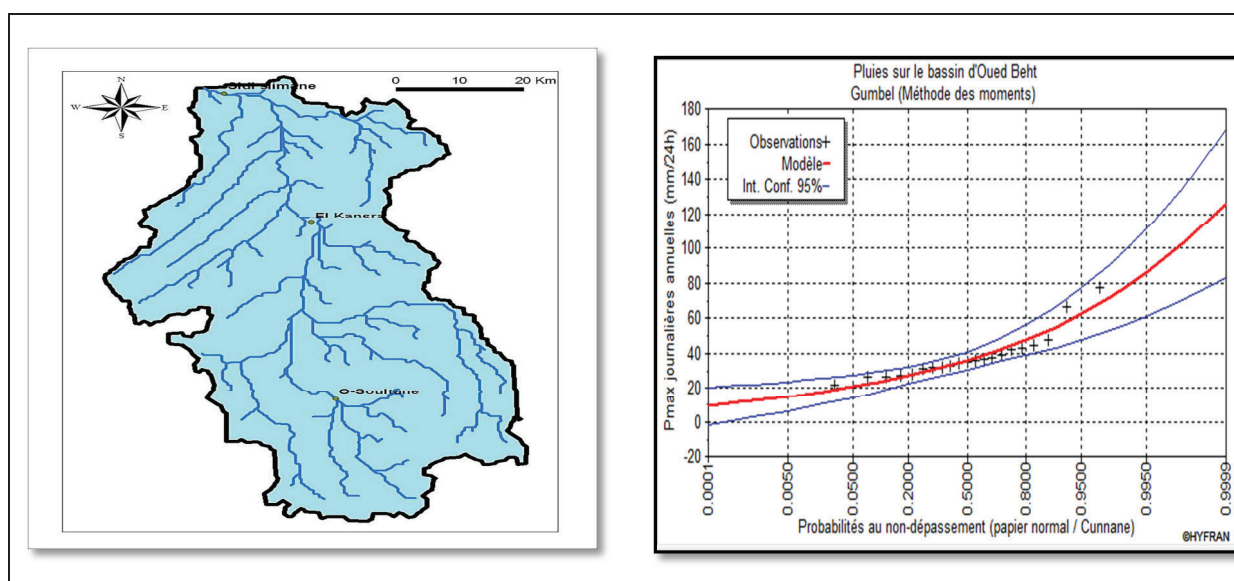


Figure 6. Sous bassin versant d'oued Beht et Modélisation des pluies selon la loi de Gumbel par « Hyfran».

Tableau 2. Calcul des débits de pointe pour chaque période de retour par la méthode rationnelle et celle du Gradex en prenant un coefficient de pointe $C_{\text{Pointe}}=1,5$.

Période de retour (an)	2	5	10	20	50	100	500	1000	2000	10000
Probabilité de non dépassement	0,5	0,8	0,9	0,95	0,98	0,99	0,998	0,999	0,9995	0,9999
Variable réduite de Gumbel $u(T)$ [-]	0,367	1,5	2,25	2,97	3,902	4,600	6,214	6,907	7,601	9,210
Débit max Q_{max} [m^3/s] [méthode du Gradex]						1554,39	2283,87	2597,48	2910,98	3638,73
Débit de pointe						2331,59	3425,81	3896,22	4366,47	5458,10

Q_{pointe} [m ³ /s] [méthode du Gradex]									
Débit max Q_{max} [m ³ /s] [méthode rationnelle]	319,5	422,7	492	557,3	642,6				

Conclusion

La région nord-ouest du Maroc est caractérisée par, une variabilité climatique relativement élevée et un climat fortement influencé par l'océanité, l'altitude et l'exposition des versants. De plus, les résultats du découpage et des indices climatiques, signalent que cette région présente trois zones climatiques homogènes (semi-aride, subhumide et l'humide). D'autre part, le calcul des valeurs de débits max et des pluies maximales pour différentes périodes de retour montre des pics étonnants (récente inondation du 22 février 2017 à la ville de Rabat-Salé avec 80 mm au cours de quatre heures). Ces résultats constituent des informations pertinentes pour les décideurs afin d'anticiper à une échelle du temps relativement longue et d'adopter les bonnes mesures stratégiques de protection, d'atténuation et d'adaptation. Ces données permettront aussi aux différents acteurs travaillant sur notre zone d'étude, de disposer de valeurs fiables et récentes pour les dimensionnements d'ouvrages hydrauliques et pour une évaluation de la vulnérabilité régionale. Toutefois, il convient de signaler que l'extension de cette étude sur d'autres bassins de la région, sera d'une grande utilité comparative.

Bibliographie

- Badri W., Gauquelin T., Minet J., Savoie JM., 1994 : Données météorologiques nouvelles sur le massif de l'Oukaimeden (2570 m, Haut Atlas de Marrakech, Maroc) : un exemple de climat de haute montagne méditerranéenne. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **7**, 190-8.
- GIEC. 2007: Impacts adaptation and vulnerability, Summary for policymakers, Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change. Web site: www.ipcc.ch
- Karrouk, M. S., 2007 : Climate change and its impacts in Morocco. Regional Climate Variability and its Impacts in The Mediterranean Area, 253-267.
- Laborde J.-P., Mouhous N., 1998 : Notice d'installation du logiciel HYDROLAB. Équipe de gestion et Valorisation de l'Environnement, Nice, 4 p.
- Mokhtari N., Mrabet R., Lebailly P., & Bock L. 2013 : Spatialisation des bioclimats, de l'aridité et des étages de végétation du Maroc. *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, **2**(1), 50-66.
- Nouaceur Z., Laignel B. et Dieppois B., 2012 : Évaluation des récents changements climatiques sur le littoral atlantique mauritanien. *Actes du XXVe colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Grenoble*, 583-588.
- Sebbar A., Fougrach H., Hsain M., Saloui A., Badri W., 2011 : Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935 – 2004). *Sécheresse*, **22**, 139-48.
- Sebbar A., Fougrach H., Hsaine M. et Badri W., 2012 : Étude des variations climatiques de la région centre du Maroc. *Actes du XXVe colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Grenoble*, 709-714.
- Sebbar A., Hsaine M., Fougrach H. et Badri W., 2013 : Carte des précipitations annuelles au Maroc (1935/2006). *Actes du XXVIe colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Cotonou*, 475-480
- Sebbar A., Hsaine M., Fougrach H., Saloui A., Badri W., 2014 : Retour des pluies au Maroc méridional. *Actes du XXVIIe colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Dijon*, 596- 600.
- Sneyers R., 1990: On the statistical analysis of observation. Technical Note N. 143, WMO.
- Stèpànek P., 2005: AnClim – software for time series analysis. Dpt of Geog, Fac, of Nat Sc, MU Brno, 1, 47.

ANALYSE DES ZONES A RISQUES D'INONDATION DANS LE BASSIN VERSANT DU FLEUVE OUEME A BETEROU AU BENIN (AFRIQUE DE L'OUEST)

KOUDAMILORO O.^{1,2}, VISSIN E. W.¹, DIPAMA J. M.²

¹Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE) Université d'Abomey-Calavi (République du Bénin), [olivierkoudamiloro@ymail.com, exlaure@gmail.com]

²Laboratoire d'Etude et de Recherche sur les Milieux et Territoires (LERMIT). Université de Ouagadougou, [jmdipama@yahoo.fr]

Résumé : L'objectif de ce travail est d'analyser les zones à risques d'inondation dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou. Pour atteindre cet objectif, des données climatologiques (hauteur de pluies journalières et mensuelles) de 1965 à 2012 ont été collectées. Les données vectorielles d'occupation des terres de la zone d'étude sont extraites de la base de données de l'IFN-2006 et actualisées à partir des images satellites. *L'analyse des résultats montre que les zones de faible vulnérabilité à l'inondation couvrent 80 % du secteur d'étude et sont rencontrées un peu partout sur le bassin. Les secteurs de vulnérabilité modérée à l'inondation occupent 15 % du territoire. et ceux de fortes vulnérabilités occupent 5 % du bassin. Pour les inondations les zones à risque faible moyen fort couvrent respectivement 8 %, 87 %, 5 % de la superficie du secteur d'étude.*

Mots clés : Bétérou, risques d'inondation, vulnérabilité.

Abstract : The objective of this work is to analyze the zones at risk of flooding in the watershed of Ouémé in Bétérou. To achieve this objective, climatological data (height of daily and monthly rains) from 1965 to 2012 were collected. Land-use vector data from the study area are extracted from the IFN-2006 database and updated from the satellite images. Analysis of the results shows that areas with low vulnerability to flooding cover 80% of the study area and are encountered throughout the basin. Areas of moderate vulnerability to flooding occupy 15% of the territory. And those with high vulnerabilities occupy 5% of the basin. For floods, the medium-high risk zones cover respectively 8%, 87% and 5% of the area of the study area.

Keywords : Bétérou, flood risks, vulnerability.

Introduction

Les climats de l'Afrique de l'Ouest et du Bénin subissent de fortes variations et les conséquences restent néfastes pour le développement durable (Ogouwalé, 2001). Cette crise climatique peut être attribuable à l'absence, la rareté, l'excès ou la mauvaise répartition spatio-temporelle des pluies (Vissin, 2007) ; ou encore à des choix sociaux qui relèguent la prévention des risques à un rang trop bas sur les listes de priorités (Dionne, 2006).

Signalons également qu'en raison de leurs répercussions immédiates et durables sur le milieu naturel, les questions de changements et de variabilité climatiques font partie désormais des préoccupations des scientifiques dans le monde. Le Bénin n'est pas épargné par ces événements extrêmes qui se traduisent par des bilans souvent très lourds en termes de pertes en vies humaines, de destructions de biens et de dégradation de l'environnement (CPP, 2008).

À l'instar de certains pays du monde, le Bénin a connu aussi, une année 2010 particulièrement désastreuse. En effet, dans la période du 1er septembre au 24 novembre 2010, l'ensemble du territoire béninois a été frappé par des pluies régulières et diluviennes qui ont entraîné des inondations catastrophiques aux dégâts très lourds : 55 communes sur les 77 que compte le Bénin ont été touchées et à des degrés divers (OMS Bénin, 2011).

Aussi les extrêmes pluviométriques associés en partie à l'augmentation de la vapeur d'eau atmosphérique vont s'accroître avec la variation climatique renforçant ainsi le cycle de l'eau. Il faut donc s'attendre au cours des années à venir à des situations contrastées alternées de sécheresse et d'excédents pluviométriques (Issa, 1995). Il paraît donc nécessaire d'analyser les zones à risques d'inondation dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou. Le bassin de

l'Ouémé à Bétérou est situé au nord du Bénin et a pour coordonnées géographiques : les latitudes 9°30' et 10°00' au nord, et les longitudes 1°30' et 2°48' est (figure 1).

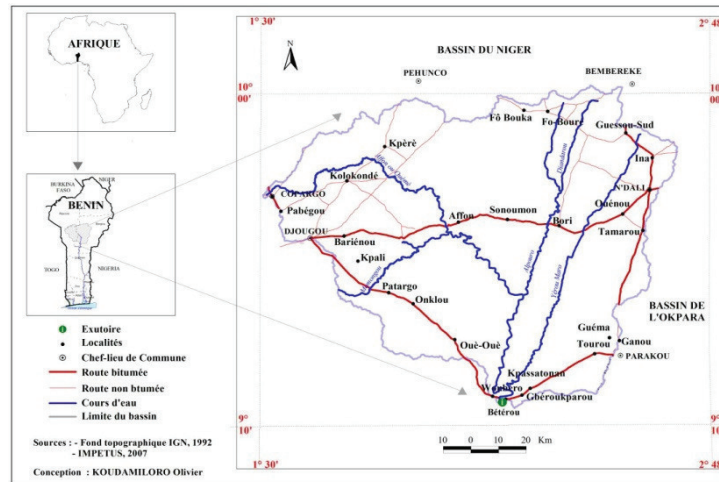


Figure 1. Situation géographique du bassin de l'Ouémé à Bétérou

2. Données et Méthodes

2.1. Données

Des données climatologiques (hauteur de pluies mensuelles) sur la période de 1965 à 2012 sont obtenues à l'ASECNA. Les données vectorielles d'occupation des terres de la zone d'étude sont extraites de la base de données de l'IFN-2006 et actualisées à partir des images satellites (Images Landsat 8_OLI-TIRS, 2013 de 30 m de résolution ; Images GeoEye II, 2010-2012 de 0,5 m résolution).

Des cartes géologiques au 1/200 000 du bassin versant, fournies par l'ORSTOM ont permis d'apprécier la géologie du terrain. Le traitement d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT) extrait du SRTM 90 m a servi à l'extraction des détails sur la morphologie du terrain. L'état des sols a été défini à partir des données vectorielles du projet IMPETUS-Bénin. Etant donné le caractère multisources des données, plusieurs types de traitement ont été nécessaires. La numérisation du réseau hydrographique a été réalisée avec le logiciel ArcGIS 10.

2.2. Méthodes

2.2.1. Approche cartographique du risque d'inondation dans le bassin

Le risque d'inondation par débordement des cours d'eau résulte de la combinaison de la vulnérabilité à l'inondation et de l'aléa à l'inondation (Saley *et al.*, 2003).

2.2.2. Cartographie de l'aléa d'inondation

Deux paramètres sont retenus pour cartographier l'aléa. À partir des données de précipitations (1965 - 2012), la carte des isohyètes est établie. Trois classes de pluviosité sont définies : faible, forte et très forte. Le deuxième paramètre est la couverture du sol. En prenant en compte le rôle des différentes classes d'occupation de sol (Saley *et al.*, 2005) dans la production des écoulements de surface, une classification est réalisée et a permis de retenir trois classes : rôle faible (forêt dense semi-décidue et plantation), rôle fort (champs et jachères), très fort (agglomérations, formations marécageuses et plan d'eau).

2.2.3. Cartographie de la vulnérabilité à l'inondation

Les variables nécessaires à la détermination de cette vulnérabilité sont de plusieurs types, car c'est l'action combinée de plusieurs facteurs qui provoque les inondations (Dia *et al.*, 2006). Il s'agit de la densité de drainage, la géologie, le domaine structural, le drainage souterrain, la pente et la perméabilité induits par le type de sol, etc. Seules les données sur le réseau hydrographique, la densité de drainage, la géologie, la pente et la pédologie sont considérées dans le cadre de ce travail en raison du manque de données actualisées et formalisées pour les autres paramètres.

2.2.4. Cartographie du risque d'inondation

Pour obtenir la carte du risque d'inondations par débordement, la combinaison par codification des cartes de vulnérabilité et de l'aléa a été faite.

3. Résultats

3.1. Evaluation de l'aléa à l'inondation du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

Une analyse complète et fiable du risque lié aux inondations ne peut donc s'affranchir d'un de ces deux éléments, à savoir l'aléa et la vulnérabilité, et doit intégrer de manière précise l'ensemble de leurs caractéristiques. Ainsi, pour cartographier l'aléa d'inondation (figure 3), la carte de l'occupation du sol (figure 2a) et la carte des champs pluviométriques (figure 2b) ont été préalablement établies (figure 3).

L'analyse de la figure 2 révèle d'une part que l'aléa fait référence aux phénomènes hydroclimatiques et à leurs conséquences sur l'écoulement des eaux. C'est la pluviosité qui déclenche les inondations (figure 2b). Cette figure 2b révèle que la station de Djougou est la plus arrosée (1244 mm). Un champ modéré s'observe au centre (entre 1080 et 1100 mm). La figure 2a montre que le bassin versant de l'Ouémé est dominé par les mosaïques de champs et de jachères qui sont répartis un peu partout dans le bassin versant. Les formations du couvert végétal naturel sont constituées de minces forêts galeries, des forêts claires et de savanes boisées, des poches de forêt dense semi-décidue et de savanes arborées et arbustives.

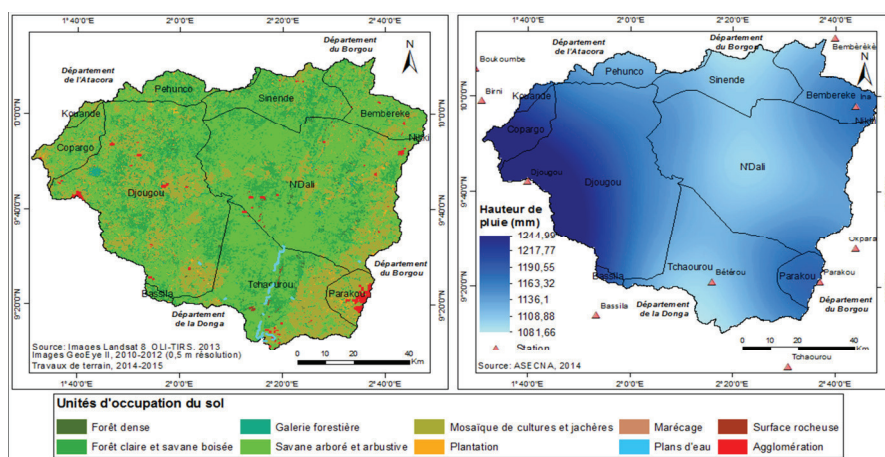
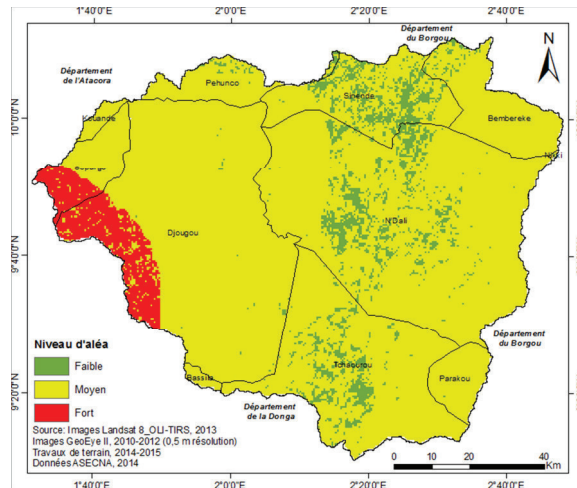


Figure 2. Répartition d'occupation du sol et intensité pluviométrique

Il faut donc retenir que c'est le croisement ou la superposition de ces deux facteurs (pluviosité et couvert végétal) qui a permis de cartographier l'étendue spatiale et les zones potentiellement exposées aux aléas climatiques pouvant engendrer des inondations dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou (figure 3).

De l'analyse de la figure 3, il ressort que la zone à faible aléa occupe 7,31 %, ces zones à aléa faible sont dispersées sur l'ensemble du territoire et correspondent aux secteurs à couverture végétale moyennement dense (mosaïque forêt-culture, savane). Les zones à aléa moyen occupent une grande partie de l'ensemble du bassin versant. Elles représentent 87,75 % soit 8841,91 km² de la superficie. L'aléa fort occupe 4,94 % soit 497,37 km². Les localités de Djougou, Copargo, et Bassila sont situées dans cette zone. Ces résultats constituent des balises pour tous travaux d'aménagement hydroagricole.

Figure 3. Présentation l'aléa d'inondation dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou



3.2. Secteurs vulnérables à l'inondation du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

La vulnérabilité à l'inondation identifie tous les secteurs où les caractéristiques intrinsèques de l'environnement (caractéristiques géologiques et géomorphologiques) sont susceptibles de favoriser une inondation.

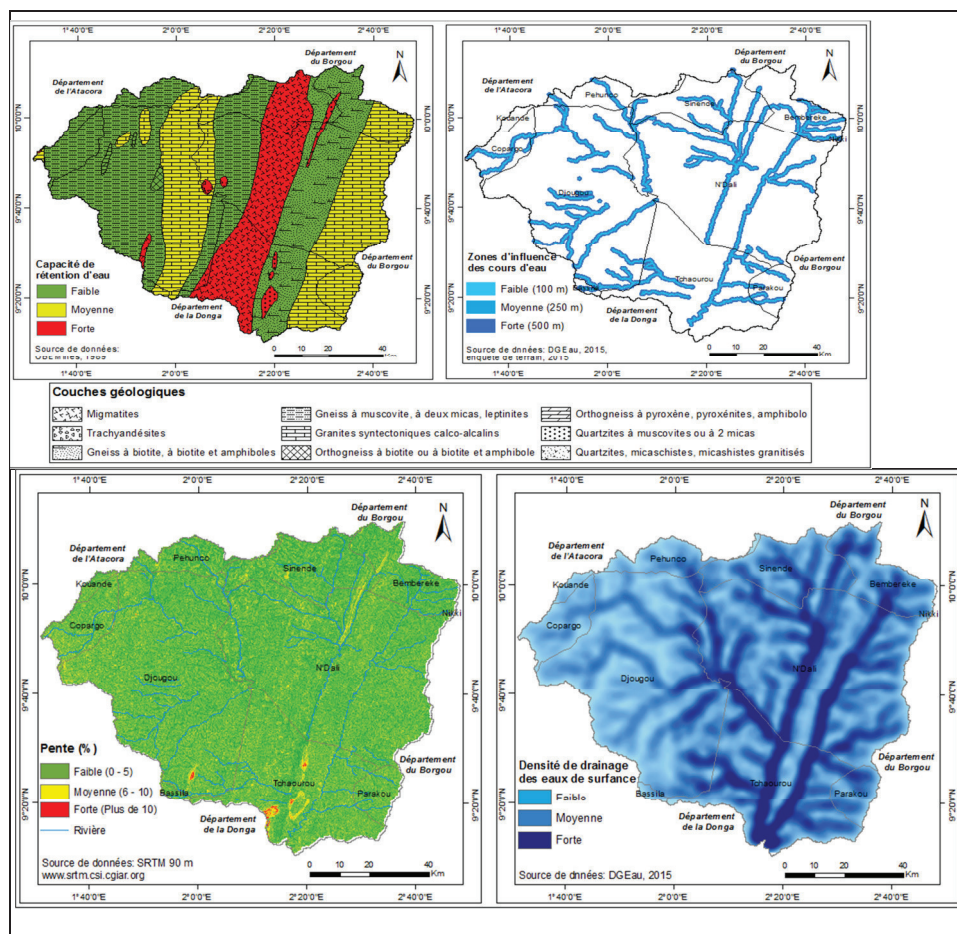
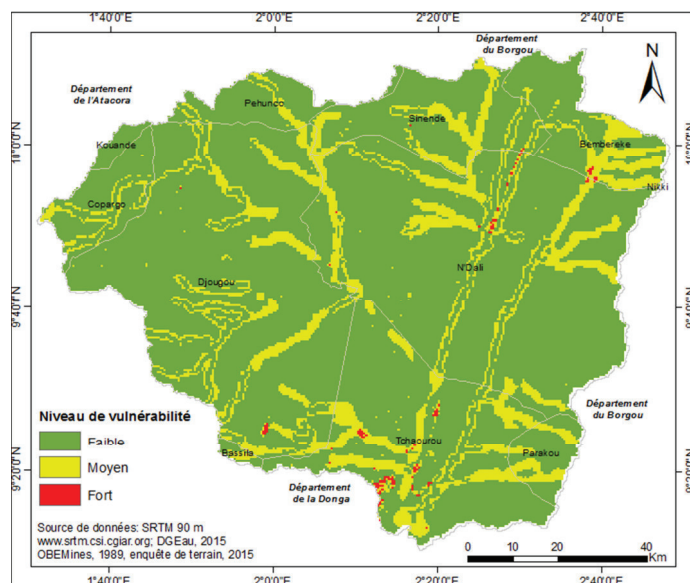


Figure 4. Différentes cartes thématiques pour l'établissement de la carte de vulnérabilité à l'inondation : a) carte des domaines lithostructuraux; b) carte des zones d'influence des cours d'eau ; c) carte des pentes ; d) carte de densité de drainage

Cette figure 4 présente les caractéristiques géomorphologiques (pente du terrain, réseau de drainage) et géologiques (domaines litho-structuraux) du bassin de l'Ouémé à Bétérou. Ce sont les différents facteurs pris en compte dans la cartographie de la vulnérabilité à l'inondation. L'analyse croisée de ces facteurs dans le SIG a permis donc l'élaboration de la carte de vulnérabilité à l'inondation dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou (figure 5).

Les zones de faible vulnérabilité à l'inondation couvrent 80 % du secteur d'étude et sont rencontrées un peu partout sur le bassin. Les zones de vulnérabilité modérée à l'inondation sont situées aux abords du lit mineur et aux points les plus bas du lit majeur du fleuve Ouémé et ses affluents dont les importantes sont la Donga, la Wèwè et la Térôu. Ces zones occupent 15 % du territoire. Les zones de forte vulnérabilité à l'inondation occupent 5 % du territoire.



Ces zones sont disséminées sur le bassin dans les milieux où les pentes sont fortes.

Figure 5. Vulnérabilité à l'inondation du bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

3.3. Secteurs à risque d'inondation dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

L'analyse croisée des facteurs relatifs à la vulnérabilité du terrain à l'inondation et des facteurs hydroclimatiques à l'intérieur d'un SIG a permis de cartographier les zones à risque d'inondation. La figure 6 présente les zones à risque d'inondation évaluées par le croisement des cartes thématiques relatives à la vulnérabilité à l'inondation et à l'aléa (facteur déclencheur). L'analyse de la figure 6 montre des secteurs à risque faible, moyen et fort aux inondations dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou. Les zones à risque faible couvrent 8 % du territoire d'étude, les zones à risque moyen couvrent 87 % du territoire. Les zones à fort risque sont situées dans les secteurs à pente moyenne ou faible, avec un couvert plus ou moins dense, elles occupent 5 % du territoire et s'étendent principalement dans la partie Ouest, dans la zone de Djougou. Ces zones présentent un danger évident lors des crues. Le risque d'inondation étant préalablement défini comme le croisement de l'aléa et à la vulnérabilité, il faut donc retenir qu'un aléa d'inondation fort dans une zone faiblement vulnérable est fortement risqué.

En somme, la carte de risque à l'inondation établie définit l'étendue et l'importance des inondations et constitue une base solide pour des campagnes d'informations aux populations, informer les autorités régionales responsables des éventuels aménagements à entreprendre et pour délimiter les zones à haut risque.

Conclusion

Au terme de cette étude, il faut signaler que le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou, les aléas forts sont obtenus dans les zones de forte concentration d'agglomérations, présence de

plans d'eau, de marécages et de routes, forte intensité de pluie. Les aléas moyens dans des zones de faible concentration des localités, avec présence de plans d'eau, de marécages et de routes avec une intensité de pluie moyenne. Par contre les zones caractérisées par une quasi-absence de localités, et les zones de végétation naturelle ont des aléas de niveau faible. Donc il serait bon de voir dans les études futures pour réduire les effets néfastes directs ou indirects des aléas sur le système agroalimentaire et les populations.

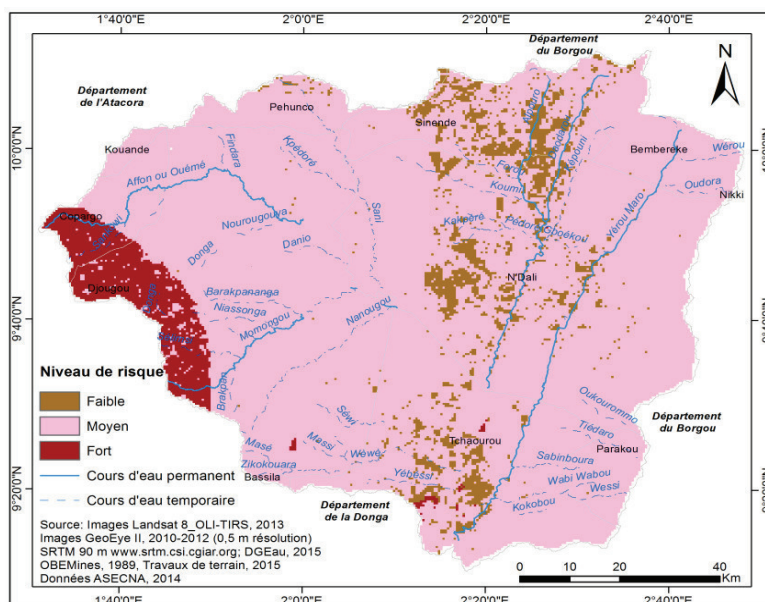


Figure 6. Carte des zones à risques d'inondation dans le bassin versant de l'Ouémé à Bétérou

Bibliographie

- BAD, 2012: *Document de stratégie Pays 2012-2016*. Bénin. Département Régional Ouest à ORMA. 40 p.
- CPP, 2008: *Catastrophes environnementales. Préparer l'évaluation de leur effet et le retour d'expérience*. Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables. Paris, 56 p
- Dia A.M., Kouamé J., Wade S., Rudant J.P: 2006: Application of Remote Sensing and GIS in natural disaster risk management: Case study of the Senegal river flood monitoring project (GESCAN), *Communication and poster to the International Disaster Reduction Conference (IRDC)*. Davos, Switzerland, August 27th – September 2
- Dionne G., 2006 : *Gestion des risques*. Rapport d'activités du 1^{er} juin 2005-31 mai 2006. Chaire de recherche du Canada sur la gestion des risques, mai 2006, HEC Montréal
- Issa M. S. 1995 : *Impacts potentiels d'un changement climatique dû au doublement du CO₂ atmosphérique sur l'agriculture en République du Bénin*. Mémoire de DESS. Université Senghor d'Alexandrie, 113 p.
- Ogouwalé E., 2001 : *Vulnérabilité /Adaptation de l'agriculture aux changements climatiques dans le département des collines*. Mémoire de maîtrise de Géographie, Université d'Abomey-Calavi, 119p.
- OMS Bénin, 2011: *Inondations au Bénin: le Bénin sous l'eau*. Bulletin électronique du Bureau de la représentation de l'OMS au Bénin N° 007. Mai 2011. Bénin Santé Plus. 3 p.
- Saley M.B., Kouame K.F., Penven M.J., Biemi J. & Kouadio B.H., 2005 : Cartographie des zones à risque d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'Ouest de la Côte d'Ivoire: Apports des MNA et de l'imagerie satellitaire. *Téledétection*, Vol 5, n°1-2-3, pp. 53-67.
- Saley M.B., 2003 : *Système d'information hydrogéologique à référence spatiale, discontinuité pseudo- image et cartographie thématique des ressources en eau de la région semi-montagneuse de Man (Ouest de la Côte d'Ivoire)*. Thèse unique de doctorat, université de Cocody. *European Scientific Journal*, vol.10, No.2 pp170-191
- Vissin E.W., 2007 : *Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger*. Thèse de Doctorat, Université de Bourgoigne, 310 p.

ESTIMATION DES CHUTES DE NEIGE A PARTIR DES TEMPÉRATURES ET DES PRÉCIPITATIONS MOYENNES MESURÉES EN SUISSE

FALLOT J.-M.

Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne, Bâtiment Géopolis, Quartier UNIL-Mouline, CH-1015 Lausanne (Suisse), Jean-Michel.Fallot@unil.ch

Résumé – *Ce papier présente une méthode empirique pour estimer les chutes de neige moyennes à partir des précipitations et températures moyennes mensuelles mesurées sur des périodes de 30 ans par 28 stations climatiques en Suisse. Les chutes de neige ainsi estimées sont assez proches ($\pm 25\%$) de celles mesurées par ces stations pour 2 périodes étudiées de 31 ans. On peut ainsi estimer assez précisément les chutes de neige moyennes en des endroits où elles ne sont pas ou plus mesurées si on dispose de données pluviométriques et thermiques sur des périodes de 30 ans. On peut également faire des projections dans le futur des chutes de neige en Suisse à partir de ces estimations et des prévisions des modèles climatiques régionaux effectuées pour les températures et précipitations moyennes sur des périodes de 30 ans. Les chutes de neige annuelles devraient diminuer de 35 à 42% au-dessous de 1400 m/mer et de 25 à 35% plus haut en Suisse d'ici à la fin du 21^{ème} siècle.*

Mots-clés : *Régression, chutes de neige, précipitations totales, températures de l'air.*

Abstract – *Snowfalls assessment from mean temperatures and precipitation measured in Switzerland.*

This paper presents an empirical method for assessing mean snowfalls from mean precipitation and temperatures measured over 30-year periods by 28 climate stations in Switzerland. Estimated and measured snowfalls are near (25%) for two studied 31-year periods. So mean snowfalls can be estimated enough accurately at locations where they are not or no more measured if precipitation and temperatures data are available over a 30-year period. Mean snowfalls can also be predicted in the future in Switzerland from such assessments and projections carried out by regional climate models for mean temperatures and precipitation over 30-year periods. Yearly snowfalls should decrease between 35 and 42% below 1400 m a.s.l. and between 25 and 35% above 1400 m a.s.l. in Switzerland up to the end of the 21st century.

Keywords : *regression, snowfalls, total precipitation, air temperature.*

Introduction

La neige constitue un élément du climat important en montagne, pour le tourisme d'hiver et les ressources en eau. Plusieurs études révèlent que le réchauffement du climat a entraîné une diminution de la couverture neigeuse dans de nombreuses régions de l'hémisphère Nord (IPCC, 2013), en particulier dans les Alpes suisses (Klein *et al.*, 2016). La proportion des chutes de neige par rapport aux précipitations totales tend également à diminuer dans plusieurs régions montagneuses des latitudes moyennes aux USA (Knowless *et al.*, 2006), au Tibet (Wang *et al.*, 2016) et dans les Alpes (Serquet *et al.*, 2011). Ces tendances devraient se poursuivre, voire s'accélérer dans le futur, selon les modèles climatiques globaux et régionaux (IPCC, 2013), notamment dans les Alpes (Marty *et al.*, 2017).

Le réseau de mesures de MétéoSuisse comprend environ 600 stations pluviométriques pour les précipitations et 140 stations climatiques pour les autres paramètres. Mais les stations climatiques sont de plus en plus automatisées et comportent de moins en moins d'observateurs pour mesurer certains paramètres particuliers comme les chutes de neige fraîche ou l'épaisseur du manteau neigeux. Il en résulte une disparition progressive des mesures in situ de la neige par les stations de MétéoSuisse, alors que ce paramètre varie aussi fortement à l'échelle locale que les précipitations dans une topographie accidentée.

D'où l'intérêt de pouvoir estimer les chutes de neige moyennes à partir des températures et des précipitations mesurées par les stations de MétéoSuisse. Cette étude a donc pour objectif de développer une méthode simple pour de telles estimations à l'échelle mensuelle sur des

périodes de 20 ou 30 ans. Il s'agit tout d'abord de déterminer un rapport moyen entre les chutes de neige et les précipitations moyennes d'un mois en fonction de sa température. La détermination d'un tel rapport permettrait notamment d'estimer les chutes de neige moyennes dans les endroits où on ne dispose que de mesures des précipitations totales, car les températures moyennes mensuelles peuvent être calculées sur des périodes de 20 ou 30 ans dans les endroits où ce paramètre n'est pas mesuré à partir de mesures effectuées par les stations climatiques de MétéoSuisse en d'autres endroits de la Suisse (Fallot, 2012).

1. Données et méthodes

Pour cette étude, nous avons analysé les températures, les précipitations totales (en mm) et les chutes de neige (en cm) moyennes mensuelles mesurées chaque mois par 28 stations de MétéoSuisse situées dans le Jura et les Alpes à des altitudes comprises entre 750 et 2700 m/mer (figure 1). Les stations au-dessous de 750 m/mer n'ont pas été retenues ici, car elles se caractérisent par des chutes de neige moyennes faibles, même en hiver. Ces analyses ont été réalisées pour la période 1972-2002, car elle comporte le plus de stations avec des mesures simultanées des températures, des précipitations et de la neige en Suisse.

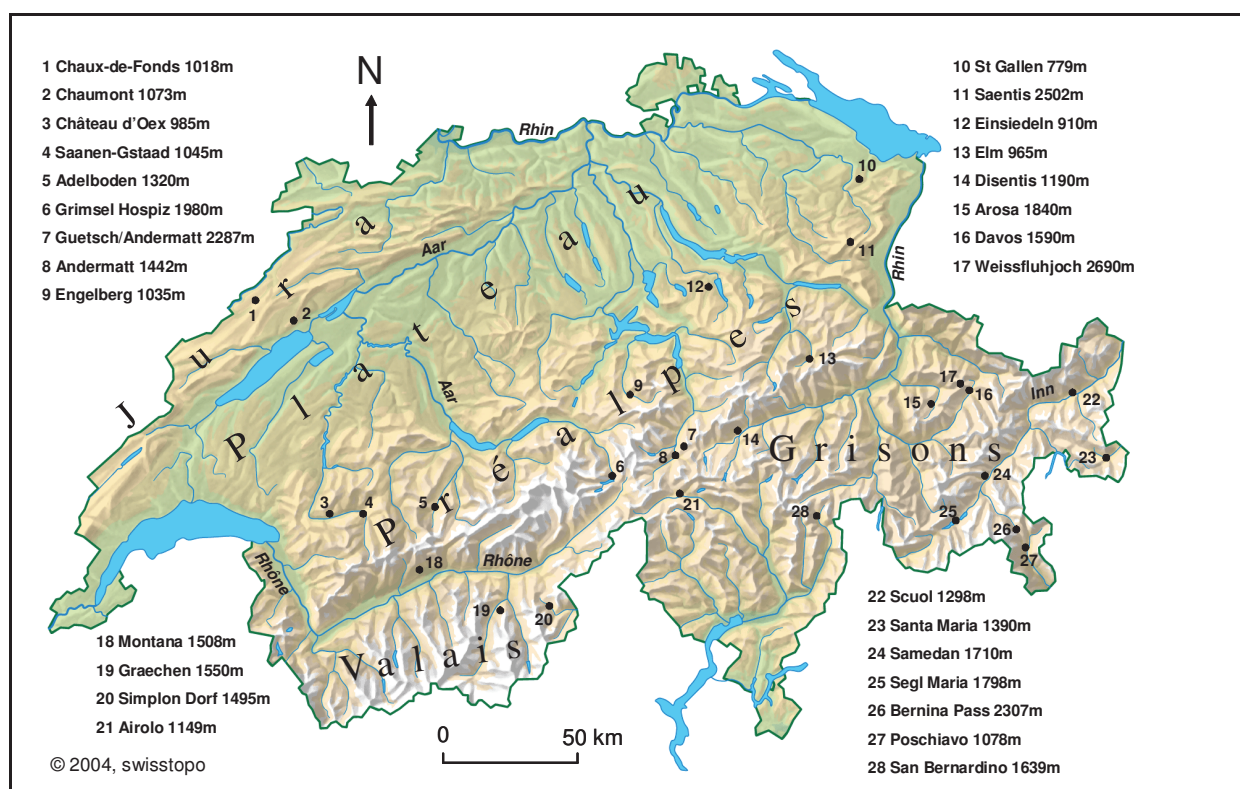


Figure 1. Localisation des stations climatiques étudiées en Suisse avec des mesures de la neige de 1972 à 2002.

Pour chaque mois de l'année, un rapport moyen a été calculé entre les précipitations et les chutes de neige mesurées sur l'ensemble de la période étudiée. Des régressions ont été calculées entre ces rapports (abrégié RPCN pour Rapport entre les Précipitations et Chutes de Neige) et les températures moyennes de chaque mois mesurées sur l'ensemble de la période 1972-2002, afin de voir comment ces RPCN varient en fonction de la température aux différents endroits. Les courbes de régression ainsi obtenues ont ensuite permis de calculer les chutes de neige moyennes pour chaque mois et de les comparer avec celles mesurées par chaque station pour la période 1972-2002 et une autre période de 31 ans (1941-1971) où des mesures de neige sont disponibles.

2. Résultats et discussion

2.1. Rapport moyen entre les précipitations et les chutes de neige mensuelles (RPCN)

Les calculs des régressions montrent qu'il n'est pas possible d'ajuster efficacement une seule courbe entre les RPCN moyens et les températures mensuelles pour l'ensemble des 28 stations et des mois de l'année. Pour ces calculs, il a fallu distinguer, de manière empirique à partir de la qualité d'ajustement de ces courbes (coefficients de détermination R^2), 4 périodes de l'année (janvier-avril, mai-juin, septembre-octobre et novembre-décembre) et 5 classes d'altitude différentes en Suisse avec les vallées des Alpes et du Jura situées au-dessous de 1000 m/mer, les vallées alpines entre 1000 et 1800 m/mer, les versants et cols alpins entre 2000 et 2300 m/mer et 2 sommets alpins à 2500 et 2700 m/mer (tableau 1). Les RPCN ne dépendent pas seulement de la température, mais aussi de l'humidité de l'air, du rayonnement et du vent qui peuvent influencer la densité de la neige tombée (Roebber *et al.*, 2003). En outre, le vent perturbe fortement les mesures de la neige et des précipitations par les pluviomètres, notamment sur les cols et les sommets alpins où il souffle en moyenne plus fortement que dans les vallées. Les coefficients R^2 varient entre 0.63 et 0.92 pour les courbes de régression du tableau 1, excepté pour celle de septembre-octobre entre 1000 et 1800 m/mer ($R^2 = 0.49$) et celle de novembre à avril entre 2000 et 2300 m/mer ($R^2 = 0.39$).

Tableau 1. Courbes de régression entre les RCPN (y) et les températures moyennes mensuelles (x) calculées en Suisse pour l'ensemble de la période 1972-2002.

Sa = Saentis We = Weissfluhjoch

Altitudes	Janvier-Avril	Mai-Juin	Septembre-Octobre	Nov.-Décembre
750-1000 m/mer	$y = 1.8905 * e^{0.1213x}$	$y = 0.3108 * e^{0.5207x}$	$y = 0.0287 * e^{0.9146x}$	$y = 2.6116 * e^{0.1332x}$
1000-1800 m/mer	$y = 1.223 * e^{0.104x}$	$y = 0.5363 * e^{0.3715x}$	$y = 1.3046 * e^{0.3297x}$	$y = 1.6304 * e^{0.1292x}$
2000-2300 m/mer	$y = 1.3019 * e^{0.069x}$	$y = 1.2812 * e^{0.3196x}$	$y = 1.2812 * e^{0.3196x}$	$y = 1.3019 * e^{0.069x}$
2500 m/mer (Sa)	$y = 2.5211 * e^{0.109x}$	$y = 2.5211 * e^{0.109x}$	$y = 2.5211 * e^{0.109x}$	$y = 2.5211 * e^{0.109x}$
2700 m/mer (We)	$y = 1.7672 * e^{0.1319x}$	$y = 1.7672 * e^{0.1319x}$	$y = 1.7672 * e^{0.1319x}$	$y = 1.7672 * e^{0.1319x}$

La figure 2 présente les RPCN moyens en fonction de la température moyenne du mois obtenus à partir des courbes de régression du tableau 1 pour les 5 classes d'altitude en Suisse et 2 périodes de l'année. Ici, une valeur de 1 pour les RPCN signifie que 1 mm de précipitation équivalent en eau liquide est égal à 1 cm de neige fraîche, ce qui correspond au rapport 1 : 10 entre ces 2 paramètres souvent cité dans la littérature. Mais ce rapport peut varier entre 1 : 3 et 1 : 100 suivant les épisodes et la densité de la neige (Roebber *et al.*, 2003). Les RPCN moyens sont globalement plus hauts pour une même température mensuelle en automne (septembre à décembre) qu'en hiver et au printemps (janvier à mai) pour les stations situées dans les vallées au-dessous de 1800 m/mer. Les RCPN du mois de décembre se rapprochent toutefois un peu de ceux de l'hiver et du printemps, surtout pour les stations situées entre 1500 et 1800 m/mer. Ces différences d'une saison à l'autre sont assez étonnantes et n'apparaissent pas pour les 5 stations situées au-dessus de 2000 m/mer.

Cette figure confirme que les RPCN moyens augmentent progressivement à toutes les altitudes avec la température moyenne mensuelle. D'une part, la proportion de chutes de neige par rapport aux précipitations totales diminue lorsque les températures moyennes d'un mois

augmentent. D'autre part, la densité et le contenu en eau dans la neige fraîche tendent aussi à augmenter avec la température de l'air.

Les RPCN moyens et les proportions de précipitations tombant sous forme de pluie augmentent partout rapidement lorsque les températures moyennes mensuelles dépassent 4 ou 5°C. Mais cette augmentation varie très fortement d'un endroit à l'autre et d'un mois à l'autre, si bien qu'il est difficile de déterminer des RPCN moyens pour l'ensemble des stations situées dans une même classe d'altitude avec des températures moyennes mensuelles supérieures à 4 ou 5°C. Pour cette raison, la figure 2 ne montre pas les RPCN au-delà de 6°C.

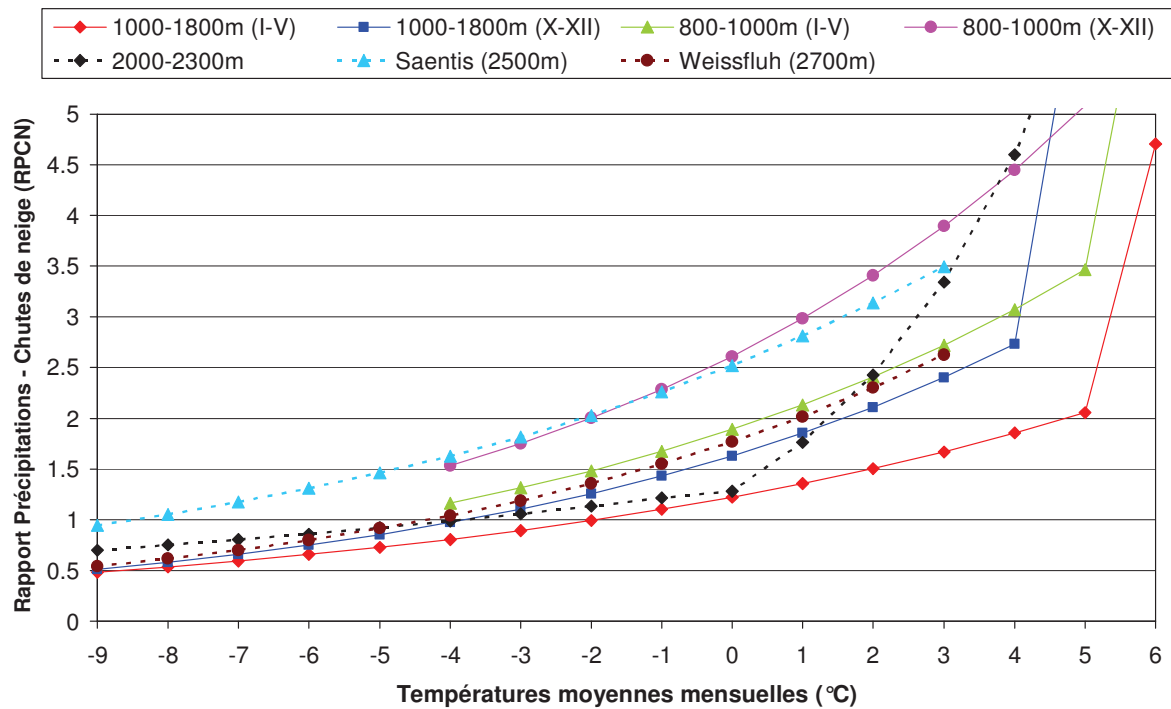


Figure 2. Rapports moyens entre les précipitations et chutes de neige (RPCN) et les températures moyennes mensuelles calculés pour différentes altitudes (et moments de l'année) en Suisse pour la période 1972-2002

La figure 2 révèle encore que les RPCN moyens au sommet du Saentis à 2500 m/mer sont sensiblement plus élevés que sur le sommet du Weissfluhjoch à 2700 m/mer et dans les autres régions plus basses pour une même température moyenne mensuelle. Une telle particularité pourrait résulter du vent qui souffle en moyenne plus fortement sur les sommets alpins, en particulier sur celui très exposé du Saentis. Les valeurs des précipitations sont souvent sous-estimées par les pluviomètres en cas de vent fort, lequel balaie également la neige au sol, ce qui a des incidences sur les RPCN (Roebber *et al.*, 2003).

2.2. Estimation des chutes de neige moyennes mensuelles

Les chutes de neige moyennes ont ensuite été calculées pour chaque mois à partir des RPCN moyens ainsi déterminés, ainsi que des précipitations et des températures mesurées et moyennées sur l'ensemble de la période 1972-2002. Le tableau 2 présente la comparaison entre les chutes de neige calculées et celles mesurées pour l'ensemble de cette période.

Le tableau 2 montre que les estimations des chutes de neige mensuelles à partir des températures et des précipitations sont globalement les meilleures à toutes les altitudes en saison froide durant les mois de décembre à mars lorsque les températures moyennes mensuelles sont inférieures à 3°C : les chutes de neige estimées se situent partout à $\pm 25\%$ (voire 30%) de celles mesurées pour ces mois-là. Les résultats sont encore assez bons pour les

mois d'avril et de novembre si on excepte quelques stations, alors qu'ils deviennent assez mauvais pour les mois de mai à octobre lorsque les chutes de neige sont les plus basses (ou nulles à basse altitude) : une différence d'estimation de un ou quelques cm pour les chutes de neige moyennes de ces mois-là se traduit par des pourcentages d'erreur importants. Ces approximations en saison chaude n'altèrent guère les estimations à l'échelle annuelle, car les chutes de neige des mois de mai à octobre ne représentent que 2 à 10% du total annuel au-dessous de 1800 m/mer et 15 à 25% de ce total de 1800 à 2700 m/mer.

Les estimations des chutes de neige deviennent de plus en plus imprécises lorsque les températures moyennes mensuelles dépassent 4 ou 5°C. Ce seuil coïncide avec le début d'une hausse de plus en plus rapide des RPCN avec la température moyenne du mois qui varie aussi fortement d'une station à l'autre (cf. figure 2). Il en résulte des estimations des chutes de neige de plus en plus imprécises pour certaines stations, notamment au Sud des Alpes (Airolo, Poschiavo, San Bernardino) où les températures sont en moyenne plus élevées qu'au Nord des Alpes pour une même altitude, surtout en saison chaude (avril à octobre). Ces stations correspondent aux pourcentages plus élevés mis entre parenthèses dans le tableau 2.

La classe d'altitude entre 2000 et 2300 m/mer ne comprend que 3 stations. Mais les pourcentages indiqués dans le tableau 2 sont souvent plus élevés (et mis entre parenthèses) pour une station située au Sud des Alpes (Bernina) que pour les 2 stations du versant Nord des Alpes (Grimsel, Guetsch/Andermatt), traduisant une différence climatique entre les versants Sud et Nord des Alpes. Cette différence climatique apparaît aussi pour les stations alpines situées entre 1000 et 1800 m/mer, notamment en saison chaude (avril à octobre).

En vue de vérifier l'efficacité des courbes de régressions calculées entre les RPCN et les températures moyennes pour la période 1972-2002, nous les avons utilisées pour estimer les chutes de neige moyennes mensuelles pour la période 1941-1971 et les comparer avec celles mesurées pour cette période-là par 13 stations. Les résultats obtenus (non montrés ici) pour ces stations sont proches de ceux décrits ci-dessus pour la période 1972-2002.

Tableau 2. Différences (%) entre les chutes de neige moyennes mensuelles calculées à partir des RPCN moyens et celles mesurées sur l'ensemble de la période 1972-2002.

Mois	750-1000 m/mer	1000-1800 m/mer	2000-2300 m/mer	2500 m/mer	2700 m/mer
I	80-130%	80-120% (137%)	90-125%	107%	112%
II	(71%) 95-125%	90-125%	95-125%	109%	124%
III	88-108%	80-122%	85-115%	105%	105%
IV	95-139% (235%)	72-122% (148%)	81-102%	88%	80%
V	90-124% (800%)	67-191% (334%)	(53%) 100-105%	92%	96%
VI	-	71-141% (808%)	46-58% (114%)	118%	122%
VI	-	-	105-141%	254%	227%
VIII	-	-	81% (226%)	258%	265%
IX	-	42-457%	48-65% (105%)	114%	127%
X	68-131% (546%)	36-288%	54-104% (162%)	79%	66%

XI	94-122% (227%)	85-150%	86-102% (157%)	88%	86%
XII	(74%) 91-119%	84-114% (130%)	92-111% (128%)	109%	105%
Hiver	80%-125%	87-115% (132%)	92-111% (125%)	108%	114%
Print.	90-114% (136%)	78-134%	87-89% (107%)	96%	92%
Eté	-	-	60-68% (131%)	177%	173%
Aut.	91-122% (253%)	70-164%	84-88% (153%)	90%	87%
An	91-115%	80-125%	89-124%	106%	106%

Ces courbes de régression peuvent ainsi être utilisées pour estimer les chutes de neige moyennes dans le futur en Suisse à partir de températures et précipitations moyennes saisonnières calculées par les modèles climatiques régionaux pour 3 périodes de 30 ans (2020-2049, 2045-2074 et 2070-2099) et 3 scénarios de réchauffement climatique envisagés durant le 21^{ème} siècle (CH2011, 2011). Pour le scénario A1B prévoyant une augmentation modérée des émissions des gaz à effet de serre et un réchauffement global de 2.5°C à la surface de la Terre durant le 21^{ème} siècle (IPCC, 2013), les températures moyennes devraient se réchauffer d'environ 4°C en été et de 3°C durant les autres saisons en Suisse d'ici à la fin du 21^{ème} siècle. Dans le même temps, les précipitations moyennes devraient diminuer de 18 à 24% en été, mais augmenter en hiver de 20% au Sud des Alpes et de 2 à 3% au Nord des Alpes d'après les modèles climatiques régionaux (CH2011, 2011).

Tableau 3. Variations moyennes des chutes de neige estimées en Suisse pour la fin du 21^{ème} siècle (2070-2100) par rapport à la période 1972-2002 pour le scénario d'émissions des gaz à effet de serre modéré A1B

Altitudes	Hiver	Printemps	Eté	Automne	An
750-1000 m/mer Nord Alpes	-30%	-49 à -58%	-	-37 à -42%	-37 à -40%
1000-1400 m/mer Nord Alpes	-28%	-43 à -48%	-	-67 à -70%	-38 à -42%
1000-1600 m/mer Sud Alpes	-16 à -20%	-40 à -71%	-	-48 à -70%	-33 à -40%
1400-1800 m/mer Nord Alpes	-26 à -28%	-26 à -43%	-80 à -100%	-35 à -43%	-28 à -35%
2000-2300 m/mer	(-4%) -18%	-26 à -38%	-76%	-42 à -49%	-27 à -28%
2500-2700 m/mer	-27 à -34%	-22 à -27%	-46 à -51%	-29 à -33%	-28 à -33%

Pour un tel scénario, les chutes de neige moyennes annuelles estimées pour la période 2070-2100 diminueront en Suisse de 35 à 42% entre 750 et 1400 m/mer et de 27 à 35% entre 1400 à 2700 m/mer par rapport à la période 1972-2002 (tableau 3). Cette baisse sera la plus faible en hiver, notamment au Sud des Alpes (-4 à -20% contre -18 à -34% au Nord des Alpes) où les précipitations augmenteront davantage à cette saison d'après les modèles climatiques régionaux. Les chutes de neige diminueront le plus fortement en été au-dessus de 1800 m/mer là où une partie des précipitations tombera encore sous forme solide à la fin du 21^{ème} siècle. Une baisse marquée des chutes de neige se produira aussi au printemps pour les stations au-dessous de 1000 m/mer et en automne pour celles situées entre 1000 et 1400 m/mer.

Selon une étude récente (Marty *et al.*, 2017), l'épaisseur du manteau neigeux à l'échelle annuelle devrait diminuer en moyenne de 60% (40% au-dessus de 3000 m/mer) en Suisse d'ici à la fin du 21^{ème} siècle avec ce scénario. Cette baisse est encore plus importante que celle obtenue pour les chutes de neige annuelles (tableau 3), car le réchauffement des températures en saison chaude favorisera aussi une fonte plus importante du manteau neigeux.

Conclusion

Les chutes de neige moyennes mensuelles estimées à partir des températures et des précipitations pour 2 périodes de 31 ans (1972-2002, 1941-1971) aboutissent à de bons résultats pour la plupart des stations climatiques en Suisse en saison froide : les différences avec les chutes de neige mesurées par ces stations ne dépassent généralement pas 25%. Ces estimations deviennent nettement moins bonnes en saison chaude lorsque les températures moyennes mensuelles dépassent 4 ou 5°C : les RPCN augmentent alors rapidement avec la température moyenne du mois, avec une grande variabilité d'une station à l'autre. Mais ces mois ne totalisent que 2 à 10% des chutes de neige annuelles au-dessous de 1800 m/mer.

On peut donc estimer de manière assez fiable les chutes de neige moyennes en saison froide et à l'échelle annuelle sur des périodes de 30 ans pour la plupart des stations pluviométriques en Suisse : les températures moyennes mensuelles peuvent aussi être estimées efficacement sur des périodes de 30 ans dans les endroits où on ne dispose pas de mesures in situ de ce paramètre à partir de celles effectuées ailleurs en Suisse (Fallot, 2012). Mais les estimations des chutes de neige sont plus difficiles pour les cols et sommets alpins au-dessus de 2000 m/mer, car le vent perturbe sensiblement les mesures des précipitations et de la neige.

Bibliographie

- CH2011, 2011 : *Swiss Climate Change Scenarios CH2011*, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 p.
- Fallot J.-M., 2012 : Influence de la topographie et des accumulations d'air froid sur les températures moyennes mensuelles et annuelles en Suisse. *Actes du 25^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 5-8 septembre 2012, Grenoble, France, 273-278.
- IPCC, 2013 : *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the International Governmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 1535 p.
- Klein G., Vitasse Y., Rixen C., Marty C., Rebetez M., 2016 : Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than later snow onset. *Climatic Change*, **139**, 637-649.
- Knowless N., Dettinger M.D., Cayan D.R., 2006 : Trends in Snowfall versus Rainfall in the Western United States. *Journal of Climate*, **19**, 4545-4559.
- Marty C., Schlögl S., Bavay M., Lehning M., 2017 : How much can we save? Impact of different emission scenarios on future snow cover in the Alps. *The Cryosphere*, **11**, 511-529.
- Roebber P.J., Bruening S.L., Schultz D.M., Cortinas Jr J.V., 2003 : Improving Snowfall Forecasting by Diagnosing Snow Density. *Weather and Forecasting*, **18**, 264-287.
- Serquet G., Marty C., Dulex J.-P., Rebetez M., 2011 : Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation-day ratio in Switzerland. *Geophys. Res. Lett.*, **38**, LO7703, doi:10.1029/2011GL046976.
- Wang J., Zhang M., Wang S., Ren Z., Che Y., Qiang F., Qu D., 2016 : Decrease in snowfall/rainfall ratio in the Tibetan Plateau from 1961 to 2013. *J. Geogr. Sci.*, **26** (9), 1277-1288.

VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE DE LA CÔTE MÉDITERRANÉENNE MAROCAINE ET MODES DE LA CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE À GRANDE ECHELLE

HANCHANE M.

Université Sidi Mohamed Ben Abdellah - Faculté Polydisciplinaire de Taza, Boîte Postale 1223 Taza Gare.
Laboratoire de recherche : Dynamique, Espace, Patrimoine et Développement Durable. Mail : mohamed.hanchane@usmba.ac.ma

Résumé : La façade méditerranéenne marocaine se situe dans la zone de transition entre la circulation instable des moyennes latitudes, dominante en saison hivernale, et l'influence des hautes pressions subtropicales stables en saison sèche. La topographie du littoral, marquée des montagnes rifaines, contribue à la création d'une multitude de climats locaux très différents. Cette zone connaît des fluctuations pluviométriques, marquées par des périodes de sécheresse ou d'événements pluvieux extrêmes. Le but de cette étude est d'effectuer une régionalisation spatio-temporelle par une Analyse en composante Principale avec Rotation Varimax (ACPR) de la pluviométrie de la saison hivernale afin d'extraire des scores sur lesquels seront effectuées des analyses de tendances selon le test de Man Kendall. Une explication de ces fluctuations seront données par les modes dominants de la variabilité de la Circulation Atmosphérique à Grande Echelle (CAGE) : l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) et l'Oscillation Méditerranéenne Occidentale (OMO).

Mots clés : Méditerranée; pluviométrie; ACPR; Test séquentiel de Mann Kendall; ONA; OMO.

Abstract: The Moroccan Mediterranean coastline is located in the transition zone between the unstable mid-latitude circulation dominant in the winter season and the influence of high subtropical high pressures in the dry season. The topography of the coastline, marked by the Rifan mountains, contributes to the creation of a multitude of very different local climates. This zone experiences fluctuations in rainfall, marked by periods of drought or extreme rain events. The purpose of this study is to perform a spatio-temporal regionalization by a Principal Component Analysis with Varimax Rotation (ACPR) of the rainfall of the winter season in order to extract scores on which to analyze trends according to the test By Man Kendall. An explanation of these fluctuations will be given by the dominant modes of variability of Large Scale Atmospheric Circulation (LSAC): the North Atlantic Oscillation (NAO) and the Western Mediterranean Oscillation (WeMO).

Keywords: Mediterranean; Rainfall; ACPR; Sequential test of Mann Kendall; NAO; WeMO.

Introduction

Le Bassin Méditerranéen se situe dans la zone de transition entre la circulation instable des moyennes latitudes et l'influence des hautes pressions subtropicales stables. Du fait du déplacement de la ZCIT au cours de l'année, cette région subit l'influence du régime des vents d'ouest en période hivernale tandis qu'elle se situe plutôt sous la banche descendante de la cellule de Hadley en période estivale (Bolle, 2003). C'est l'alternance saisonnière entre ces deux régimes et la forte influence de la mer Méditerranée qui explique le contraste saisonnier entre hivers doux et pluvieux et étés chauds et secs. En outre, cette position charnière entre les régimes extratropicaux et tropicaux rend le bassin méditerranéen particulièrement sensible à tout changement intervenant dans la circulation atmosphérique. La complexité topographique du littoral méditerranéen vient néanmoins se superposer à ce schéma simpliste contribuant, au final, à créer une multitude de climats locaux très différents (Bolle, 2003).

Il est aujourd'hui admis que le bassin méditerranéen est une des zones du globe où le changement climatique et ses impacts seront les plus importants (Giorgi, 2006). La plus grande menace est l'évolution vers des conditions de plus en plus arides au cours du 21^{ème} siècle, une diminution de la disponibilité des ressources en eau, indispensables aux activités humaines, devrait en être la conséquence.

Détecter un changement climatique consiste à démontrer que l'évolution observée d'une variable climatique est incompatible (au sens statistique du terme) avec la variabilité naturelle intrinsèque. D'importants travaux sur les méthodes de détection du changement climatique ont été publiés ces dernières années pour tenter de monter l'influence de l'Homme sur le

climat méditerranéen (l'ensemble du Bassin Méditerranéen : Giorgi, 2002 ; Trigo *et al.*, 2000 ; Grèce-Italie et Proche Orient: Norrant et Douguédroit, 2005 ; Italie : Brunetti *et al.*, 2000 ; Côte Orientale de l'Espagne: Esteban-Parra *et al.*, 2003). En revanche, la rive méditerranéenne marocaine a été très rarement concernée.

Notre contribution a pour but d'analyser l'amorce d'un changement dans la variabilité pluviométrique de la saison pluvieuse (novembre-mars) qui peut se manifester par une tendance et/ou un changement abrupt. Les stations choisies pour cette étude s'étalent sur le littoral méditerranéen marocain de l'ouest à l'est. L'étude permettra de montrer si d'éventuels changements sont généralisés ou non. Elle vérifiera, ensuite, le lien entre cette variabilité pluviométrique et les deux oscillations atmosphériques qui affectent la zone d'étude : l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) et l'oscillation Méditerranéenne d'Ouest (OMO).

1. Indices de la Circulation Atmosphérique à Grande Echelle

De manière générale, la diminution des précipitations hivernales sur le pourtour méditerranéen est liée à une diminution du passage du nombre de perturbations en provenance de l'atlantique, en lien avec un décalage vers le nord du rail des dépressions atlantiques, et à l'affaiblissement de la cyclogénèse au-dessus de la Méditerranée (Xoplaki *et al.*, 2004).

D'un autre côté, les tendances pluviométriques peuvent être comme des changements de l'occurrence des indices qui caractérisent la force et la phase des modes dominants de la variabilité de la Circulation Atmosphérique à Grande Echelle (CAGE) dont certains ne se manifestant qu'au cours de saisons particulières (Barnston et Livezey, 1987). Cependant, ils peuvent avoir des liens très forts avec le climat régional, ce qui peut être un outil d'analyse du climat régional intéressant (Hurrell, 1995). Nous avons choisi de ne retenir que les principaux modes/variables relatives à la CAGE susceptibles d'influencer le plus le climat de surface dans notre zone d'étude :

- L'ONA est reconnu depuis plus de 70 ans comme le mode atmosphérique dominant de la variabilité basse-fréquence de la CAGE en Atlantique Nord (Walker, 1924). C'est un signal important et robuste pour expliquer les variations des précipitations hivernales en Méditerranée. De nombreuses études ont effectivement montré que les fluctuations de l'indice ONA sont anti-corrélées avec les variations des précipitations hivernales en Méditerranée Occidentale. Ainsi, il a été montré que la baisse significative des précipitations hivernales en Méditerranée constatée depuis 1960 est due, au moins partiellement, à la prépondérance des phases positives de l'ONA (e.g. Dünkeloh et Jacobeit, 2003; Xoplaki *et al.*, 2004);
- L'OMO est un indice caractéristique d'un mode dominant de la CAGE en Méditerranée Occidentale (Martin-Vide et Lopez-Bustins, 2006). Elle est caractérisée dans sa phase positive par le renforcement de l'Anticyclone des Açores et son extension sur le quart sud ouest de la péninsule ibérique associé à de faibles pressions au niveau du Golfe de Ligurie, induisant une circulation générale nord-ouest – sud-est des masses d'air en surface. A l'inverse, sa phase négative correspond à une zone de basses pressions centrée sur le quart sud-ouest de la péninsule ibérique associée au renforcement de l'Anticyclone central européen et à son extension sur le Golfe Ligurie, induisant une circulation générale est-ouest des masses d'air en surface.

En principe, les phases négatives des indices ONA et OMO expliquent les périodes humides hivernales de la zone d'étude alors les phases positives sont responsables de l'installation de la sécheresse.

2. Position géographique des stations et données utilisées

Les travaux de recherche cités ci-dessus nous ont orienté dans le choix des données exploitées dans cette présente étude. Il s'agit des précipitations de la saison hivernale (Tableau 1) et des indices de la CAGE qui sont calculés sur la même période. La période d'analyse s'étale sur 34 ans (septembre 1970-août 2003). Les données pluviométriques sont issues des différentes agences des bassins hydrauliques tandis que les valeurs des deux indices ont été téléchargées à partir des sites suivants : <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/nao.htm>; <http://www.ub.es/gc/English/wemo.htm>).

La pluviométrie de cette saison des pluies diminue de l'ouest vers l'est et cette diminution devient plus remarquable surtout dans les stations continentales qui se trouvent loin de l'effet orographique (ex. Stations de Ben Taib et de Driouech). Dans ces dernières la variabilité interannuelle, exprimée par le coefficient de variation, y est maximale. Elle augmente aussi vers le sud de la côte tangéroise (station de Oued Lao) (tableau 1).

Tableau 1. Coordonnées géographiques et caractéristiques pluviométriques de la zone d'étude (période 1970-2003)

	Tag	Tet	O.Lao	EIHoc	B.T	Mid	Dri	Taf	Agh	Tam	Tro	Mel	Ouj
Latitude (°N)	35.77	35.6	35.27	35.15	35.05	34.93	34.98	35.02	35.08	35.12	35.13	35.28	34.69
Longitude (°O)	5.81	5.40	5.60	3.57	3.45	3.53	3.42	3.53	3.67	3.63	3.7	2.95	1.92
P(NDJFM) (mm)	494	402	390	188	156	136	161	210	210	202	209	254	171
CV %	44.3	31.1	56.6	45.4	63.1	59.3	61.9	44.3	41.8	43.0	41.5	34.0	44.0

Tag: Tanger; Tet:Tetouan; O.Lao:Oued Lao; B.T:Ben Taib; Mid:Midar; Dri:Driouech; Taf:Tefferte; Agh:Agharmous; Tam:Tamsamane; Tro:Troghoute; Mel:Melilla; Ouj:Oujda.

Méthodologie

A une échelle locale méditerranéenne, la variabilité des précipitations est importante et beaucoup d'études ont été basées sur l'analyse des tendances. Notre contribution consiste en une analyse en Composante Principale avec Rotation de type Varimax (ACPR-Varimax) sur la pluviométrie saisonnière (novembre à mars), en utilisant comme variables les stations et comme individus les années.

Le test séquentiel de Mann-Kendall (Sneyers, 1975) est appliqué sur les séries temporelles des scores des principales composantes qui sont obtenus par ACPR, et sur les indices ONA et OMO. Ce test non paramétrique est le plus approprié pour détecter la nature des changements. En général, on peut distinguer trois types de changements: changement brutal, tendance et fluctuations. Un changement brutal se produit lorsqu'une tendance est présente et qu'un point de changement divise la série en deux sous-catégories distinctes. Le point de division est un point de changement abrupt. Le terme «tendance» se réfère non seulement à un changement linéaire, mais également à des changements au maximum ou au minimum aux points extrêmes de la série.

Le principe de calcul de ce test se fait en remplaçant les valeurs de la série par le nombre de valeurs précédentes inférieures à la valeur de l'année; un test (u_t) est ainsi calculé. Pour situer cette évolution dans le temps, on effectue un test régressif (u'_t). En portant graphiquement les deux tests (u_t et u'_t), on obtient deux courbes qui se croisent approximativement au moment où a commencé la tendance. On considère que la tendance est significative si au moins une des deux courbes dépasse ± 1.96 qui représente la valeur du test de Mann Kendall au seuil de 0.05. En pratique, l'absence de toute tendance donne généralement des courbes qui s'enchevêtrent tandis que dans le cas d'une tendance significative l'intersection de ces courbes permet de situer approximativement le début du phénomène.

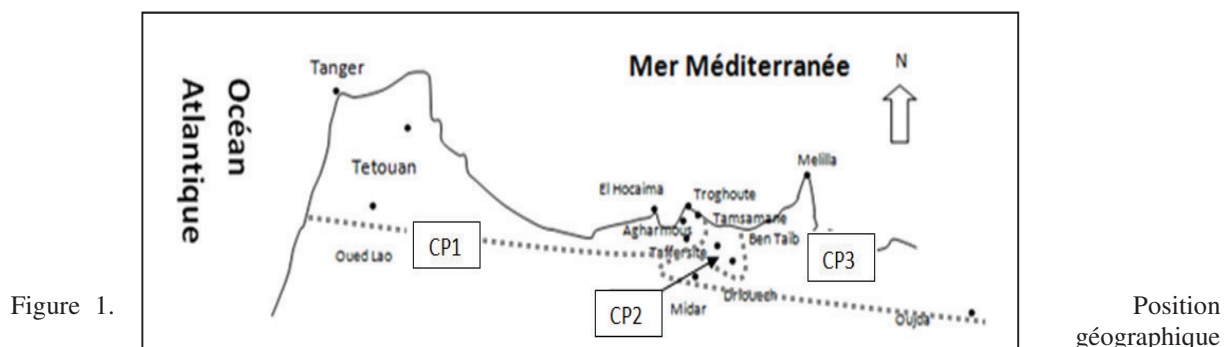


Figure 1.

Position géographique

des stations étudiées (CP 1-3 : composantes principales extraites par ACP de type Varimax)

Les modes de variabilité régionalisés sont ensuite corrélés aux indices ONA et OMO afin de vérifier l'hypothèse selon laquelle la diminution des précipitations hivernales sur le pourtour méditerranéen est liée à une diminution du nombre de perturbations en provenance de l'atlantique et à l'affaiblissement de la cyclogénèse au-dessus de la Méditerranée.

Résultats

L'ACP de type Varimax nous a permis d'extraire 3 composantes principales qui expliquent 80% de la variance totale. La première CP1 (38.5% de la variance expliquée) et la troisième CP3 (22.5% de la variance expliquée) regroupent la majorité des stations situées respectivement à l'ouest et l'est de la rive méditerranéenne marocaine.

Le test Z de Mann Kendall appliqué sur l'ensemble de la série temporelle des scores des deux composantes (CP1 et CP2) ne montre aucune tendance significative. En revanche, la 2^{ème} composante principale CP2, expliquant uniquement 19 % de la variance totale, regroupe les stations qui sont marquées par une extrême variabilité interannuelle : Driouech et Ben Taïb. Ces deux stations sont ouvertes aux influences méditerranéennes par l'est et elles se trouvent sous abri orographique des influences atlantiques venant de l'ouest. L'analyse de tendance des scores de cet axe montre une tendance significative vers l'augmentation au seuil $\alpha = 0.05$ (tableau 2).

Tableau 2. Analyse de tendance des composantes principales (période 1970-2003)

	Test Z	Pente	constante	
Composante 1	0,30	0,003	-0,32	
Composante 2	2,46*	0,042	-0,85	Driouech : Z = 2.22* Ben Taïb : Z = 2.19*
Composante 3	0,33	0,004	-0,44	

A l'exception de la CP2 pour laquelle un changement abrupt significatif est constaté, l'application du test séquentiel de Mann-Kendall sur les deux autres composantes et sur les indices ONA et OMO (Figure 2) n'a pas montré de changements significatifs car les graphiques du test séquentiel progressif (u_t) et rétrograde (u'_t) ne se croisaient pas aux limites de significativité de ± 1.96 . L'enchevêtrement des deux courbes (u_t et u'_t) relatives à la CP1 témoigne d'une absence de tendance.

Pour la CP2, une tendance à la hausse est apparue vers 1987 et a atteint son maximum vers 1997; cette tendance significative a persisté jusqu'en 2003. Une tendance à la hausse est aussi constatée pour l'indice ONA dès 1981 et elle a atteint son maximum en 1994, puis une tendance à la baisse est remarquée depuis cette dernière date. L'indice OMO s'est caractérisé par une augmentation depuis le début de la série qui est devenue significative entre 1977 et 1983; après cette date, une tendance non significative vers la diminution a subsisté jusqu'à la fin de la série observée. Pour la CP3, une tendance négative, constatée depuis 1973, a atteint

son degré de significativité en 1984, puis elle a été inversée, d'une façon non significative, vers la fin des années 1980.

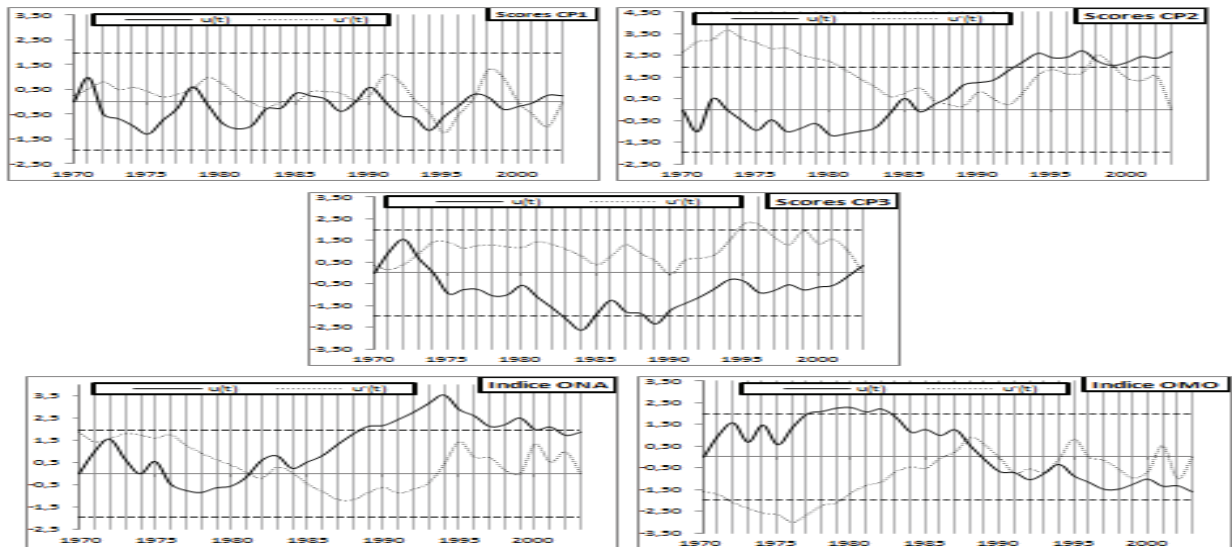


Figure 2. Représentation graphique de la série progressive $u(t)$ et la série rétrograde $u'(t)$ du test séquentiel de Mann-Kendall pour les scores des 3 composantes et des indices ONA et OMO (1970-2003).

Les corrélations entre les composantes principales et les indices de la circulation atmosphérique ONA et OMO sont représentées sur le tableau suivant :

Tableau 3. Matrice de corrélation entre les composantes principales et les indices ONA et OMO (*en gras, seuil de significativité $\alpha=0.1$*).

Variables	CP1	CP2	CP3	ONA	OMO
CP1	1	0,000	0,000	-0,481	-0,349
CP2		1	0,000	0,304	-0,283
CP3			1	0,121	-0,069
ONA				1	0,049
OMO					1

Les stations situées à l'ouest et représentées par la CP1 sont négativement corrélées avec les deux indices au seuil de significativité $\alpha=0.1$. Quant aux stations situées à l'est de la rive méditerranéenne marocaine (représentées par la CP3), elles ne sont corrélées avec aucun des deux indices. Le lien entre les précipitations de la période novembre-mars et les modes de la CAGE, exprimés par les indices ONA et OMO, s'estompe en direction de l'est de la rive méditerranéenne marocaine. En revanche, on note pour la CP2 une corrélation positive significative au seuil $\alpha=0.1$ avec l'indice ONA et une corrélation négative, mais non significative, avec l'indice OMO (tableau 3). Néanmoins, la covariation dans le même sens de l'ONA et des précipitations des stations qui sont corrélées avec la CP2 (ONA positive avec anomalie pluviométrique positive et inversement) est associée, dans presque 50 % des cas, à des phases de signes opposés pour l'OMO (anomalie pluviométrique positive associée à un indice OMO négatif et inversement), surtout vers la moitié des années 80. En effet, à partir de cette période le sens de la tendance des deux indices de la CAGE s'inverse (positif pour ONA et négatif pour OMO) (figure 2). Le mois de mars de l'année 1989 la plus pluvieuse pour la station de Driouech (441 mm au mois de mars) illustre bien cette situation (figure 3). Il s'agit du passage d'une goutte froide à l'origine d'une cyclogenèse locale qui est favorable à la formation d'une dépression méditerranéenne sur le quart sud-ouest de la péninsule ibérique. Cette dépression est associée à un renforcement de l'anticyclone sur la partie est de l'Europe,

induisant ainsi une circulation générale est-ouest, favorable à l'établissement d'une phase négative de l'OMO et à des anomalies pluviométriques positives des stations de la seconde composante (figure 3).

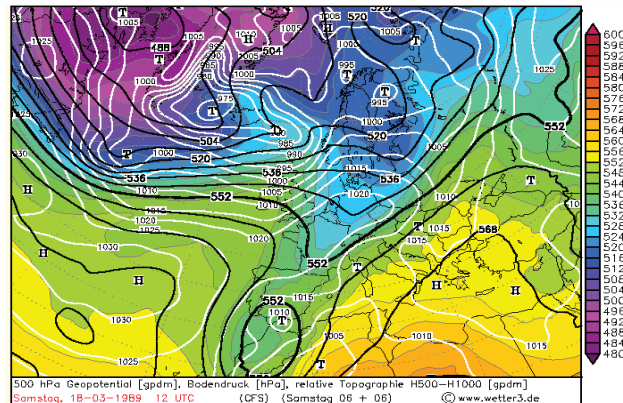


Figure 3. Situation météorologique du 18 mars 1989 (épaisseur troposphérique (en couleur) entre la pression au niveau de la mer (isobares en blanc) et la hauteur des géopotentiels (isohypses en noir).

Conclusion

A une échelle de la rive méditerranéenne marocaine, la variabilité des précipitations est importante et les changements abrupts et tendances relevées selon le test séquentiel de Mann-Kendall ne sont pas toutes statistiquement significatives. Des fluctuations ont marqué la CP1 alors qu'une tendance significative vers la diminution a marqué la CP3 durant la période 1973-1984. Pour la CP2, un changement abrupt en 1997 avec une augmentation significative entre 1987 et 1997 a été observé. Cette tendance est corrélée positivement avec l'ONA. Ce résultat semble être en contradiction avec l'ensemble des travaux qui ont montré une corrélation toujours négative entre l'ONA et les précipitations en région méditerranéenne. Néanmoins, cette covariation dans le même sens de l'ONA et de la CP2 semble être associée aussi à des phases négatives de l'OMO, enregistrées depuis le milieu des années 80. Ainsi, peut-on supposer que la phase positive de la ONA, marquée par le renforcement de la dorsale anticyclonique des Açores et son extension sur la partie Est de l'Europe, est accompagnée, dans certaines situations météorologiques, de gouttes froides, à l'est de la dorsale. Cette situation, favorable à l'installation d'un flux est-ouest, influe sur les apports pluviométriques des stations corrélées avec la CP2. Cette hypothèse fera l'objet d'une étude plus approfondie en analysant l'alternance de périodes humides et sèches en liaison avec les situations météorologiques synoptiques.

Bibliographie

- Barnston A.G. et Livezey R.E., 1987: Classification, seasonality and persistence of low frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, **115**(1-2), 1083-1127.
- Bolle H.-J., 2003: Climate, climate variability and impacts in the Mediterranean area: an overview. Dans: Bolle H.-J. (Ed): *Mediterranean Climate – Variability and Trends*. Springer. Verlag, 5-86.
- Brunetti M., Maugeri M. et Nanni T., 2000: Variations of temperature and precipitations in Italy from 1866 to 1995. *Theor. Appl. Climatol.*, **65**, 165-174.
- Düneloh A., et Jacobeit J., 2003: Circulation dynamics of Mediterranean precipitation variability 1948-98. *Int. J. Climatol.*, **23**, 1843.
- Esteban-Parra M.J., Pozo-Vasquez D., Rodrigo F.S., Castro-Diez Y., 2003: Temperature and precipitation variability and trends in Northern Spain in the context of the Iberian.

- Giorgi F., 2002: Variability and trends of sub-continental scale surface climate in the twentieth century. Part I: observations. *Clim. Dyn.*, **18**, 675-691.
- Giorgi F., 2006: Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L08707. doi :10.1029/2006GL025734.
- Hurrell J.W., 1995: Decadal trends in the North-Atlantic Oscillation - regional temperature and precipitation, *Science*, **269** (5224), 676-679.
- Norrant C. and Douguédroit A., 2005: Monthly and daily precipitation trends in the Mediterranean (1950-2000). *Theor. Appl. Climatol.*, **83**, 89-106.
- Sneyers, R. (1975). Sur l'analyse statistique des séries d'observations. *Note technique de l'OMM* n°143.
- Trigo I.F., Trevor T.D. et Bigg G.R., 2000: Decline in Mediterranean rainfall caused by weakening of Mediterranean cyclones. *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 2913-2916.
- Walker G.T., 1924 : Correlations in seasonal variations of weather IX. *Mem Ind Meteor Dept*, **24**, 275-332.
- Xoplaki E., González-Rouco J.F., Luterbacher J. et Wanner H., 2004: Wet season Mediterranean precipitation variability: influence of large-scale dynamics and trends. *Clim. Dyn.*, **23**, 63-78, doi: 10.1007/s00382-004-0422-0.

EXTREMES CLIMATIQUES DANS LE DOMAINE SOUDANIEN AU BENIN : ETUDE COMPAREE DES PERCEPTIONS POPULAIRES ET DES DONNEES CLIMATOLOGIQUES DE L'ASCENA

DJOHY G. L.¹, TOTIN VODOUNON S. H.^{1,2}, KINZO N. E.¹, SINWONGOU M. A.¹, AVAHOUIN C. N. N.¹, AKPLOGAN K. N.¹, DOUMAHOUN D. S. E.¹

¹Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université de Parakou, 03 BP 303 Parakou, Bénin, [gildasdjohy@gmail.com], [thernicko@yahoo.fr], [sinwongoumpoabel@gmail.com]

²Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement, Université d'Abomey-Calavi, 03 BP 1122, Cotonou, Bénin, [sourouhenri@yahoo.fr]

Résumé : Les changements et variabilités climatiques sont actuellement une réalité perceptible à travers les impacts des phénomènes extrêmes. Cette étude vise à confronter les tendances des paramètres climatiques des stations de Parakou et de Kandi avec les perceptions des populations locales. Les données climatologiques (pluviométrie, température et vent) collectées sur la période de 1971-2010, ont été analysées par la méthode des anomalies centrées réduites. La perception des populations sur les événements climatiques extrêmes a été recueillie au cours des enquêtes de terrain. Les résultats montrent que les anomalies pluviométriques ont varié en extrêmes de -2,46 à +2,19 à Parakou et de -2,21 à +2,64 à Kandi. Quant aux températures, elles ont varié entre les extrêmes -2,07 et +2,69 à Parakou et entre -1,59 et 2,20 à Kandi. Le milieu a connu une période de vents extrêmes avec des anomalies d'amplitudes respectivement de 2,57 m/s et 2,49 m/s. Ces événements climatiques extrêmes sont des phénomènes météorologiques localisés par les populations sous formes d'inondations ou de sécheresse, d'inondation, de vague de chaleur, de vent fort.

Mots-clés : pluie, inondation, vague de chaleur, climat soudanien, Bénin.

Abstract : "Extreme climatic events in the Northern Benin: comparative study of population perception and climate parameters from ASECNA" Climate changes and variability are real through impacts of extreme events. This study aim to confront climatic parameter trends of Parakou and Kandi stations with local population perceptions. Climate data (rainfall, temperature and wind) collected over the period 1971-2010 were analyzed by the standardized method to determine anomalies. Population perception on extreme climate events was gathered from field works. The results show that rainfall anomalies varied by extreme from -2.46 to +2.19 in Parakou and -2.21 to +2.64 in Kandi. Temperatures ranged from extreme -2.07 to +2.69 in Parakou and -1.59 and 2.20 in Kandi. The environment experienced a period of extreme winds with amplitude anomalies of 2.57 m/s and 2.49 m/s, respectively. These extreme climatic events are meteorological phenomena localized by people as flood, drought, heat wave, strong wind.

Keywords: rainfall, flood, heat wave, soudanian climate, Benin.

Introduction

Les conditions climatiques extrêmes ont affecté le Bénin, et entraîné une diminution sensible des ressources en eau et une hausse des températures (Vissin, 2007). Au cours de la période 1951-2010, le nombre de jours de pluie a constamment baissé dans l'ordre de 11 à 28 % alors que la température a connu une augmentation dans le Nord du Bénin (Boko *et al.*, 2012). Les paramètres climatiques, notamment les précipitations, la température et la vitesse du vent sont marqués par une intensification des événements extrêmes avec le réchauffement global (IPCC, 2013 ; Karimou Barké *et al.*, 2015). Ainsi, les phénomènes climatiques extrêmes commencent à prendre de l'ampleur ces dernières décennies (Ly *et al.*, 2013). Les modèles probabilistes prédisent qu'à l'horizon 2050, le Nord du Bénin sera victime d'un accroissement de pluies périodiques, d'une diminution des précipitations à l'échelle saisonnière et d'un accroissement de la durée des saisons sèches (Boko *et al.*, 2012). Cette étude confronte les tendances des paramètres climatiques des stations synoptiques de Parakou et de Kandi avec les perceptions des populations locales. Elle est réalisée dans les Communes de Parakou et de Kandi situées respectivement entre 9° 15' et 9° 27' de latitude Nord et 2° 31' et 2° 45' de longitude Est et entre 10°55' et 11°39' de latitude Nord et 2°38' et 3°15' de longitude Est. Ces Communes sont soumises au climat des régions soudaniennes et soudano-sahéliennes à deux saisons (Boko, 1988).

1. Données et méthodes de traitement des données

1.1. Données utilisées

Les données utilisées sont les températures minimales et maximales, les pluies annuelles des stations synoptiques de Parakou et de Kandi. Elles ont été collectées à l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA) de Cotonou et couvrent la période 1971-2010. Les enquêtes socio-anthropologiques ont permis d'apprécier les perceptions populaires sur les événements climatiques extrêmes au Nord-Bénin. Un échantillon de 121 personnes a été enquêté sur la période d'août et septembre 2015. Ces mois d'enquête constituent la période la plus pluvieuse du domaine climatique soudanien.

1.2. Méthode de traitement des données et d'analyse des résultats

L'analyse de l'évolution des différents paramètres climatiques a été faite à l'aide de la méthode des indices standardisés (IS) ou des anomalies centrées réduites de Lamb (1982) qui représente l'écart à la moyenne normalisée par l'écart-type : $IS = \frac{x_i - \bar{X}}{\sigma}$, où x_i représente le

cumul annuel de pluie, moyen de température et du vent de l'année i . Les termes \bar{X} et σ représentent respectivement, la moyenne et l'écart type de la pluviométrie, de la température et de la vitesse du vent sur la période de référence. Ces indices standardisés (Bergaoui et Alouini, 2001) ont été utilisés pour mieux déterminer l'amplitude des anomalies de pluie, de température et du vent. Deux seuils ont été ainsi considérés en fonction des classes d'indices standardisés. Il s'agit de l'anomalie extrêmement forte ($IS > 2$) et l'anomalie extrêmement faible ($IS < -2$) pour servir de référentiel aux extrêmes climatiques. De plus le calcul de la pente a permis de déterminer les taux d'augmentation de la température.

Les caractéristiques attribuées par les populations à chaque événement climatique particulier ont permis d'en faire une similitude avec les résultats statistiques en termes de comparaison.

2. Résultats et discussion

2.1. Extrêmes pluviométriques

L'évolution interannuelle de la pluviométrie à Parakou et à Kandi sur la période de 1971 à 2010 est illustrée par la figure 1.

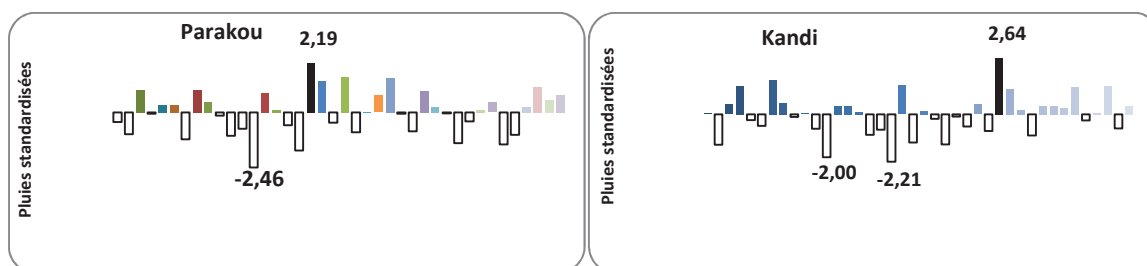


Figure 1. Variabilité interannuelle de la pluviométrie à Parakou et à Kandi de 1971 à 2010

Les précipitations à Parakou et Kandi sont marquées par de fortes fluctuations avec une succession d'années déficitaires et excédentaires marquées parfois par des événements exceptionnels. Sur la période d'étude, l'année la plus sèche a été 1983 avec une anomalie d'amplitude de -2,46 et 1988 la plus arrosée avec +2,19 à Parakou. Par contre à Kandi, l'année la plus sèche est 1988 avec une anomalie d'amplitude -2,21 et 1998 la plus arrosée avec une anomalie de +2,64. L'alternance des périodes extrêmement déficitaires et

excédentaires traduit une forte instabilité pluviométrique. La photo 1 montre les cas d'inondation à Parakou et à Kandi.



Planche 1. Inondation à Kandi (a ; b) (Source : Actubénin, 2015) et inondation à Parakou (c) (Source : Djohy G. L., 2016)

Les inondations sont des catastrophes climatiques ayant des conséquences dramatiques sur les écosystèmes, les établissements humains et les activités socioéconomiques. Les inondations sont liées aux précipitations extrêmes (Tchotsouaet *al.*, 2007 ; Amoussouet *al.*, 2014), auxquelles sont vulnérables les populations, les systèmes écologiques et socioéconomiques. La sécheresse constitue également un phénomène climatique extrême qui varie dans le temps et dans l'espace (Vissin, 2007 ; PANA, 2008 ; Bokoet *al.*, 2012). Les événements pluviométriques extrêmes sont devenus récurrents ces dernières années dans un contexte global de dessiccation (New *et al.*, 2001 ; IPCC, 2013).

2.2. Extrêmes thermométriques

La variabilité interannuelle des températures minimales, moyennes et maximales en anomalies centrées réduites entre 1971 et 2010 sont illustrées par la figure 2. Toutes les stations n'ont pas connu simultanément la même variabilité thermométrique. Les années d'extrêmes thermométriques à Parakou sont entre autres 2006, 2007 et 2008 avec des anomalies d'amplitudes respectivement de +2,69 ; +2,25 et +2,25. En outre, les années 1976 et 1978 ont connu des températures extrêmement faible (-2,07 ; -2,22).

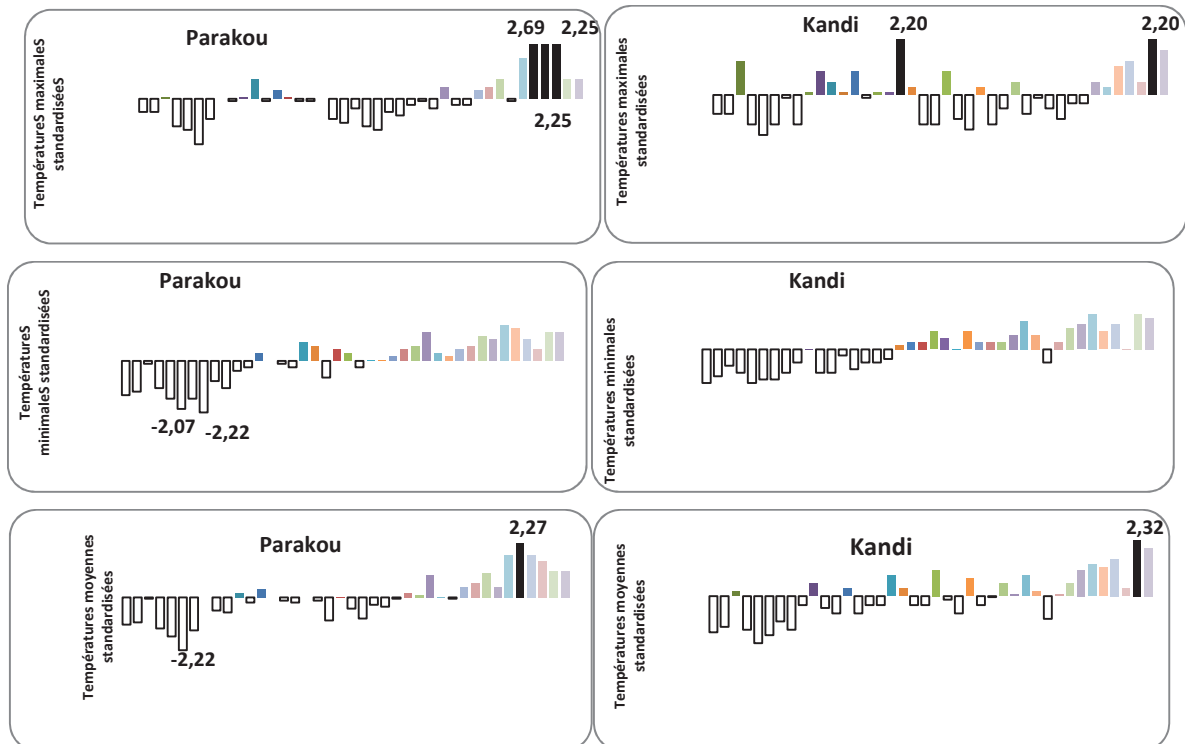


Figure 2. Variabilité interannuelle des températures à Parakou et à Kandi de 1971 à 2010

Les années d'extrêmes thermométriques à Kandi sont 1987 et 2009 avec des anomalies d'amplitudes respectivement de +2,20 et +2,20. Les vagues de chaleur et de fraîcheur sont très aléatoires et variables dans l'espace et dans le temps. Les températures extrêmes influent sur la santé de la population ainsi les activités socioéconomiques surtout l'agriculture (Abderrahmani *et al.*, 2009 ; AIPALS, 2012).

2.2. Vents extrêmes

L'évolution interannuelle de la vitesse du vent en anomalies centrées réduites sur la période de 1971 à 2010 est illustrée par la figure 3.

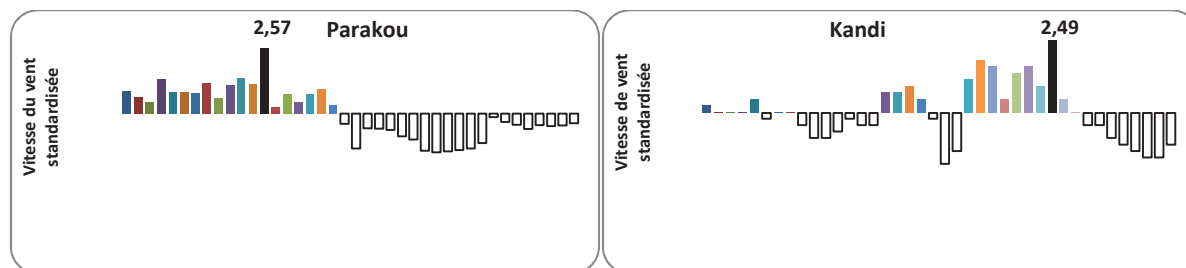


Figure 3. Variabilité interannuelle de la vitesse du vent à Parakou et à Kandi de 1971 à 2010

Les années 1983 (2,57) et 2000 (2,49) ont connu des vents extrêmes respectivement à Parakou et Kandi. Ces résultats confirment ceux de Bouba (2013), qui a montré que les vents deviennent très violents et extrêmes ces dernières années : soit environ 3,33 m/s avec une vitesse moyenne maximale de 3,88 m/s. Le vent extrême constitue une menace pour les activités économiques et les établissements humains (photo 2).



Photo 2. Salle de classe décoiffée par le vent fort à l'Ecole Primaire Publique SNTN (Parakou)

Source : Djohy G. L., Octobre 2015

La photo 2 montre à Parakou une conséquence de la manifestation des vents extrêmes qui constituent un risque climatique majeur pour les populations. Cet effet du vent sur les établissements humains s'est reproduit dans l'Ecole Primaire Publique de Banikanni en mars 2016. Cela justifie la fréquence non encore significative des vents extrêmes à Parakou ces dernières années.

Selon Alexander *et al.* (2009), la fréquence et l'intensité des conditions climatiques extrêmes ont une incidence sur les sociétés et leurs infrastructures ainsi que les écosystèmes. Les vents extrêmes provoquent des dommages considérables aux forêts et aux constructions humaines et perturbent également les activités socioéconomiques (Fallot et Hertig, 2008).

2.4. Perceptions populaires des événements climatiques extrêmes

Pour environ 80 % des populations enquêtées, les températures extrêmes sont liées à la variabilité naturelle du climat mais sont amplifiées par les activités humaines notamment les activités agricoles et l'exploitation forestière. Les enquêtés perçoivent les phénomènes

d'extrêmes climatiques dans leur milieu d'étude à travers les périodes de sécheresse et d'inondation. Ces extrêmes climatiques menacent de façon critique les activités socioéconomiques. Les communes enregistrent également des vents plus ou moins extrêmes que par le passé selon 97 % de la population et ce risque s'associe souvent aux fortes pluies.

Les populations expliquent que le renforcement des phénomènes météorologiques extrêmes notamment les cas de sécheresses sévères et d'inondations, les vagues de froids et de chaleurs et les vents extrêmes constitue des menaces réelles pour les systèmes écologiques, économiques et humains, fondements de leur mode de vie. Cette perception des populations sur les événements climatiques extrêmes corrobore les résultats de Tchotsoua *et al.*, (2007) et Karimou Barké *et al.*, (2015), qui ont observé que les effets néfastes des phénomènes climatiques extrêmes constituent un grand handicap pour le développement des activités socioéconomiques des populations et leur mode de vie.

2.5. Analyse comparative des phénomènes climatiques

A la station de Parakou, les températures maximales ont varié de 32 °C en 1976 à 34,2 °C en 2005, soit une tendance à la hausse de 0,05 °C/an, et les températures minimales ont varié de 19,9 °C en 1978 à 22,5 °C en 2005, soit une augmentation de 0,06 °C/an. A Kandi, les températures maximales ont varié de 33,8 °C en 1975 à 35,6 °C en 2009 soit une hausse de 0,04 °C/an ; celles minimales ont varié de 20,6 °C en 1971 à 22,6 °C en 2009 soit une hausse de 0,05 °C/an. Ces données confirment le réchauffement climatique évoqué par les habitants de Parakou et Kandi.

Les précipitations enregistrées au cours des années 1971 et 1972 ont été déficitaires dans toutes les stations d'étude. A Parakou, l'année 1983 a été la plus déficitaire et 1988 la plus excédentaire. A Kandi, les années 1982 et 1988 ont été les plus déficitaires et 1998 la plus excédentaire. Ces données confirment la perception des populations sur les déficits pluviométriques marquant des cas de sécheresses entre novembre et avril et les excès pluviométriques causant des inondations entre août et septembre dans leur milieu.

La forte vitesse du vent dans le mois d'avril (2,5 m/s à Parakou et 2,4 m/s à Kandi), un mois marquant le début de la saison pluvieuse ou de pré-saison selon Houndénou (1999), confirme la perception des populations sur les vents extrêmes qui accompagnent les pluies. Ces vents causent d'énormes dégâts matériels et socioéconomiques.

Les résultats des différentes analyses des phénomènes climatiques extrêmes corroborent Boko *et al.*, (2012) et Vissin (2007), qui évoquent respectivement une hausse des températures dans le Nord du Bénin de + 0,5 à 1 °C et des cas d'extrêmes pluviométriques et une sécheresse généralisée. Selon Ly *et al.*, (2013), l'augmentation des températures globales semble s'accompagner d'une diminution significative de la fréquence des jours très froids et d'une augmentation de la fréquence des jours très chauds. Le nombre d'événements météorologiques extrêmes et les dommages occasionnés tendent à augmenter ces dernières années en relation avec le réchauffement global du climat (IPCC, 2013). De plus, les vents extrêmes constituent une menace pour les activités et coïncident toujours avec la saison des pluies (Leroux, 1995).

Conclusion

Les populations des communes de Parakou et de Kandi disposent d'indicateurs caractéristiques des événements climatiques extrêmes dont les manifestations sont les inondations, la sécheresse, les vagues de chaleurs et de froids, des vents forts, statistiquement prouvés. La récurrence de ces phénomènes climatiques extrêmes et la vulnérabilité des modes

et moyens d'existence des populations renforcent leurs perceptions de l'évolution du contexte climatique dans le domaine soudanien.

Les perceptions avérées et validées pourraient être d'exploitées à des fins de modèle de type empirico-scientifique de prévention des risques climatiques et de la réduction de la vulnérabilité des populations face aux événements extrêmes.

Bibliographie

Abderrahmani B., Haouari M., Dobbi A., Hadjel M., Hassini N., 2009 : Analyse et modélisation des extrêmes de température au niveau de quelques stations types du nord ouest Algérien. *Geographia Technica*, 5-10.

AIPALS, 2012 : *Températures extrêmes*. Fiche repère, N° 6, 2 p.

Alexander L.V., Tapper N., Zhang X., Fowler H. J., Tebaldi C., Lynch A., 2009 : Climate extremes: progress and future directions. *International Journal of Climatology*, **29**, 317-319.

Amoussou E., Camberlin P., TotinVodounon S. H., Trambly Y., Houndenou C., Mahé G., Paturel J.-E., Boko M., 2014 : Evolution des précipitations extrêmes dans le bassin versant du mono (Bénin-Togo) en contexte de variabilité / changement climatique : 331-337. In Camberlin P., Richard Y., « *climat : système & interactions* », Actes du XXVIIème Colloque de l'AIC, 766 p.

Bergaoui M., Alouini A., 2001 : Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique : cas du bassin versant de Sliana en Tunisie. *Sécheresse*, **12** (4), 205-213.

Boko M., 1988 : *Climats et communautés rurales du Bénin : rythmes climatiques et rythmes de développement*. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Bourgogne, Dijon, 601p.

Boko M., Kosmowski F., Vissin W.E., 2012 : *Les Enjeux du Changement Climatique au Bénin : Programme pour le Dialogue Politique en Afrique de l'Ouest*. Konrad-Adenauer-Stiftung, Cotonou, 65 p.

Bouba L., 2013 : Hydrométéorologie de la région de l'extrême-nord (Cameroun) : impacts sur les risques d'atteintes a l'environnement et a la sante des populations : 116-121. In Boko M., Vissin E.W., Afouda S., « *Climat Agriculture, Ressources en Eau d'hier à demain* », Actes du XXVIème Colloque de l'AIC, 573 p.

Fallot J. M., Hertig J. A., 2008: Détermination des vents extrêmes à l'aide d'analyses statistiques et de modélisations numériques dans une topographie accidentée en Suisse. *Bulletin de la Société géographique*, Liège, Belgique, **51**, 31-47.

IPCC, 2013: *Climatic Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1 535 p.

Houndéou C., 1999 : *Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide. L'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation*. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Dijon, France, 390 p.

KarimouBarké M., Ambouta K., Sarr B., Tychon B., 2015 : Analyse des phénomènes climatiques extrêmes dans le sud-est du Niger : 537-542. In Michel E., « *Modélisation et Variabilités* », *Colloque de l'AIC*, liège, Belgique, 647 p.

Lamb P. J., 1982 : Persistence of Subsaharan drought. *Nature*, London, **299**, 46-47

Leroux M., 1995 : La dynamique de la grande sécheresse sahélienne. *Revue de Géographie de Lyon*, **70** n°3-4, 223-232.

Ly M., Traore S. B., Alhassane A., Sarr B., 2013 : Evolution of some observed climate extremes in the West African Sahel. *Weather and Climate Extremes*, 1, 19-25.

New M., Todd M., Hulme M., Jones P., 2001 : Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *International Journal of Climatology*, 21(15), 1 889-1 922.

PANA, 2008. *Programme d'Action National d'Adaptation Aux changements climatiques du Bénin (PANA-BENIN)*. Ministère de l'Environnement et de la Protection de la Nature (MEPN), Cotonou, Bénin, 81 p.

Tchotsoua M., Fotsing J.-M., Moussa A., 2007 : Evaluation des risques d'inondation dans la vallée de la Bénoué en aval du barrage de Lagdo (Cameroun). *Actes des JSIRAUF*, Hanoi Vietnam 1-9.

Vissin W. E., 2007 : *Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger*. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Dijon, France, 310 p.

VARIABILITÉ ET TENDANCES DES EXTRÊMES THERMIQUES DANS L'ÉTAT DU PARANÁ, BRÉSIL (1970-2015)

ELY D. F.¹, FORTIN G.²

¹*Departamento de Geociências, Campus Universitário – Caixa Postal 6001 – CEP 86051-990 - Universidade Estadual de Londrina (UEL) - deise.ely@gmail.com*

²*Département d'histoire et de géographie, Université de Moncton – guillaume.fortin@umoncton.ca*

Résumé : L'état du Paraná, au sud du Brésil, fait face à divers aléas climatiques qui menacent la sécurité des populations les plus vulnérables. Cette étude présente les résultats d'une analyse de la variabilité et des tendances d'extrêmes thermiques qui se base sur une dizaine d'indices climatiques calculés à partir des données thermiques issues des réseaux de l'Institut National de Météorologie (INMET) et de l'Institut Agronomique du Paraná (IAPAR) pour dix stations réparties principalement en deux régions de l'état du Paraná. Nos résultats montrent une réduction du nombre de jours froids dans toutes les stations mais plus marquée pour Morretes, Curitiba et Paranaguá. Une augmentation significative du nombre de jours avec des températures supérieures à 25°C a été observée pour Bela Vista do Paraíso, Londrina, Umuarama, Lapa et Curitiba. Une analyse détaillée des résultats obtenus et des disparités spatiales est présentée dans ce travail.

Mots-clés: températures, extrêmes, tendances, Brésil.

Abstract : The state of Paraná, in southern Brazil, faces various climatic hazards that threaten the safety of the most vulnerable populations. This study presents the results of an analysis of variability and extreme thermal trends based on ten climatic indices calculated from temperature data from the National Meteorological Institute (INMET) networks and the Agronomic Institute of Paraná (IAPAR) for ten stations distributed mainly in two regions of the state of Paraná. Our results show a reduction of cold days in all stations but more pronounced for Morretes, Curitiba and Paranaguá. A significant increase in the number of days with temperatures above 25°C was observed for Bela Vista do Paraíso, Londrina, Umuarama, Lapa and Curitiba. A detailed analysis of the obtained results and spatial disparities is presented in this work.

Keywords : temperature, extremes, trends, Brazil.

Introduction

Les conditions météorologiques perturbent, de manière directe ou indirecte, la plupart des activités socio-économiques. Les activités agricoles sont particulièrement sensibles aux aléas climatiques qui sont perçus comme des contraintes. L'étude de la variabilité climatique permet d'identifier l'apparition d'un changement climatique, à moyen et long terme, ce qui peut causer des changements dans les formes de production, la disponibilité des produits ainsi que sur les questions relatives à la politique agricole.

L'état de Paraná se situe dans le sud du Brésil (figure 1). Son économie est fortement dépendante des activités et rendements agricoles qui sont très sensibles aux phénomènes météorologiques extrêmes tels que les vagues de froids ou de chaleur, les sécheresses et les inondations. Selon Marengo et Camargo (2008), la fréquence et l'intensité des températures extrêmes modulent les réponses des écosystèmes agricoles et des sociétés. De plus, la variabilité climatique du Paraná s'explique par la dynamique atmosphérique qui est intimement liée à ENSO (Marengo et Camargo, 2008). ENSO est responsable d'épisodes de fortes pluies et de sécheresses prolongées selon la phase. D'autres événements extrêmes tels que les vagues de chaleur et de froid, les tempêtes et les tornades ont aussi des impacts conséquents sur les activités socio-économiques de l'état (Ely et Pereira, 2011; Mangili et Ely, 2016).

Les extrêmes thermiques peuvent être calculés à partir de seuils appliqués sur les températures minimales et maximales sur une base quotidienne (Karl *et al.*, 1999, Fortin *et al.*, 2016). Ces indices thermiques permettent de mieux décrire la variabilité et les tendances des conditions extrêmes récentes qui peuvent avoir un impact sur la société, affectant, par

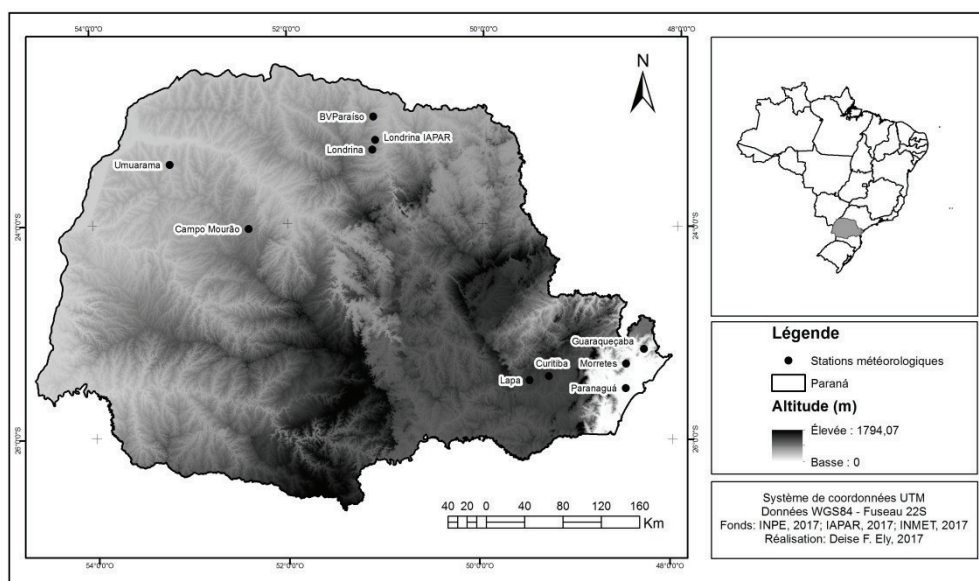
exemple, la santé, l'agriculture, les ressources en eau ou la disponibilité et la consommation de l'électricité.

Mendonça (2006, 2014) estime qu'au cours les quarante dernières années, la température moyenne dans le sud du Brésil a augmenté d'environ $1,3^{\circ}\text{C}$, ce qui aurait également été accompagné d'une hausse des précipitations totales annuelles moyennes. L'intensification du réchauffement régional s'est poursuivie de manière plus marquée dans la partie nord du sud du Brésil, où se situe l'état du Paraná, en particulier dans la région qui est caractérisée par un climat de type tropical sans période sèche du Brésil central où un renforcement des conditions tropicales a été observé. Cela signifie des hivers moins froids et des précipitations plus intenses au cours des dernières décennies.

Marengo et Camargo (2008) ont analysé les tendances de la température minimale et maximale de l'air et l'écart de température diurne (DTR) pour le sud du Brésil de 1960 à 2002. Ils ont identifiés de fortes hausses des températures nocturnes (représenté par la température minimale) comparativement à une légère augmentation de la température diurne (représenté par la température maximale) à l'échelle annuelle et saisonnière pour la plupart des stations météorologiques étudiées. Les tendances du réchauffement sont plus fortes pendant la saison hivernale qu'au cours de la période estivale. Par conséquent, les tendances négatives aux échelles annuelles et saisonnières de la variable DTR signifient qu'il y a eu dans le sud du Brésil, au cours les 40 dernières années, une plus forte augmentation des températures nocturnes plutôt que pour les températures diurnes ce qui a atténué les écarts entre les valeurs minimales et maximales.

Ely et Dubreuil (2014) ont analysé la variabilité interannuelle de la température et des précipitations sur le versant sud du bassin du Rio Paranapanema, situé dans l'état du Paraná. Le but était d'identifier un possible changement du régime climatique. Des données quotidiennes des températures et des précipitations pour la période de 1979 à 2010 ont servi à réaliser des tests statistiques, notamment Mann-Kendall et Pettitt (Pettitt, 1979). Les résultats obtenus ont montré une tendance générale à la hausse des températures dans le sud du bassin versant.

Le but principal de la présente étude consiste à évaluer la fréquence et les tendances de certains extrêmes thermiques, entre 1970 et 2015, en utilisant une dizaine d'indices thermiques pour dix stations météorologiques situées dans deux régions de l'état (figure 1).



1. Données et méthodes

En accord avec Fortin *et al.* (2016), le récent réchauffement climatique observé à l'échelle mondiale peut être difficile à détecter au niveau régional ou local notamment lorsque les séries temporelles sont incomplètes voire même absentes. Au Paraná il existe plusieurs défis quant à la disponibilité des données climatiques. Ces données sont rarement utilisables avant les années 1970, c'est-à-dire avant la mise en place d'un réseau national de collecte des données météorologiques.

Les données utilisées dans cette étude proviennent de l'Institut Agronomique de Paraná (IAPAR) et l'Institut National de Météorologie (INMET). Il s'agit de données quotidiennes des températures maximales et minimales pour la période de 1970 à 2015. Au total dix stations météorologiques ont été retenues (figure 1 et tableau 1). Cinq stations se situent dans le nord de l'état. Elles sont dotées d'un climat tropical du Brésil central où la température moyenne du mois le plus froid se situe en dessous de 18°C, le mois le plus chaud dépasse les 22°C et la saison sèche est absente. Les cinq autres stations sont regroupées dans la partie est de l'état. Elles subissent une influence plus ou moins marquée de la côte selon la distance à la mer. Le climat est ici de type subtropical humide à hiver frais où les températures minimales des jours les plus froids peuvent atteindre le point de congélation.

La première étape de l'analyse consiste à contrôler la qualité des données. Ensuite on procède au comblement des données manquantes dans nos séries temporelles. Deux méthodes ont été testées : celle du plus proche voisin et la méthode NIPALS (*Non Linear Iterative Partial Least Squares*) (Wold, 1973). Cette dernière a été appliquée à l'ensemble des données, qui est en fait un modèle d'analyse en composantes principales (ACP) qui a été obtenu et utilisé pour calculer les valeurs manquantes. Nous n'avons retenu que les stations ayant moins de 20% de données manquantes (tableau 1).

L'homogénéisation des données a été réalisée avec le logiciel RHtestsV4 (Feng et Wang, 2013). Des ajustements ont été apportés lors de la détection d'un problème de manque d'homogénéité des données ou d'un saut dans une série temporelle, causé par la relocalisation d'une station plutôt que par une variation d'origine climatique. Le modèle utilisé est basé sur le t maximal pénalisé et les tests F (Wang *et al.*, 2007 ; Wang 2008a), qui sont intégrés dans un algorithme de test récursif (Wang 2008b). Pour calculer les ajustements sur les séries, RHtestsV4 utilise un algorithme de type QM (*Quantile-Matching*).

Tableau 1. Coordonnées géographiques des stations utilisées et pourcentage des données manquantes (qui ont été comblées par la suite).

Nom de la station (code)	Latitude S	Longitude O	Altitude (m)	Données manquantes (%)	
				Tmax	Tmin
Bela Vista do Paraíso (2251027)	-22,57	-51,12	600	2,9	2,9
Londrina (2351003)	-23,22	-51,10	585	11,63	11,63
Londrina (83766)	-23,31	-51,10	566	16,32	15,05
Campo Mourão (83783)	-24,05	-52,36	616	10,15	3,77
Umuarama (2353008)	-23,44	-53,17	480	3,8	3,8
Morretes (2548038)	-25,30	-48,49	59	-	-
Lapa (2549091)	-25,47	-49,46	910	17,8	17,8
Curitiba (83842)	-25,43	-49,26	923	5,8	5,8
Paranaguá (83844)	-25,53	-48,51	4,5	21,35	10,17
Guaraqueçaba (2548039)	-26,16	-48,51	40	16,29	16,29

Une fois le contrôle de qualité des données est terminé, les différents indices climatiques ont été calculés à partir des séries modifiées en utilisant le logiciel ClimPACT. Ce logiciel est semblable à RCLimDex qui a été développé par l'équipe d'experts ETCCDMI pour la

détection des changements climatiques et les indices de surveillance (Zhang et Yang, 2004). Il se base sur divers seuils pour calculer la fréquence, l'intensité et la durée des extrêmes thermiques à partir des séries de données quotidiennes (Tableau 2).

La dernière étape de l'étude a consisté à calculer les tendances sur les séries des indices pour la totalité de la période de l'étude. Pour l'analyse des tendances, nous avons utilisé le test non paramétrique de Mann-Kendall ou MK (Mann 1945; Kendall 1975). Ce test nous a permis de calculer le τ (tau) qui varie entre -1 et +1 dans notre tableau (ou entre -4 et +4 selon Sneyers, 1990), dont les valeurs positives indiquent une tendance à la hausse et les valeurs négatives expliquent une tendance à la baisse (Almeida *et al.*, 2016).

2. Résultats et discussion

L'analyse des résultats nous permet de dégager certains constats, notamment une réduction du nombre de jours froids (FD) pour toutes les stations dont les baisses les plus importantes et significatives statistiquement, sont pour les stations de Morretes, Curitiba et Paranaguá; situé à l'est de l'État (tableau 3).

Tableau 2. Description des indices utilisés dans cette étude.

<u>Élément</u>	<u>Indice</u>	<u>Nom de l'indicateur</u>	<u>Définitions</u>	<u>Unités</u>
TX	SU25, SU30, SU35	Jours d'été	Décompte annuel lorsque TX (maximum journalier) >25°C; >30 °C; >35°C	Jours
	ID	Jours glaciaux	Décompte annuel lorsque TX (maximum journalier) <0°C	Jours
	TX10p	Jours frais	Décompte des jours lorsque TX < 10 ^{ième} percentile	Jours
	WSDI	Durée de vague de chaleur	Décompte annuel des jours avec au moins 6 jours consécutifs lorsque TX > 90 ^{ième} percentile	Jours
	TX90p, TX95p	Jours chauds, Jours très chauds	Décompte des jours lorsque TX > 90 ^{ième} percentile; Décompte des jours lorsque TX > 95 ^{ième} percentile	Jours
	TXx	Temp. Max	Valeur maximale quotidienne enregistrée au cours d'un mois	°C
TN	FD	Jours de gel	Décompte annuel lorsque TN (minimum journalier) <0°C	Jours
	TN10p	Nuits fraîches	Décompte des jours lorsque TN < 10 ^{ième} percentile	Jours
	CSDI2, CSDI6	Durée de vague de froid	Décompte annuel des jours avec au moins 2 (CSDI2) ou 6 (CSDI6) jours consécutifs lorsque TN < 10 ^{ième} percentile	Jours
	TN90p	Nuits chaudes	Décompte des jours lorsque TN > 90 ^{ième} percentile	Jours
	TNn	Temp. Min	Valeur minimale quotidienne enregistrée au cours d'un mois	
Les deux	DTR	Écart diurne de température	Différence de la moyenne mensuelle entre TX et TN	°C

TX : température maximale; TN: température minimale.

Une augmentation du nombre de jours avec des températures supérieures à 25°C (SU25) est survenue de façon plus significative à Bela Vista do Paraíso, Londrina, Umuarama (nord), Lapa et Curitiba (est). Les indices SU30 et SU35 mettent en évidence une tendance positive pour les stations situées dans le nord de l'état. Seul le poste de Lapa a montré une tendance négative significative ce qui est contradictoire avec la hausse observée pour la même station pour SU25.

Les valeurs maximales mensuelles des températures quotidiennes (TXx) ont également une tendance significative à la hausse pour les stations situées au nord de l'État (Bela Vista do Paraíso, Londrina IAPAR, Londrina et Umuarama). Par contre, elles ont une tendance à la baisse pour les stations de Paranaguá et Lapa (dans l'est). Les températures minimales

quotidiennes (TNn) sont aussi augmentées dans les stations analysées, sauf pour Lapa (situé à l'est) où il y a eu une réduction presque nulle et non significative.

Les vagues de chaleur (WSDI) ont montré une hausse significative pour Morretes et Umuarama, située dans le nord de l'État, mais une baisse à Guaraqueçaba qui se localise à l'est de l'État. Pour les épisodes de vagues de froid (CSDI2), plusieurs stations ont plutôt enregistré une réduction significative dans les deux régions étudiées. Concernant les vagues de froid de longue durée (CSDI6) et à la différence des autres stations, la station de Campo Mourão a connu une augmentation de ces vagues.

Tableau 3. Tendances pour les indices thermiques pour les dix stations.

Indices	BVParaiso	Londrina IAPAR	Londrina	CMourão	Umuarama	Morretes	Lapa	Curitiba	Paranaguá	Guaraqueçaba
FD	-0.08	-0.17	-0.18	-0.05	-0.05	-0.34	-0.07	-0.43	-0.21	-0.15
SU25	0.22	0.18	0.33	0.00	0.39	0.07	0.24	0.30	0.10	-0.15
SU30	0.35	0.29	0.45	0.05	0.58	0.16	-0.06	0.11	0.08	-0.06
SU35	0.38	0.29	0.32	0.08	0.42	0.13	-0.26	-0.05	-0.08	0.16
TXx	0.34	0.32	0.26	0.11	0.36	0.06	-0.36	0.05	-0.03	0.15
TNn	0.20	0.17	0.20	0.00	0.14	0.34	-0.01	0.41	0.25	0.11
WSDI	0.13	0.01	0.16	0.03	0.37	0.20	0.05	0.18	0.06	-0.22
CSDI2	-0.31	-0.41	-0.24	0.07	-0.37	-0.53	-0.04	-0.56	-0.52	-0.35
CSDI6	-0.29	-0.28	0.01	0.27	-0.21	-0.45	-0.08	-0.37	-0.37	-0.20
TX95t	0.15	0.15	0.54	0.12	0.09	-0.12	-0.03	-0.01	-0.18	-0.15
DTR	0.29	0.26	0.38	0.17	0.53	0.12	0.10	0.44	0.16	0.11

Les valeurs en **gras** sont significatives à un taux de 0,05.

Concernant les jours très chauds (TX95t), on remarque que les stations situées au nord ont tendance à connaître des hausses, en particulier pour Londrina (la seule station qui présente une tendance significative) tandis que celles qui se situent sur la côte orientale ont plutôt une légère tendance à la baisse.

Enfin, l'écart diurne de température (DTR) a tendance à augmenter dans toutes les stations analysées, mais avec des taux significatifs pour les stations situées au nord de l'État (Bela Vista do Paraiso, LondrinaIAPAR, Londrina et Umuarama).

Conclusion

Notre étude permet d'obtenir une vue d'ensemble des tendances observées pour la période de 1970 à 2015 pour une dizaine de stations qui sont regroupées principalement en deux régions dans l'état du Paraná au sud du Brésil. Nos résultats semblent indiquer une hausse plus marquée des indices utilisant les températures maximales surtout dans la partie nord de l'état tandis que les indices basés sur les températures minimales connaissent une hausse plus modeste et partielle qui varie selon l'emplacement des stations. L'utilisation future d'une approche similaire mais pour des indices pluviométriques devrait nous permettre de mieux comprendre l'ampleur des changements récents survenus dans cette région ainsi que de déterminer si des tendances peuvent être détectées.

Bibliographie

- Almeida, C. T., Oliveira-Júnior, J. F., Delgado, R. C., Cubo, P., Ramos, M. C., 2016 : Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973–2013. *International Journal of Climatology*. DOI: 10.1002/joc.4831
- Ely, D. F., Pereira, L. M. P., 2011 : Contribuição ao estudo do regime dos ventos no estado do Paraná. *Geografia*, **36**(3), p. 589 – 607.
- Ely, D. F., Dubreuil, V., 2014 : Evolutions des températures et des précipitations dans le versant sud du bassin de la rivière Paranapanema, Parana, Brésil. *Actes du 27e colloque de l'AIC*, Dijon, 555-560.
- Fortin, G., Acquavotta, F., Fratianni, S., 2016: The evolution of temperature extremes in the Gaspé Peninsula, Quebec, Canada (1974–2013). *Theoretical & Applied Climatology*. DOI 10.1007/s00704-016-1859-x
- Karl, T.R., Nicholls, N., Ghazi, A., 1999 : CLIVAR/GCOS/WMO workshop on indices and indicators for climate extremes: workshop summary. *Climatic Change*, **42**, 3–7.
- Kendall, M.G., 1975 : Rank Correlation Methods. Griffin: London.
- Mann, H.B., 1945 : Nonparametric tests against trend. *Econometrica*. **13**, 245-259.
- Mangily, F. B.; Ely, D. F. 2016 : Análise da produção do milho segunda safra com o balanço hídrico sequencial em Londrina (PR). *Geografia (Londrina)*, **25**(1), p. 65 – 85.
- Marengo, J. A., Camargo, C. C., 2008 : Surface air temperature trends in Southern Brazil for 1960–2002. *International Journal of Climatology*, **28**, 893–904.
- Mendonça, F. A., 2006 : Aquecimento global e suas manifestações regionais e locais: alguns indicadores da região Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, **2**, 71–86.
- Mendonça, F. A. (Org.), 2014 : Os Climas do Sul: em tempos de mudanças climáticas globais. Jundiaí, *Paco Editorial*.
- Pettitt, A.N. 1979 : A nonparametric approach to the change-point problem. *Applied Statistics*, **28**, 126-135.
- Sneyers, R. 1990. On the statistical analysis of series of observations World Meteorological Organization (WMO), Technical note No. 143, Geneva: 192.
- Wang, X.L. 2008a : Penalized maximal F test for detecting undocumented mean shift without trend change. *Journal of Atmospheric and Ocean Technology*. **25**(3), 368–384.
- Wang, X.L. 2008b: Accounting for autocorrelation in detecting mean shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. **47**(9), 2423–2444.
- Wang, X.L., Wen, Q.H., Wu, Y., 2007: Penalized maximal t test for detecting undocumented mean change in climate data series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. **46**(6), 916–931.
- Wang, X.L., Chen, H.; Wu, Y.; Feng, Y., Pu, Q., 2010: New techniques for the detection and adjustment of shifts in daily precipitation data series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*. **49**(12), 2416–2436.
- Wang, X.L., Feng, Y., 2013: *RHtestsV4: User Manual*. Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate, Science and Technology Branch, Environment Canada. Downsview, Ontario, Canada.
- Wold, H. 1973 : Nonlinear iterative partial least squares (NIPALS) modeling: some current developments. In: Krishnaiah, P. R., ed. *Multivariate Analysis II*. *Academic Press*, 383–407.
- Zhang, X.; Yang, F., 2004 : *RCLimDex (1.0) User Guide*. Climate Research Branch, Environment Canada, Downsview, Ontario, Canada.

APPORTS DES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES RADARS ET AU SOL A L'ÉTUDE DES ÉVÉNEMENTS PLUVIOMÉTRIQUES EXTRÊMES DU PIEMONTE (ITALIE)

GUENZI D. ¹, BARONETTI A. ¹, KERMADI S. ², ACQUAOTTA F. ¹, CREMONINI R. ³, BORASO R. ⁴, SPANNA F. ⁵, FRATIANNI S. ¹

¹Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino, via Valperga Caluso 35 - 10125 Torino, Italie [simona.fratianni@unito.it]

²Université de Lyon, UMR CNRS 5600 EVS [saida.kermadi@univ-lyon2.fr]

³ARPA Piemonte – Dipartimento sistemi previsionali, via Pio VII 9 - 10135 Torino, Italie [roberto.cremonini@arpa.piemonte.it]

⁴CSP – Innovazione nelle ICT, via Alassio 11 – 10126 Torino, Italie [rodolfo.boraso@csp.it]

⁵Regione Piemonte – Servizio Fitosanitario – Settore Agrometeorologico, via Livorno 60 – 10144 Torino, Italie [federico.spanna@regione.piemonte.it]

Résumé : *Prévoir l'évolution spatiale et temporelle des événements extrêmes exige des mesures précises des précipitations. Mettant l'accent sur la plaine et la colline du Piémont, une caractérisation de la distribution des précipitations dans la zone a été réalisée et des événements extrêmes et leurs seuils ont été identifiés. Pour analyser les événements, nous avons utilisé deux radars météorologiques et un réseau de pluviomètres en comparant les observations du radar avec 211 pluviométries appartenant aux deux différents réseaux de monitoring piémontais. Afin de réduire les incertitudes et les erreurs entre les deux types de données, nous avons appliqué une correction sur les informations provenant du radar avec les informations spatialisées des pluviomètres, ce qui nous a permis de reconstruire le champ de précipitations avec une bonne précision.*

Mots-clés : *événements de précipitations extrêmes, radars météorologiques, pluviomètres, fusion conditionnelle*

Abstract : *Analysis of extreme rainfall events: weather radars, satellite imaginary and a dense network of rain gauges in Piedmont. Predicting the spatial and temporal evolution of extreme events requires accurate measurements of rainfall. Focusing on the Piedmont plain and hills zone, a characterization of rainfall's distribution in the area was carried out and extreme events and their thresholds were identified. To analyze these events, we used two weather radars and a dense network composed by 211 rain gauges belonging to two different monitoring networks, by comparing the radar observations with ground measurements. In order to reduce uncertainties and errors between the two data types, we have applied on radar data a correction based on a spatialization of gauges' information, allowing us to reconstruct the precipitation field with good accuracy.*

Keywords : *extreme precipitation events, weather radars, rain gauges, conditional merging*

Introduction

Les précipitations extrêmes, en particulier celles de courte durée, provoquent souvent d'importants dommages dans les régions densément peuplées. Une bonne surveillance de ces événements extrêmes exige des mesures précises des précipitations en raison des caractéristiques hydrologiques de l'environnement. Pour faire une estimation de ces précipitations, nous nous sommes concentrés sur le Piémont, en recherchant les événements extrêmes et leurs seuils, ainsi qu'en obtenant une caractérisation climatique de la région et en identifiant certains cas d'étude.

Afin d'analyser ces événements, nous avons corrélié les données de précipitations enregistrées par deux radars météorologiques avec ceux de 211 stations météorologiques appartenant aux réseaux ARPA (Agence régionale pour la protection de l'environnement) Piémont et RAM (Réseau agro-météorologique de la région du Piémont).

Cette double instrumentation a permis de comparer, pour chaque événement, les observations du radar avec les mesures au sol des pluviomètres. Afin de réduire les incertitudes et les écarts entre les deux types de données, nous avons corrigé les informations provenant du radar avec les informations spatialisées des pluviomètres. Cette correction nous a permis de reconstruire le champ de précipitations avec une bonne précision et d'évaluer les

performances du radar avec une technique d'ajustement qui est capable de corriger la quantité des précipitations observées au pas de temps horaire.

1. Zone d'étude

Le Piémont, situé dans la partie nord-ouest de l'Italie (fig. 1), couvre une superficie de 25 402 km² caractérisée par trois zones d'altitude : montagnes (43%), collines (30%) et plaines (27%). Pour cette raison, il existe une forte différenciation géographique dans les régimes de précipitations, non seulement en ce qui concerne les valeurs absolues, mais aussi en ce qui concerne leur répartition (Acquaotta et Fratianni, 2013).

L'une des principales raisons de la très grande variabilité spatiale des précipitations est sa forte dépendance à l'altitude du terrain et à la pente, ainsi qu'à l'orientation des pentes (Meersmans *et al.*, 2016). En outre, dans les zones avec une orographie complexe, le radar souffre d'un problème appelé beam blocking. Ce phénomène peut ainsi faire de la détection des précipitations une question particulièrement sensible. Pour cette raison, les pluies des stations situées à plus de 770 mètres ne sont pas analysées.

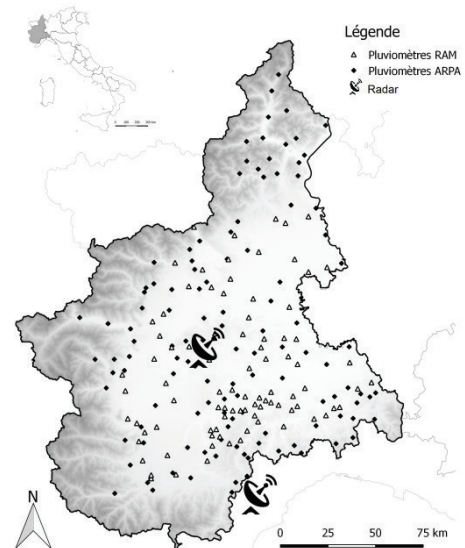


Figure 7. Radar et pluviomètres de la plaine et la colline du Piémont.

2. Méthodologie

2.1. Instrumentation

Dans notre zone d'étude, l'Agence Régionale pour la Protection de l'Environnement (ARPA) et le Réseau Agro-Météorologiques (RAM) comptent 211 pluviographes avec une fréquence d'information de 10 mn. Deux radars météorologiques couvrent également l'ensemble du territoire et fournissent des informations avec une fréquence de 5 mn (fig. 1). Avant de procéder à l'analyse climatique, les données ont été contrôlées par le programme R ClimPACT (Alexander *et al.*, 2013) et la corrélation entre les deux réseaux au sol a été vérifiée (Acquaotta *et al.*, 2016). Notre travail s'est d'abord basé sur l'étude des épisodes de précipitations de la période 2004 – 2014, puis ensuite sur l'analyse de quelques événements extrêmes qui nous paraissaient intéressants d'approfondir.

2.2. Caractérisation climatique

La caractérisation climatique des précipitations dans le Piémont montre que la moyenne annuelle des précipitations au cours des 11 dernières années est de 954 mm et l'année la plus arrosée est 2014, avec 1378 mm. La répartition spatiale des précipitations a été identifiée grâce à l'analyse par grappes (cluster analysis) qui, à partir d'un ensemble de données initiales, détermine les sous-groupes appelés grappes. L'application de cette méthode dans le Piémont met en valeur cinq grappes correspondant à cinq zones climatiques (fig. 2).

Il existe trois zones de forte pluviosité, les contributions les plus importantes correspondent au Cluster5 qui affecte l'ensemble du secteur nord du Piémont, en particulier la province du Verbano-Cusio-Ossola. Dans ce domaine, le total pluviométrique est supérieur à 1600 mm/an. La deuxième zone la plus pluvieuse correspond au Cluster4 et caractérise l'Apennin Ligure, la

frontière entre le Piémont et la Ligurie. Dans ce domaine, la pluviométrie

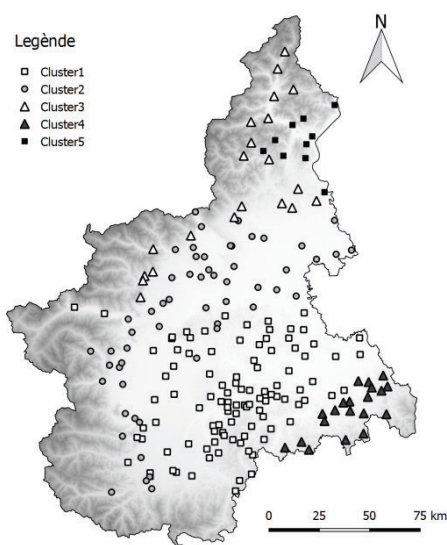


Figure 2. Régions climatiques

trouve dans les groupes Cluster1, Cluster3 et Cluster5. Le régime préalpin (maximum au printemps, minimum en hiver) se trouve dans le Cluster2 et le régime sublittoral (maximum en automne, minimum en hiver) dans le groupe du Cluster4. L'étude sur la densité des précipitations montre que le Cluster5 présente les précipitations les plus intenses, une moyenne journalière de 19 mm, alors que le Cluster1 n'enregistre que 11 mm.

La classification des précipitations par le calcul des percentiles a montré que les stations situées au nord du Piémont, au pied des Alpes du Canavese (groupe Cluster5 et Cluster3), figurent parmi celles où les mesures de précipitations sont les plus importantes. En effet, les événements pouvant être considérés comme extrêmes, correspondent à des événements pluvieux de 94 à 123 mm/jour. Pour le secteur central (correspondant au groupe du Cluster1 et à notre zone d'étude), les épisodes extrêmes sont d'environ 61 mm par jour. L'utilisation des percentiles 95 (précipitations fortes) et 99 (précipitations extrêmes) pour chaque saison montre que les précipitations fortes ont lieu principalement en automne et au printemps et les précipitations extrêmes en été, associées essentiellement à des orages.

2.3. Application de la fusion conditionnelle

Afin d'analyser au mieux les épisodes de précipitations extrêmes qui ont affecté l'ensemble du Piémont, nous avons mis en œuvre une méthode géostatistique bien connue dans la littérature et considérée comme une des meilleures actuellement disponibles : la fusion conditionnelle (Ehret, 2002 ; Sinclair et Pegram, 2005 ; Goudenhoofd et Delobbe, 2009).

Cette méthode est basée sur les hypothèses suivantes : les données radar conservent très bien la structure spatiale du champ des précipitations, bien que leurs mesures quantitatives restent des estimations. Les données des pluviomètres sont plus précises dans les mesures, mais elles sont par contre ponctuelles.

Pour spatialiser les données des pluviomètres, nous avons utilisé la méthode du krigeage ordinaire. Cette méthode a été, ensuite, appliquée aux points de la grille de radar correspondants aux pluviomètres. Les deux cartes résultantes sont alors soustraites l'une de

moyenne annuelle est de plus de 1500 mm et le maximum (1750 mm) a été enregistré à Fraconalto (AL). La troisième zone pluvieuse est le Cluster3 qui longe les Alpes du Canavese vers le nord. Dans cette zone, la pluviométrie moyenne annuelle est comprise entre 1200 mm et 1400 mm.

Les zones de faible pluviosité, représentées par les Cluster1 et Cluster2, correspondent aux plaines d'Alessandria, où chaque année on mesure une moyenne de 650 mm. Une grande partie du centre de Piémont reçoit moins de 800 mm, en particulier le Val di Susa, dont la moyenne annuelle des précipitations est de 700 mm.

Les précipitations saisonnières montrent que le régime est généralement subalpin (maximum dans les saisons d'automne et de printemps et minimum en hiver) (Acquaotta et Fratianni, 2013) ; en particulier, on le

l'autre de manière à obtenir un champ d'écarts, qui est utilisé pour corriger le krigeage effectué sur les pluviomètres.

Nous avons aussi testé une variante de la méthode utilisant la division plutôt que la soustraction. Ce test a permis d'obtenir ce que nous avons appelé un « champ de biais », à la place du champ d'écarts utilisé dans la fusion conditionnelle. Cette méthode s'est révélée meilleure que la fusion conditionnelle dans certains cas, mais inappropriée pour d'autres applications. Pour cette raison, nous avons décidé d'examiner la moyenne du champ d'écarts et du champ de biais, qui avait donné des résultats satisfaisants (Guenzi *et al.*, 2016). Cependant, d'une manière générale, la fusion conditionnelle classique s'est avérée plus fiable, offrant de meilleures valeurs avec de faibles facteurs d'erreur que nous avons examinés (l'erreur moyenne ME, l'erreur absolue moyenne MAE, l'erreur absolue moyenne relative RMAE, le biais moyen MB, la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne RMSE, l'écart-type SD, le coefficient de détermination R² et les coefficients A et B de la régression linéaire $Y=AX+B$).

Cette méthode a été validée par la méthode de validation croisée appelée « k-fold cross-validation » (Arlot et Celisse, 2010). Nous avons utilisé un facteur $k=30$ qui nous permet l'exclusion de 10 pluviomètres au maximum par itération, sur l'ensemble des 211 pluviomètres.

L'algorithme, développé en R, est disponible sur demande auprès des auteurs (Guenzi *et al.*, 2016) et sur le site de Github³³.

3. Résultats

Les figures 3a à 3c présentent les résultats de la méthode de fusion conditionnelle appliquée à l'événement pluviométrique extrême du 28 et 29 juillet 2014, identifié dans la zone climatique du Cluster1. Cette zone comprend la majeure partie du centre du Piémont, et est représentative de la situation habituellement rencontrée au Piémont. Les événements extrêmes caractéristiques y enregistrent plus de 74 mm/jour pendant la saison la plus pluvieuse (printemps) et 51 mm pour la saison la plus sèche (hiver).

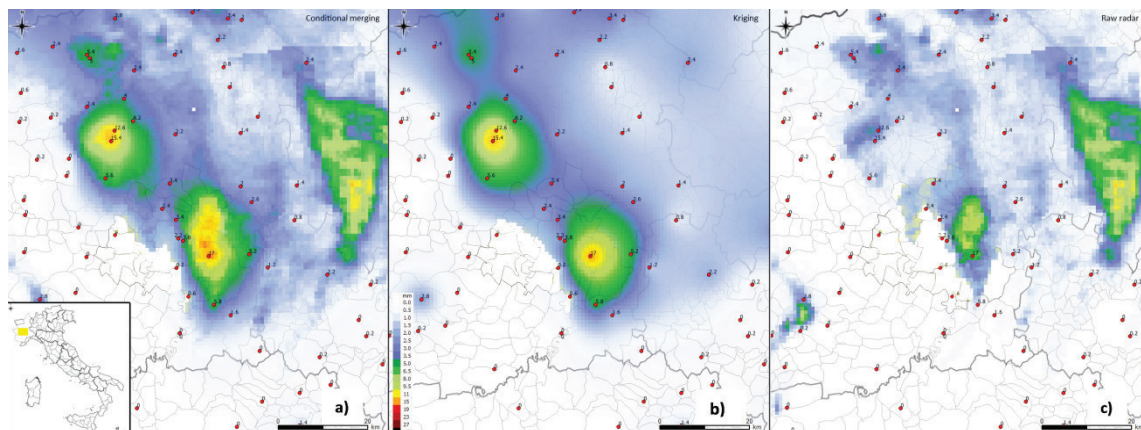


Figure 3. **Champ de précipitations du 28-29 juillet** a) Fusion conditionnelle ; b) Krigeage ; c) Données radar brutes

³³ <https://github.com/UniToDSTGruppoClima/CondMerg>

L'événement des 28 et 29 juillet 2014 est caractérisé par un flux cyclonique provenant du nord de la France et atteignant la région du Piémont, dans le nord-ouest de l'Italie. Cela a induit une zone de basse pression avec des pluies et de la grêle près de Turin, mais son décalage rapide vers l'est a permis que les précipitations ne persistent pas trop sur la même zone. Malgré cela, les valeurs moyennes de pluie mesurées ont atteint entre 30 et 40 mm en 12 heures, avec des pics de 120 mm; d'autres pics ont été mesurés jusqu'à 64 mm/h, 89,8 mm en 3 heures et 115,8 mm en 6 heures, ce qui correspond à une période de retour estimée supérieure à 50 ans. Dans cet événement extrême, les informations provenant du radar et des pluviomètres ne correspondaient pas la plupart du temps, donc nous avons dû reconstruire les champs de précipitation en utilisant CondMerg.

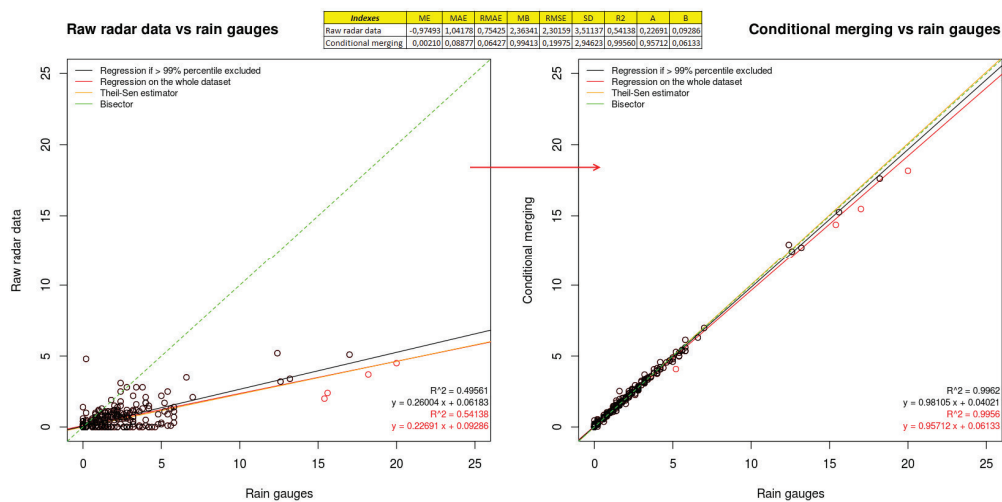


Figure 4. Nuage de points des données radar brutes et de la fusion conditionnelle

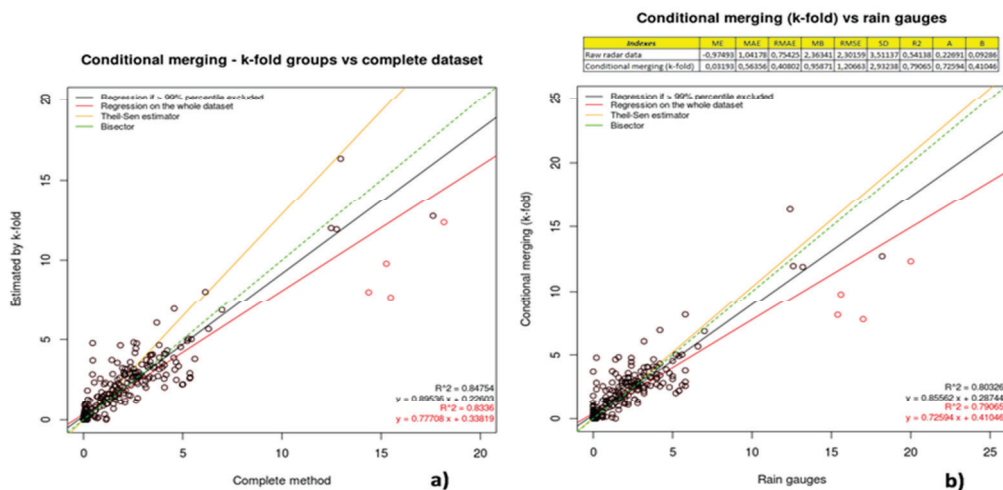


Figure 5. a) Validation de la fusion conditionnelle par la « k-fold cross validation »; b) Estimation de la fusion conditionnelle aux points de mesures pluviométriques par la « k-fold cross validation ».

En regardant les études de cas des événements extrêmes que nous avons sélectionnées, nous pouvons voir que la fusion conditionnelle (fig. 3a) représente mieux les données spatialisées que le krigeage ordinaire (fig. 3b). Cette méthode maintient, par ailleurs, la forme de la zone des précipitations dérivées des observations du radar (fig. 3c).

Si nous passons à l'analyse du nuage de points résultant, on remarque que les données radar et les données pluviométriques ont un meilleur ajustement après l'application de la fusion conditionnelle conduisant à une amélioration de tous les indices (fig. 4).

Enfin, grâce à la méthode de validation croisée, nous avons trouvé que ces améliorations sont non seulement satisfaisantes pour les points couverts par les pluviomètres, mais aussi pour les zones qui ne le sont pas directement. En enlevant certaines stations pluviométriques de notre série de données, nous avons pu vérifier que l'algorithme est capable de reconstruire les points au-dessus des pluviomètres. Ceci nous a permis de constater que, grâce à l'utilisation d'un réseau de pluviomètres très dense et vaste, même dans les endroits non couverts directement, la fusion conditionnelle permet d'affiner les données radar avec une amélioration non négligeable (Guenzi *et al.*, 2016).

Dans le nuage de points obtenu (fig. 5a), nous avons inclus sur l'axe des abscisses les valeurs calculées avec la fusion conditionnelle « complète » (réalisée sur l'ensemble des données) et sur l'axe des ordonnées toutes les valeurs obtenues en supprimant des groupes des stations pluviométriques. Il est intéressant de noter que ces résultats sont plus satisfaisants que les données radar brutes, sans l'application de la fusion conditionnelle sur les mesures des pluviomètres. Par exemple, le R^2 passe de 0.54 à 0.79 et le RMSE de 2.3 à 1.2 (fig. 5b).

Conclusion

Pour identifier, surveiller et éventuellement prévoir les événements extrêmes, il est nécessaire d'obtenir une estimation très précise des précipitations, non seulement d'un point de vue spatial, mais également au niveau temporel. À cette fin, nous avons combiné les données des pluviomètres appartenant aux deux réseaux des données météorologiques (ARPA et RAM) avec celles des radars voisins. La méthode de la fusion conditionnelle (et sa variante que nous avons testé) permet d'obtenir des améliorations dans la précision des estimations de pluies. L'étude prouve que les seules données des pluviomètres ou des radars sont insuffisantes pour caractériser une zone ou pour obtenir des mesures pluviométriques précises. Le programme utilisé dans cette étude, appelé CondMerg, est disponible en ligne et peut être librement téléchargé. Facile à modifier et à adapter à différentes exigences, c'est le premier programme open source à apporter des résultats satisfaisants dans l'utilisation de la fusion conditionnelle.

Bibliographie

- Acquaotta F. et Fratianni S., 2013 : Analysis on long precipitation series in Piedmont (North-West Italy). *American Journal of Climate Change*, **2**, 14-24.
- Acquaotta F., Fratianni S. et Venema V., 2016 : Assessment of parallel precipitation measurements networks in Piedmont, Italy. *International Journal of Climatology*, doi:10.1002/joc.4606.
- Alexander L., Yang H. et Perkins S., 2013 : *ClimPACT, indices and software*. Workshop CIIFEN, Guayaquil, Ecuador.
- Arlot S. et Celisse A., 2010: A survey of cross-validation procedures for model selection. *Statistics surveys*, **4**, 40-79.
- Ehret U., 2002 : *Rainfall and flood nowcasting in small catchments using weather radar*. PhD Thesis, University of Stuttgart, 262.
- Goudenhoofd E. et Delobbe L., 2009 : Evaluation of radar-gauge merging methods for quantitative precipitation estimates. *Hydrology and Earth system sciences*, **13**, 195-203.
- Guenzi D., Fratianni S., Boraso R. et Cremonini R., 2016 : CondMerg: an open source implementation in R language of conditional merging for weather radars and rain gauges observations. *Earth Science Informatics* **10**, 127-135, ISSN 1865-0473, doi: 10.1007/s12145-016-0278-y.
- Meersmans, J., Van Weverberg, K., De Baets, S., De Ridder, F., Palmer, S. J., van Wesemael, B. et Quine, T. A., 2016 : Mapping mean total annual precipitation in Belgium, by investigating the scale of topographic control at the regional scale. *Journal of Hydrology*, **540**, 96-105.
- Sinclair S. et Pegram, G., 2005 : Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging. *Atmospheric science letters*, **6**, 19-22.

SUIVI D'UNE CELLULE ORAGEUSE AYANT PROVOQUÉ D'IMPORTANTES DÉGÂTS FORESTIERS DANS LE DOMAINE UNIVERSITAIRE DU SART TILMAN, LIÈGE, BELGIQUE

ERPICUM M., DOUTRELOUP S., NOURI, M., BELLEFLAMME A. ET SURCIN J.

Université de Liège, Faculté des Sciences, Laboratoire de Climatologie et de Topoclimatologie, Département de Géographie, Quartier Village 4, Clos Mercator 3, 4000 Liège, Belgique. Michel.ericum@ulg.ac.be

Résumé – Une cellule orageuse ayant provoqué des rafales descendantes (micro-downbursts) qui ont sévi quelques minutes sur le domaine universitaire de l'Université de Liège au Sart Tilman durant la soirée du samedi 27 août 2016 en y abattant de nombreux arbres parmi des voisins immédiats restés debout et intacts. L'analyse de la situation météorologique locale et régionale est proposée à partir d'enregistrements aux pas de temps de 10 minutes ou 1 minute et de METEOSAT-10.

Mots-clés : Analyse météorologique, Belgique, Liège, microbursts, chablis.

Abstract – A stormy cell having caused the downward gusts (micro-downbursts) which raged a few minutes on the domain of the University of Liège in Sart Tilman during the evening of Saturday, August 27th, 2016 by bringing down numerous trees among remained standing and intact immediate neighbours. The analysis of the local and regional meteorological situation is proposed from recordings in the steps of time of 10 minutes or of 1 minute and of METEOSAT-10.

Keywords : Weather analysis, Belgium, Liège, microbursts, treefalls.

Introduction

Durant la soirée du samedi 27 août 2016, une cellule orageuse a provoqué dans le domaine universitaire du Sart Tilman - situé au sud de la ville de Liège sur la crête de l'Entre Meuse et Ourthe et la vallée du Blanc Gravier - des centaines de chablis du type de celui de la **figure 1**. Selon l'analyse des séquences temporelles des images IR et WV du satellite géostationnaire METEOSAT-10, cette cellule orageuse aurait pris naissance en Champagne vers 17 h locale (TU+2) pour atteindre le domaine universitaire liégeois du Sart Tilman un peu après 22h (TU+2) avant de continuer son cheminement vers les Pays-Bas. Selon les responsables du domaine forestier universitaire, aucun événement météorologique aussi bref n'y aurait causé autant de chablis depuis plus de 20 ans (**Fig 2**). De nombreuses voiries et chemins forestiers ont été bloqués suite à cet événement et leurs dégagements ont créé pas mal de soucis pendant tout le WE et les semaines qui suivirent.



Figure 1. Type de chablis provoqués

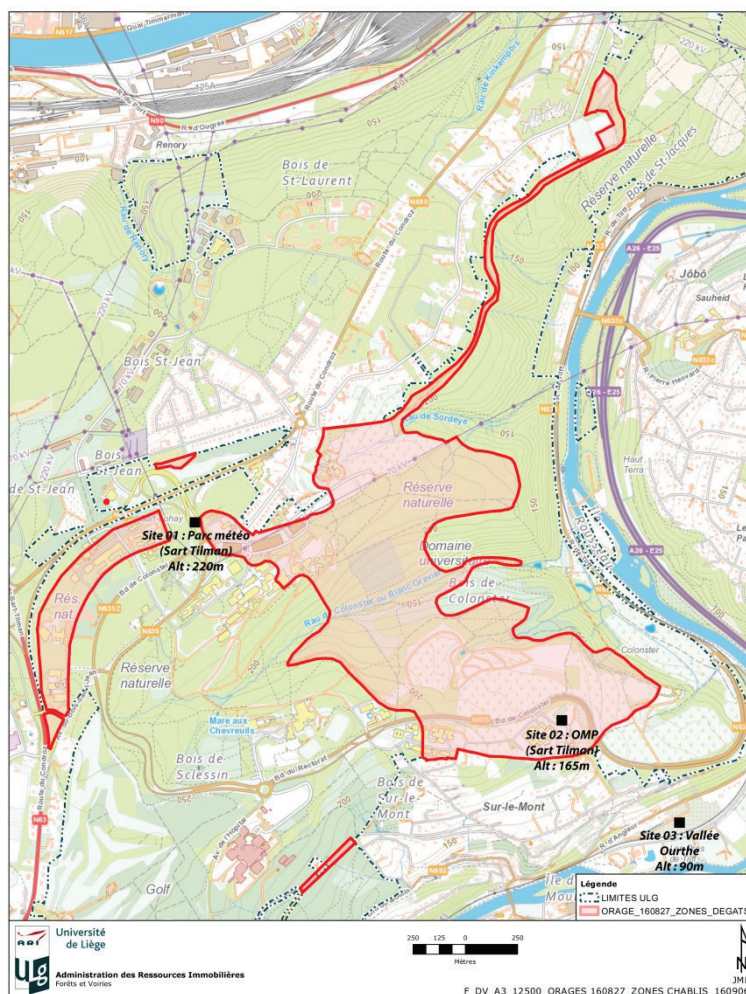


Figure 2. Cartographie de l'étendue du domaine forestier universitaire du Sart Tilman affectée par de nouveaux chablis (zone hachurée) suite au passage de la cellule orageuse vraisemblablement accompagnée de « *micro-downburst* » (cf **Fig 3**) avec positionnement des postes d'enregistrements météo : parc météo très instrumenté (01) et des stations automatiques DAVIS en (01), (02) et (03). (Source : ULg, Administration des Ressources Immobilières ; carte dressée par J-M Lovinfosse)

1. Rappel concernant les différences entre « downburst » et tornades

Un « downburst » (**Fig 3**), ou rafale descendante en français, est un brutal coup de vent, parfois très violent, qui se produit à l'avant du nuage orageux. Cette rafale descendante est liée à la chute d'une masse d'air provenant de plusieurs kilomètres en altitude au sein du nuage orageux, le cumulonimbus. Le « downburst » peut survenir au sein de tout orage avec un minimum d'organisation, au contraire des tornades en rotation ascendante suite à une forte dépression en leur centre qui fait converger les masses d'air environnantes.

Au départ, un courant descendant existe au sein de tout orage. Celui-ci se trouve dans la zone de précipitations. Il est couplé à un courant ascendant, voisin de quelques kilomètres, qui alimente le cumulonimbus en air chaud, maintenant ainsi l'orage. Le « downburst » survient lorsque des précipitations (pluie et grêle) venant de plusieurs kilomètres d'altitude tombent dans une masse d'air sec. C'est le cas dans la situation atmosphérique analysée dans cette contribution. Ces précipitations s'évaporent et suite à l'absorption de la chaleur sensible de la masse d'air sec par cette eau se transformant en vapeur, l'air sec environnant se retrouve

brutalement refroidi, et donc plus dense et plus lourd. Sa masse supplémentaire entraîne son accélération en direction du sol. Le flux d'air descendant ainsi créé s'écrase alors au sol et s'étale en rayonnant à partir de son point de chute, provoquant les rafales caractéristiques du « downburst ».

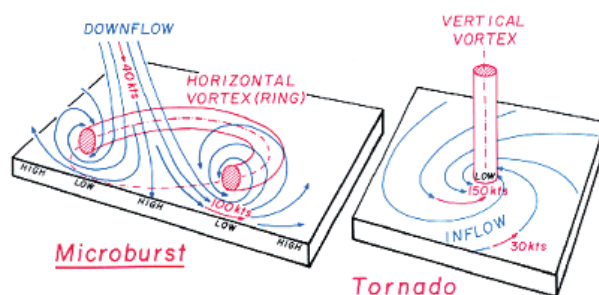


Figure 3. Différence entre un downburst (rafale descendante avec vortex multiples horizontaux) et une tornade (avec vortex unique vertical ascendant) (Source: NOAA)

2. Enregistrement laser des précipitations enregistrées de minute en minute au Sart Tilman lors de la journée du 27 août 2016 (événement pluvieux focalisé)

La **figure 4** est sélectionnée au moment le plus intense de l'averse ayant accompagné l'orage (copie d'écran du logiciel associé au moniteur laser) au site 1 (**Fig 2**). Elle permet d'une part de caractériser dans sa partie supérieure la statistique du spectre (vitesse de chute et diamètre) et d'autre part dans sa partie inférieure de caractériser le type d'hydrométéore correspondant aux particules d'eau liquide ou solide ayant traversé le faisceau laser au cours des 60 secondes précédant 21h25, TU+1 et de focaliser le moment exact du début et de la fin des précipitations.

3. Description des contextes atmosphériques régionaux et locaux et de leurs conséquences forestières au Sart Tilman

Durant l'après-midi du 27 août 2016, la Belgique comme le nord de la France et le sud de l'Allemagne ont connu des températures caniculaires (**Fig 5**) avec à certains endroits des records décennaires. Les températures les plus chaudes de cette journée dans le réseau de l'Institut Royal Météorologique belge ont été enregistrées à Buzenol : 35,3°C (en Lorraine belge, au sud de la Belgique) et à Ernage 35,2°C (en Hesbaye brabançonne). A l'aéroport de Liège-Bierset, la température maximale de l'air a atteint 34,6 °C, la rafale maximale a été limitée à 29km/h et aucune précipitation n'a été relevée ; or, cet aéroport est situé au nord de la Meuse à moins de 10km à vol d'oiseau du Sart Tilman ! Dans le domaine universitaire, la température maximale a atteint 39.8°C à l'Observatoire du Monde des Plantes (OMP, site (2)). La rafale de vent maximale y a atteint 120km/h et une pointe d'intensité de précipitations de grêle y a été observée : 426 mm/h en une minute entre 22h15 et 22h30 (heure locale, TU+2) (**Fig 6**).

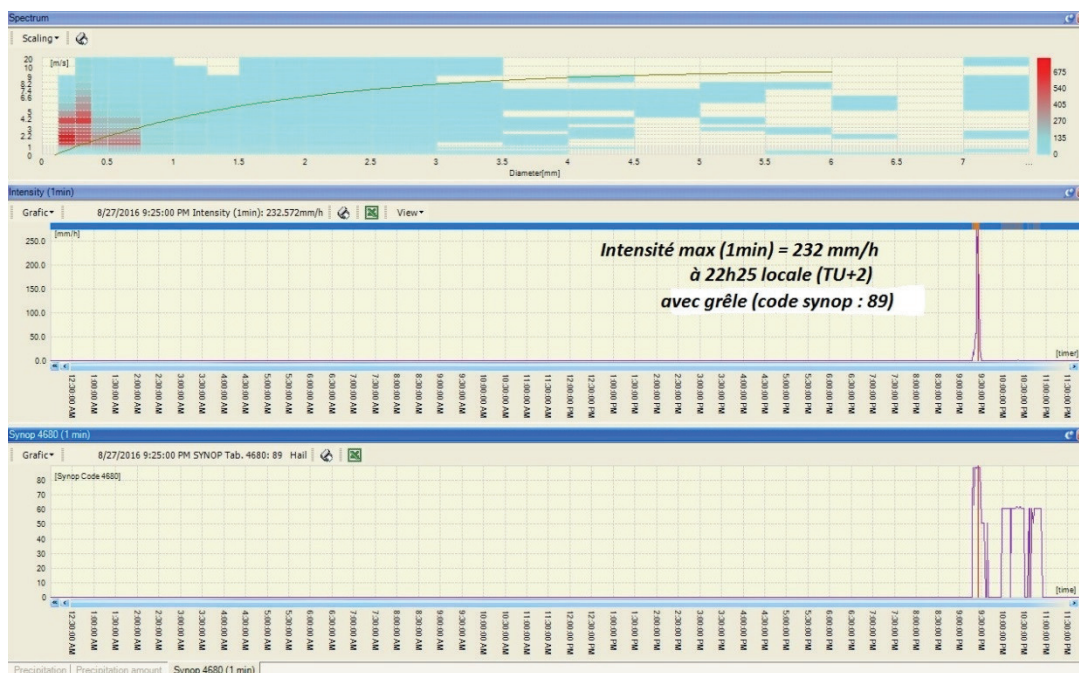


Figure 4. Enregistrement de minute en minute de l’averse orageuse destructrice accompagnée de grêle. Equipement : moniteur à faisceau laser. Début des précipitations à 22h15 et fin des précipitations à 22h40 (heure locale : TU+2). Parc météo du LCT situé au Sart Tilman (site1- Fig 2)



Figure 5. Températures maximales du 27/08/2016 à 18h TU modélisées par GFS selon des mailles de 0,5°de latitude. (Source : www.wetter3.de)

De nombreux troncs de chênes ou de hêtres, de deux mètres de circonférence ont soit été plaqués au sol, soit été déchirés dans leur longueur. De très nombreux troncs d’arbres de plus d’un mètre de circonférence mesurée à 1m50 du sol ont été retrouvés çà et là torchés aussi bien à la lisière de la forêt qu’en son cœur.

Les fougères très touffues situées en bord de chemins ont véritablement été plaquées au sol dans la direction dominante de la cellule orageuse. De multiples « microburst » ont dû se déclenchés subitement à 22h15 dans de l’air avec une humidité relative comprise entre 60 et

70 %, une température du point de rosée entre 18 et 20°C (**Fig 7**) et une température de 28°C. La cellule convective était accompagnée de nombreux coups de tonnerre et de grêlons jusqu'à 0,5 cm de diamètre, d'une chute de la température de l'air de 8°C en 10 minutes (de 28 à 20°C) et de rafales de vent très localisées ayant atteint des vitesses de 40 m/s. (**Fig 6**).

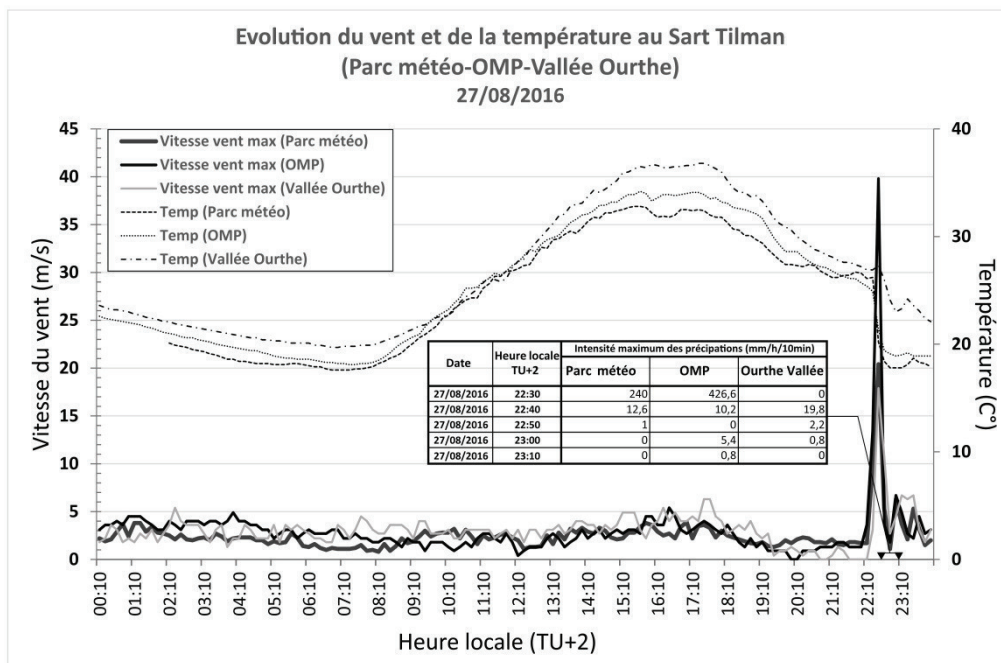


Figure 6. Température (traits discontinus), pointes de vent (traits continus) et d'intensité des précipitations (encart) à deux endroits dans le domaine du Sart Tilman (sites 1 et 2) et à troisième en périphérie immédiate dans la plaine alluviale de l'Ourthe (site 3).

NB : la séquence ayant causé les dégâts forestiers a donc sévi moins de 30 minutes entre 22h10 et 22h40

Conclusion

La **figure 8** permet de confirmer l'ampleur spatiale des amas nuageux convectifs et l'intensité des mouvements verticaux qui se sont développés au Sart-Tilman, situé au sud de la ville de Liège. Nous avons émis l'hypothèse que des « micro-downburst » avaient dû y être déclenchées après avoir traversé du sud vers le nord tout l'est de la Belgique.

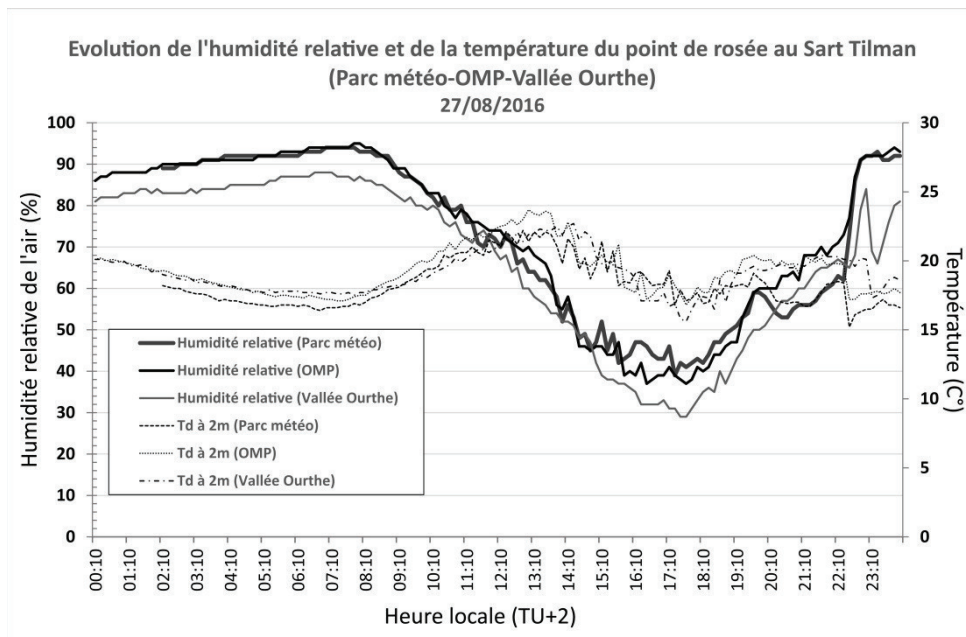


Figure 7. Température du point de rosée (Td) (traits discontinus) et axe à droite. Humidité relative (traits continus) et axe à gauche à deux endroits dans le domaine du Sart Tilman (sites 1 et 2) et à un troisième en périphérie immédiate dans la plaine alluviale de l'Ourthe (site 3).

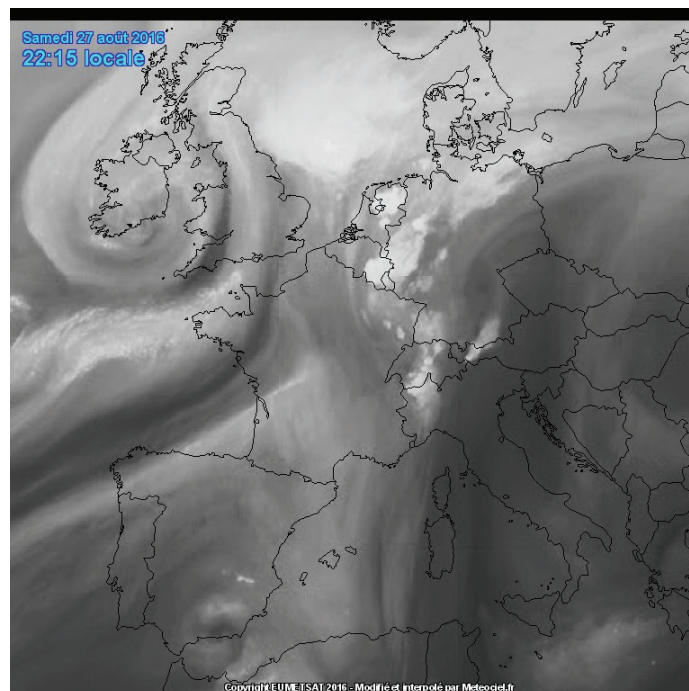


Figure 8. Amas nuageux convectifs - à 22h15 locale- très bien mis en évidence par le canal de vapeur d'eau (WV 6.2 µm infrarouge moyen) du radiomètre de Météosat 10. (Source : www.meteociel.be)

Bibliographie

<https://en.wikipedia.org/wiki/Microburst>

<http://www.meteociel.be/>

<http://www.weather.gov/cae/downburst.html>

<http://www.srh.noaa.gov/jetstream/tstorms/wind.html>

ESTIMATION DE LA DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE ENTRE LA FORÊT ET LES SITES OUVERTS DANS LE JURA

JOLY D.

Laboratoire ThéMA, CNRS et UB-FC, 32 rue Mégevand, 25030 Besançon. Courriel : daniel.joly@univ-fcomte.fr

Résumé : Cet article porte sur la modélisation statistique des différences qui apparaissent entre la température observée en forêt et en site ouvert. Pour ce faire, nous utilisons un corpus de 29 couples de stations situées à faible distance l'une de l'autre dans les deux milieux et localisés dans le Jura (France). Les températures minimales (tn) et maximales (tx) ont été acquises de décembre 2014 à octobre 2015. La modélisation est fondée sur un modèle de régression où les variables explicatives sont deux variables temporelles relatives aux conditions atmosphériques (amplitude journalière et écart à la normale 1981-2010 des températures). En moyenne, les tn sont plus élevés de 1°C et les tx plus frais de 2°C dans la forêt que hors forêt. Les deux variables expliquent plus de 90% de la variance. Les estimations reproduisent bien les différences observées : les erreurs faibles (-0,4°C à +0,4°C) concernent 45% des estimations. Mais des erreurs d'estimation supérieures à 1,5°C se produisent dans 10% des cas. Les RMSE et le R² s'établissent à 0,98°C et 0,4 pour les tn et à 0,86°C et 0,44 pour les tx.

Mots-clés : température, forêt, sites ouverts, estimation, Jura.

Abstract : Estimation of the temperature difference between forest and adjacent open sites. This article focuses on the statistical modeling of daily averages differences that appear between the temperature observed under forest cover and the temperature observed within adjacent open sites. To achieve this goal, a corpus of 29 pairs of stations located at a short distance from each other in both environments over the Massif du Jura (France) is used. Minimum (tn) and maximum (tx) temperatures were acquired during 330 days, from December 2014 to October 2015. Modeling is based on a regression model where the explanatory variables are two temporal variables related to atmospheric conditions (daily amplitude and 1981-2010 temperature deviation). On average, minimum temperatures are higher by 1°C and cooler by 2°C in the forest than in open sites. The estimates accurately reproduce the observed differences, but estimation errors above 1.5°C occur in 10% of cases. Low errors (-0.4°C and 0.4°C) occur in 45% of days. RMSE and R² are 0.98°C and 0.4 for Tn and 0.86°C and 0.44 for Tx.

Keywords: temperature, forest, open sites, estimation, Jura.

Introduction

La variation de la température sous couvert forestier (SCF), question fort ancienne, est cependant encore peu étudiée de nos jours. Les conditions climatiques spécifiques qui règnent sous forêt résultent des arbres qui, avec leurs feuilles, leurs branches, leur tronc (Chen *et al.*, 1999), modifient pratiquement tous les éléments du climat et touchent tant le rayonnement solaire direct (Carlson et Groot, 1997 ; Porté *et al.*, 2004), la vitesse du vent (Grimmondet *et al.*, 2000) ou les précipitations (Lee, 1978). La variation journalière de la température est également modifiée par rapport aux sites ouverts adjacents en raison des composantes du bilan radiatif qui y sont très différentes. Les températures journalières sont tamponnées par le couvert arboré qui minore les maximums de quelques degrés selon la densité des arbres et relève d'autant les minimums quotidiens (Aussenac, 1975 ; Grimmondet *et al.*, 2000 ; Porté *et al.*, 2004 ; Joly, 2014A ; Joly 2014B ; Joly, 2015 ; Joly et Gillet, 2017).

Le moyen le plus efficace pour connaître avec précision les conditions climatiques SCF passe par l'implantation d'un réseau de capteurs spécifique dont les mesures permettent d'étudier les principaux éléments du climat dans leur continuité spatiale. Toutefois, la quasi-totalité des études portant sur le climat des forêts est fondée sur des données enregistrées en un petit nombre de stations et durant un temps court, généralement inférieur à un an (Friedland *et al.*, 2003 ; Porté *et al.*, 2004). De très rares études portent sur un réseau plus large de stations (Renaud et Rebetez, 2009). Le réseau que nous avons constitué en 2014 sur le massif du Jura vise à dépasser ces limites. Constitué de 50 capteurs (dont 29 en vis-à-vis de stations gérées par Météo-France) localisés selon des règles de l'échantillonnage spatial, ce

réseau permet d'interpoler les températures SCF avec une erreur d'estimation acceptable (Joly et Gillet, 2017). Les écarts moyens entre forêt et sites ouverts s'établissent à environs $+1^{\circ}\text{C}$ le matin lors du minimum thermique et de -2 à -3°C l'après-midi lors du maximum et varient selon les formations arborées lors des maximums (Joly, 2014B). L'ennui est que ce réseau n'est pas destiné à rester actif très longtemps. Pour dépasser cette limite, les données qui y sont collectées doivent être modélisées en vue de rechercher une méthode qui permette de reconstituer les températures SCF sur de longues périodes à partir des seules températures fournies par Météo-France (MF).

L'objectif assigné à notre étude est de décrire la première étape de cette méthode, à savoir, modéliser les différences de température minimale et maximale journalière qui apparaissent entre les espaces ouverts et les espaces SCF adjacents. Nous nous appuyons pour ce faire sur 29 couples de stations appartenant à deux réseaux : celui de Météo-France et celui que nous avons constitué en forêt. L'aire d'étude concernée, située sur le massif du Jura, est limitée par la vallée du Doubs au nord et par la Haute Chaîne du Jura au sud. Les enregistrements concernent une période d'environ un an entre décembre 2014 et octobre 2015.

1. Données et méthode

La modélisation envisagée est fondée sur des régressions. Les différences de température entre température MF et température SCF constituent la variable expliquée tandis que les variables explicatives sont deux variables relatives aux conditions atmosphériques observées une station MF de référence. Besançon, la principale station de la région a été choisie car elle est destinée à être pérenne et dispose d'une très longue série d'observation (début des enregistrements : 1885). Les données mobilisées ayant été précisément décrites dans Joly et Gillet (2017), nous ne reproduirons ici que les éléments de base.

1.1. L'aire d'étude

L'aire d'étude (figure 1) est située en France du centre-est, entre la vallée du Doubs au Nord et le sud de la Haute Chaîne du Jura. Les altitudes sont comprises entre 200 m (plaines à l'ouest) et 1720 m (Crêt de la Neige, sommet de la haute chaîne jurassienne). La localisation de la forêt, qui recouvre 47% du territoire, est tout autant guidée par la topographie que par l'altitude, les vales défrichés s'opposant aux monts boisés. Dans sa composition, la forêt offre les formations typiques de la France de l'Est, réparties en quatre étages principaux (Gillet, 2001) : l'étage collinéen jusqu'à 600 m, l'étage montagnard inférieur entre 600 et 900 m, l'étage montagnard supérieur à partir de 900 m et l'étage subalpin inférieur au-dessus de 1300 m. Notons en outre que le sapin blanc a été planté jusqu'en plaine.

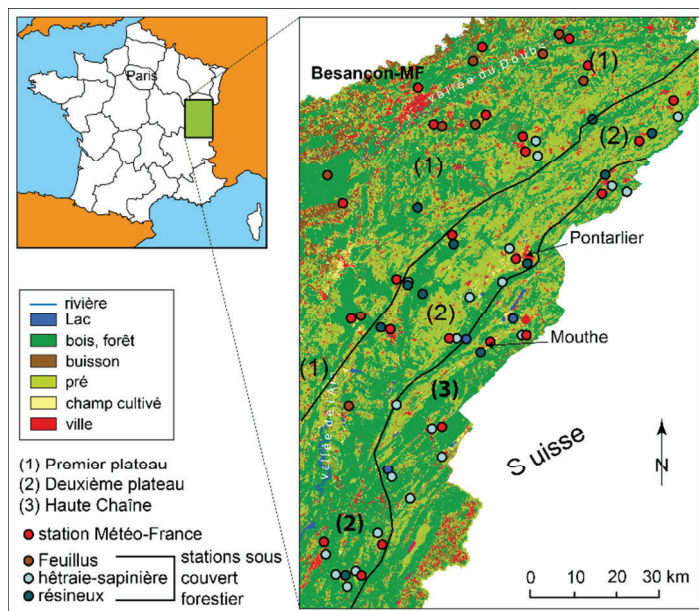


Figure 1. Aire d'étude et mode d'occupation du sol à 50 m de résolution; tiré de Joly et Gillet, 2017.

1.2. Acquisition des températures

Les températures observées en site ouvert ont été fournies gratuitement par Météo-France dans le cadre d'une convention de recherche. Notre propre réseau d'observation de la température SCF est constitué de 29 stations. Plusieurs critères ont guidé leur localisation : proximité de routes carrossables et des stations climatiques gérées par Météo-France. La température est mesurée toutes les 6 minutes grâce à des capteurs de type « HOBO PRO V2 » installés à 1,5 m au-dessus du sol sur le côté nord des arbres (Kollaset *al.*, 2013). Les enregistrements, qui s'échelonnent entre le 1 décembre 2014 et le 26 octobre 2015, comptent 3,5 % de lacunes. La *tn* et la *tx* quotidiennes (330 jours au total) sont extraites de la base de données.

Dans la suite du propos, nous utiliserons le terme « différence(s) » en lieu et place de la locution « différence(s) de température qui s'établi(ssen)t entre une station SCF et la station MF qui lui est appariée ». Le terme « différence-*tn* » ou « différence-*tx* » remplaceront « différence qui survient lors du minimum ou du maximum thermique journalier ». La différence est calculée pour les *tn* et *tx* des 330 jours que comporte la base de données.

1.3. Les variables explicatives temporelles

Les variables explicatives temporelles introduites pour expliquer la variation des différences concerne les conditions atmosphériques dont plusieurs travaux ont montré l'intérêt en microclimatologie (Joly, 1994 ; Joly, 2004). Il s'agit des deux indicateurs thermiques suivants calculés à partir des données de la station MF de Besançon :

- L'amplitude moyenne journalière qui oppose les jours à forte advection accompagnée le plus souvent d'une nébulosité importante et de vent (amplitude faible) aux jours où les processus radiatifs dominant (amplitude élevée).
- L'écart à la normale (1981-2010) des températures *tn* et *tx* de Besançon.

1.4. Méthode : construction du modèle spatial

La méthode est basée sur la construction d'un modèle temporel. La première étape consiste à calculer 330 (i) différences moyennes journalières, (ii) valeurs d'amplitude thermique journalière et (iii) valeurs d'écart des températures à la normale 1981-2010. Ensuite, on constitue deux tableaux de 330 lignes (jours) et deux colonnes pour appairer l'une puis l'autre variable explicative temporelle aux différences moyennes journalières. Un tri sur les variables explicatives est ensuite exécuté pour ranger les lignes des tableaux par ordre croissant. Chaque unité entière d'amplitude ou d'écart à la moyenne (constituée de plusieurs valeurs exprimées en dixièmes de degré) est considérée comme une classe ; enfin, la moyenne des différences est effectuée dans le cadre de chacune de ces classes.

Des régressions linéaires polynomiales de degré 1 à 4 appliquées aux différences (variable expliquée) et aux valeurs de classe (variable explicative) sont appliquées à chacun des deux tableaux. L'estimation d'une différence par le modèle temporel repose sur le produit de plusieurs termes : le(s) coefficient (s) directeur(s) moyen(s) et la valeur journalière de chacune des deux variables. Des estimations des différences sont ensuite effectuées. Le R^2 et le RMSE des résidus permettront d'évaluer leur performance.

2. Résultats

2.1. Statistiques descriptives

La différence moyenne globale est respectivement de +0,9 et -1,8°C pour les tn et les tx. Ces valeurs moyennes cachent en réalité une grande instabilité des différences moyennes quotidiennes qui peuvent varier de plus de 6°C d'un jour à l'autre lors des minimums et de plus de 5°C lors des maximums. A l'intérieur de chaque série journalière qui comporte 29 valeurs stationnelles, des différences singulières apparaissent également d'une station à l'autre. La statistique porte ici sur 9231 différences (330 jours x 29 sites = 9570 - 339 lacunes). La différence minimale et maximale rencontrée sur l'ensemble du corpus est de -7,5°C et 13,1°C pour les tn et de -9,6°C et 7,8°C pour les tx.

2.2. Coefficients directeurs des variables temporelles

L'instabilité des différences d'un jour à l'autre est réduite par les différences moyennes (-tn et -tx) calculées dans le cadre des classes regroupant les valeurs des variables explicatives par unités entières. La première variable temporelle qui explique les différences est l'amplitude thermique journalière. Avec les minimums, les différences sont voisines de 0°C pour les amplitudes de 1 à 7°C ; elles augmentent ensuite jusqu'à 2°C puis stagnent lorsque les amplitudes dépassent 15°C (figure 2A). Avec les maximums, on assiste à un comportement identique mais de signe opposé (figure 2B). Les différences sont également faibles, un peu inférieures à 0°C lorsque les amplitudes sont réduites (1 ou 2°C), puis augmentent rapidement et stagnent vers -2,3°C lorsque les amplitudes dépassent 10°C. On assiste donc à un modèle de croissance avec plafonnement, bien ajusté par un polynôme d'ordre 3 (tn) ou 2 (tx).

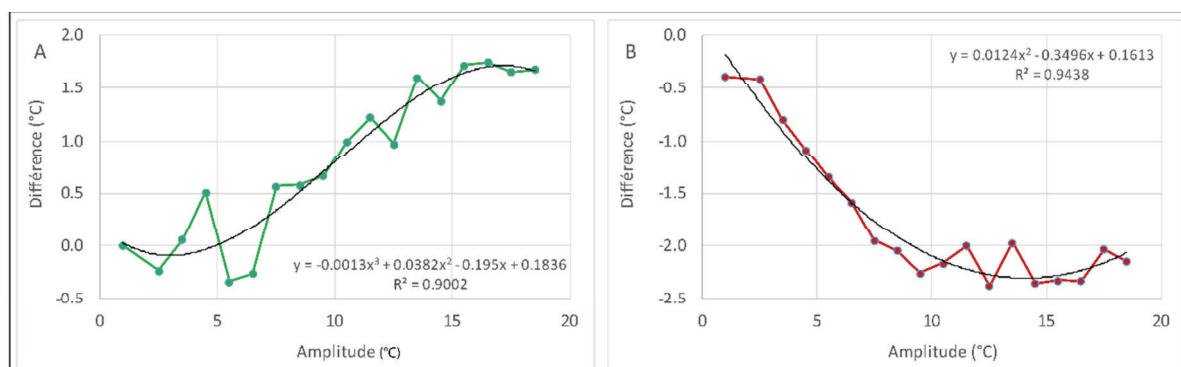


Figure 2. Variation croisée entre l'amplitude journalière (station MF de Besançon) et la différence journalière moyenne de température entre forêt et sites ouverts pour les minimums (A) et les maximums (B) ; ajustement polynomiale et paramètres associés

Les écarts à la normale, seconde variable explicative, rendent compte de variations inversées par rapport aux amplitudes. Avec les tn, les différences sont très élevées (plus de 2,5°C) quand les écarts à la normale sont fortement négatifs (-14°C) puis diminuent régulièrement pour atteindre des valeurs proches de 0°C lorsque les écarts à la normale sont positifs (figure 3A). Les tx présentent un comportement inverse avec des différences faibles quand les écarts à la normale sont fortement négatifs (figure 3B) ; les différences augmentent au prorata des écarts à la normale pour atteindre la valeur de -3°C quand les écarts à la normale sont supérieurs à 8°C. Des polynômes d'ordre 2 (tn) ou 1 (tx) ajustent ces distributions avec des r^2 de 0,90 et 0,94 pour les tn et les tx.

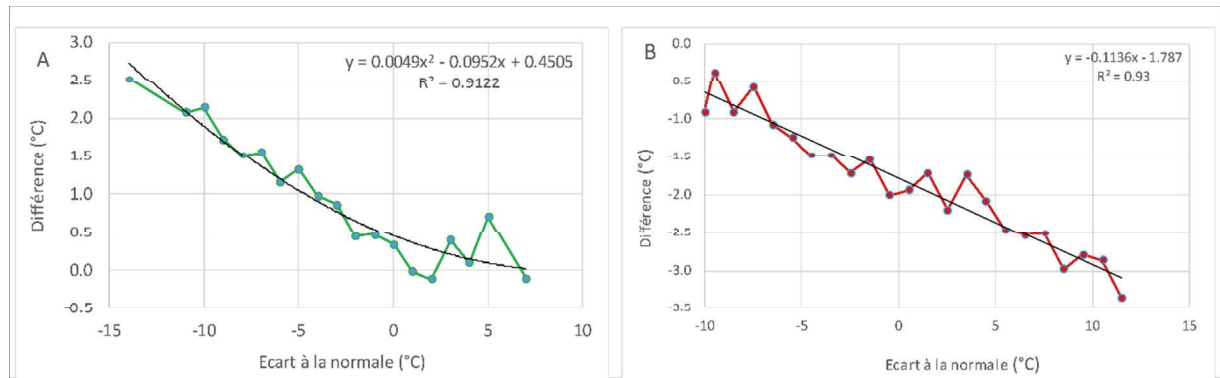


Figure 3. variation croisée entre l'écart à la normale des températures journalières de Besançon et la différence journalière moyenne de température entre forêt et sites ouverts pour les minimums (A) et les maximums (B) ; ajustement polynomial et paramètres associés

2.3. Estimation des différences entre températures SCF et MF

Les valeurs d'estimation des différences reproduisent dans les grandes lignes les différences observées. L'estimation prend bien en compte la tendance des t_n à présenter des différences positives et l'inverse pour les t_x (fig. 4). De même, certaines séquences de quelques jours successifs sont très bien reproduites. Mais, dans le détail, les différences observées les plus faibles (inférieures à -1°C pour les t_n par exemple) ou les plus fortes (supérieures à $0,5^\circ\text{C}$ pour les t_x par exemple) sont mal représentées. La distribution des résidus confirme ce diagnostic : si plus de 45% des résidus sont compris entre $-0,4$ et $+0,4^\circ\text{C}$, 10% sont inférieurs à $-1,5$ ou supérieurs à $+1,5^\circ\text{C}$. Le RMSE et le R^2 sont de $0,98^\circ\text{C}$ et $0,4$ pour les t_n et de $0,86^\circ\text{C}$ et $0,44$ pour les t_x .

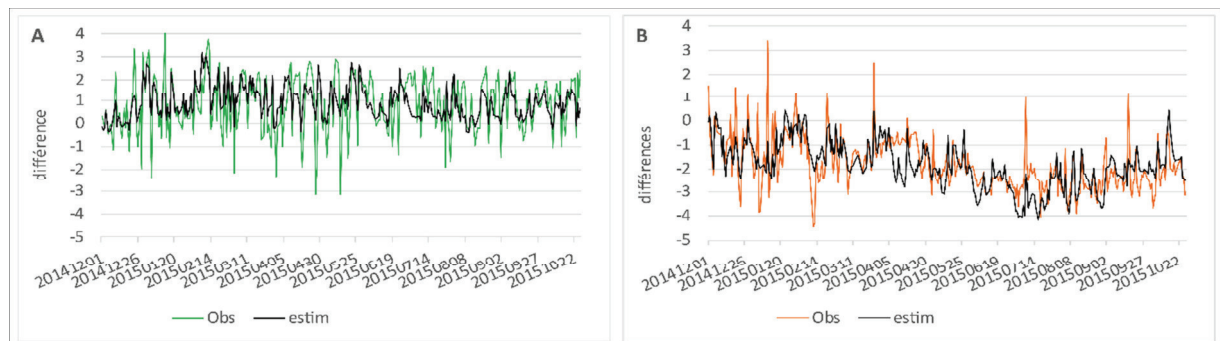


Figure 4. Différences moyennes journalières ($^\circ\text{C}$) observées et estimées pour les minimums (A) et les maximums (B) ; courbe de régression polynomiale d'ordre 3 des différences observées

Conclusion

La méthode mise au point pour estimer les différences de température est fondée sur la construction de modèles temporels qui intègrent deux variables : l'amplitude journalière et l'écart à la moyenne calculée sur les 30 ans de la normale 1981-2010 à la station de Besançon. Ces deux variables sont classées par ordre croissant ce qui permet de calculer une différence moyenne dans le cadre de chaque valeur entière d'amplitude et d'écart à la moyenne. Les ajustements par polynômes des distributions ainsi obtenues se sont révélés de bonne qualité, montrant par-là que, derrière le bruit statistique, il existe des tendances lourdes dans la variation des différences.

Les estimations reflètent bien les variations d'un jour à l'autre des différences. Des erreurs d'estimation supérieures à 3°C se produisent dans 10 % des situations analysées. Sans doute

d'autres variables explicatives pourraient-elles les réduire quelque peu. Compte-tenu des informations dont nous disposons, les résultats obtenus peuvent être qualifiés de satisfaisants. Dans le domaine de la modélisation, l'idéal est que les estimations soient ajustées le mieux possible aux observations. La méthode que nous avons utilisée n'y parvient pas tout-à-fait puisque des résidus parfois élevés apparaissent de temps à autre. Des jours particuliers en nombre réduit, très bruités, engendrent de fortes erreurs d'estimation et rendent le modèle moins pertinent. Toutefois, le modèle spatial présente l'immense avantage d'être applicable à toutes les situations pour lesquelles des observations de la température à Besançon sont disponibles. Ainsi, est-il loisible de reconstituer les différences depuis 1888, date d'ouverture de la station. Ce sera la prochaine étape.

Remerciements: à Météo-France pour la gratuité des données ; à la Zone Atelier de l'Arc Jurassien (<http://zaaj.univ-fcomte.fr>) ; aux maires des communes et aux propriétaires privés qui nous ont permis d'installer les capteurs dans leur parcelle de forêt.

Bibliographie

- Aussenac G., 1975 : *Couverts forestiers et facteurs du climat : leurs interactions, conséquences écophysilogiques chez quelques résineux*. Thèse d'Etat, Nancy, 234 p.
- Carlson D.W., Groot A., 1997 : Microclimate of clear-cut, forest interior, and small openings in trembling aspen forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, **87**, 313-329.
- Chen J., Saunders S.C., Crow T.R., Naiman R.J., Broszofski K.D., Mroz G.D., Brookshire B.L., Franklin J.F., 1999 : Microclimate in forest Ecosystem and landscape Ecology. *BioScience*, **49** (4), 288-297.
- Friedland A.J., Boyce R.L., Vostral C.B., Herrick G.T., 2003 : Winter and early spring microclimate within a mid-elevation conifer forest canopy. *Agriculture and Forest Meteorology*, **115**, 195-200.
- Gillet F. 2001 : L'étagement de la végétation. In: Ferrez Y. & Prost J.F. (ed.), Atlas des plantes rares ou protégées de Franche-Comté. Naturalia Publications, Turriers, p. 44-46.
- Grimmond C.S.B., Robeson S.M., Schoof J.T., 2000 : Spatial variability of micro-climatic conditions within a mid-latitude deciduous forest. *Climate Research*, **15**(2), 137-149.
- Joly D., 1994 : *Ambiances climatiques instantanées au Spitsberg ; pour une approche méthodique par niveau d'échelle*. Annales Littéraires de l'Université de Franche-Comté, n°529, Diffusion Les Belles Lettres, Paris, 404 p.
- Joly D., 2004 : Ambiances climatiques instantanées ; application à la microclimatologie du Spitsberg. *Norois*, **191**, 43-58.
- Joly D., 2014A : Comparaison des températures observées sous couvert forestier et en espace ouverts dans le Jura. Actes du 27^{ième} colloque de l'AIC, 2-5 juillet 2014, Dijon, 48-53.
- Joly D., 2014B. Etude comparative de la température en forêt et en espace ouvert dans le parc naturel régional du Haut-Jura. *Climatologie*, **11**, 19-33.
- Joly D., 2015. Etude comparative de la température en forêt et en espace ouvert dans le parc Naturel Régional du Haut-Jura. *Climatologie*, 11. <http://odel.irevues.inist.fr/climatologie/index.php?id=562>
- Joly D., Gillet F., 2017 : Interpolation of temperatures under forest cover on a regional scale in the French Jura Mountains. *International Journal of Climatology*, DOI:10.1002/joc.5029.
- Kollas C, Randin CF, Vitasse Y, Körner C., 2013. How accurately can minimum temperatures at the cold limits of tree species be extrapolated from weather station data? *Agricultural and Forest Meteorology*, **184**, 257-266.
- Lee R., 1978 : *Forest microclimatology*. Columbia University Press, New York, 276 p.
- Porté A., Huard F., Dreyfus P., 2004 : Microclimate beneath pine plantation, semi-nature pine plantation and mixed broadleaved-pine forest. *Agricultural and Forest meteorology*, **126**, 175-182.
- Renaud V., Rebetez M., 2009 : Comparison between open-site and below-canopy climatic conditions in Switzerland during the exceptionally hot summer of 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, **149**(5), 873-880.

L'ÉROSION DES PLUIES ET L'ÉROSION HYDRIQUE SUR LES VERSANTS DE PLATEAU EN ROUMANIE

GRECU F.¹, CARABLAISA S.², VIȘAN M.¹, TEODOR M.¹

¹Université de Bucarest, Faculté de Géographie, 1 Boulevard N. Bălcescu, 010041, Secteur 1, Bucarest, Roumanie, grecu@geo.unibuc.ro, me@visanm.ro, mada.teodor@yahoo.com

²Université de Bucarest, Faculté de Géographie, Station Géographique Orșova, 2 Rue Panfil Ștefănescu, 225200, Orșova, jud. Mehedinți, Roumanie, cgsorin@yahoo.com

Résumé - Le hasard du à l'érosion hydrique du sol est le plus dangereux et le plus actif en raison de l'action permanente sur de grandes surfaces, avec des pertes variées mais constantes du sol. La vulnérabilité à l'érosion hydrique dépend largement de l'érosion des eaux de pluie (érosion par la goutte de pluie) et l'érodibilité (la réponse du sol à l'action des gouttes des pluies torrentielles). Le but de ce document est que grâce à des calculs mathématiques et des enquêtes de terrain puissent être soulignées les valeurs de l'indice d'érosivité pluviale dans les régions de collines, mais variés en fonction des expositions à la dynamique des masses de l'air et autres facteurs: Le Plateau de Transylvanie, les Souscarpatés Gétiques, les Gorges du Danube. Pour qu'une averse soit érosive (efficace), la pluie tombée doit être supérieure à la somme des pertes et l'intensité doit dépasser la valeur de l'indice d'infiltration dans le sol. Il résulte d'ici le rôle de la pente, de la végétation et des caractéristiques du sol. Les résultats obtenus sont utilisés dans la formule générale de l'érosion du sol USLE, avec des applications GIS, réalisant des cartes générales d'érosion hydrique.

Mots-Clés: érosion des pluies, érosion hydrique, alea, Roumanie

Abstract- The hazard of the water erosion of the soil is the most dangerous and active due to the permanent action on large areas with varied but steady loss of soil. The vulnerability to the water erosion depends on the pluvial erosion (pluvio-denudation) and the soil erodibility (the response of the soil to the action of the torrential rain drop). The purpose of this work is to emphasize the values of the rainfall erosivity/aggression index in the hilly areas, through the mathematic calculations and expertise on the field. For a torrential rainfall to be erosive (effective), the rainfall must be greater than the amount of losses, and the intensity to exceed the index value of the infiltration into the soil. The calculation of the index of the pluvial erosion EI_{30} is performed by using the Wischmeier formula. The obtained results are used for the general formula of the soil erosion USLE, with GIS applications, then realizing water erosion maps.

Key words: water erosion, pluvio-denudation rainfall erosivity, hazard, Romania

Introduction

Cette étude précise nos préoccupations sur les rapports d'interdépendance entre le climat et les facteurs de l'environnement sur le territoire de la Roumanie, présentée au cadre d'AIC (Grecu *et al.*, 2012, 2014, 2015). Parmi les risques liés aux précipitations, l'érosion hydrique du sol qui constitue un des plus dangereux en raison de l'action permanente sur les grandes surfaces, avec des pertes variées, mais constantes sur le sol. La vulnérabilité à l'érosion hydrique, avec l'apport direct des précipitations, dépend généralement de l'érosion pluviale (érosion due à la pluie ou la pluviodénudation) et l'érodibilité du sol (la réponse du sol à l'action de la goutte torrentielle de pluie). Le but de cet article est de mettre en évidence les valeurs de l'érosion hydrique dans les aires de collines à l'aide de la technique SIG et des études sur le terrain. L'étude de cas présente le Plateau de Hârtibaciu. La comparaison des résultats est faite avec d'autres aires des unités de plateau.

1. La zone d'étude

Le Plateau de Hârtibaciu, subdivision du Plateau de la Transylvanie, occupe l'espace compris entre l'Olt (au Sud), les Subcarpatés de la Transylvanie (à l'est), la rivière de Târnava Mare (au nord), la rivière de Visa et le cours inférieur de la rivière de Cibin (à l'ouest). Les altitudes baissent de l'est (749 m) à l'ouest (380 m) et vers les vallées marginales et la vallée axiale est-ouest, centrale, de Hârtibaciu. C'est un haut plateau d'altitudes moyennes entre 500 et 700m. Une analyse détaillée de l'érosion du sol a été fait pour le bassin hydrographique Hârtibaciu, qui occupe le secteur central du plateau. Les résultats sont comparés avec ceux du

bassin de Sasaus (la partie sud-est du Plateau de Hârtibaciu), Mislea (les Subcarpathes Gétiques) et le Défilé du Danube (basin Eşelnită, le secteur Orsova – Drobeta Turnu Severin)(fig.1a). Dans les bassins Hârtibaciu et Sasaus, la topographie et les données climatiques sont relativement semblables (Greco, 1992). La position géographique de la Roumanie favorise les variations du climat d'une région à l'autre, en fonction de la position vers les centres barriques et des caractéristiques du relief.

Ainsi, le Plateau de la Transylvanie, ayant une ouverture vers le nord-ouest, favorise la pénétration des masses d'air humide tempéré océanique ce qui détermine, pendant les mois de l'été, les plus élevées quantités diurnes de précipitations. Pendant l'hiver, les quantités maximales diurnes des précipitations sont, en général, moins, sur le fond de la domination de la circulation des anticyclones continentaux et de la convection thermique réduite. Ainsi, le bassin hydrographique de Hârtibaciu et celui de Sasaus s'individualisent par une grande amplitude dans la variation annuelle des quantités des précipitations, mais aussi par des valeurs surunitaires de l'indice Angot du mois de mai jusqu'au septembre, durant la période 1961-2000. La variabilité du coefficient pluviométrique mensuel est comprise entre 0,50 et 1,90. Le développement des cyclones de la Mer Méditerranée et leur pénétration au sud-ouest du pays, influence les caractéristiques du climat du Défilé du Danube. Le minimum pluviométrique est lié aux périodes déficitaires de la fin de l'hiver et de l'été et du début du printemps et de l'automne. On constate une variabilité du coefficient pluviométrique mensuel beaucoup plus réduite, entre 0,69 et 1,29. Encadré comme type IV de la répartition zonale des précipitations atmosphériques, le bassin hydrographique Mislea (ST Campina) présente le maximum pluviométrique au mois de juin et un minimum aux mois de janvier, février, mars avec des amplitudes annuelles significatives. On peut constater plusieurs caractéristiques communes avec le type I, en occupant les aires de transition entre le type II (ST Drobeta Turnu Severin) et le type I (ST Sibiu) (Dragota, 2006) (tableau 1, figure 1b).

Tableau 1. Les valeurs de l'indice pluviométrique d'Angot pour les stations météorologiques Drobeta-Turnu Severin, Sibiu et Campina (1961-2000).

MOIS	IAN	FEB	MAR	AP R	MAI	IUN	IUL	AUG	SEP	OCT	NOE	DEC	ST. METEO
<i>Indice Angot</i>	0.84	0.91	0.85	1.14	1.29	1.24	1.09	0.69	0.83	0.88	1.09	1.19	Drobeta
	0.50	0.53	0.60	1.00	1.45	1.90.	1.68	1.25	1.06	0.77	0.65	0.58	Sibiu
	0.61	0.68	0.60	0.94	1.39	1.78	1.55	1.29	0.82	0.69	0.85	0.79	Campina

Source: données traitées après l'archive ANM

2. Méthodologie

Pour l'élaboration du modèle de l'érosion du sol, on a utilisé les cartes topographiques à l'échelle 1/25000 (ed. 1980), la Carte des Sols de la Roumanie à l'échelle 1/200000 et l'ensemble des données Corine Land Cover 2006. Pour l'aire d'étude, on a calculé ces coefficients au niveau de pixel et on a généré un modèle numérique altitudinal avec une résolution de 20 m. La méthodologie se fonde sur l'utilisation de l'équation de l'érosion effective du sol élaborée par Moţoc par l'application et l'achèvement de l'équation USLE aux conditions de la Roumanie (Moţoc *et al.*, 1975 ; 2002):

$$E = K \cdot L^m \cdot I^n \cdot S \cdot C \cdot C_s$$

où :

E= le taux moyen de l'érosion effective (t/ha/an);

K= le coefficient de correction pour l'agressivité pluviale = $100 E_{ps} \cdot A_p / L^{0,5} \cdot I^{1,45}$

(l'érosion sur les parcelles standard de contrôle de l'érosion);

A_p = l'agressivité pluviale = $e^{115} \cdot H^{0,5}$;

L et I la longueur (m) et la pente du versant (%);
 S = le coefficient de correction pour l'érodibilité du sol ;
 Cs = le coefficient de correction pour les travaux contre l'érosion du sol;
 $m = 0,3; I^n = 1,36 + 0,97 i + 0,381 i^2$ (où i est la pente moyen du versant);
 C = le facteur de couvert de végétation.

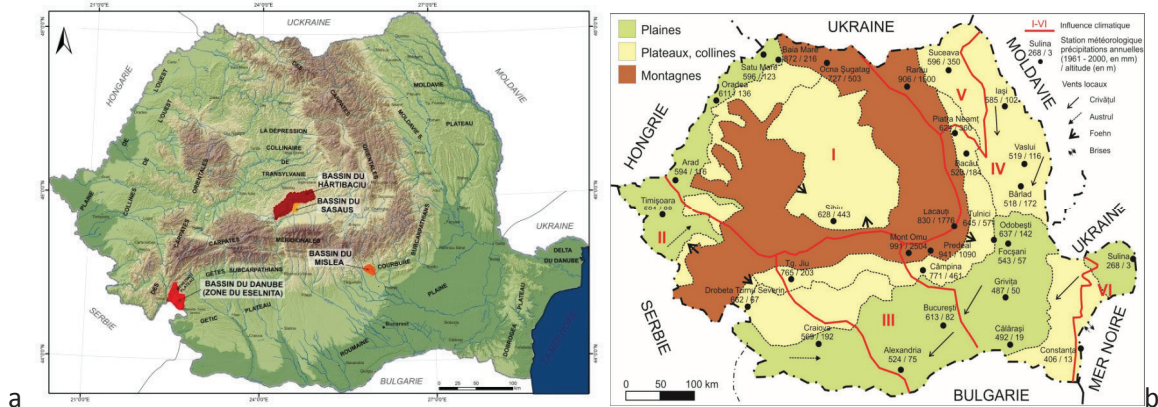


Figure 1.a. La position géographique des aires d'étude (les bassins hydrographiques).b. Influence climatiques: I océanique, II méditerranéenne, III de transition, IV continentale, V scandinave (fig1b retravaillé de Toroimac)

Le facteur d'érosivité pluviale (K)

Ce facteur montre l'énergie cinétique additionnée des pluies au noyau torrentiel de 30 minutes, pendant une année:

$$K = \sum_{i=1}^n E_i \cdot I_{30i}$$

E_i = l'énergie cinétique de chaque pluie avec une durée de plus de 30 minutes pendant un an (MJ/ha); I_{30i} = l'intensité maximum du noyau torrentiel de 30 minutes (mm/h).

Pour calculer la valeur de l'indice d'érosivité pluviométrique EI_{30} on a utilisé la formule Wischmeier (Wischmeier & Smith, 1958), adaptée aux quantités maximales annuelles de précipitations enregistrées en 24 heures:

$$EI_{30} = e_r v_r I_{30}$$

$$e_r = 0,29[1 - 0,72 \exp(-0,05 i_r)]$$

où e_r - l'énergie cinétique de la pluie ($MJ ha^{-1} mm^{-1}$);
 v_r - la quantité des précipitations (mm);
 i_r - l'intensité de la pluie dans une heure ($mm h^{-1}$);
 I_{30} - l'intensité de la pluie en 30 minute (mm^{-1})

Pour le Défilé du Danube (le secteur Orsova - Drobeta Turnu Severin), l'indice d'érosivité pluviométrique est de $1.5 MJ mm ha^{-1} h^{-1}$. Il est calculé à partir des précipitations maximales en 24 heures dans la station météorologique de Drobeta Turnu Severin, durant le mois de septembre de la période 1961-2014. En septembre 2014, on a enregistré les valeurs de précipitations les plus élevées en 24 heures (118,8 mm le 14 septembre), étant dépassées seulement de celles du mois de septembre des années 1999 et 1969. Dans le bassin d'Eselnita, on a cartographié la couche de la fuite de l'eau (Greco *et al.*, 2015).

Le facteur d'érodibilité du sol (S)

On l'a repris après la carte du sol, en fonction de la texture, reclassement ICPA (1987).

Le facteur LS

Le facteur LS détermine l'influence du relief sur l'érosion du sol et consiste dans la détermination de la longueur (L) et de la pente des versants (I) sur la base du modèle numérique altitudinal.

Le facteur du couvert de végétation (C)

Le facteur C a été déterminé par l'ensemble des données Corine Land Cover (2006).

3. L'Application de la méthode

3.1. Les valeurs des facteurs pour le bassin de Hârtibaciu

Le facteur d'érosivité pluviale (K) a été pris de la carte de zonage de l'érosivité pluviale de la Roumanie (Motoc, 1975). La valeur de ce facteur varie entre 0,12 pour la *Dépression Collinaire de la Transylvanie*, 0,16 dans les Carpates Méridionales et 0,14 dans les Subcarpates de la Courbure.

Le facteur LS (les facteurs longueur et inclinaison-pente)

Il a été déterminé sur la base du modèle numérique altitudinal avec une résolution de 20 m, par l'application Topographic Indices dans le programme SAGA GIS (Moore, 1991,2003 www.saga-gis.org/saga_tool_doc/2.1.4/ta_hydrology_20.html).

Le facteur C (couvert de végétation)

- 0.02 – le périmètre construit
- 0.2 – la végétation forestière
- 0.3 – la végétation herbeuse (pâturages, prairie de foin)
- 0.45 – les terrains arables
- 0.5 – les vergers

Le facteur d'érodibilité du sol (S) est en fonction de la texture des types du sol. Dans le bassin de Hartibaciu, on a obtenu cinq classes d'érodibilité du sol:

- La classe d'érodibilité 1,2 représente la classe avec la plus grande prédisposition à l'érosion et inclut les sols argileux avec une texture argileuse (le secteur inférieur du bassin de Hartibaciu);
- La classe d'érodibilité 1 caractérise les sols avec une grande prédisposition à l'érosion et représente les sols bruns argileux, noirs clinohydromorphes, érodisols, pseudorendzins et les sols bruns eu-mésobasiques avec une texture argileuse et limoneuse;
- La classe d'érodibilité 0.8 caractérise les sols avec une texture argilo-sableuse;
- La classe d'érodibilité 0.7 comprend les sols bruns argileux, bruns-luviques (podzolises), texture limoneuses, argilo-sableuse;

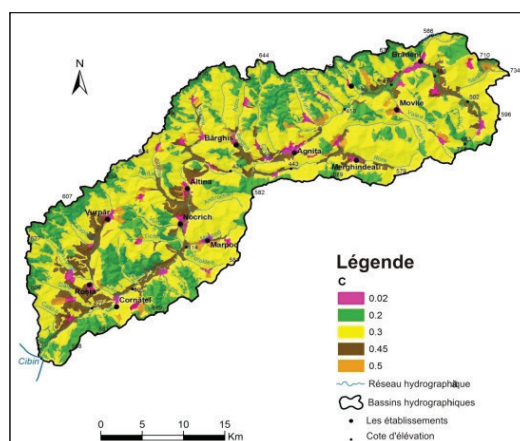
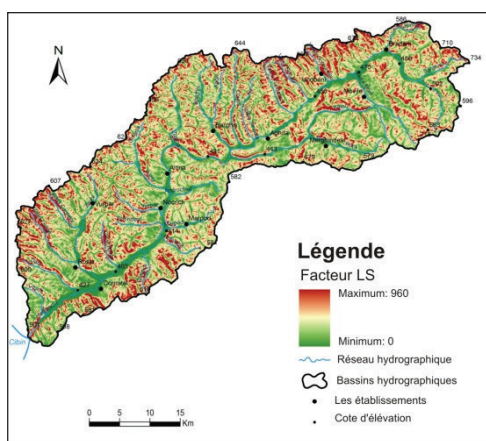


Figure 2. Le facteur LS- longueur et pente (slopes) Figure 3. Le facteur C (couvert de végétation)

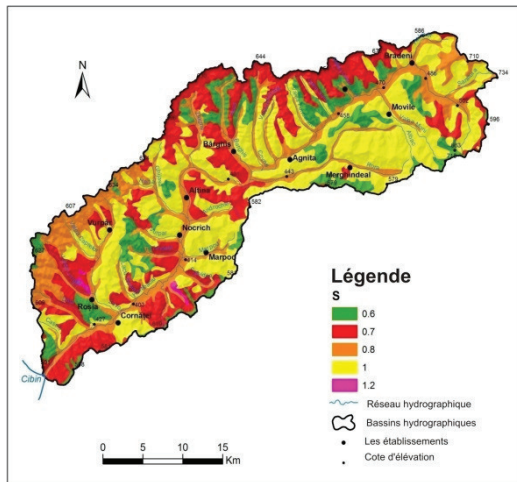


Figure 4. Le facteur d'érodibilité du sol (S)

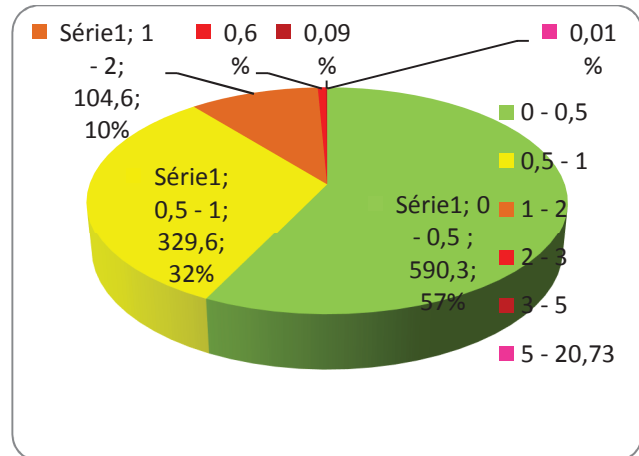


Figure7 Les valeurs des classes d'érosion effective (t/ha/an)

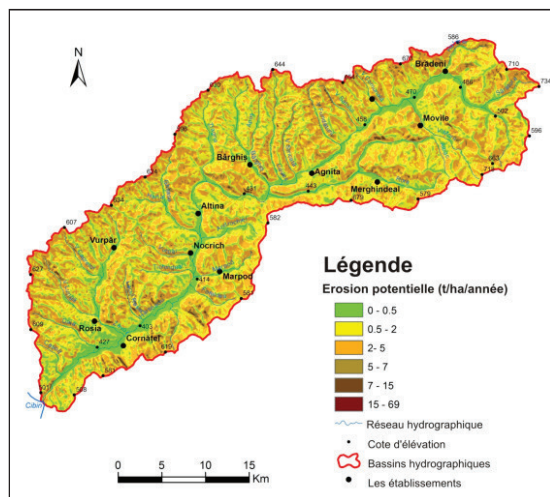


Figure 5. La carte de l'érosion potentielle (t/ha/an)

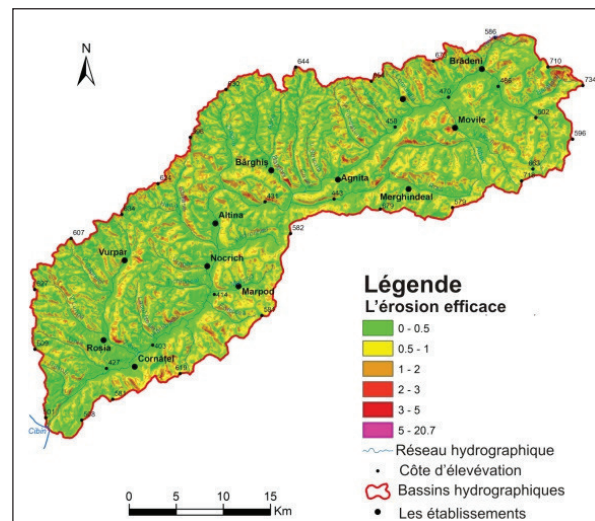


Figure 6. La carte de l'érosion efficace (t/ha/an)

-La classe d'érodibilité 0.6 est la classe avec la plus grande résistance à l'érosion.

3.2. L'application de la technique SIG

Les cartes obtenues pour les facteurs (fig.2,3,4) ont été utilisées à la réalisation des cartes de l'érosion potentielle (fig 5) et de l'érosion efficace (fig.6,7) sur la base de la méthodologie générale.

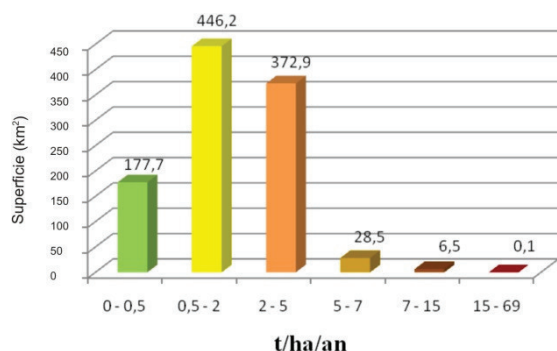


Figure 8. Les valeurs des classes d'érosion potentielle

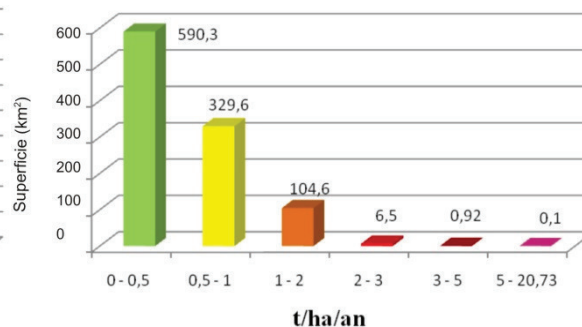


Figure 9. Les valeurs des classes d'érosion effective

4. Résultats et conclusions

Les cartes de l'érosion effective et potentielle représentent la combinaison des matrices des facteurs K, LS, S et C, respectivement des facteurs K, LS et S, en résultant:

-Le modèle de l'érosion effective estime une quantité annuelle de sol érodé qui varie entre 0 et 20,73 t/ha/an (le bassin de Hartibaciu), l'écart plus grand que les valeurs de 0-8,4 t/ha/an (le bassin hydrographique de Săsăuș), respectivement 0- 13,5 t/ha/an (le bassin Mislea) (Alexandru *et al.*, 2012).

-En nous basons sur un scénario de l'érosion potentielle, où on a éliminé le facteur de végétation (C), il en résulte des valeurs de l'érosion comprises entre 0 e 69 t/ha/an dans le bassin de Hartibaciu, entre 0 et 28 t/ha/an à Săsăuș) et 0 - 32 t/ha/an à Mislea.

-En général, les valeurs de l'érosion potentielle sont plus importantes. La classe 1-2-3 t/ha/an recouvre environ 54% de la surface du bassin à Sasaus, 47% à Hârtibaciu et 30% à Mislea.

-Dans les mêmes conditions du climat, le facteur de végétation réduit ce pourcentage, de sorte que le moyen de l'érosion de surface par an est de 0,5-1 t/ha/an.

-Le rôle de la pluviométrie dans la susceptibilité aux processus géomorphologiques dépendants de l'eau, semble être plus important dans le Plateau de la Moldavie, dans les Carpates et Subcarpates Orientales et la Courbure ; ici l'indice Angot a les plus élevées valeurs moyennes mensuelles (Grecu *et al.*, 2014). La pluviométrie joue un rôle moins important dans la susceptibilité à l'érosion hydrique dans le Plateau de Transylvanie, où les quantités maximum absolues de précipitations en 24 heures sont moins de 50 mm (Dragota 2006). Dans ces régions, la végétation a un rôle plus important dans l'érosion hydrique (fig 8, 9). Dans le bassin de Săsăuș, les pâturages et les prairies occupent environ 57 % de surface (Alexandru *et al.*, 2012) et dans le bassin de Hartibaciu, les bois occupent moins de 25% (Grecu 1992). Dans le bassin Mislea, qui se trouve dans les Subcarpates de Courbure, le substrat géologique joue un rôle important dans la dynamique (bassins versants torrentiels et pentes accentuées).

-L'utilisation de la technique SIG relève son efficacité dans les études multicritériales et permet une bonne connaissance des conditions du terrain.

Bibliographie

Alexandru R., Cătescu G., Grecu F., Paisa M. 2012 : *Comparative analysis of the erosion in hill basins (Săsăuș and Mislea)*, Analele Universității Bucureșt. *Geografie*, Anul LXI, 25– 42.

Cernescu N., Florea N și colab. 1964 – 1994 : *Harta solurilor României*, scara 1:200.000. Institutul Geologic - Institutul de Cercetări pentru Pedologie și Agrochimie, carte Sibiu 1971, carte Tg.Mures 1994, București.

Dragotă C. S. 2006: *Precipitațiile excedentare în România*, Editura Academiei, București, 176 p.

Grecu F. 1992: *Bazinul Hârtibaciului. Elemente de morfohidrografie*, Editura Academiei, București, 160 p.

Greco F., Carablaisă, S., Zaharia, L. & Ioana-Toroimac, G. 2012 : *Les précipitations – facteur de la dynamique des versants dans défilé du Danube (Roumanie)*, in vol *Les climats régionaux: observations et modélisation* 349-354.

Greco F., Ioana-Toroimac G., Constantin (Oprea) D. M., 2014 : *Le critère pluviométrique Angot dans la détermination de la susceptibilité du terrain aux aléas géomorphologiques en Roumanie*, in vol., *Actes du XXVII^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 441 – 446.

Greco F., Ioana-Toroimac G., Constantin (Oprea) D. M., Carablaisă S., Zaharia L., Costache R. Munteanu A. 2015: *L'événement pluvial du septembre 2014 dans le défilé du Danube (Roumanie) – aléas et risques exceptionnels*, in vol., *Actes du XXVIII^{ème} Colloque International de Climatologie*, 491– 496.

Institutul de Cercetări pentru Pedologie și Agrochimie 1987: *Metodologia elaborării studiilor pedologice*. Partea I-a Colectarea și sistematizarea datelor pedologice 192 p., Partea a II-a Elaborarea studiilor pedologice în diferite scopuri 350 p., Partea a III-a Indicatorii ecopedologici, București, 226 p.

Moore I. D., Grayson R. B., Ladson A. R. 1991 : *Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications*, *Hydrological Processes* 5, 1: 3– 30.

Moțoc M., Munteanu S., Băloiu V., Stănescu P., Mihai G. 1975 : *Eroziunea solului și metodele de combatere*. Ed. Ceres.

Moțoc M., Mircea S., 2002: *Evaluarea factorilor care determină riscul eroziunii hidrice în suprafață*, Ed. BREN.

Harta topografică a României, 1980: Ediția a. II-a, scara 1:25 000, Direcția Topografică Militară.

Wischmeier W.H., Smith D.D. 1958 : *Rainfall energy and its relationship to soil loss*. *Trans., Am. Geophys. Union* **39**, 285–291.

www.saga-gis.org/saga_tool_doc/2.1.4/ta_hydrology_20.html

ÉVOLUTION DE L'ENNEIGEMENT MOYEN DANS LES ALPES AU COURS DU 20^E SIÈCLE À L'AIDE DU MODÈLE ATMOSPHÉRIQUE RÉGIONAL MAR

BELLEFLAMME A., WYARD C., DOUTRELOUP S., FETTWEIS X., ERPICUM M.

Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie, Département de Géographie, Université de Liège, Clos Mercator 3, 4000 Liège, Belgique, A.Belleflamme@ulg.ac.be, coraline.wyard@ulg.ac.be, S.Doutreloup@ulg.ac.be, xavier.fettweis@ulg.ac.be, michel.erpicum@ulg.ac.be

Résumé – *L'évolution de l'enneigement dans les Alpes peut fortement affecter le tourisme, mais aussi la disponibilité en eau de la région. Dans cette étude, nous avons reproduit l'évolution du climat des Alpes au cours du 20^e siècle à l'aide du modèle atmosphérique régional MAR forcé par trois réanalyses (ERA-20C, NCEP/NCAR et ERA-Interim). Le MAR montre que la hauteur de neige a augmenté depuis le début du 20^e siècle, d'abord uniquement en haute altitude, puis également aux altitudes inférieures, avant de connaître une forte et brusque diminution entre 1985 et 1990. Cette évolution, qui est en accord avec les observations décrites dans la littérature, est directement liée aux fluctuations de la NAO et de l'AO. En effet, les changements de circulation atmosphérique que traduisent la NAO et l'AO entraînent des variations de température et de précipitations qui déterminent directement la hauteur de neige dans les Alpes.*

Mots-Clés : hauteur de neige, MAR, Alpes.

Abstract - *Evolution of the snow height in the Alps over the 20th century using the regional atmospheric model MAR. The evolution of the snow height over the Alps can strongly impact tourism, but also the water availability of the region. In this study, we have reproduced the evolution of the climate in the Alps over the 20th century with the help of the regional atmospheric model MAR forced by three reanalyses (ERA-20C, NCEP/NCAR, and ERA-Interim). MAR shows that the snow height has increased since the beginning of the 20th century, first only at higher altitudes, then also at lower levels, before knowing a strong and abrupt decrease between 1985 and 1990. This evolution, which is consistent with observations given in the literature, is directly linked with the trends of NAO and AO. In fact, the atmospheric circulation changes highlighted by NAO and AO induce temperature and precipitation changes that directly determine the snow height in the Alps.*

Keywords : snow depth, MAR, Alps.

Introduction

L'enneigement dans les Alpes joue un rôle important, non seulement dans le secteur du tourisme des sports d'hiver, mais également pour la disponibilité en eau. Dans ce contexte, Beniston (1997) a analysé la hauteur de neige et la durée de la période d'enneigement pour plusieurs stations météorologiques en Suisse. Cette étude a été actualisée et complétée par Beniston (2012). Cet auteur a observé une augmentation de l'épaisseur du manteau neigeux depuis 1930 et jusqu'au milieu des années 1980 pour les stations situées plus haut en altitude. Les stations situées dans les vallées n'ont pas enregistré de tendances significatives. Entre 1985 et 1990, une forte diminution de la hauteur de neige et de la durée de l'enneigement a été constatée. L'analyse de ces constats a montré que ces variations de l'enneigement sont bien corrélées à l'oscillation nord-atlantique (NAO) et qu'elles sont donc essentiellement dues à des changements de la circulation atmosphérique (Beniston, 1997 ; 2012).

Steger *et al.* (2013) ont utilisé un ensemble de modèles climatiques régionaux afin de réaliser des projections futures de l'enneigement en Suisse. Il en ressort que, sous l'impact du réchauffement climatique, la hauteur de neige devrait fortement diminuer d'ici la fin du 21^e siècle, surtout dans les tranches d'altitudes moyennes, où la température moyenne hivernale approchera, voire dépassera, les 0°C. Vu leur température plus basse, les altitudes plus élevées devraient, du moins dans un premier temps, être épargnées par la diminution de l'enneigement.

Sur la base de ces recherches, nous avons dès lors tenté de reproduire le climat du 20^e siècle dans les Alpes à l'aide du Modèle Atmosphérique Régional MAR afin d'y modéliser

l'évolution de la hauteur de neige, avec un double objectif. D'une part, nous voulons évaluer la capacité du MAR à reproduire le climat d'une région avec un relief très accidenté et, d'autre part, nous voulons vérifier si les changements de la hauteur de neige observés aux stations suisses par Beniston (1997 ; 2012) sont généralisables à l'ensemble de la région alpine.

1. Méthode

Afin de reconstituer l'évolution de la hauteur de neige au cours du 20^e siècle sur le massif alpin, nous avons modélisé le climat de la région à l'aide du Modèle Atmosphérique Régional (MAR) utilisé essentiellement au Groenland (Fettweis *et al.*, 2013), mais qui a été récemment adapté à l'Europe (Wyrd *et al.*, 2017). Nous utilisons le MAR à une résolution horizontale de 7 km, ce qui est la résolution la plus fine possible pour le MAR sur une région au relief aussi accidenté que les Alpes. Le domaine initial s'étend de 43°N à 48°30'N et de 2°E à 15°E sur 140 x 90 points de grille. Afin que les résultats ne soient pas influencés par les effets de bord, le domaine utilisé par la suite a été rogné de 15 points de grille sur chaque bord (30 sur le bord ouest).

Le MAR est forcé à ses frontières toutes les six heures par les réanalyses ERA-20C du Centre Européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (ECMWF) sur la période 1902-2010. Afin d'évaluer la fiabilité des simulations du MAR forcé par cette réanalyse, nous les avons comparées au MAR forcé par les réanalyses ERA-Interim du ECMWF sur la période 1981-2010, d'une part, et par les réanalyses des National Centers for Environmental Prediction – National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) sur la période 1950-2010, d'autre part.

Dans le cadre de cette étude, nous utiliserons les valeurs journalières de hauteur de neige, de température de l'air à 2 m et de précipitations totales fournies par le MAR. Nous avons moyenné ces données sur les mois de janvier à avril car, même si la hauteur maximale d'enneigement dans les Alpes est atteinte en moyenne au cours du mois de mars, il peut y avoir de fortes variations d'une année à l'autre et, par ailleurs, notre objectif est d'étudier la hauteur de neige moyenne au cours de l'hiver. En outre, nous limiterons notre analyse aux altitudes supérieures à 500 m.

Pour l'interprétation de nos résultats, nous utilisons les moyennes sur janvier-avril des valeurs mensuelles des indices de téléconnexion suivants :

- l'oscillation nord-atlantique (NAO) du CRU (Climate Research Unit, www.cru.uea.ac.uk) qui représente la différence de pression atmosphérique entre les Açores et l'Islande, sur la période 1902-2015 ;
- la NAO du CPC (Climate Prediction Center, www.cpc.noaa.gov) sur la période 1950-2015 ;
- l'oscillation arctique (AO) du CPC qui mesure la différence de pression atmosphérique entre 20°N et le pôle Nord, sur la période 1950-2015.

2. Résultats

2.1. Évolution de la hauteur de neige

Une comparaison entre les simulations du MAR forcé par les trois réanalyses montre que, même si les valeurs absolues d'enneigement peuvent parfois varier d'une simulation à une autre, suite à des biais de température et d'humidité présents dans les données initiales des réanalyses, les variations de la hauteur de neige sont similaires sur la période commune entre

ERA-20C, NCEP/NCAR et ERA-Interim (figure 1). Par la suite, nous nous limiterons donc à l'analyse des simulations du MAR forcé par ERA-20C.

L'analyse de l'évolution de la hauteur de neige au cours du 20^e siècle permet de dégager plusieurs constats (figure 1). D'abord, il apparaît que la variabilité interannuelle a toujours été très importante. Ensuite, les moyennes glissantes sur 10 ans permettent de diviser la période d'étude en quatre sous-périodes relativement homogènes. Les années 1900 à 1940 qui n'indiquent pas de tendance claire, suivies par une augmentation relativement continue de la hauteur de neige au cours des années 1950 à 1980. Ensuite, la décennie 1980 est marquée par une diminution abrupte et nettement supérieure à la variabilité interannuelle, avant de retrouver une tendance à la hausse après 1990.

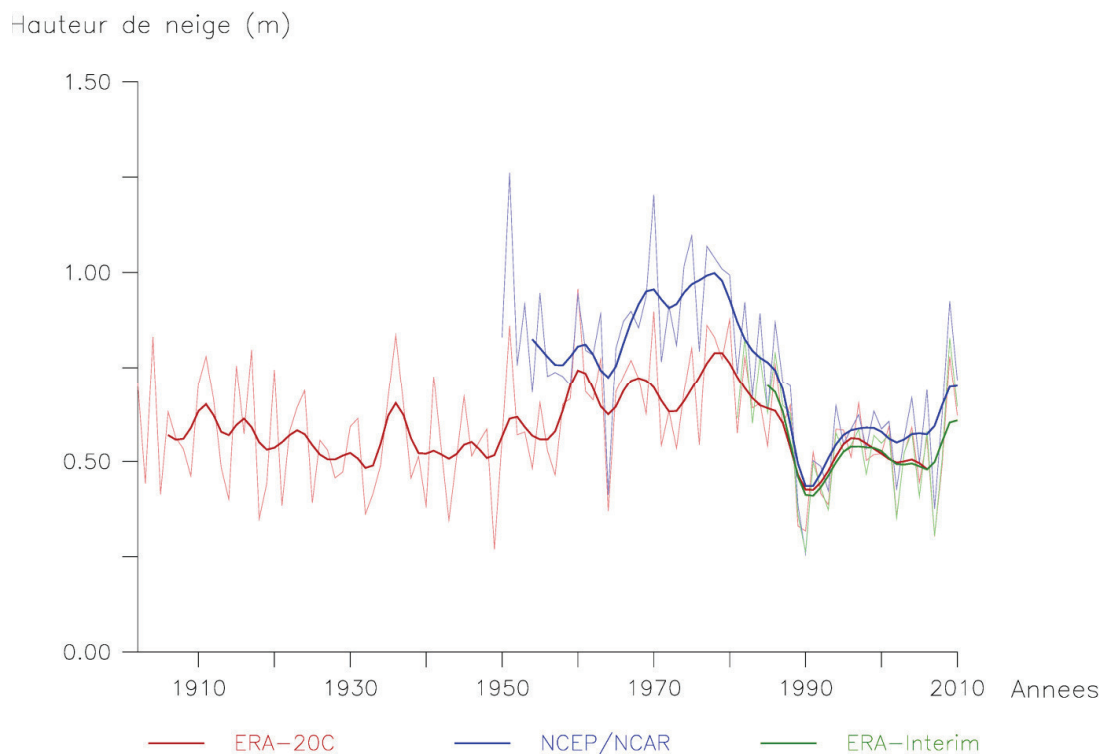


Figure 1. Évolution de la hauteur de neige moyenne des mois de janvier à avril simulée par le MAR forcé par les réanalyses ERA-20C, NCEP/NCAR et ERA-Interim. Les traits fins représentent les valeurs annuelles et les traits épais représentent les moyennes glissantes sur 10 ans.

Il est intéressant de remarquer que l'évolution de la hauteur moyenne de neige donnée par le MAR correspond tout à fait à celle observée aux stations suisses par Beniston (1997 ; 2012). Néanmoins, une comparaison avec les stations alpines situées à une altitude supérieure à 500 m disponibles dans la banque de données de l'ECA&D (European Climate Assessment & Dataset) indique une grande variabilité entre les stations. Ainsi, pour certaines stations, la hauteur de neige affiche plutôt un pic au début des années 1980 et la forte diminution entre 1985 et 1990 y représente plutôt un retour à la normale (non montré ici). Les variations spatiales des tendances calculées par tranche de 20 ans, excepté pour la décennie 1980, permettent de préciser l'évolution décrite ci-dessus (figure 2). En effet, avant 1980, l'augmentation de la hauteur de neige est surtout marquée pour les altitudes les plus élevées (> 2000 m). Nous remarquons également que les tendances à ces altitudes sont plus marquées sur la moitié ouest du domaine d'étude. Les tranches d'altitude inférieures (500-2000 m) ont d'abord connu une diminution de la hauteur de neige, avant que cette tendance ne s'inverse progressivement de l'amont vers l'aval entre les années 1920 et 1960. La forte diminution de la hauteur de neige des années 1980 était généralisée sur l'ensemble de l'arc alpin, et elle était d'autant plus marquée que l'altitude était élevée. Finalement, depuis 1990, les tendances sont

très faibles et plutôt marquées par un gradient ouest-est que par un gradient altitudinal, avec des tendances négatives sur l'ouest et positives sur l'est.

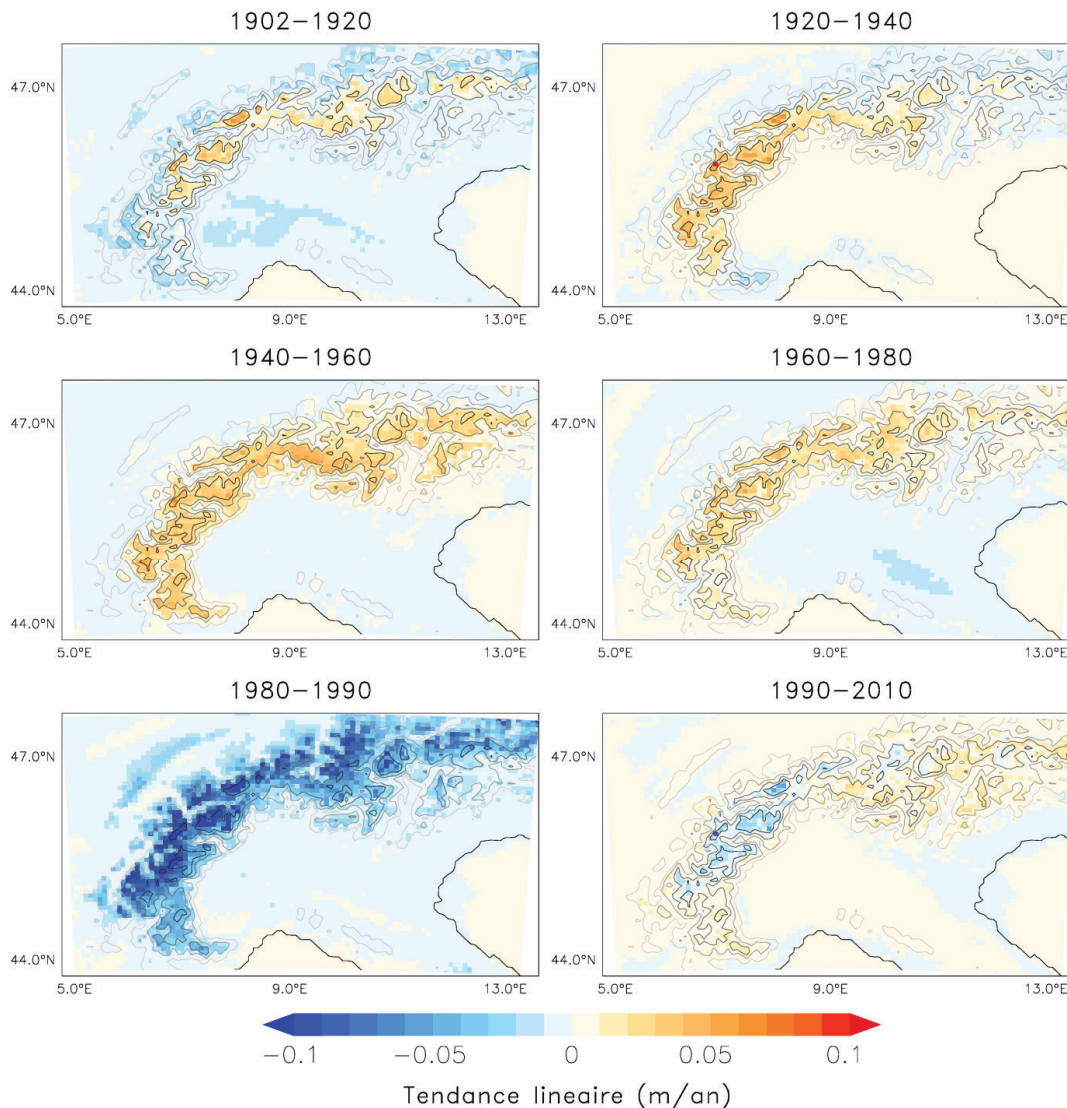


Figure 2. Tendances linéaires de la hauteur de neige moyenne de janvier à avril simulée par le MAR forcé par ERA-20C sur des périodes successives de 20 ans (respectivement 10 ans pour la décennie 1980). Les tranches d'altitude sont représentées par les courbes de niveau de 500, 1000, 1500, 2000 et 2500 m (de gris clair à gris foncé).

2.2. Lien avec la température et les précipitations

L'évolution de la hauteur de neige peut être expliquée par les changements conjoints de la température à 2 m et des précipitations (figure 3). Notons qu'il n'y pas de différences significatives de l'évolution, ni pour la température, ni pour les précipitations, entre les tranches d'altitude.

La température n'affiche pas de tendance à long terme claire sur l'ensemble de la période. Tout au plus peut-on deviner une légère tendance négative avant 1985 et une légère tendance positive depuis 1990. Toutefois, notre période d'étude est entrecoupée par deux sauts d'environ 4°C, l'un – négatif – autour de 1950 et l'autre – positif – entre 1985 et 1990. Au niveau des précipitations, on constate une augmentation entre les années 1940 et 1980, suivie d'une diminution au cours de la décennie 1980.

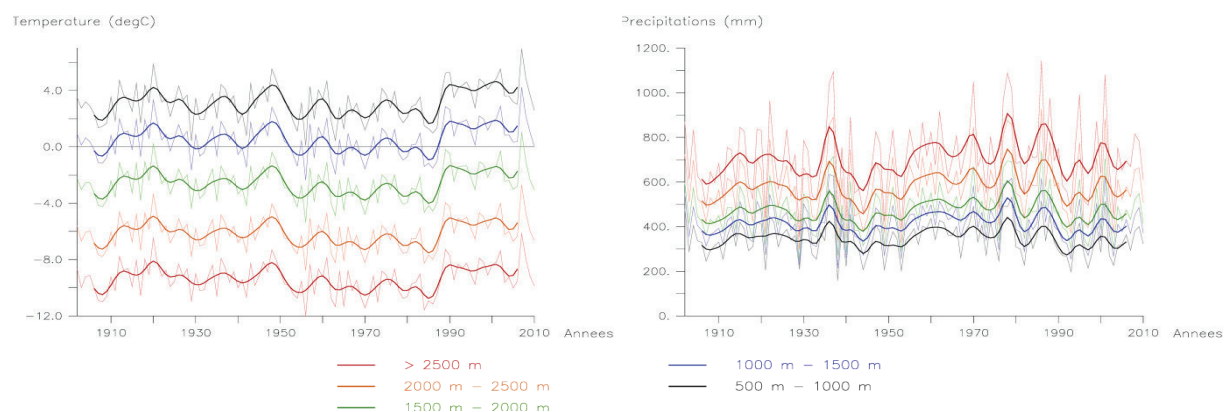


Figure 3. Évolution de la température moyenne de l'air à 2 m (gauche) et du cumul des précipitations (droite) des mois de janvier à avril simulées par le MAR forcé par les réanalyses ERA-20C pour différentes tranches d'altitude. Les traits fins représentent les valeurs annuelles et les traits épais représentent les moyennes glissantes sur 10 ans.

Ainsi, l'augmentation de la hauteur de neige constatée avant 1980 pour les altitudes les plus élevées peut être expliquée par l'augmentation des précipitations sur la même période. La température étant suffisamment basse à ces altitudes, elle n'a pas dû jouer de rôle déterminant dans l'évolution du manteau neigeux. Par contre, la diminution de température observée vers 1950 peut expliquer pourquoi l'augmentation de la hauteur de neige a gagné les tranches d'altitude plus faible entre 1940 et 1960. Finalement, la forte diminution de la hauteur de neige au cours des années 1980 peut clairement être attribuée au réchauffement de 4°C et à la diminution des précipitations observées concomitamment, en particulier de 1985 à 1990.

2.3. Lien avec la NAO et l'AO

L'évolution des indices de la NAO et de l'AO montre que les variations de température et de précipitations qui ont induit les changements de la hauteur de neige peuvent être imputées à des changements de la circulation atmosphérique (figure 4), comme l'a également indiqué Beniston (1997 ; 2012). Il apparaît effectivement que la NAO a connu une légère tendance à la baisse jusqu'à atteindre des valeurs négatives avant 1980, ce qui correspond bien à une augmentation des précipitations dans les Alpes. On retrouve également une diminution claire de la NAO (CRU) autour de 1950, associée à la chute de la température moyenne. À l'inverse, la fin des années 1980 est marquée par des valeurs très positives de la NAO et de l'AO, ce qui se traduit par des températures plus élevées en Europe et des précipitations plus faibles en Europe du Sud, et donc aussi dans les Alpes.

Conclusion

Pour cette contribution, nous avons modélisé le climat des Alpes à l'aide du Modèle Atmosphérique Régional MAR forcé par les réanalyses ERA-20C, NCEP/NCAR et ERA-Interim, dans le but d'analyser l'évolution de la hauteur de neige. Il en ressort que la hauteur de neige a augmenté depuis le début du 20^e siècle, d'abord uniquement en haute altitude (> 2000 m), et depuis les années 1940-1960 aussi aux altitudes moyennes (500-2000 m). Toutefois, les années 1985-1990 sont marquées par une inversion de cette tendance, avec une diminution forte et généralisée de la hauteur de neige.

Cette évolution de la hauteur de neige est notamment due à des changements de la circulation atmosphérique, comme le montre l'analyse des indices NAO et AO. Ces changements de circulation ont probablement induit des variations de température et de précipitations qui ont un effet direct sur la hauteur de neige. Ainsi, ils pourraient expliquer, du moins partiellement, la hausse de température observée au cours des années 1980. Toutefois,

une analyse plus détaillée de ces changements de circulation, et en particulier de la période 1985-1990, mériterait d'être menée

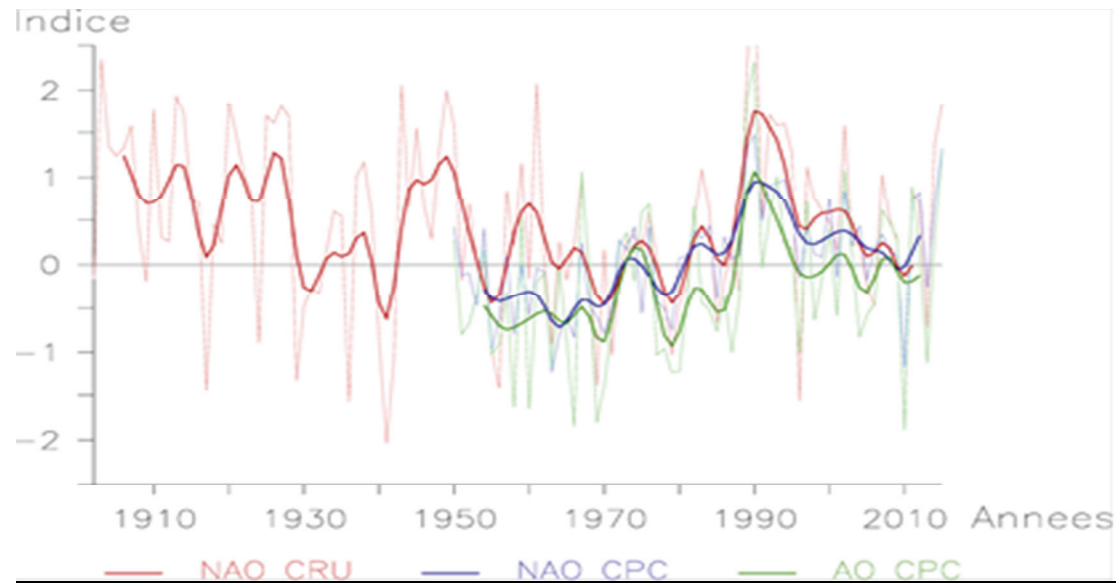


Figure 4. Évolution de l'oscillation nord-atlantique (NAO) du CRU et du CPC, ainsi que de l'oscillation arctique (AO) du CPC moyennes sur les mois de janvier à avril. Les traits fins représentent les valeurs annuelles et les traits épais représentent les moyennes glissantes sur 10 ans.

Finalement, il est intéressant de constater que les variations de hauteur de neige, de température et de précipitations données par le MAR forcé par les différentes réanalyses sont en accord avec les indices de téléconnexion issus d'autres jeux de données et, surtout, avec les observations issues de stations météorologiques (Beniston, 1997 ; 2012). Cela confirme à la fois la qualité des réanalyses sur notre domaine d'étude et la capacité du MAR à reproduire le climat d'une région au relief aussi accidenté que les Alpes. Néanmoins, il faut garder à l'esprit que la résolution du MAR (7 km) n'est pas assez fine pour représenter correctement les variations spatiales de la hauteur de neige dans les Alpes. Le relief est trop lissé et les influences locales de la topographie (effet d'abri / d'exposition au vent, adret / ubac) sont négligées.

Bibliographie

- Beniston M., 1997 : Variations of snow depth and duration in the Swiss Alps over the last 50 years: links to changes in large-scale climatic forcings. *Climatic Change*, **36**, 281-300
- Beniston M., 2012 : Is snow in the Alps receding or disappearing ? *WIREs Clim Change*, doi: 10.1002/wcc.179
- Fettweis X., Franco B., Tedesco M., van Angelen J., Lenaets J., van den Broeke M., Gallée H., 2013 : Estimating the Greenland ice sheet surface mass balance contribution to future sea level rise using the regional atmospheric climate model MAR. *The Cryosphere*, **7**, 469-489
- Steger C., Kotlarski S., Jonas T., Schär C., 2013 : Alpine snow cover in a changing climate: a regional climate model perspective. *Climate Dynamics*, **41**, 735-754
- Wyard C., Scholzen C., Fettweis X., Van Campenhout J., François L., 2017 : Decrease in climatic conditions favouring floods in the south-east of Belgium over 1959-2010 using the regional climate model MAR. *International Journal of Climatology*, **37**, 2782-2796, doi: 10.1002/joc.4879

LES PLUIES EXTRÊMES À RISQUE D'INONDATIONS DANS LA VILLE DE KAIROUAN

NASRALLAH W.¹, BEN BOUBAKER H.², VINET F.³

¹Faculté des Sciences Humaines et Sociales. Université de Tunis - UR. Biogéographie, Climatologie Appliquée et Dynamique Érosive. Université de Manouba / Université Paul-Valéry Montpellier III - UMR. Gouvernance, Risque, Environnement, Développement [nasrallah_wafa@gmail.com].

²Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités. Université de Manouba - UR. Biogéographie, Climatologie Appliquée et Dynamique Érosive [hboubaker@yahoo.fr].

³Université Paul-Valéry Montpellier III - UMR. Gouvernance, Risque, Environnement, Développement [freddy.vinet@univ-montp3.fr].

Résumé – Ce travail étudie les pluies extrêmes à risque d'inondations dans la ville de Kairouan. Il s'appuie sur une méthode d'analyse fréquemment utilisée pour l'étude des événements extrêmes (SAHANI M. et al., 2012; OZER P. et al., 2014; HANGNON H. et al., 2015...). L'analyse des précipitations a été réalisée en calculant, pour chaque année, 5 indicateurs pluviométriques, à savoir: la précipitation totale annuelle (PTOT), le nombre total de jours de pluie (précipitations ≥ 1 mm, JP), la pluviométrie maximale enregistrée sur un jour (Px1J), la fréquence des événements pluviométriques intenses (P95p) et extrêmes (P99p). En outre, on a eu recours au modèle Gumbel (qualifié le plus adéquat pour la série pluviométrique utilisée), qui nous a permis de déterminer les types des événements pluviométriques à risque d'inondations à Kairouan.

Mots-Clés : Pluies extrêmes, indicateurs pluviométriques, inondations, Kairouan.

Abstract - Extreme rains at risk of flooding in the city of Kairouan

This work studies of extreme rains at risk of floods in the city of Kairouan. It is based on an analysis method, frequently used for the study of extreme events (SAHANI M. et al., 2012, OZER P. et al., 2014, HANGNON H. et al., 2015 ...). The analysis of rainfall required 5 precipitation indicators, for each year: the total annual precipitation (PTOT), the total number of rainy days (precipitation ≥ 1 mm, JP), the maximum rainfall recorded over one day (Px1J), the frequency of events Intense rainfall (P95p) and extreme (P99p). In addition, we used the Gumbel model (which is the most appropriate for the rainfall series), which enabled us to determine the types of rainfall events at risk of flooding in the city of Kairouan.

Keywords : Extreme rains, rainfall indicators, floods, Kairouan.

Introduction

Située au centre de la Tunisie, la ville de Kairouan (Figure 1) s'est développée sur une plaine inondable traversée par deux grands cours d'eau endoréiques « Oued Zeroud » et « Oued Marguellil ». Historiquement, elle est connue par le risque d'inondation. Elle en a tant souffert. En crue, ces deux oueds se transforment en de vrais torrents, menaçant la ville et causant des dommages souvent graves.

La commune de Kairouan, se particularise par un régime pluviométrique de nuance continentale et par l'importance des pluies des intersaisons. Les pluies extrêmes qui y sont observées sont essentiellement liées à des situations de retour d'est (Henia et EL-Melki, 2000). Elles sont souvent prolongées dans le temps, d'une forte intensité et engendrent des totaux pluviométriques quotidiens élevés (EL-Melki, 2008). Ces pluies génératrices de crues peuvent tomber plus loin de la ville, sur le bassin versant de Zeroud. Mais les choses ont changé après la construction des barrages pour la protection de la ville (barrages Sidi Sâad sur Oued Zroud en 1982 et El Houareb sur Oued Marguellil en 1989).

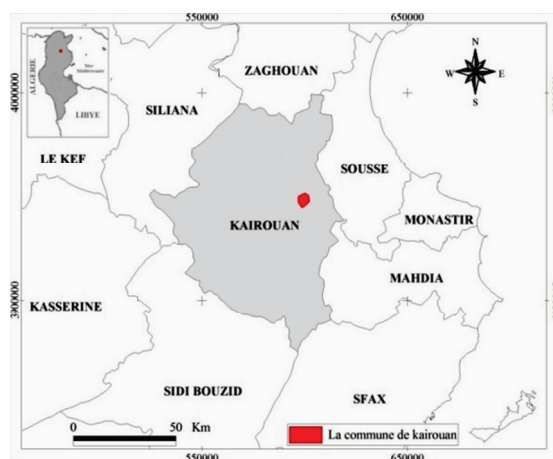


Figure 1. Localisation de la ville et du gouvernorat de Kairouan

Toutefois, le risque d'inondation ne s'est pas dissipé, puisque la commune de Kairouan a connu un étalement urbain galopant (figure 2) même sur des secteurs inondables, y compris ceux ayant déjà été inondés en 1969.

L'exemple de Kairouan met en évidence la complexité du phénomène de l'inondation urbaine. Plusieurs facteurs interfèrent, notamment le site (situation de bassin....), la variété des contextes pluviométriques pouvant générer les inondations, (pluies intenses de courte durée, pluie durable mais de quantité moyenne...) l'effet saison etc.

Dans cet article, l'accent sera mis sur les fortes pluies qui théoriquement sont génératrices du risque. Nous cherchons à démontrer dans quelle mesure les pluies exceptionnelles ont contribué aux inondations dans la ville de Kairouan.

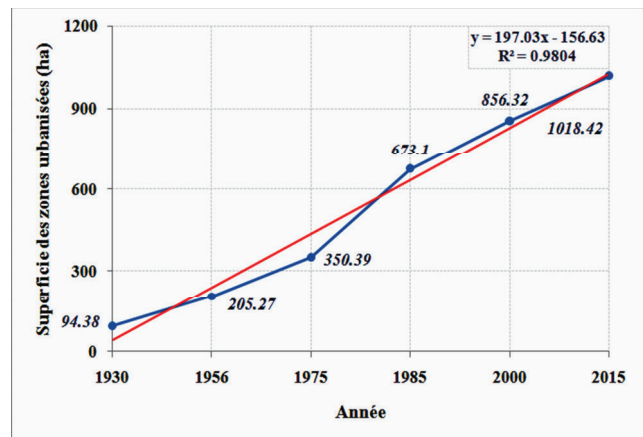


Figure 2. Evolution des surfaces urbanisées dans la commune de Kairouan (Source : REBHI , 2007 ; Mission d'ortho-photos IGN 2000, Google Earth 2015).

1. Données et méthodes

1.1. Qualité des données utilisées

Pour l'étude de la relation entre pluies extrêmes et inondations dans la ville de Kairouan, nous nous sommes fondés sur une série de pluies quotidiennes mesurées à la station synoptique de Kairouan (SM) entre 1959 et 2013 (Tableau1).

Tableau 1. Situation de la station et caractéristiques de la série des totaux annuels

Station	Coordonnées			Observations		Statistiques							
	Latit.	Long.	Alt. (m)	Période	Nbre. années	Moy	Max	Min	Ecart		CV (%)	95 ^e	99 ^e
						(mm)			Type	Absolu		p (mm)	
Kairouan (SM)	35°66 N	10°1E	60	1959-2013	54	301,7	634	152,4	106,1	481,6	35,17	27,23	50,19

(Source des données brutes : D.G.R.E).

Les données traitées sont à la fois continues, non lacunaires et couvrent une période d'observation de 54 ans (en considérant l'année agricole). Ces données ont été gracieusement mises à notre disposition par la Direction Générale des Ressources en Eau (D.G.R.E).

1.2. Méthodes adoptées

Dans ce travail, nous avons opté pour deux méthodes. La **première** est une méthode d'analyse des événements pluvieux extrêmes, qui consiste à déterminer cinq indicateurs pluviométriques (Tableau.2).

La **deuxième** méthode adoptée est la loi double exponentielle nommée aussi la loi de Gumbel (1958), ajustée par la méthode des moments. Le but est d'estimer les fréquences de retour des pluies exceptionnelles et de déterminer les types des évènements pluviométriques à risque d'inondations.

Tableau 2. Les cinq indicateurs utilisés pour la détermination des événements pluvieux extrêmes

ACRONYME	NOM DE L'INDICE	DEFINITION	UNITE
PTOT	Précipitation annuelle	Précipitation totale annuelle	[mm]
JP	Jour de pluie	Nombre total de jours de pluie (≥ 1 mm)	[jours]
Px1J	Pluie maximale quotidienne	Précipitation maximale quotidienne	[mm]
P95p	Fréquence des pluies intenses	Nombre de jours avec des précipitations $\geq 95^e$ percentile calculé sur la période 1959-2013	[jours]
P99p	Fréquence des pluies extrêmes	Nombre de jours avec des précipitations $\geq 99^e$ percentile calculé sur la période 1959-2013	[jours]

Selon la classification des événements extrêmes (Vandiepenbeeck, 1997), fréquemment utilisée (Sene et Ozer, 2002 ; Sahani *et al.*, 2012 ; Hangnon *et al.*, 2015...), on peut dégager 5 types d'évènements pluvieux en fonction de la période de retour:

- **Normal** : PR < à 6 ans.
- **Anormal** : 6 < PR < 10 ans.
- **Très anormal** : 10 < PR < 30 ans.
- **Exceptionnel** : 30 < PR < 100 ans.
- **Très exceptionnel** : PR > à 100 ans.

Il est à noter que le choix de cette loi est fondé sur une comparaison avec une autre loi statistique couramment utilisée pour l'étude des valeurs extrêmes, il s'agit de la loi GEV (Distribution Valeur-Extrême Généralisée).

3. Résultats

3.1. Variabilité annuelle des précipitations

Afin d'étudier la variabilité annuelle des précipitations et déterminer les périodes humides et sèches, on s'est basé sur l'indice **SPI**.

Il s'agit de l'Indice Standardisé des Précipitations créé par les scientifiques américains T.B. MCKEE, N.J. DOESKEN et J. KLEIST, de l'Université de l'État du Colorado en 1993. Cet indice, répond à la formule suivante (FAYE C., 2015) : $SPI = (Xi - Xm) / Si$

↳ où Xi est le cumul de la pluie pour une année i ; Xm et Si , sont respectivement la moyenne et l'écart-type des pluies annuelles calculés pour une série (1959-2013). L'analyse de la figure 1 laisse voir une très grande variabilité interannuelle des pluies à la station de Kairouan. Pour 54 ans d'observations, il n'y a eu que quatre années très humides [$1,5 \leq SPI < 2$] (les années agricoles : 1972/1973 ; 1973/1974 ; 1975/1976 et 1997/1998) et trois années extrêmement

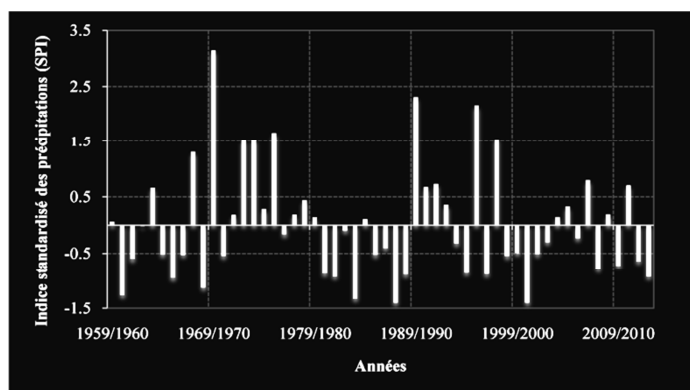


Figure 3. Variabilité pluviométrique annuelle à la station Kairouan (SM) de 1959-2013

humides [$SPI \geq 2$] (les années agricoles : 1969/1970 ; 1989/1990 et 1995/1996). A partir de 1998/1999, la majorité des années (10 années sur 15) sont déficitaires.

3.2. La tendance pluviométrique

Le traitement, de la série des pluies quotidiennes de la station synoptique de Kairouan (SM) entre 1959 et 2013, montre que :

- Le nombre moyen annuel de jours de pluie ($P \geq 1\text{mm}$) est d'environ 38 jours.
- Le nombre moyen annuel est de 0,39 jour pour les pluies extrêmes et de 1,89 jours pour les pluies intenses.

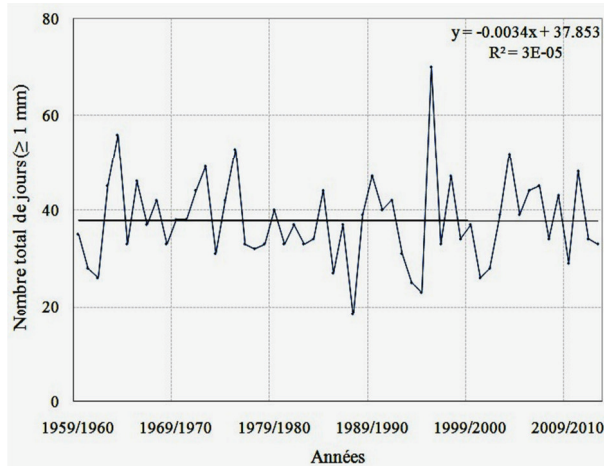


Figure 4. Tendance du nombre de jours de pluie à Kairouan (SM) de 1959-2013

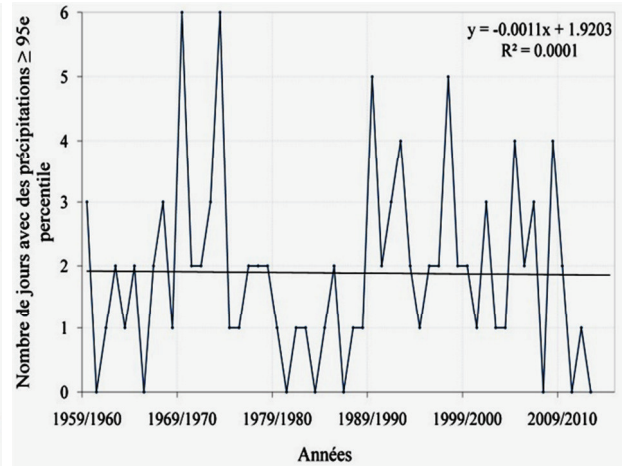


Figure 5. Tendance du nombre de jours de pluie dont le total est supérieur au 95^e percentile à Kairouan (SM) de 1959-2013

Quant aux tendances des paramètres pluviométriques, on a pu constater que certains sont stables (Figures 4 et 5) à savoir : le JP (nombre total de jours de pluie ($\geq 1\text{mm}$)) et les événements pluvieux intenses (P_{95p} : définis à partir du seuil de 27,23 mm).

Les événements pluvieux extrêmes (P_{99p} : définis à partir de seuil 50,19 mm) présentent une tendance non significative vers la baisse sur la période 1959-2013. L'analyse de la figure 6 permet de constater qu'à partir de l'année agricole 1998/1999, il n'y a eu aucun jour de pluie extrême.

3.3. Types des pluies journalières pouvant générer des inondations

Il s'avère difficile de définir un seuil pluviométrique à partir duquel on peut considérer les pluies comme génératrices des inondations. Dans ce travail, nous avons opté pour le seuil ($P \geq 30\text{mm} / 24\text{h}$) retenu pour définir les pluies torrentielles (Kassab F., 1979), ainsi que les pluies à risque en Tunisie et qui « donnent lieu à des inondations catastrophiques notamment en milieu urbain qui subit un fort ruissellement des eaux en raison des surfaces imperméabilisées » (Dallel, 2015).

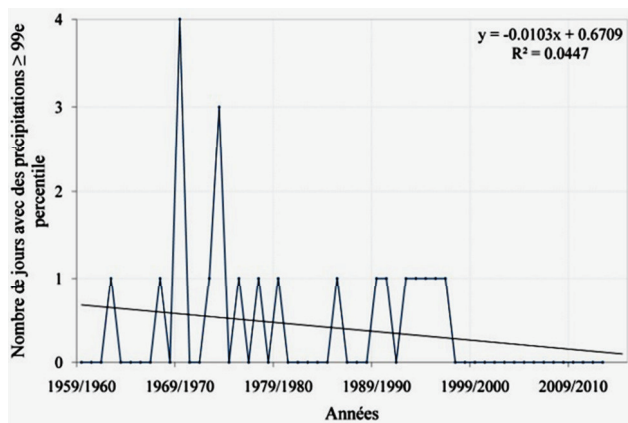


Figure 6. Tendence du nombre de jours de pluie dont le total est supérieur au 99^e percentile à la station Kairouan (SM) de 1959-2013

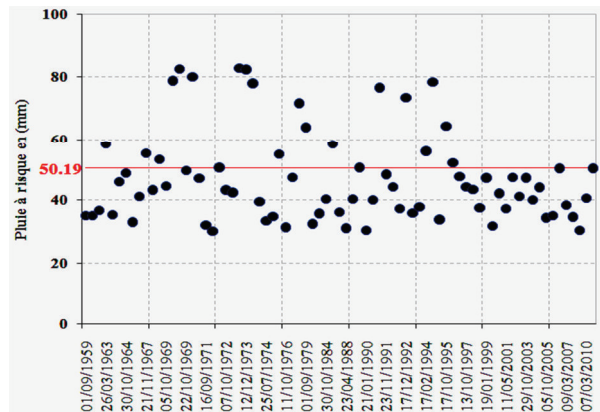


Figure 7. Les jours des pluies à risque à la station Kairouan (SM) de 1959-2013

L'analyse de la figure 7 laisse voir que parmi 77 jours de pluies à risque, environ 21 jours de pluies sont qualifiées d'extrêmes ($P > 50,19$ mm).

Pour estimer les types des événements pluviométriques à risque d'inondations dans la ville de Kairouan, on a eu une difficulté du choix du modèle statistique le plus adéquat : modèle Gumbel (Figure 8) ou Modèle GEV (Figure 9). Pour cela, nous nous sommes basés sur les deux critères les plus connus pour le choix du meilleur entre un ensemble de modèles, il s'agit de : Critère d'Information d'Akaike (AIC) et le BIC (Bayésien information criterion) ; (Hebal et Remini, 2011). En effet, un modèle est meilleur qu'un autre s'il a un AIC (ou BIC) plus petit.

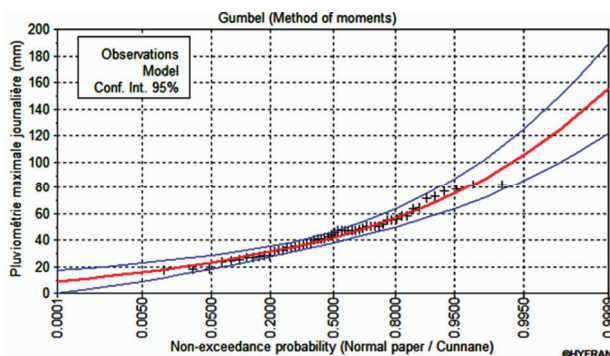


Figure 8. Ajustement statistique de la pluviométrie maximale journalière à la station Kairouan (SM) de 1959-2013- « Loi Gumbel »

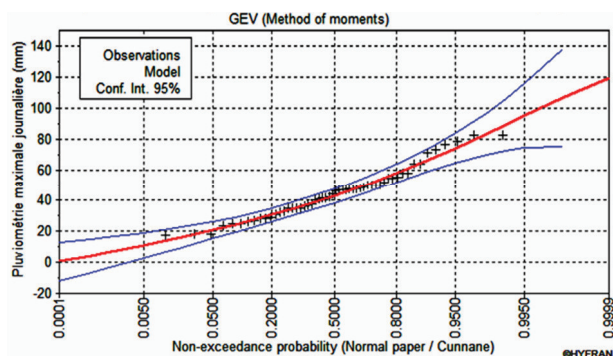


Figure 9. Ajustement statistique de la pluviométrie maximale journalière à la station Kairouan (SM) de 1959-2013- « Loi GEV »

En se basant sur le logiciel « HYFRAN », on a pu calculer les (BIC) et (AIC) pour les deux modèles. Le modèle Gumbel s'avère le plus approprié (Tableau.3).

Tableau 3. Les deux critères (BIC) et (AIC) calculés pour les modèles GUMBEL et GEV

Modèle	BIC	AIC
Gumbel (Méthode des moments)	460.317	456.340
GEV (Méthode des moments)	462.953	456.986

Les types des évènements pluviométriques à risque d'inondations dans la ville de Kairouan (Tableau.4), estimés par le modèle GUMBEL, met en évidence que :

Tableau 4. Types des évènements pluviométriques à la ville de Kairouan (1959-2013)

Type d'évènement pluvieux	Période de retour	Seuil pluviométrique	Nombre d'évènements pluvieux
Normal	PR < à 6 ans	P < à 59,01 mm	65
Anormal	6 < PR < 10 ans	59,01 < P < 66,1 mm	0
Très anormal	10 < PR < 30 ans	66,1 < P < 80,6 mm	9
Exceptionnel	30 < PR < 100 ans	80,6 < P < 96,2 mm	3
Très exceptionnel	PR > à 100 ans	P > à 96,2 mm	0

- La majorité des évènements pluviométriques à risque d'inondations (Figure 7), recensés entre 1959 et 2013 sont normaux : avec un seuil pluviométrique ($P < 59,01$ mm) et une période de retour inférieure à 6 ans.

- Parmi les 21 jours de pluies extrêmes : 9 sont dans la catégorie normale, 9 dans celle très anormale et 3 seulement sont dans la catégorie exceptionnelle.

Le tableau 5, regroupe les dégâts occasionnés par les pluies extrêmes exceptionnelles qui se sont abattues sur la commune de Kairouan.

Tableau 5. Événements pluviométriques exceptionnels et dégâts associés à la ville de Kairouan (1959-2013)

Date	Pluie (mm)	Dégâts
21/10/1969	82,4	« La ville de Kairouan est complètement isolée, toutes les routes conduisant à la ville sont coupées, 20 habitations se sont effondrées à Kairouan où les communications téléphoniques sont interrompues sauf avec Sousse ». La Presse de Tunisie/ Jeudi le 23 Octobre 1969.
05/12/1973	82,7	Coupure de la GP2 : « La direction des ponts et chaussées du Ministère de l'Équipement communique: La circulation est encore coupée sur la route principale N. 2 Enfida-Kairouan. La circulation à destination Kairouan est possible par Sbikha, et entre Kairouan et Sidi Amor Bou Hajla au P.K. 71,000 ». La Presse de Tunisie/ Vendredi le 07 Décembre 1973.
12/12/1973	82,3	« Les pluies ont cessé, mais les routes sont encore coupées. La ville de Kairouan est encore coupée de certaines délégations du gouvernorat. Un nombre indéterminé de maisons ont subi des dommages ». La Presse de Tunisie/ Samedi le 15 Décembre 1973.

Conclusion

L'analyse des types des évènements pluviométriques à risque d'inondations dans la ville de Kairouan entre 1959 et 2013, permet de constater que cette ville n'a connu que 3 évènements pluviométriques exceptionnels par leurs intensités journalières.

D'autre part, il s'avère que les pluies responsables des inondations à la ville de Kairouan, au cours des dernières décennies, ne sont ni extrêmes ni exceptionnelles. Elles sont plutôt des pluies intenses et normales ($P < 59,01$ mm). L'inondabilité de la ville dépend certes de facteurs de souche (site de bassin, pente faible, endoréisme, proximité du niveau de base...), mais qui sont renforcés par l'extension du tissu urbain et la faible densité du réseau d'évacuation des eaux pluviales. En effet ce n'est qu'à partir de 2008 qu'un tel réseau a été mis en place, se limitant aux voies principales: GP 12, GP 2 et R99 (enquête personnelle).

Pour améliorer la résilience de la ville à l'égard des inondations, il s'avère impératif d'étendre ce réseau à l'intérieur même des quartiers, notamment ceux où l'habitat est non réglementaire comme Menchia et Bourgi (REBHI A., 2007).

Bibliographie

- Dallel J., 2015 : Les pluies à risques en Tunisie. *Contribution à l'étude des aléas et risques climatiques en Tunisie*, Publications de l'Université de Tunis, F.S.H.S, U.R « GREVACHOT », 33-59.
- EL Melki T., 2008 : Exemples de situations de « Retour d'Est » en Tunisie orientale. *Atlas de l'eau*, Publications de l'Université de Tunis, F.S.H.S, U.R « GREVACHOT », 46-47.
- Faye C., 2015 : Étude des sècheresses pluviométriques et hydrologiques en Afrique tropicale : Caractérisation et cartographie de la sècheresse par indices dans le haut bassin du fleuve Sénégal. *Physio Géo*, **9**, 17-35.
- Hangnon H. et al., 2015 : Précipitations 'extrêmes' et inondations à Ouagadougou : Quand le développement urbain est mal maîtrisé... *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **28**, 497-502.
- Hebal A. et Remini B., 2011 : Choix du modèle fréquentiel le plus adéquat à l'estimation des valeurs extrêmes de crues (cas du Nord de L'Algérie). *Canadian Journal of Civil Engineering*, **38**, 881-892.
- Henia L. et El Melki T., 2000 : Circulation de "Retour d'est" et pluies diluviennes sur la Tunisie orientale. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **13**, 120-127.
- Kassab F., 1979 : *Les très fortes pluies en Tunisie*. Publications de l'Université de Tunis, 244p.
- Ozer P. et al., 2014 : Évolution récente des extrêmes pluviométriques en Mauritanie (1933-2010). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **27**, 394-400.
- Rebhi A., 2007: Dynamique urbaine non-réglementaire et gouvernance locale à Kairouan. *Insaniyat*, **38**, 11-28.
- Sahani M. et al., 2012 : Évolution des caractéristiques pluviométriques dans la zone urbaine de Butembo (RDC) de 1957 à 2010. *Geo-Eco-Trop*, **36**, 121-136.
- Sene S. et Ozer P., 2002 : Évolution pluviométrique et relation inondations-événements pluvieux au Sénégal. *Bulletin de la société géographique de Liège*, **42**, 27-33.
- Vandiepenbeeck M., 1997 : Bilan climatologique saisonnier. Hiver 1997 : Une période de froid remarquable. *Ciel et Terre*, **113**, 65-66. In : Sene S. et Ozer P., 2002 : Évolution pluviométrique et relation inondations-événements pluvieux au Sénégal. *Bulletin de la société géographique de Liège*, **42**, 27-33.

SAISONNALITÉ CLIMATO-THERMIQUE EN TUNISIE : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE APPLIQUÉE À QUELQUES STATIONS

BEN BOUBAKER H.¹, CHEHAIB S.², NMIRI A.²

¹Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités de Manouba - UR. Biogéographie, Climatologie Appliquée et Dynamique Érosive. E-mail : hboubaker@yahoo.fr

²Institut National de la Météorologie (INM Tunisie)

Résumé – *L'étude propose une nouvelle approche de définition des saisons « thermiques », chaude et froide. Elle définit le début et la fin de la saison chaude par rapport à la moyenne pentadaire des TX et TN des mois de juin et d'août. Quant à la saison froide, elle est définie de la même manière par référence aux moyennse de décembre et de février. L'analyse de la variabilité interannuelle de la durée des deux saisons dénote d'une tendance à l'allongement de la saison chaude et un raccourcissement de la saison froide.*

Mots-Clés : Variabilité thermique, saison thermique, changement climatique.

Abstract - *The study proposes a new approach to the definition of "hot" and "cold" seasons. It defines the beginning and the end of the warm season compared to the average TX and TN of the months of June and August. The cold season, is defined in the same way by reference to the averages of December and February. The analysis of the interannual variability of the duration of the two seasons indicates a tendency to extension of the warm season and a shortening of the cold one.*

Keywords : Climatic variability, thermal season, climate change.

Introduction

Dans le domaine tempéré de l'hémisphère nord, l'année est couramment découpée en saisons de durées égales, qui sont définies par référence à un facteur unique ou à une combinaison de facteurs (Peguy, 1970).

- **les saisons astronomiques** (ou calendaires) sont identifiées par référence au calendrier astronomique, déterminé par la hauteur du soleil. L'hiver commence au solstice de décembre et s'achève à l'équinoxe du printemps (en mars) et l'été commence au solstice de juin et s'achève à l'équinoxe d'automne (septembre). Quant à l'automne et au printemps, saisons intermédiaires, ils s'étendent entre l'équinoxe qui porte leur nom et le solstice (Peguy, 1970; Hufty, 2001).

- **les saisons climatiques** (ou météorologiques) sont une simplification des précédentes. Elles regroupent, pour chaque saison, trois mois entiers et admettent les débuts des mois comme dates charnières (1^{er} septembre, 1^{er} décembre, 1^{er} mars et 1^{er} juin). Ces dates annoncent l'avènement des quatre saisons, telles qu'elles sont admises dans le domaine tempéré (<http://www.meteofrance.fr/publications/glossaire/153727-saison-climatique>). Un tel découpage des saisons présente l'avantage de faciliter le calcul et le traitement des données climatiques.

En Tunisie, pays situé en marge sud de la zone tempérée, on admet l'alternance des 4 saisons climatiques, selon ce même découpage. Conventionnellement, l'été est la saison chaude et l'hiver la saison froide. Toutefois, on constate de plus en plus que ce découpage n'est pas forcément le plus pertinent dans le contexte climatique de la Tunisie. En l'occurrence, les limites entre les saisons ne correspondent ni à une rupture pluviométrique, ni à une rupture thermique.

Le présent travail propose une approche d'identification des saisons « climato-thermiques », sous un angle thermique, par référence aux températures moyennes du début et de la fin des saisons principales (été et hiver). Pour valider cette méthodologie, l'étude se réfère à quelques stations représentatives des différentes régions de la Tunisie.

1. Données et méthodes

1.1. Données

Pour mener à bien le présent travail, nous nous référons aux données quotidiennes des températures maximales (TX) et minimales (TN) observées dans 8 stations, représentatives des différentes régions de la Tunisie (figure 1). Ces données se réfèrent à une période d'observation suffisamment longue, s'étalant de 1950 à 2016. Ce sont des données contrôlées et validées, issues de la base de données de l'Institut National de la Météorologie (INM). Elles ont été gracieusement mises à notre disposition³⁴.

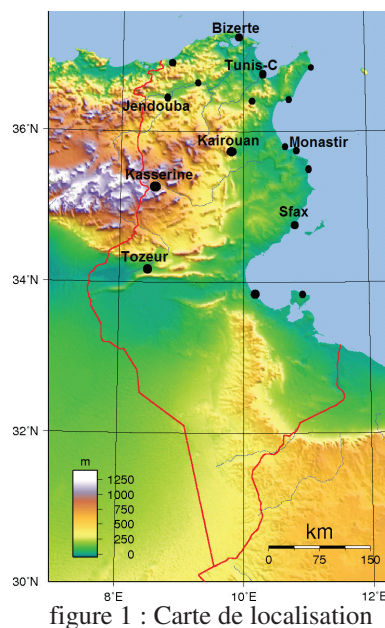


figure 1 : Carte de localisation

1.2. Méthodes

L'objectif de ce travail est de faire la part entre saison « astronomique » ou « météorologique », tributaires des mouvements et interactions entre la terre et le soleil, et les saisons « thermiques », se référant aux températures observées dans chaque station. Si les premières sont censées démarrer à la même date dans toutes les stations, il n'en est pas de même pour les saisons baptisées « thermiques ».

La mise en évidence du démarrage et de l'achèvement de la saison thermique repose sur des indicateurs thermiques « relatifs », propres à chaque station. La méthodologie adoptée dans ce travail est le fruit de plusieurs tâtonnements effectués sur bon nombre de stations. Il a été nécessaire de trouver la démarche qui convient aux différentes stations de la Tunisie, qu'elles soient sahariennes, littorales, continentales ou montagneuses. Il s'avère que la méthode suivante convient le mieux, dans le contexte climato-thermique de la Tunisie, pour identifier le démarrage et l'achèvement des saisons thermiques.

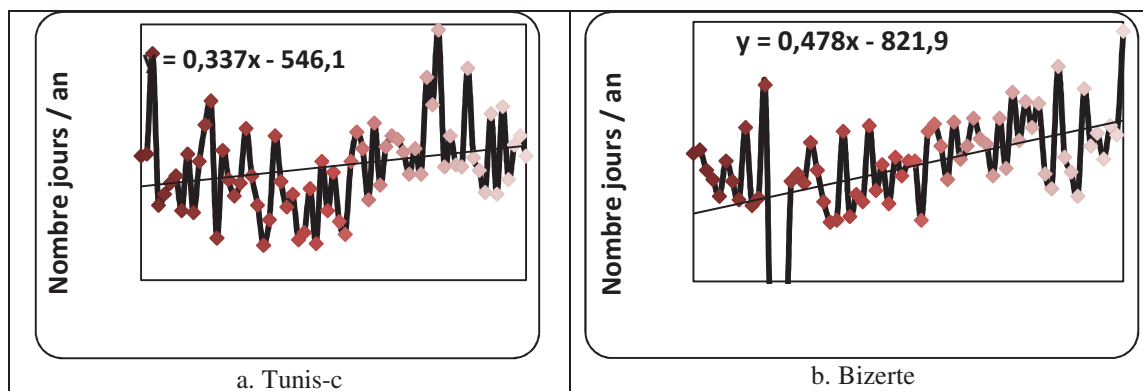
Pour mettre en évidence le **début de la saison chaude**, nous nous référons d'abord aux seuils de définition d'un jour chaud : il s'agit d'un jour où les TX et TN sont supérieures à la moyenne du mois de juin, calculée sur l'ensemble de la période d'observation (tableau 1).

Toutefois, un jour pareil pourrait survenir d'une manière subite assez précocement dans l'année, parfois même au mois de mars. C'est pour cela qu'il est nécessaire de considérer une période de stabilité thermique. Nous optons pour une durée minimale de 5 jours consécutifs remplissant les mêmes conditions (pour TX et TN ensembles), pour annoncer le démarrage de la « saison chaude ». Cette pentade est à chercher entre le premier mois de l'été (juin) et les mois précédents.

Tableau 1. Températures quotidiennes maximales (TX) et minimales (TN) moyennes dans quelques stations en Tunisie

Station	TX Juin	TX Aout	TN Juin	TN Aout	TX Décembre	TN Décembre	TX Février	TN Février
Tunis-C (1950-2016)	29.74	33.37	18.18	21.64	19.96	8.71	16.56	7.6

³⁴ Nous tenons à remercier l'Institut National de la Météorologie pour l'encouragement des initiatives de coopération universitaire et pour la mise à notre disposition des données nécessaires pour la réalisation de ce travail



Bizerte (1950-2016)	28.28	32.01	17.29	20.81	16.61	8.44	15.85	7.17
Sfax (1950-2016)	29.43	32.66	18.63	21.91	17.97	7.28	17.99	6.67
Jendouba (1950-2016)	32.64	36.34	16.01	19.43	16.32	6.05	16.30	5.01
Kairouan (1950-2016)	33.71	36.94	18.72	21.99	18.11	7.62	18.39	6.97
Monastir (1968-2016)	28.73	32.52	19.69	23.19	17.73	9.29	17.16	8.68
Kasserine (1950-2016)	31.77	34.80	16.08	18.83	14.50	3.82	15.12	3.43
Tozeur (1950-2016)	36.80	39.36	22.80	25.59	17.40	7.22	19.18	7.76

Quant à l'**achèvement de la saison chaude**, il correspond aux derniers jours consécutifs remplissant les mêmes critères-seuils, à prospector entre le dernier mois de l'été (aout) et les mois suivants.

En revanche, l'**amorce de la saison froide** est définie sur le même principe de stabilité thermique diurne et nocturne d'au moins 5 jours consécutifs, avec TX et TN inférieurs à la moyenne du premier mois de l'hiver (décembre). Evidemment, la 1^{ère} pentade répondant à ces seuils est à chercher entre le mois de décembre et les mois précédents.

Quant à l'**achèvement de la saison froide**, il se définit par rapport à la dernière pentade remplissant les critères d'un jour froid relatif (TX et TN \leq moyenne de février).

Il va sans dire qu'une fois la saison chaude et froide définies, les saisons intermédiaires apparaissent systématiquement (Ben Boubaker *et al.*, 2015).

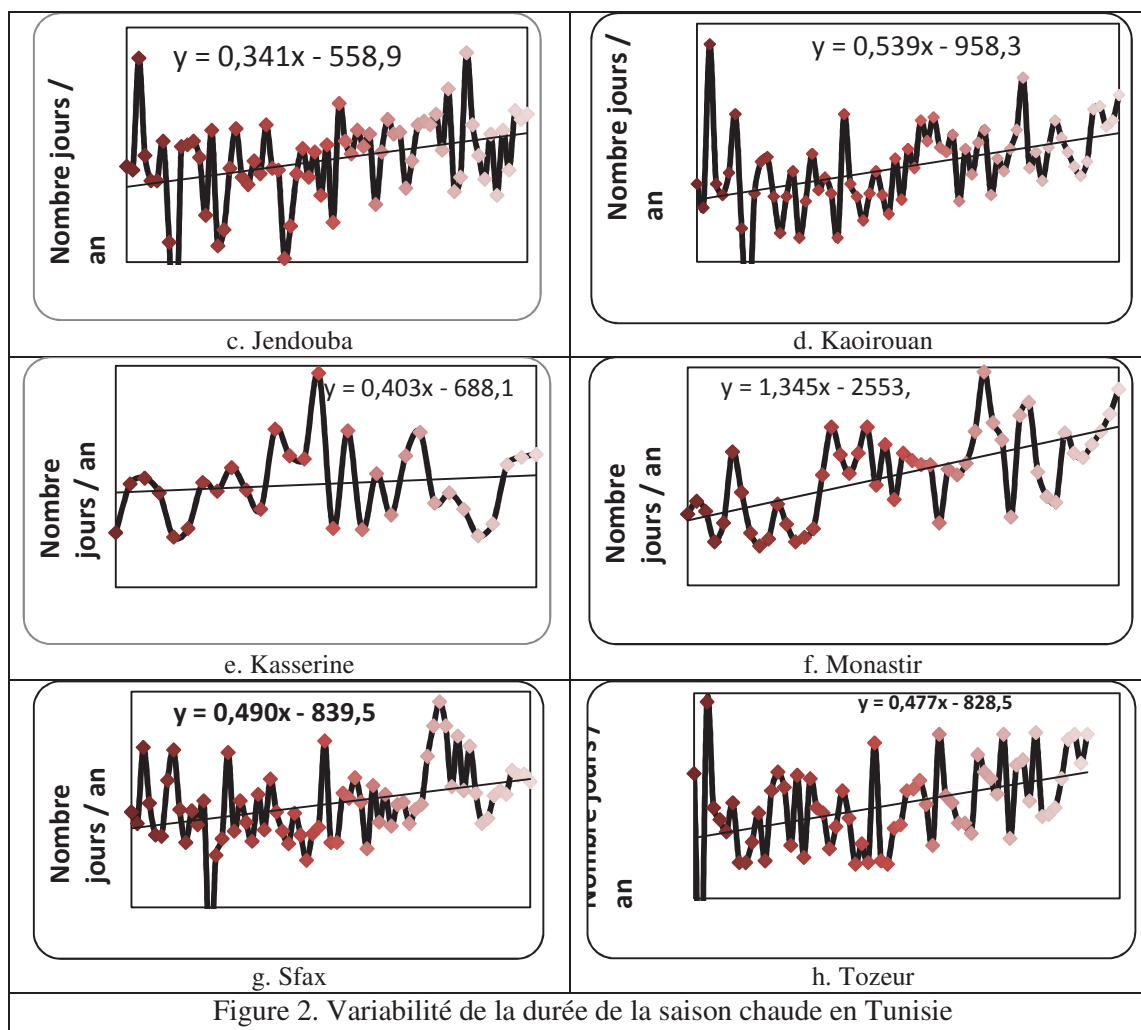
Cette méthode permet définir les saisons thermiques d'une manière « relative », proportionnellement aux indicateurs du climat local. Elle permet également de suivre la variabilité interannuelle de la durée de la saison chaude et froide et de chercher leur tendance.

2. Résultats

2.1. La saison chaude : durée, intervalle et variabilité

L'analyse de la variabilité interannuelle de la durée de la saison chaude (figures 2.a ... 2.f) met en évidence que :

- la durée de la saison chaude accuse une grande variabilité interannuelle (tableau 2) ;
- la comparaison de cette variabilité entre les différentes stations étudiées dénote d'une grande co-variation. En l'occurrence, les années où la durée de la saison chaude accuse un pic sont souvent identiques. Exemple : 1952, 2003, ...
- L'ajustement par une droite des moindres carrés laisse voir, sur la plupart des figures, une tendance ascendante, ce qui laisse présager d'un penchant à l'élargissement de la saison chaude.



2.2. La saison fraîche : durée, intervalle et variabilité

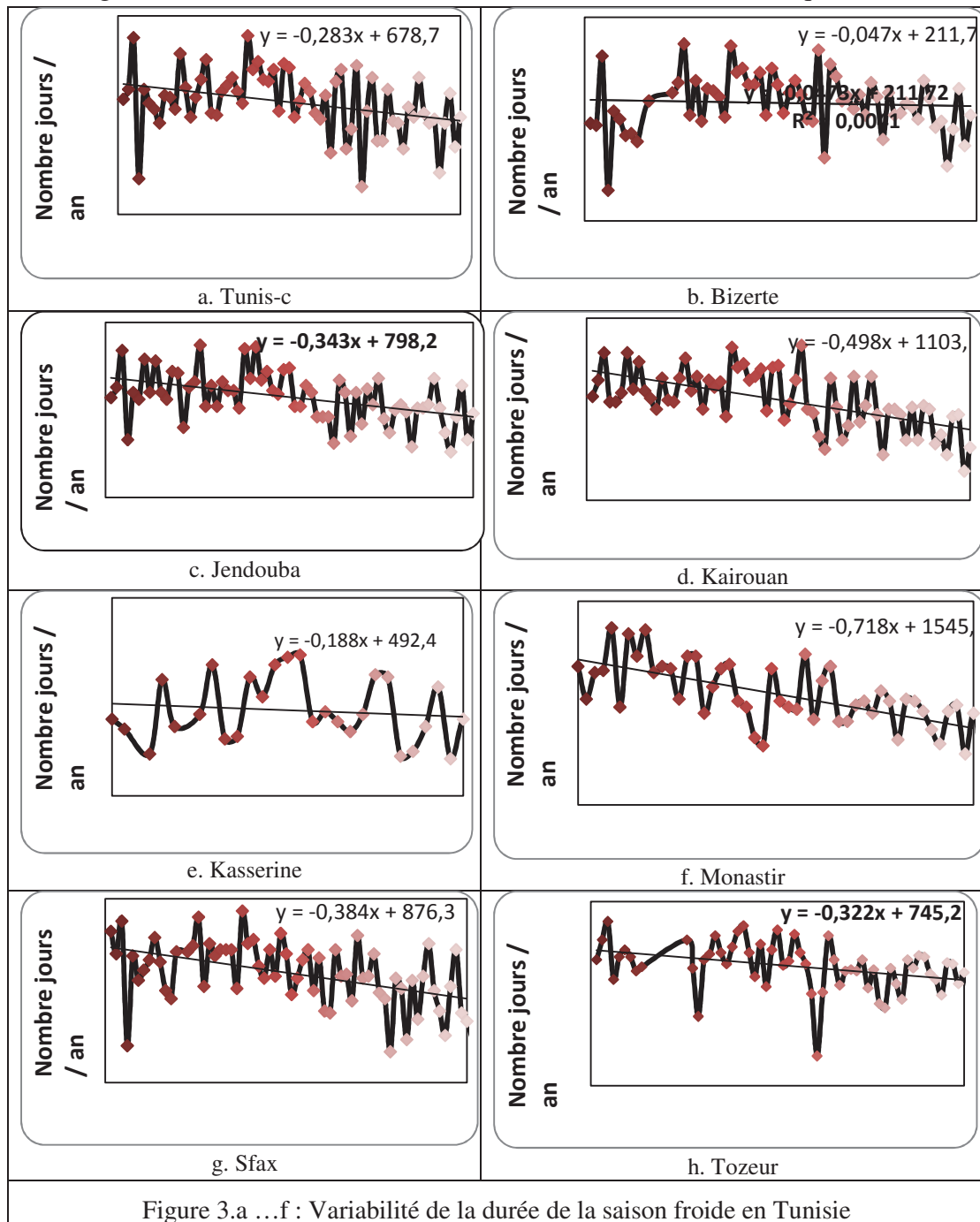
L'étude de l'évolution interannuelle de la durée de la saison froide/fraîche dénote d'une grande variabilité (tableau 1). On peut en déduire que :

- *il est rare que la saison froide corresponde à la saison dite astronomique, météorologique ou climatique de 90 jours* ; - Contrairement à la saison chaude, les figures 2.a à 2.f affichent dans la plupart des cas une légère tendance générale vers le raccourcissement de la durée de la saison fraîche. C'est particulièrement perceptible dans le centre du pays (Kairouan et Monastir).

3. Discussion

3.1. Une large discordance entre la durée des saisons thermiques et les saisons astronomiques ou météorologiques. D'après les différentes figures, on déduit qu'il est quasiment rare que la durée de la saison thermique, fraîche ou chaude, corresponde à celle de la saison astronomique. Par exemple, à Kasserine (station montagneuse de la Dorsale tunisienne), la durée de la saison froide est toujours supérieure à 90 jours. Pour la saison chaude, Bizerte et Sfax par exemple (deux stations littorales) enregistrent des durées quasiment supérieures à 90 jours. On comprend dès lors que la température de l'air près du sol n'est pas uniquement l'expression de l'énergie reçue du soleil. Elle traduit plutôt l'inertie du sol par rapport à cette énergie solaire, ce qui laisse interférer les facteurs locaux (altitude, proximité ou éloignement de la mer, ...).

3.2. Une grande variabilité interannuelle de la durée des saisons thermiques.



-la durée de la saison froide peut tomber en deçà de 90 jours, notamment dans les stations sahariennes et littorales, mai elle peut aussi les dépasser, notamment dans les stations montagneuses, comme Kasserine.

La durée des saisons thermiques est très variable d'une année à l'autre, d'où des indicateurs de variabilité assez élevés, aussi bien pour la saison chaude que froide. En fonction des types de flux dominants, la saison, chaude ou fraîche, peu démarrer précocement et/ou s'achever tardivement, en dehors des dates charnières astronomiques. Par exemple, à Tunis en 1952, la saison chaude a démarré le 29 mars. En 2013, la dernière pentade avec TX et TN supérieurs à la moyenne du mois d'aout s'y est prolongée jusqu'au 5 octobre. Ces débordements grignotent évidemment au détriment des saisons intermédiaires, qui méritent le

qualificatif de «transitoires». Un autre exemple de Bizerte, la saison froide 1989-1990 a démarré le 6 novembre et s'est achevée le 30 mars 1990.

Toutefois, l'inverse est possible. La saison thermique peut démarrer ou s'achever plus tard que le solstice. Mais les exemples sont beaucoup plus rares.

Tableau 2. Indicateurs de variabilité de la durée de la saison chaude et froide dans quelques stations en Tunisie (1950-2016)

	Indicateur	Bizerte	Tunis	Jendouba	kairouan	kasserine	Monastir	Sfax	Tozeur
Saison chaude	Ecart type	21,08	24,52	22,20	24,33	27,89	30,36	27,36	23,76
	CV	16,55	20,02	18,75	21,78	25,31	23,90	20,48	20,41
Saison froide	Ecart type	13,96	15,60	14,10	15,80	13,35	15,59	15,72	16,80
	CV	11,84	13,40	12,04	13,75	11,51	13,66	13,88	16,13

III.3. Une tendance à l'allongement de la saison chaude et au raccourcissement de la saison fraîche. Même si ces deux tendances ne sont pas toujours prouvées statistiquement, la lecture des différentes figures aboutit au constat que depuis le milieu du 20^{ème} siècle, les deux saisons thermiques affichent deux tendances inverses. Attestent-elles du réchauffement climatique en Tunisie ?

Il va sans dire que par sa position géographique à la marge de la zone tempérée, la Tunisie se trouve dans la zone de balancement des masses d'air polaires. Certaines années, elle peut se trouver précocement sous la domination de l'air froid polaire. Il pourrait en être de même vers la fin de l'hiver, avec la possibilité d'un retrait précoce (ou tardif) des masses d'air froides.

A l'inverse, les masses d'air tropicales chaudes peuvent aborder la Tunisie dès le milieu du printemps, et elles peuvent se prolonger jusqu'au milieu de l'automne (Henia *et al*, 2015). En hiver, l'advection des masses d'air tropicales, aussi bien en surface qu'en altitude, reste toujours possible mais beaucoup plus rare (El Melki, 2014).

Conclusion

L'approche méthodologique proposée convient au contexte de climat chaud méditerranéen, en l'occurrence celui de la Tunisie. Elle met en évidence les limites du concept classique de saisonnalité à exprimer la réalité thermique des deux épisodes thermiques extrêmes de l'année. Fondée plutôt sur le climat vécu, elle peut servir pour une meilleure adaptation au climat (comportement vestimentaire, économie d'énergie (climatisation, chauffage...)).

La tendance observée vers l'allongement de la saison chaude et le raccourcissement de la saison froide pourrait être considérée comme un indicateur supplémentaire du réchauffement climatique sous nos latitudes.

Bibliographie

- Ben Boubaker H., 2015: Les vagues de chaleur en Tunisie. In « *Contribution à l'étude des risques climatiques en Tunisie* ». Edit. Université de Tunis, Coordination Henia L. et Hlaoui Z., 216-161.
- Ben Boubaker H., 2015: Les vagues de froid en Tunisie. In « *Contribution à l'étude des risques climatiques en Tunisie* ». Edit. Université de Tunis, Coordination Henia L. et Hlaoui Z., 162-194.
- Ben Boubaker H., Nmiri A., Mrabti M., Ouechteti L., 2015: Tendance au débordement de la saison chaude sous climat méditerranéen chaud : Exemple des canicules tardives automnales en Tunisie. Actes du *XXVIII^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège*. 427-432.
- El Melki T., 2014 : Climatologie dynamique de la Tunisie. Université Manouba, 438 p.
- Henia L. et al, 2015 : Facteurs géographiques et aérologiques du climat de la Tunisie. In « Contribution à l'étude des risques climatiques en Tunisie ». Edit. Université de Tunis, Coordination Henia L. et Hlaoui Z., 162-194.**
- Hufty A., 2001 : *Introduction à la climatologie*. Edit. DeBoeck, 542 p.
- Meteofance : <http://www.meteofrance.fr/publications/glossaire/153727-saison-climatique>
- Peguy. Ch. P., 1970 : *Précis de climatologie*. Edit. Masson, 468 p.

RECORDS THERMIQUES ET PLUVIOMÉTRIQUES DANS LE SUD-OUEST DE LA ROUMANIE PENDANT LES DEUX DERNIÈRES DÉCENNIES

CONSTANTIN (OPREA) D. M.¹, MARINICĂ A. F.², MARINICĂ I.³, VĂTĂMANU V. V.⁴

¹Université de Bucarest, Faculté de Géographie, 1 Boulevard N. Bălcescu, 010041, Bucarest, Roumanie ; oprea.constantin@geo.unibuc.ro

²Jacobs University, Campus Ring 1, 28759, Bremen, Germany ; marinica.andreea@gmail.com

³Université de Craiova, Faculté des Sciences, 13 Rue A.I. Cuza, 200585, Roumanie, ionmarinica@yahoo.com ;

⁴Centre Météorologique Régional Oltenia, 3A Rue Brestei, 200581, Craiova, Roumanie ; victor.vatamanu@gmail.com.

Résumé – Le plus important changement climatique de la planète est le réchauffement global. Ce processus se manifeste de manière différente d'une région à l'autre. Dans ce contexte, le but de ce travail est de mettre en évidence le phénomène de réchauffement qui a caractérisé le climat dans le sud-ouest de la Roumanie notamment après l'année 1990, ainsi que des changements dans la variabilité des précipitations. Par conséquent, nous avons analysés les plus importants événements climatiques enregistrés dans le sud-ouest de la Roumanie durant la période 1996 – 2015, qui ont conduit au dépassement des records de la température de l'air et des précipitations. L'analyse se base sur des données climatiques des 18 stations météorologiques du Centre Météorologique Régional Oltenia. Le dépassement des valeurs maximales de la température de l'air et la hausse de la variabilité du régime des précipitations des deux dernières décennies sont des indicateurs du changement climatique global.

Mots-clés : sécheresse intense, vagues de chaleur, excès de précipitations, sud-ouest de la Roumanie.

Abstract – *Thermal and pluviometric records in the South-Western of Romania in the past two decades.*

The most important global climate change is the global warming. At the regional level, this climate process manifests differently from one region to another. The purpose of this paper is to highlight the phenomenon of warming in the south-western part of Romania, especially after 1990, as well as changing in the variability of precipitation. We analyzed the most important climatic events recorded in south-west of Romania for the period 1996 – 2015, as a result of which the air temperatures and precipitation were exceeded. The analysis will be based on climatic data from 18 meteorological stations belonging to the Oltenia Regional Meteorological Center. Outclassing maximum air temperature and increasing rainfall variability over the past two decades are indicators of global climate change.

Keywords : Intense drought, heat waves, excess of rainfall, south-western of Romania.

Introduction

L'année 2015 a été la plus chaude de l'histoire récente, selon NASA et Petteri Taalas, secrétaire général de l'OMM, la moyenne globale dépassant de 1,0 °C la moyenne globale enregistrée à l'époque préindustrielle, et de 0,9 °C la moyenne globale de l'hémisphère nord (NOAA, 2016). Au sud-ouest de la Roumanie, 2007 a été la plus chaude année, quand l'hiver a été méditerranéen, l'été excessivement chaud et, en juillet, la majorité des stations météorologiques ont enregistré les valeurs thermiques maximales absolues de la période des observations climatiques en Roumanie. La variabilité climatique de la période 1996 – 2015 a été très importante, avec des changements rapides du temps pluvieux au temps sec, du temps frais (ou même froid) au temps chaud et sec. Un aspect spécifique du réchauffement climatique est le surclassement des valeurs maximales dans toutes les saisons (Dumitrescu *et al.*, 2015). Dans ce travail nous présenterons synthétiquement les plus importants événements climatiques enregistrés dans le sud-ouest de la Roumanie pendant les dernières 2 décennies (1996 – 2015). Nous nous sommes focalisés sur les vagues de chaleur, la sécheresse et les précipitations liquides abondantes, en mettant en évidence des records thermiques et pluviométriques.

1. Région d'étude et données utilisées

Le sud-ouest de la Roumanie représente 12,2 % de la superficie du pays et est connu sous le nom de la province historique Oltenia. De nord au sud, cette région s'étend sur environ 1°55' de latitude et, de l'ouest à l'est, sur 2°53' de longitude. La surface active est très variée, avec un relief de plaine de 25 – 36 m en altitude, englobant des dunes de sable dans l'extrémité méridionale, et des montagnes de 2000 – 2519 m en altitude, dans l'extrémité septentrionale (Fig. 1). Au-dessus de l'Oltenia, les types dominants de circulation atmosphérique sont celle du sud, de l'ouest et de l'est, tandis que les autres sont moins fréquents (Marinică, 2006). En ensemble, la région d'Oltenia a un climat tempéré continental avec une influence méditerranéenne au sud et à l'ouest. Cet article repose sur les données climatiques (température maximale de l'air mensuelle et quotidienne, quantités mensuelles de précipitations, nombre de jours sans précipitations) des 18 stations météorologiques appartenant au Centre Météorologique Régional Oltenia (CRM Oltenia) pour la période d'observations 1996 – 2015 (Fig. 1), cartes synoptiques et opératives du Centre Européen Offenbach et de l'Administration Nationale de Météorologie (ANM). Les méthodes utilisées sont celles classiques comme l'analyse statistique, spatiale et comparative, la recherche bibliographique et observations de terrain dans des situations à risque climatique, ainsi que les méthodes modernes basées sur les SIG.

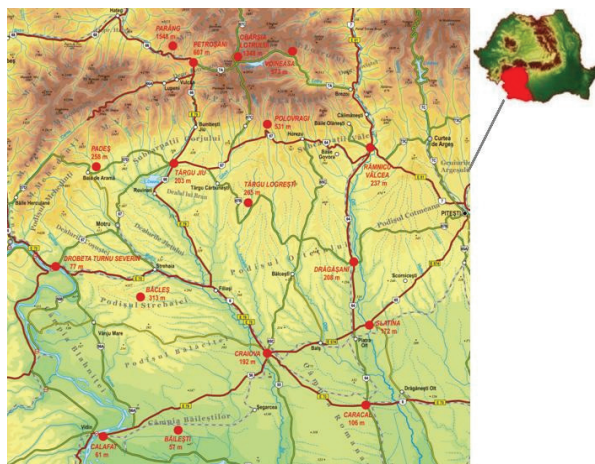


Figure 1. La région d'étude et la localisation des stations météorologiques utilisées (points rouges)

2. Résultats et discussions

2.1. Canicule et sécheresse de l'année 2000

Il a fait très chaud en Oltenia du 01.01.2000 au 01.09.2000 et l'été de 2000 a connu une période de forte canicule associée à une sécheresse drastique et deux températures record absolues pour la Roumanie ont été enregistrées. De même, la sécheresse a évolué lentement pendant les premiers 3 mois de l'année (janvier, février, mars), marqués par des précipitations fortement en dessous de la norme climatologique.

L'arrivée du printemps a été précoce, à partir de février, et vers la fin d'avril, les brumes tardives se sont produites. Les prochains mois de printemps, avril et mai, ont eu des précipitations très rares. Vers la fin du juin, les jours caniculaires ont fait leur apparition. En juillet et août, les périodes de canicule prolongée se sont succédé avec des périodes courtes où le temps s'est « refroidi » légèrement par rapport aux jours de canicule précédents.

De point de vue synoptique, ces états du temps ont été marqués par des situations synoptiques avec des circulations atmosphériques de type continental tropical. Pendant les périodes de canicule, la température est restée haute, même pendant la nuit, et des nombreuses nuits tropicales ont été enregistrées ($t_{max} \geq 20$ °C).

Un record thermique a été enregistré en Roumanie en juillet, plus précisément le 05.07.2000, à Giurgiu, 43,5 °C, qui est devenu la température maximale absolue en juillet en Roumanie. Le surclassement s'est produit 84 ans après l'enregistrement de la température

maximale absolue pour juillet. Quelques années plus tard, en 2007, le surclassement s'est produit à des nombreuses stations météorologiques, sur des zones étendues.

L'intensité particulière de la canicule a coïncidé avec l'année de l'activité solaire maximale (qui se répète une fois tous les 11 ans, mais cette valeur maximale a été particulière, de type séculaire, comme les astronomes la caractérise, comparable à celle de 1946, mais moins forte), qui a amplifié les effets thermiques et la canicule (Dobrica et. al., 2009). Le maximum de la canicule a été enregistré entre 4 – 5 juillet 2000. Par conséquent, l'été de 2000 a été unique de ce point de vue, pour toute la période depuis le début des observations météorologiques en Roumanie, en 1884. La valeur maximale précédente pour juillet a été 42,9°C enregistrée le 05.07.1916 à Alexandria ; notons aussi la coïncidence de cette date du calendrier avec la date de 05.07.2000, et non pas par hasard, car elle est la période caractéristique chaude de juillet. Donc, après 84 ans, la valeur maximale absolue a été dépassée de 0,6°C. La valeur qui dépasse cette maximale absolue coïncide à la croissance de la température moyenne globale de la planète en 2000. En Olténie, la température maximale absolue mensuelle enregistrée antérieurement en juillet, a atteint 41,8°C à Strehaia (dans le département de Mehedinți) le 05.07.1916. En 2000, cette valeur a été enregistrée et dépassée dans plusieurs localités en Oltenia : 42,3°C/04.07.2000 à Caracal dans le département d'Olt; 42,6°C/04.07.2000 à Drobeta-Turnu Severin dans le département Mehedinți ; 43,0°C/05.07.2000 à Bechet et 43,1°C/04.07.2000 à Băilești dans le département de Dolj. Pour Oltenia, la plus chaude journée de l'été de 2000 a été le 04.07.2000, qui est en fait la plus chaude journée de juillet des derniers 84 ans. La valeur de 43,2°C est la plus proche de la maximale absolue mensuelle de juillet, enregistrée en 2000 en Roumanie. En ce qui concerne les quantités de précipitations cumulées durant l'intervalle mai – août 2000, ont été enregistrés 161,9 mm à Băilești, 89,6 mm à Bechet, 103,2 mm à Calafat et 94,2 mm à Craiova ; le nombre de jours sans précipitations a été de 102 jours à Băilești, 104 jours à Bechet, 101 jours à Calafat et 105 jours à Craiova.

L'analyse des données de température et précipitations de 2000 pour Oltenia et pour la plupart du pays, relève une forte sécheresse qui s'est amplifié graduellement à partir de janvier. La sécheresse s'est amplifié en été par une forte canicule et pour la première fois le gouvernement roumain a été mis dans la situation d'adopter le décret d'urgence no 99/2000 (<http://lege5.ro>, 2017), concernant les mesures de protection de la population en cas de phénomènes météorologiques extrêmes. Les périodes de sécheresse ont été interrompues par des périodes pluvieuses (12 – 13.06.2000) après lesquelles la sécheresse est revenue. Malgré le fait qu'en juillet les quantités mensuelles de précipitations semblent très proches des valeurs normales (même excédentaires), elles n'ont pas eu un effet sur les cultures, car les précipitations ont tombé un seul jour (nuit de 12/13.07.2000) et ont été suivies, peu de temps après, d'une période sèche et ensuite d'une forte canicule du 22 au 26.07.2000. Le plus grand nombre de jours pendant lesquels la température maximale a été plus élevée ou égale à 33°C, durant la saison d'été 2000, a été 45 jours (sur les 92 jours d'été), enregistré à Băilești dans le sud du département de Dolj, c'est-à-dire, un pourcentage de 48,9% des jours d'été. Le plus grand nombre de jours pendant lesquels la température maximale a été plus élevée ou égale à 35°C pendant l'été de 2000, a été de 32, enregistré à Băilești, Calafat et Bechet, dans le sud du département de Dolj, c'est-à-dire un pourcentage de 34,8% des jours d'été. A noter la zone de Drobeta-Turnu Severin, dans le département de Mehedinți, avec 30 jours et Caracal, dans le département d'Olt, avec 27 jours. Le plus grand nombre de jours pendant lesquels la température maximale a été plus élevée ou égale à 40 °C durant l'été de 2000 a été de 8, enregistré à Caracal, dans le sud du département d'Olt. A noter aussi la zone de Bechet dans le sud du département de Dolj et Halânga, près de Drobeta-Turnu Severin, avec 6 jours. Dans plusieurs localités à la montagne et sur des collines, en août, les quantités mensuelles des

précipitations ont été presque normales, mais sans effet important sur la végétation puisque la plupart est tombée pendant un seul jour et puis la sécheresse et le temps très chaud se sont installés. Le réchauffement fort de l'été de 2000 en Oltenia fait partie du fort réchauffement qui a caractérisé tout le pays dans cette période. Dans tout le pays, en juillet et août 2000, des températures maximales au-dessus de 40 °C ont été enregistrées dans plus de 45 stations météorologiques, et beaucoup ont devenu des maximales absolues pour les stations météorologiques respectives, ce qui signifie un important saut thermique dans l'évolution climatique de la température. Les vagues de chaleur génèrent la canicule, le déficit de précipitations, sécheresse et produisent des importants dégâts matériels et des victimes humaines.

Les années suivantes (2001, 2002, 2003 et 2004) ont confirmé l'idée que le temps après 2000 s'est réchauffé, surtout à cause des situations de canicule présentes chaque année non seulement en Roumanie, mais aussi à travers l'Europe (Russo *et al.*, 2015), qui font des nombreuses victimes et des dégâts considérables, ce qui nous permet de les considérer un changement climatique.

2.2. Canicule et sécheresse de 2007 : surclassement des records thermiques

En juin 2007 les températures maximales de l'air enregistrées le 26.06.2007 aux stations météorologiques situées dans le département de Dolj (38,6°C à Craiova, 41,1°C à Băilești et Bechet et 41,3°C à Calafat) sont devenues des valeurs maximales absolues de juin et ont été supérieures aux valeurs maximales enregistrées en juin 2000, lorsque la canicule a été forte pour des longues périodes de temps. Pour juin, la valeur maximale absolue du pays est 42,0°C, enregistrée le 29.06.1938 à Oravița. En Oltenia, le 26.06.2007, au poste pluviométrique de Cujmir, dans le département de Mehedinți, la valeur thermique maximale de 42,0°C a été égale à la valeur maximale absolue de juin pour le pays et a été un nouveau record thermique pour juin, dans cette région du sud-ouest de la Roumanie. Par rapport à la période caniculaire de juin 2000, les valeurs maximales de juin 2007 sont de 3 – 4°C plus élevées. Les plus grandes valeurs maximales de température de juin 2000, enregistrées en Oltenia ont été : 38,5°C à Bechet le 23.06.2000 ; 38,7°C à Băilești, le 23.06.2000 ; 37,5°C à Caracal, le 23 et le 24.06.2000 ; 36,8°C à Slatina le 23.06.2000 ; 37,4°C à Halânga et 38,0°C à Drobeta Turnu Severin, le 23.06.2000. Les valeurs maximales mensuelles de température de juin 2007 caractérisent la vague naturelle de chaleur qui fait son apparition dans la première partie de juillet. Par conséquent, nous notons que la vague de chaleur de juin 2007 a eu une intensité exceptionnelle et la chaleur de l'été (caractéristique de juillet) s'est installée deux semaines plus tôt. Les vagues de chaleur de grande intensité de juin dans le siècle précédent se sont produites avec une fréquence de un par siècle. A la suite du réchauffement climatique globale, la fréquence des vagues de chaleur peut devenir 2 – 3 par décennie, ce qui signifie une croissance de 20 fois par rapport au siècle antérieur (Russo *et al.*, 2015). C'est un important indice des changements climatiques régionaux, en plein progrès actuellement sur la planète. Les conséquences de cette vague de chaleur ont été multiples: les cultures de maïs dans le sud du pays ont été affectées, une consommation record d'électricité (pour la saison chaude) à la suite de l'utilisation excessive des climatiseurs, la végétation des pâturages s'est séchée, la navigation sur la Danube a été mise en difficulté, les puits ont séchés etc.

En juillet 2007 la vague de chaleur de la période 15 – 24 juillet 2007 a été la plus forte pour cette période depuis le début des observations météorologiques en Roumanie et a dépassé de 0,7°C la valeur maximale thermique de juillet (de 43,5°C) enregistrée le 05.07.2000, à Giurgiu. La température de 44,3°C enregistrée à Calafat (en Oltenia) le 24.07.2007, est à présent la valeur maximale thermique absolue de juillet en Roumanie. Le 24.07.2007, à Calafat, dans 10 minutes seulement, entre 16h10 OVR et 16h20 OVR (heure d'été de la Roumanie), la

température de l'air a augmenté de 43,6°C à 44,3°C (0,7°C en 10 minutes) ce qui montre d'un côté l'intensité de l'advection d'air chaud et, de autre côté, la rapidité de la croissance de la température de l'air. L'apogée de la phase maximale de l'air chaud sur la Roumanie a été atteint à 18 UTC (21 OVR), lorsque, dans le sud-ouest de la Roumanie, l'isotherme de 30°C se trouvait au niveau de 850 hPa (1520 m conformément à la carte de géo-potiel du niveau de 850 hPa) (Fig. 2). C'était pour la première fois que l'isotherme de 30°C se trouvait au-dessus de la Roumanie au niveau de 850 hPa. En Oltenia, 8 records thermiques absolus se sont enregistrés : 44,3°C à Calafat, 44,2°C à Bechet, 44,0°C à Băilești, 43,2°C à Băcleș, 42,6°C à Craiova, 41,4°C à Slatina, 40,7°C à Tg. Jiu et 28,4°C au sommet de Parâng, à la montagne (Fig. 3). Ces résultats confirment l'une des conclusions du 4^{ème} rapport de l'IPCC, selon lequel la fréquence et l'intensité des phénomènes extrêmes de temps ont augmenté à la suite de l'intensification du réchauffement globale du climat (ANM, www.meteoromania.ro, 2016).

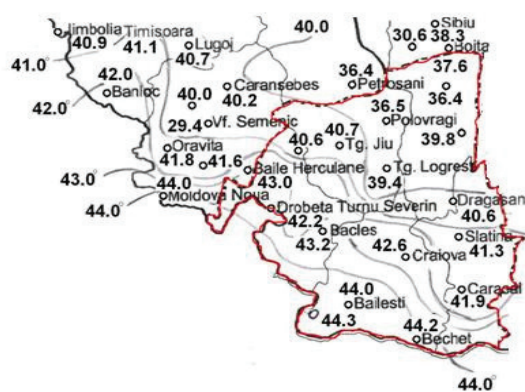
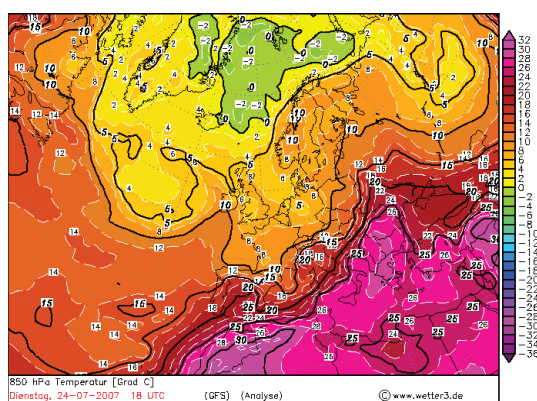


Figure 2 (à gauche). Champ de température de 850 hPa de 24/07/2007, à 18 UTC. Source : <http://www1.wetter3.de/Archiv/>

Figure 3 (à droite). Valeurs maximales de température enregistrées en Sud – Ouest de la Roumanie le 24/07/2007. Le périmètre délimité en trait rouge est la province historique Oltenia. Source : ANM, 2016.

La sécheresse de l'été de 2007 a eu de multiples conséquences : la destruction des cultures et de la végétation dans plusieurs départements du pays et surtout dans le sud et dans l'est, en perturbant la vie ; la mort des animaux ; l'assèchement des fontaines et des cours d'eaux etc. La vague thermique très forte a intensifié la sécheresse dans le pays, la végétation s'est séchée sur des surfaces importantes, les cultures ont été grièvement affectées. La consommation nationale d'électricité a été double par rapport à la normale et des pannes d'électricité fréquentes ont eu lieu à cause de la surcharge du réseau électrique. Pour la première fois en Roumanie, l'avertissement météorologique de code rouge de canicule a été déclaré.

2.3. Records pluviométriques de l'année 2014

L'année 2014 a été exceptionnellement pluvieuse. Cette année a été marquée dans le sud-ouest de la Roumanie par l'évolution de 23 forts cyclons méditerranéens, qui ont déterminé des pluies abondantes et torrentielles dans des régions étendues de la Roumanie et en Europe et, par conséquent, 12 records pluviométriques annuels absolus ont été enregistrés depuis 1955 : 1167,9 l/m² à Dr. Tr. Severin, 1156,5 l/m² à Drăgășani, 1079,1 l/m² à Târgu Jiu, 1171,4 l/m² à Polovragi, 1147,0 l/m² à Craiova, 1140,0 l/m² à Tg. Logrești, 1134,9 l/m² à Râmnicu Vâlcea, 1034,4 l/m² à Băilești, 1031,1 l/m² à Slatina, 979,8 l/m² à Calafat, 937,3 l/m² à Caracal et 840,5 l/m² à Bechet. C'est le premier an où les valeurs des précipitations annuelles dépassent 1000,0 l/m² sur des zones étendues dans la Plaine d'Oltenia et détient le record annuel absolu de ce point de vue (Marinică *et al.*, 2014). L'année 2014 a été considéré, au

début de décembre 2014, comme la plus chaude depuis le début des mesures, où les premières 9 mois ont été les plus chauds mois enregistrés depuis le début des mesures de température (NOAA, 2016). Malgré ça en Oltenia et même en Roumanie, 2014 a été un an thermique normal, mais excessivement pluvieux, où les précipitations annuelles ont dépassé les valeurs enregistrées en 2005, considérée en Roumanie le plus pluvieux an des dernières décennies. Les précipitations enregistrées en 2014 en Roumanie (et en Oltenia) ont surclassé les précipitations enregistrées en 2005 en marquant ainsi un nouveau "seuil" du régime pluviométrique dans cette zone du pays.

Conclusions

Les records climatiques pour la température de l'air et les précipitations atmosphériques ont été dépassés plusieurs fois dans les deux dernières décennies (1996 – 2015) ; par conséquent, les limites de variation des paramètres climatiques ont été modifiées par rapport au siècle passé. Dans le sud-ouest de la Roumanie (Oltenia), durant la période analysée, l'année 2007 a été la plus chaude due notamment aux températures très élevées des mois d'été. En juillet, la plupart partie des stations météorologiques a enregistré les maximums thermiques absolus de ce mois. Le phénomène de sécheresse a été accompagné de vagues de chaleur dont la durée a monté jusqu'aux 10 – 14 jours durant la canicule de l'été 2007.

L'année 2014 a été exceptionnellement pluvieuse par rapport à la période analysée ; elle s'est caractérisée par le nouveau record absolu des quantités de précipitations annuelles à 12 des 18 stations météorologiques d'Oltenia.

Ces dépassements des records de la température de l'air et des précipitations atmosphériques des deux dernières décennies sont la conséquence du phénomène de changement climatique global, au niveau régional. Les vagues de chaleur, les sècheresses et les précipitations liquides abondantes représentent des phénomènes climatiques de risque, qui peuvent engendrer des pertes humaines et des dégâts matériels. Par conséquent, des mesures de surveillance de ces phénomènes et de mitigation de leurs conséquences sont nécessaires, ainsi que trouver des moyens de s'adapter aux changements climatiques associés au réchauffement global.

Bibliographie

Administrația Națională de Meteorologie (ANM), 2016 : www.meteoromania.ro.

Dobrica V., Demetrescu C., Boroneant C., Maris G., 2009 : Solar and geomagnetic activity effects on climate at regional and global scales: Case study – Romania. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **71**, 17-18, 1727-1735.

DUMITRESCU A., BOJARIU R., BÎRSAN M.V., MARIN L., MANEA A., 2015 : RECENT CLIMATIC CHANGES IN ROMANIA FROM OBSERVATIONAL DATA (1961 – 2013). *THEORETICAL AND APPLIED CLIMATOLOGY*, **122**, 1, 111-119.

MARINICĂ I., 2006 : *FENOMENE CLIMATICE DE RISC ÎN OLTENIA*. EDITURA AUTOGRAF MJM, CRAIOVA, 386 P.

Marinică A.F., Constantin (Oprea) D.M., Marinică I., Vătămanu V.V., 2014 : Considerations on the exceptionally rainy year 2014 in the south-west of Romania. *International Journal of Academic Research in Environment and Geography*, **1**, 2, 8-17.

Russo S., Sillmann J., Fischer E.M., 2015 : Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environmental Research Letters*, **10**, 12, 124003.

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), 2016 : <http://www.wmo.int>.

Décret d'urgence no 99/2000, 2017 : <http://lege5.ro>.

Wetterzentrale, 2016 : <http://www1.wetter3.de/Archiv/>.

PLUIES EXTRÊMES ET RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED EL BEY (CAP-BON, TUNISIE)

MAKHOULFI D.¹, HADDED R.², EL MELKI T.³

¹, ², ³Unité de recherche Géomatique des Géosystèmes UR : 11ES41 ; Faculté des Lettres, des Arts et des Humanités - Université de La Manouba, 2010 La Manouba, Tunis.

¹Makhloufida@hotmail.com ; ²romdhanhaddad@yahoo.fr ; ³lmlkitfik@gmail.com

Résumé : Depuis plusieurs années, le problème des événements pluviométriques extrêmes se pose avec acuité à l'échelle nationale, notamment par les risques qu'ils provoquent dans les zones urbaines. Les fortes pluies présentent un phénomène assez récurrent en Tunisie. Elles provoquent souvent, des inondations dévastatrices. L'étude proposée s'intéresse à un bassin versant fréquemment inondé. Il s'agit du bassin de l'Oued El Bey (sud-ouest du Cap-Bon, à 30 Km de la ville de Tunis). L'objectif est d'étudier, en premier lieu, la répartition spatio-temporelle des pluies à l'aide d'une méthode d'analyse graphique et chronologique de traitement de l'information (MGCTI) de type Matrice Bertin (Nouaceur et al., 2014). En second lieu, l'accent est mis sur les divers facteurs qui interfèrent pour accroître la vulnérabilité du milieu au risque des inondations. Enfin, une carte des zones à risque d'inondations sera proposée.

Mots-Clés : répartition spatio-temporelle des pluies, inondations, carte de risque, Oued El Bey.

Abstract : *Extreme rainfall and flooding risk in the Oued el Bey Watershed (Cap-Bon, Tunisia)*

Since several years, the extreme rainfall events problem has become acute at the national level, particularly by the risks they cause in urban areas. Heavy rain falls are fairly common in Tunisia. It often causes devastating floods. The proposed study focuses on a frequently flooded area: the Oued El Bey watershed (south-west of Cap-Bon, 30 km from Tunis). The objective is to study, firstly, the spatial and temporal distribution of rainfall using a graphical and chronological method of information processing (MGCTI): Bertin Matrix type (Nouaceur et al., 2014). Secondly, the focus is on the various factors that interfere to increase the environment vulnerability to the flooding risk. Finally, a map of the flooding risk areas will be proposed.

Keywords : spatial and temporal rainfall distribution, floods, risk map, Oued El Bey.

Introduction

Le bassin versant d'Oued El Bey (Fig. 1) constitue un des espaces touchés par l'étalement urbain du Grand-Tunis. Il est confronté actuellement à des problèmes environnementaux sérieux. L'extension urbaine s'est faite, entre autres terrains, aux dépens de zones marécageuses inondables. Tels sont les cas de *Sabkhet El Melah* et des rives de l'Oued El Bey (Brahmi, 2017). La situation du Bassin versant de cet oued risque d'empirer dans le contexte des évolutions environnementales qu'il subit et du changement climatique contemporain. L'urbanisation démesurée et souvent anarchique se conjugue à des événements pluviométriques intenses qui semblent augmenter en fréquence d'occurrence dans le Grand-Tunis ces deux dernières décennies.

C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude, qui a pour objectif de caractériser les propriétés de la répartition spatio-temporelle des pluies dans le bassin versant de l'Oued El Bey. Une *Méthode d'analyse Graphique et Chronologique de Traitement de l'Information* (MGCTI) de type Matrice Bertin (Nouaceur et al. 2014) est adoptée. L'attention est portée particulièrement à l'identification des événements pluviométriques extrêmes, sources du risque, et déterminant des dommages parfois graves, afin de réaliser une carte de risque pour la zone d'étude.

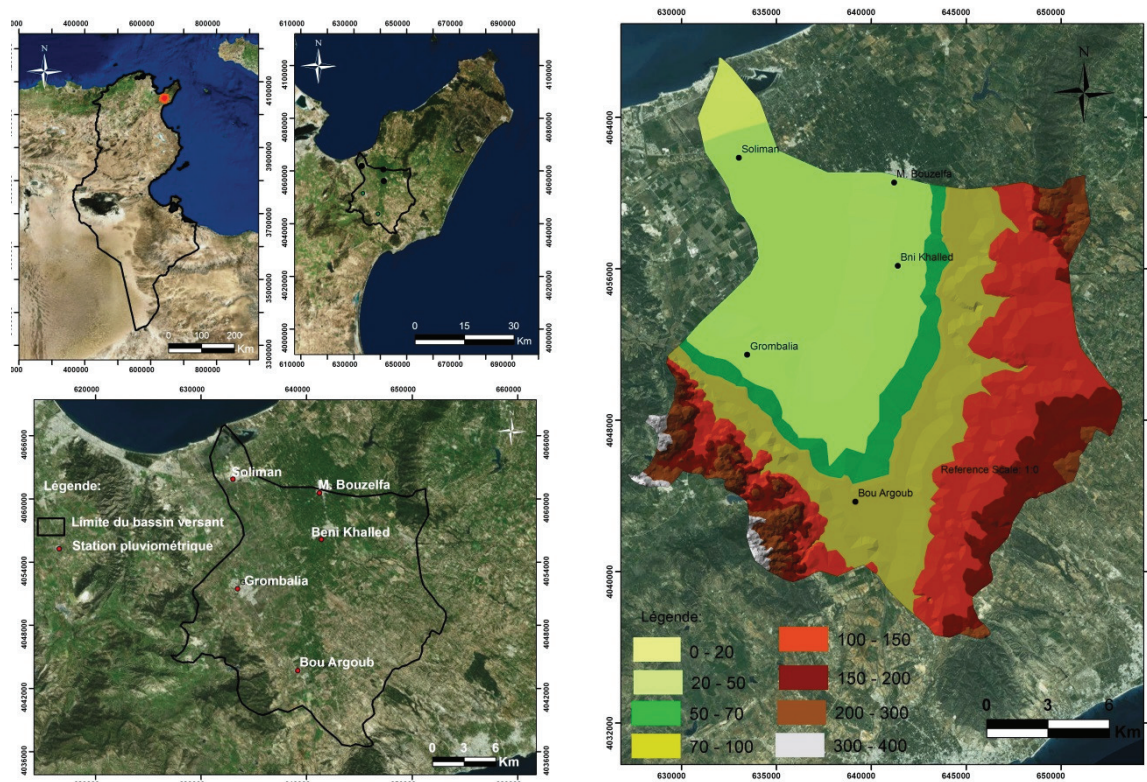


Figure 1. Gauche : Localisation de la zone d'étude et des stations pluviométriques retenues. Droite : Topographie du Bassin versant de l'Oued El Bey.

1. Données de base et Méthodologie

1.1. Données de base

La base de données pluviométriques utilisée est constituée des relevés journaliers des stations citées ci-après : *Soliman*, *Menzel Bouzelfa*, *Beni Khalled*, et *Grombalia*, toutes situées dans le bassin versant de l'Oued El Bey. Elle couvre la période 1970-2011. Ces données sont gracieusement fournies par la Direction Générale des Ressources en Eaux (DGRE) de Tunisie. Les séries chronologiques des moyennes annuelles calculées ne comportent pas de ruptures (test de Pettitt, à tous les seuils : 99%, 95% et 90%) pour les quatre stations et aucune tendance significative (± 1.92) n'est observée (test de Mann-Kendall) pour toutes les stations. Le Tau de Mann-Kendall (au seuil 95%) est de : -0.33 à *Grombalia*, de : $+0.79$ à *Beni Khalled*, de : $+0.68$ à *Menzel Bouzelfa* et de : $+1.59$ à *Soliman*. Ce dernier constat prouve que le risque des inondations dans la zone étudiée ne peut être lié qu'à deux causes possibles. La première de type naturel, peut être une évolution de la répartition intra-annuelle des pluies favorisant la recrudescence des épisodes de pluies extrêmes ; la démarche proposée dans cette étude permet, entre autres, de présenter des éléments de réponse à cette question. La seconde de nature socio-économique, revient à l'incapacité matérielle des catégories sociales démunies, qui oblige l'Homme à s'exposer au risque d'inondation.

Maintes ressources cartographiques et imageries sont utilisées aussi : des cartes topographiques au 1/2500, des cartes géologiques, une image LANDSAT 8 de 30m de résolution prise le 06/01/2015, des images « Google Earth » et des données d'archives variées (photos, valeurs des dégâts). Une prospection de terrain a été effectuée à Soliman le 8/12/2016.

1.2. Méthodologie

La démarche suivie dans cette étude repose sur différentes approches :

Une approche statistique : basée sur une MGCTI de type Matrice Bertin. C'est une méthode qui conjugue à la fois une méthode statistique basée sur les rapports des données annuelles aux quintiles de la série et sur la visualisation de ces rapports à l'aide d'une gamme de couleurs afin de caractériser l'évolution temporelle des données (Fig. 2) à partir de l'indice centré réduit (Nouaceur Z. et al. 2013).

Une approche cartographique : Consiste à modéliser une carte de risque d'inondations pour le bassin versant d'Oued El Bey. Cette modélisation nécessite l'intégration de plusieurs cartes thématiques dans un système d'information géographique (SIG). La carte obtenue du risque est en fait la combinaison des cartes de l'aléa et de la vulnérabilité :

$$\text{Risque} = \text{Aléa} * \text{Vulnérabilité}$$

La carte d'aléa : combine cinq variables environnementales à la fois (altitude, pente, lithologie, hydrologie, pluviométrie). Les deux premières variables sont issues d'un modèle numérique de terrain (MNT). La carte lithologique est dérivée de la vectorisation de la carte géologique au 1/50000. La carte hydrologique est le résultat de la vectorisation du réseau hydrographique à partir de la carte topographique au 1/25000.

La carte de vulnérabilité : est le résultat d'une classification supervisée d'une carte d'occupation du sol issue de l'image satellitaire LANDSAT, suite à une classification supervisée.

La combinaison de ces données nécessite l'attribution d'indices de classification pour chaque variable. Ces indices permettent de caractériser le poids de chaque classe d'une variable donnée du modèle dans la détermination du risque d'inondation.

2. Résultats

2.1. L'évolution pluviométrique

L'évolution pluviométrique illustrée dans la matrice MGCTI (Fig. 2) reflète trois périodes bien déterminées :

1970 – 1986 : c'est une période qui a un aspect normal à caractère plutôt humide : car elle compte 41% d'années humides et très humides et 20.6% d'années d'humidité moyenne/normale, contre 38% d'années sèches et très sèches.

1987 – 2002 : cette période est sèche par excellence : 50.7% des années sont sèches, contre 28% pour les années humides et 20.6% pour les années normales.

2003 – 2011 : c'est une période plutôt humide : avec 61% d'années humides et très humides, contre 19.4% pour les années sèches et normales. Il est à noter que seule l'année 2008 est marquée par une sécheresse intense.

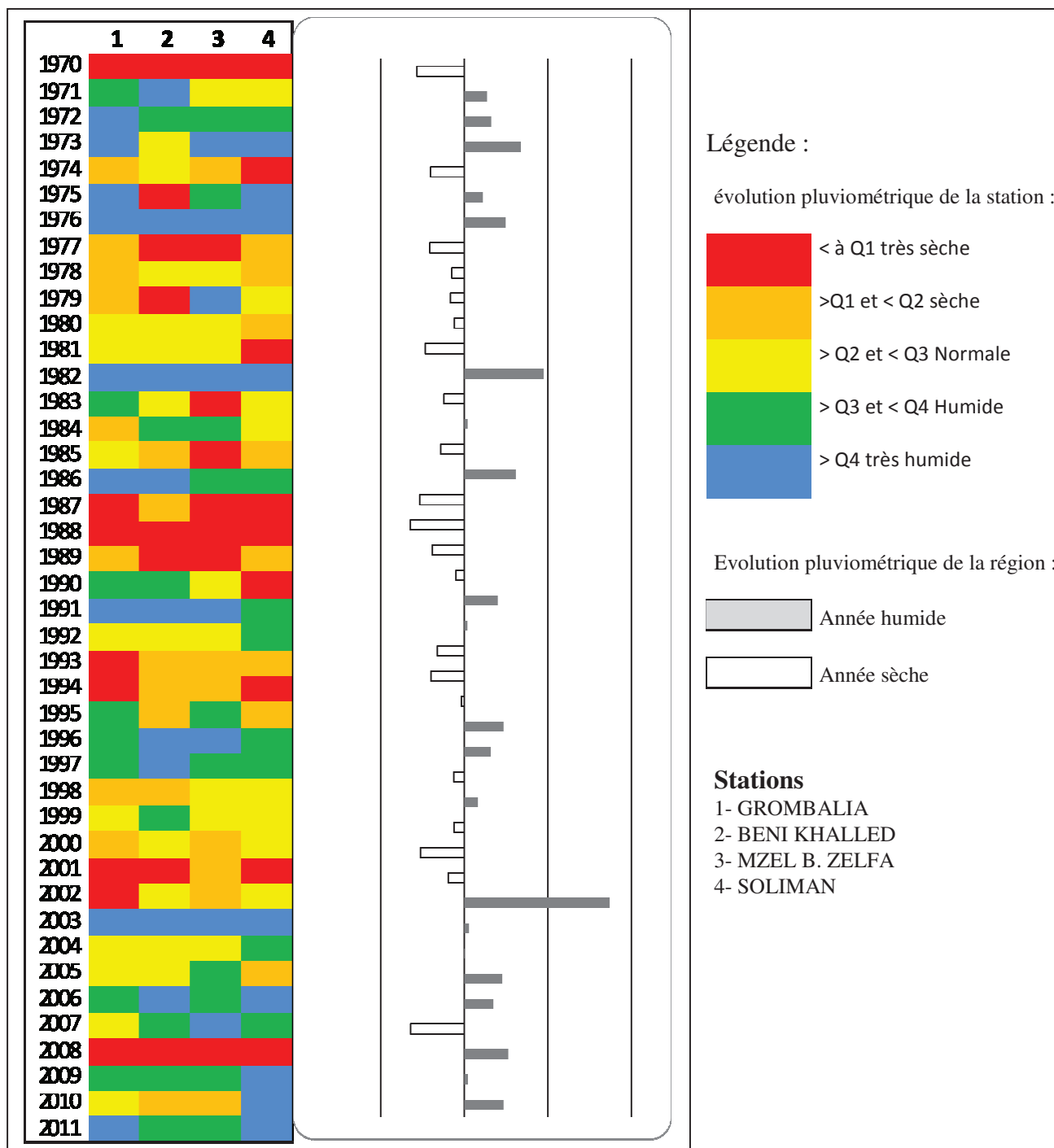


Figure 2. Matrice appliquée aux précipitations annuelles

Le retour vers l'humidité caractérisant cette dernière période est accompagné par la recrudescence des événements pluviométriques intenses. Ceux des années 2003, 2007, 2009, 2011 et 2012 sont mémorables, d'où le grand intérêt d'une étude du risque d'inondations dans la région étudiée, surtout qu'elle a été épargnée depuis les années 1980 jusqu'au début des années 2000. S'agit-il d'un cycle « normal » induit par la variabilité naturelle du climat, ou d'une nouvelle tendance ? Les prochaines années permettront d'y répondre.

Le bassin versant de l'Oued El Bey a été couramment soumis au cours de la dernière décennie à des événements pluviométriques intenses de nature à mettre à l'épreuve tous les types d'infrastructures dans la région ; ce qui trahit leur fragilité. Une cartographie des zones susceptibles d'être inondées permettra d'identifier les secteurs les plus vulnérables.

Tendance pluviométrique à la station :

- < à Q1 très sèche
- >Q1 et < Q2 sèche
- > Q2 et < Q3 Normale
- > Q3 et < Q4 Humide

2.2. Cartographie des zones soumises au risque d'inondation

La carte du risque d'inondation pour le bassin versant de l'Oued El Bey est le résultat de la « multiplication » des cartes de l'aléa et de la vulnérabilité. La carte de l'aléa (fig. 3) combine les paramètres indiqués dessus. Elle montre que l'effet de l'aléa est élevé aux alentours de l'Oued El Bey et qu'il diminue vers les périphéries du bassin versant, fait tout à fait normal quand les altitudes augmentent (Fig. 1, droite).

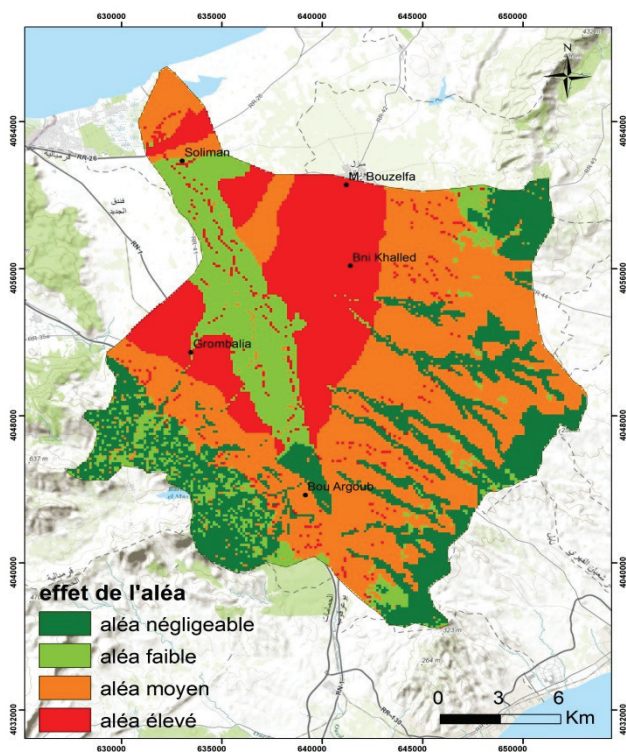


Figure 3. Carte de l'aléa

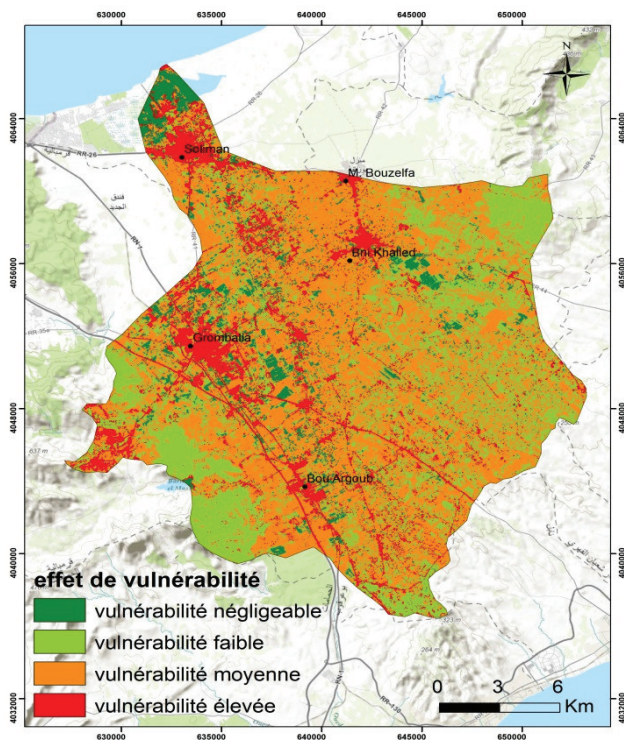


Figure 4. Carte de la vulnérabilité

La carte de la vulnérabilité (fig. 4) est le résultat de la classification des composantes de l'occupation du sol. Elle est marquée par la présence des zones urbaines sur des terrains à faible altitude ne dépassant pas les 50m pour les villes de *Soliman*, *Grombalia*, *Béni Khalled* et *Menzel Bouzefa*. La ville de *Bou Argoub* à presque 150m d'altitude paraît épargnée. La zone la plus densément peuplée, se développant sur des altitudes faibles et une pente ne dépassant pas 2°, constitue la zone la plus vulnérable (fig. 5). C'est le cas en premier lieu du delta de l'Oued El Bey (ville de *Soliman*) et de son arrière pays agricole. Au total, 6% du bassin versant de l'oued sont à risque élevé (2511 hectares) et 48% sont à risque moyen ce qui représente 21508 hectares.



Photo2. Sebkha de Soliman 8/12/2016



Photo3. Centre de Formation Soliman 8/12/2016



Photo 1. Soliman (Lot. Ben Gamra) 8/2/2017



Photo4. Hôpital Soliman 8/12/2016



Photo6. Plaine Grombalia 21/1/2017

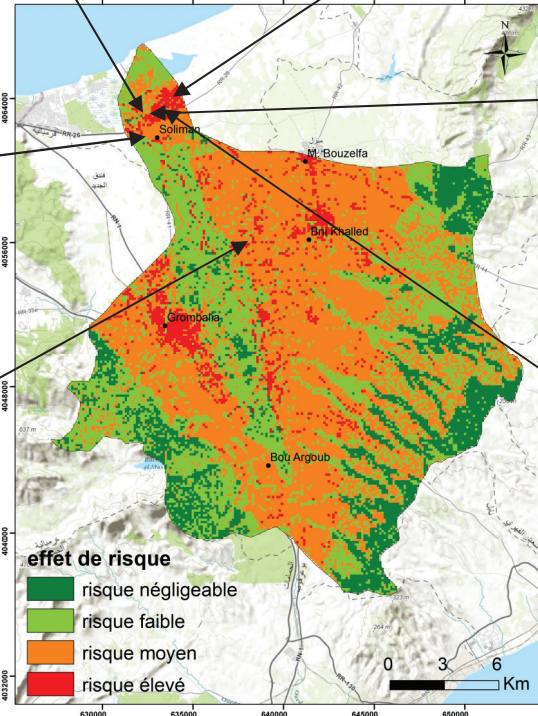


Photo5. Sortie Soliman vers korbous

Clichés Makhloufi Dalel

Figure 5. Carte de risque

Conclusion

L'étude de la variation temporelle des pluies annuelles montre bien un retour à une période humide ces dernières années. Les événements de pluies intenses indiqués dessus laissent prévoir une recrudescence du risque d'inondation. Ces caractères de la pluviométrie accentuent la vulnérabilité du bassin versant de l'Oued El Bey aux inondations.

L'identification, par la cartographie du risque, des zones les plus vulnérables peut servir, à l'échelle locale, pour une meilleure gestion du territoire. Il va sans dire que les résultats de cette étude peuvent être affinés en intégrant dans le modèle des données pluviométriques à des échelles temporaires plus fines comme les intensités des averses.

Bibliographie

Brahmi N., 2017: *Pressions anthropiques et risques liés à l'environnement: cas des lagunes côtières du Cap Bon approche cartographique*. Thèse de doctorat en Sciences Géographiques, Université de Sfax, 367 p.

Laignel B., Nouaceur Z., Jemai H., Abida H., Ellouze M., Turki I., 2014 : Vers un retour des pluies dans le nord-est tunisien ? *Actes du XXVII^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie (Dijon)*, 727-732.

Nouaceur Z., Laignel B., Turki I., 2014 : Changement climatique en Afrique du Nord : vers des conditions plus chaudes et plus humides dans le Moyen Atlas marocain et ses marges. *Actes du XXVII^{ème} colloque de l'Association International de Climatologie (Dijon)*, 387- 393.

Nouaceur Z., Laignel B., Turki I., 2013: Changements climatiques au Maghreb : vers des conditions plus humides et plus chaudes sur le littoral algérien ?, *Physio-Géo*, Volume 7, <http://physio-geo.revues.org/3686> ; DOI : 10.4000/physio-geo.3686

LE CLIMAT ET L'*Aedes aegypti* DANS LE SUD DU BRÉSIL

OLIVEIRA MARCIA M. F.¹, MENDONÇA F.², LARA MARIA A. M.³, BOBATO P.⁴, BANDEIRA, V. F.⁵

^{1,3,4,5}UNINTER – Centro Universitário Internacional (marcia.o@uninter.com)

² Universidade Federal do Paraná / LABOCLIMA (chico@ufpr.br)

Résumé : Cette étude analyse la relation entre les conditions climatiques et le vecteur de la dengue sur les sites de reproduction *Aedes aegypti* dans l'État de Rio Grande do Sul (Brésil), entre 2010 et 2015. La méthodologie utilisée dans cette recherche est fondée sur l'approche systémique du climat et fait usage des données officielles relatives aux conditions climatiques de reproduction et de diffusion de *Aedes aegypti*. Les résultats indiquent que les communes infestées par *Aedes aegypti* sont situées dans la partie nord-ouest de l'Etat, coïncidant avec des sites de température les plus élevées du climat Cfa qui sont plus favorables au développement du moustique.

Mots-clés : climat, dengue, sud du Brésil.

Abstract : *Climate and AedesAegypti in the southern Brazil.* This study analyzes the relationship between climate conditions and the dengue vector *AedesAegypti* breeding sites in the state of Rio Grande do Sul (Brazil), between 2010 and 2015. The methodology used in this research is founded on the systemic climate approach and makes use of official data related to both climate conditions of reproduction and breeding areas of *AedesAegypti*. The results indicate that the municipalities infested with *AedesAegypti* are located in the northwestern portion of the state, coinciding with higher temperature sites (ClimateCfa) – favorable to the development of the mosquito.

Key-words : climate, dengue, South of Brazil.

1. Introduction

La dengue est une maladie virale transmise par un moustique (*Aedes aegypti*), qui touche plus de 100 millions de personnes dans le monde chaque année (WHO, 2016). Le Brésil enregistre, depuis les années 1980, des épidémies de plus en plus intenses. En 2015, environ 1,5 millions de personnes ont été touchées par cette maladie. Du fait de l'absence de contrôle clinique, ni de prévention dans le domaine de la médecine, le contrôle de la maladie se fait surtout par la lutte contre les vecteurs dont leur prolifération et leur capacité à transmettre la dengue dépendent directement des conditions climatiques (WHO, 2012; MENDONÇA *et al.*, 2010).

La dengue se produit et se propage surtout dans les pays tropicaux et subtropicaux où les conditions environnementales favorisent le développement et la prolifération de l'*Aedes aegypti* (WHO, 2012). Au cours des 50 dernières années, l'incidence a augmenté 30 fois avec l'augmentation de l'expansion géographique dans des nouveaux pays et dans la présente décennie dans les petites villes et les zones rurales. On estime que 50 millions de cas de dengue surviennent chaque année et qu'environ 2,5 milliards de personnes vivent dans des pays où la dengue est endémique.

Le Brésil est un pays de dimensions continentales, ayant la tropicalité comme une de ses principales caractéristiques. Selon Mendonça et Danni Oliveira (2007), bien que se situant presque complètement dans la zone intertropicale de la planète, le territoire brésilien présente une grande variété de types climatiques, qui se reflète dans la formation d'une mosaïque riche et diversifiée de paysages naturels en majorité favorables à l'incidence de la dengue.

Cette étude cherche à mettre en évidence une relation spatiale entre la distribution des foyers de l'*Aedes aegypti* et les conditions climatiques dans l'État de Rio Grande do Sul, dans la période entre 2010 et 2015.

2. Méthodes et techniques de la recherche

La méthodologie utilisée dans cette recherche est basée sur une approche systémique du climat et utilise les données des foyers du moustique *Aedes aegypti* et la typologie du climat du Rio Grande do Sul.

Les données climatiques proviennent de sources diverses telles que l'Institut National de Météorologie, de l'Université Fédérale de Santa Maria et de Rossato (2011). Les références ont permis de caractériser en termes généraux les climats de l'État et de mettre en évidence son aspect de saisonnalité important qui influe fortement sur l'incidence de la dengue et d'autres maladies transmises par le même vecteur, telles que le chikungunya et le virus Zika.

Les données des foyers de l'*Aedes aegypti* dans les villes du Rio Grande do Sul ont été fournies par le Département d'État de la Santé et traitées sous forme cartographique.

Les données ont permis de caractériser la distribution spatiale des foyers du moustique *Aedes aegypti* dans les villes de Rio Grande do Sul et les confronter à la typologie climatique.

3. Résultats

3.1. Climats du Rio Grande do Sul

Cette zone d'étude est située dans la partie sud du Brésil, couverte par le climat subtropical (Figure 1). Selon Vanhoni (2015), ce type de climat prévaut au sud du Tropique du Capricorne. Il se caractérise par des températures moyennes inférieures à 18°C et la gamme de températures minimales entre 9°C et 13°C. Dans les zones plus élevées, l'été est doux et l'hiver est froid, avec des enregistrements de blizzards occasionnels. Il pleut entre 1.400 mm et 2.000 mm/an, bien répartis tout au long des saisons. Il est impossible d'identifier une saison sèche.

Deux éléments climatiques ont une influence directe sur le développement du moustique *Aedes aegypti* : la température et les précipitations. Deux autres éléments, l'humidité de l'air et la vitesse du vent influent également sur l'écologie des vecteurs, mais avec moins d'importance.

Selon la classification de Köppen, le Rio Grande do Sul correspond à la zone tempérée type "C" et le domaine "Cf" ou tempéré humide. Dans l'État ce "Cf" est divisé en deux variétés spécifiques «Cfa» et «Cfb» (Mendonça et Danni-Oliveira, 2007 ; Rossato, 2011). Le type "Cfa" est caractérisé par la présence des précipitations au cours de tous les mois de l'année et le mois le plus chaud avec une température supérieure à 22°C et le mois le plus froid supérieur à -3°C ; la variété "Cfb" dispose également des précipitations au cours de tous les mois de l'année et la température du mois le plus chaud est au dessous de 22°C et la température du mois le plus froid est supérieure à -3°C. L'état est ainsi divisé en deux régions climatiques, «Cfa» et «Cfb : le type "b" est limité au plateau basaltique supérieur et le bouclier Sud Riograndense, tandis que les zones restantes appartiennent au type "a".

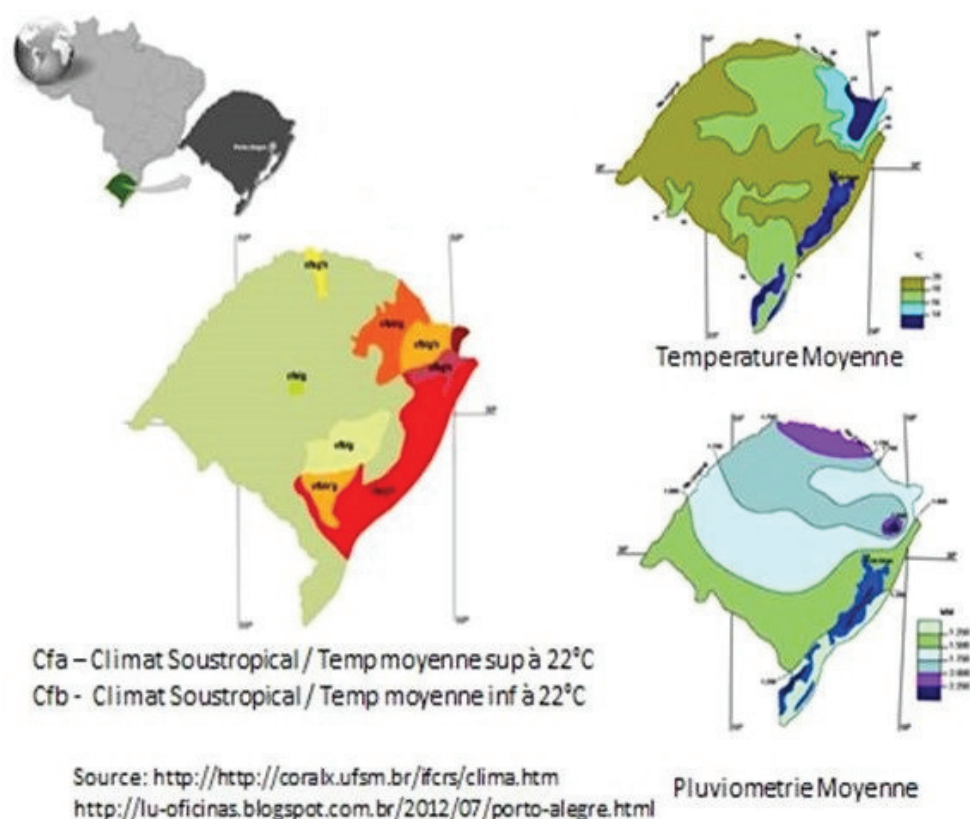


Figure 1. Les climats du Rio Grande do Sul – Brésil

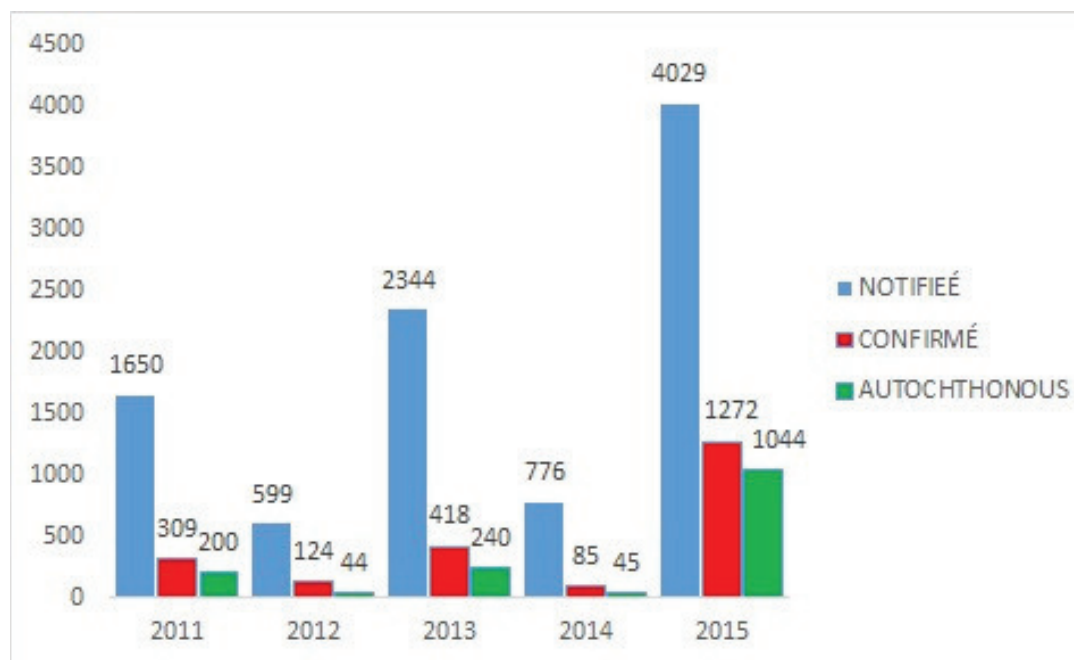
Selon Rossato (2011) le régime climatique de la région est dominé par les interactions entre les systèmes polaires et les systèmes tropicaux. Cependant, c'est cette interaction en relation avec les facteurs géographiques locaux et régionaux qui définissent la variabilité spatiale des éléments climatiques tels que la température et la pluviosité. La genèse de précipitations est principalement associée à des systèmes frontaux.

La Saisonnalité est un facteur décisif pour la prolifération des moustiques. Selon le ministère de la Santé (2016) avec l'arrivée du printemps et le début de la saison des pluies dans la plupart du pays, les sites potentiels pour la création du moustique *Aedes aegypti* se multiplient [...] non seulement la pluie, mais aussi la température commence à augmenter. *Aedes aegypti* est sensible à ces deux choses : la pluie, qui est à la base de la reproduction du moustique, et lorsque la température augmente, la vitesse de son développement s'accélère.

3.2. Les foyers de l'*Aedes aegypti* dans le Rio Grande do Sul

Selon le ministère de la Santé (2016), dans une analyse de l'incidence (nombre de cas pour 100.000 habitants), les cas de dengue par région montrent une croissance en 2015 dans toutes les régions du pays.

La figure 2 montre l'élévation du nombre des cas de dengue dans l'Etat de Rio Grande do Sul entre 2011 et 2015, notamment les cas notifiés. L'augmentation de cas confirmés de la maladie, et aussi des cas autochtones, confirme l'expansion de la dengue dans cette partie sud du Brésil qui était, jusqu'à quelques années, hors le risque de transmission de dengue.



Figurr 2. Comparaison des cas de dengue de 2011 à 2015 dans le Rio Grande do Sul

Source:http://www.saude.rs.gov.br/upload/1451483674_informativo%20epidemiol%C3%B3gico%20dengue%2030%20de%20dezembro.pdf

Tableau 1. Les municipalités infestées par *Aedes aegypti* au Rio Grande do Sul. Brésil

Nombre de municipalités infestées par <i>Aedes aegypti</i> (annuelle) dans l'état de Rio Grande do Sul. Brésil	
2010	65
2011	75
2012	79
2013	116
2013	132
2014	173
2015	212

Les données des municipalités avec une infestation de foyers d'*Aedes aegypti* de l'État de Rio Grande do Sul, révèlent l'expansion spatiale considérable des moustiques dans la période analysée, comme le confirme le tableau 1. Les municipalités infestées par l'*Aedes aegypti*, se trouvent, surtout, dans la partie nord-ouest de l'État, ainsi que dans la partie orientale, avec une augmentation continue de 2010 (65 municipalités infectées) à 2014 (173 municipalités infectées) pour culminer en 2015 avec 212 municipalités infestées, encore principalement dans la région du nord-ouest de l'État, mais aussi dans d'autres régions à l'ouest de l'État.

La dynamique spatiale révèle donc une expansion qui se produit notamment de la partie ouest et nord-ouest à la partie centrale et à l'Est de l'Etat (figure 3) ; elle se déplace, de toute

évidence, de la partie de climat plus chaud et continental (type Cfa) à la partie moins chaude et plus océanique (climat Cfb).

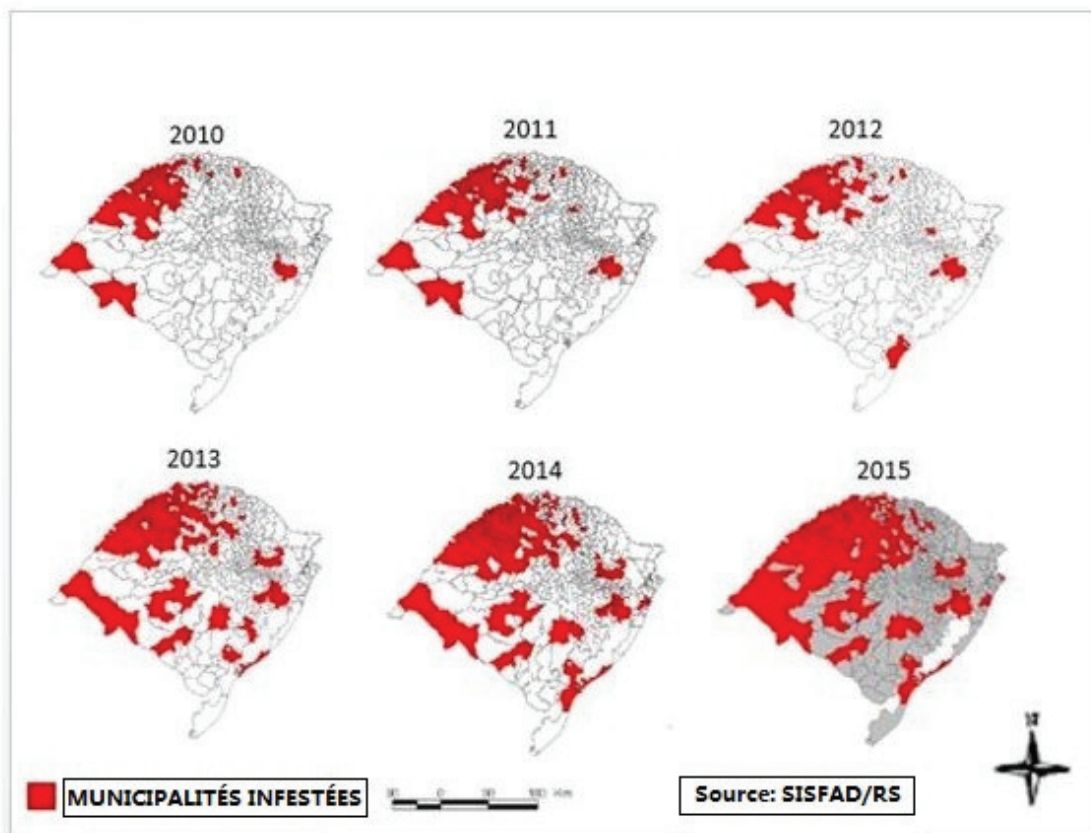


Fig. 3. Municipalités Infestées par l'*Aedes aegypti* dans l'état de Rio Grande do Sul (2010-2015) au Brésil

La mairie de la ville de Porto Alegre, capitale du Rio Grande do Sul, effectue la surveillance du moustique *Aedes aegypti* en utilisant le taux moyen d'infestation des femelles adultes (IMFA). Le IMFA est obtenu à partir de la surveillance hebdomadaire dans 935 pièges pour attraper les moustiques adultes dans 31 quartiers de la ville considérés comme vulnérables à la fièvre de la dengue où une histoire de cas confirmés de dengue, zika et le chikungunya. Le niveau critique est atteint lorsque la marque devient plus de 0,90, généralement uniquement à la fin de l'été. En janvier 2017, l'indice dans la ville a atteint un état critique dès la semaine du 15-21 janvier avec un indice de 1,00. Enfin, il faut souligner le fait que dans cet État, selon les données du ministère de la Santé, au milieu des années 2000 la plupart des cas diagnostiqués étaient des cas importés, les patients étant piqués par des moustiques dans d'autres Etats (MENDONÇA et al, 2010). Actuellement, la situation est différente, au-delà des cas importés, le nombre de cas autochtones augmente également. Ainsi, selon le Département de Santé de l'État de Rio Grande do Sul (SES/RS, 2017), le Centre d'État de Veille Sanitaire (CEV/RS) a enregistré jusqu'à la semaine épidémiologique (SE) 52, (du 25/12/16 au 31/12/16) 8.140 cas suspects de dengue, dont 2.437 ont été confirmés : parmi ces derniers, 2.159 (89%) sont considérés comme autochtones (maladie contractée dans l'Etat du RS), 183 (8%) importés (transmission en dehors de l'État) et 95 (4%) attendent une définition du probable site d'infection.

4. Conclusion

Cette étude a mis en évidence une approche introductive concernant le rapport entre le climat et la dengue dans le contexte brésilien dans une région du sud du Brésil, dominée par le

climat du type Cfa (Subtropical) qui était jusqu'à récemment pas touchée par cette maladie. L'étude porte sur la relation entre le climat et l'*Aedes aegypti*, le principal vecteur de la dengue au Brésil. La période de 5 années analysées montre une augmentation de l'infestation du moustique dans les municipalités, notamment les années 2014 et 2015, les plus chaudes et humides des dernières décennies. Les municipalités situées plus au nord-ouest et à l'ouest de l'Etat de Rio Grande do Sul sont celles qui ont été les plus touchées par la maladie, et sont aussi celles où ont enregistré les températures les plus élevées du climat Cfa. La dengue est un grave problème de santé publique au Brésil. Par conséquent, il existe un besoin urgent pour la mobilisation communautaire par tous les médias qui nécessite un processus continu d'éducation à la santé. Soulignons également que le vecteur *Aedes aegypti* est de plus en plus menaçant car il existe d'autres maladies détectées émanant de ce même moustique.

Bibliographie

Brasil - Ministerio da Saude 2016 : <http://www.brasil.gov.br/saude/2016/09/periodo-chuvoso-aumentou-criadouros-de-aedes-aegypti>.

Mendonça F.A., Danni-Oliveira I. M. 2007 : *Climatologia: Noções básicas e clima do Brasil*. Ed. Contexto. 206 p.

Mendonça F.A., Roseghini W. F. F., Aquino JR, J.2010 : Changements climatiques et expansion de la dengue dans le sud du Brésil. *Actes du XXIII Colloque Internationale de Climatologie - AIC, 2010, Rennes, vol. 1*. 403-408.

Rossato M. S. 2011 : *Os climas do Rio Grande do Sul: Variabilidade, tendências e tipologia*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 253 p.

SES-RS - Secretaria Estadual de Saúde do Rio Grande do Sul. 2017 : http://www.saude.rs.gov.br/upload/1485536768_1483643891_SE%2052%20informativo%20epidemiol%C3%B3gico%20dengue%20-%2030.12.2016.pdf. Acessado dia 25-02-2017 as 14:00.

Vanhoni F., 2015 : *A dinâmica pluvial do clima subtropical: variabilidade e tendência no Sul do Brasil*. Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba/PR, 166p.

WHO – World Health Organisation. 2012 : *Neglected tropical diseases*.

http://www.who.int/neglected_diseases/diseases/en/. Accédé le 23/02/2017.

WHO – World Health Organisation, 2016 : <http://www.who.int/immunization/diseases/dengue/en/>.

CLIMATOLOGIE DES TEMPÊTES SUR LES ZONES CÔTIÈRES ALGÉRIENNES : APPROCHE PAR INTÉGRATION D'ÉCHELLES SPATIO-TEMPORELLES

NACEF L.¹, BACHARI N.E.I.¹, MENNAD M.¹

¹ Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene (USTHB), LOBEM/EEM/FSB, El-Alia, BP : 32, Bab-Ezzouar, 16111, Alger, Algérie. nacef_l@yahoo.fr ; bachari10@yahoo.fr ; m-mennad@gmail.com

Résumé : Sur le littoral algérien, les tempêtes qui provoquent des pics du niveau marin sont responsables des inondations et des submersions des zones côtières et peuvent avoir des conséquences désastreuses sur ces zones. Ces tempêtes sont caractérisées par des vents forts et se développent lorsqu'une dépression synoptique transite autour du Golfe de Gascogne. Les conditions atmosphériques associées à ces événements sont isolées à l'échelle du littoral algérien, à l'échelle synoptique et à l'échelle de l'Oscillation Nord Atlantique et celle de l'Oscillation Arctique. Cette circulation atmosphérique est associée aux phases positives de ces deux oscillations. Dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle, la fréquence des vents forts, venant de la mer, est augmentée significativement. Des changements dans les conditions moyennes de ces modes ont progressivement modifié la circulation atmosphérique à l'échelle synoptique et augmenté le risque des vents forts à l'échelle du littoral algérien.

Mots-clés : Littoral algérien, Vents forts, Variabilité climatique, Echelles spatio-temporelles.

Abstract : *Storms climatology on Algerian coastal zones: a spatio-temporal scales interaction approach.*

In the Algerian coastline, storms that cause sea level peaks are responsible of flooding and submersions of coastal areas and can have disastrous consequences on those areas. Atmospheric conditions associated with these events are isolated at Algerian coastline scale, at synoptic scale and at scale of the North Atlantic Oscillation and that of the Arctic. At local and synoptic scales storms are the impacts of relatively strong and persistent north-western winds that develops when a synoptic depression passes around the Bay of Biscay. Winds frequency is associated with positive phases of the two climate variability modes. During the second half of the 20th century, the northwesterly winds frequency is significantly increases throughout the Algerian coast. Changes in average conditions of climate variability modes have progressively altered synoptic atmospheric circulation and increased the risk of strong winds throughout the Algerian coastline.

Keywords : Algerian coastline, Strong winds, Climate variability, Spatio-temporal scales.

Introduction

Les côtes algériennes s'étendent sur environ 1200 kilomètres et ouvertes au nord et nord-nord-ouest sur la mer Méditerranée. Les tempêtes côtières, les vents forts et les importantes surcotes marines qui les accompagnent constituent une menace grave pour la vie et les activités socio-économiques de la société algérienne, en particulier le cas des ports commerciaux et pétroliers et celui des zones écologiques protégées naturellement. En effet, ces zones fragiles sont particulièrement soumises aux caprices de la mer et notamment aux tempêtes qui entraînent inondations, érosions et submersions des zones littorales. La plupart de ces événements extrêmes se produisent lors du passage d'une forte dépression. Cette dernière est responsable de l'apparition de vents très forts à violents qui poussent la masse d'eau vers les côtes et entraîne la formation des pics du niveau marin extrêmes (Pirazzoli *et al.*, 2006 ; Ullmann et Pirazzoli, 2007).

Le littoral algérien est soumis aux climats méditerranéen et subtropicale qui ne sont pas exempts de phénomènes violents. Bien qu'il ne se situe pas sous les principales trajectoires des perturbations (Rogers, 1997), de fortes dépressions peuvent néanmoins y transiter. En plus, l'appartenance du littoral algérien au bassin méditerranéen fait que différents modes de variabilité atmosphérique régissent son climat (Cassou, 2004 ; Trigo *et al.*, 2006) : des conditions météorologiques locales et instantanées jusqu'aux lentes oscillations climatiques agissant à de très vastes échelles spatiales.

Face aux risques associés à ces phénomènes, l'accès en temps opportun à des informations précises à des échelles de temps allant de quelques heures à plusieurs années est important. Partant du constat que le climat est un système multi-scalaire dynamique, l'objectif de cette étude est d'analyser comment les tempêtes dans les zones côtières, qui sont des événements ponctuels et localisés, sont intégrées à ces conditions atmosphériques agissant à différentes échelles spatio-temporelles. De comprendre comment la variabilité des indices climatiques a pu avoir un impact sur les tempêtes à l'échelle du littoral algérien. La finalité de ce travail est la compréhension des évolutions du régime de tempête lors des dernières décennies qui permettra aux gestionnaires du littoral de mieux se préparer aux événements futurs et de prendre en compte les tendances d'évolution des tempêtes dans leurs stratégies de mitigation et d'adaptation. Un effort d'amélioration des connaissances pour bien appréhender les relations entre les mécanismes déclencheurs ou/et amplificateurs et le phénomène naturel étudié, notamment leur intensité et leur fréquence afin d'améliorer la capacité prédictive des modèles actuels. Enfin, de fournir des informations utiles pour minimiser les risques à ces phénomènes et éviter des catastrophes, surtout, comme il est probable, si leurs caractéristiques se trouvent amplifiées dans l'avenir.

1. Méthode d'approche

Les conditions des tempêtes sont isolées à différentes échelles spatio-temporelles :

- A l'échelle locale, avec l'analyse des données de vent tri-horaire (direction et vitesse) de 13 stations météorologiques côtières de l'Office National de la Météorologie (figure 1) qui ont plus de 18 années d'enregistrement sans données manquantes et de bonne qualité.

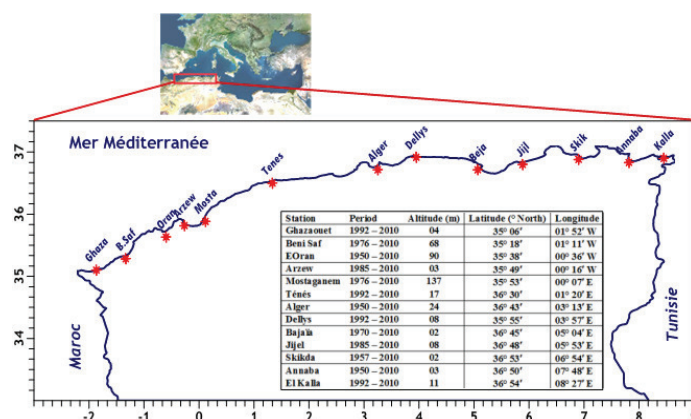


Figure 1. Zone d'étude et stations météorologiques retenues

- A l'échelle synoptique qui correspond essentiellement à l'activité des perturbations tempérées dont la surface d'influence couvre environ 1 million de km² et dont la durée de vie est généralement comprise entre 2 à 6 jours. L'analyse des données quotidiennes de pression atmosphérique de surface, sur la période de 1948 à 2010. Ces données sont issues des ré-analyses *20th Century V2*, avec une résolution spatiale de 2° de longitude et de 2° de latitude et couvrent l'ensemble du globe.
- A l'échelle globale, avec l'analyse des indices mensuels de l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) ainsi que ceux de l'Oscillation Arctique (OA). Le calcul des indices NAO et OA est basé sur l'analyse en composantes principales avec rotation Varimax (RPCA avec maximum de variance) (Barnston et Livezey, 1987 ; Hurrell et Deser, 2010). Cette procédure isole le champ de téléconnexion dominant et permet de construire des séries chronologiques. La technique RPCA est appliquée aux anomalies mensuelles standardisées des pressions au niveau de la mer, sur la région délimitée par : [35 °N et 65 °N] et [80 °W et 30 °E] pour le

NAO et la ceinture hémisphérique au nord de 20 °N pour l'OA, entre janvier 1948 et décembre 2011. Les anomalies sont normalisées sur la période de référence 1950-2000.

2. Résultats

2.1. Tempêtes dans les zones côtières algériennes : conditions atmosphériques moyennes

A l'échelle locale, les tempêtes capables d'engendrer des pics du niveau marin au niveau du littoral sont celles associées aux vents de mer de secteur nord-ouest à nord-est (280°-80°) dont la vitesse dépasse 5 m/s (figure 2). Parce que, durant un épisode tempétueux, la persistance (48 heures et plus) d'un vent avec une force ≥ 5 m/s (modéré à fort), soufflant de ce secteur de façon synchrone sur l'ensemble du littoral algérien, est capable d'accumuler et de pousser la masse d'eau vers les côtes algériennes. Le fait que les tempêtes soient d'échelle régionale témoigne d'un mode de variabilité atmosphérique agissant à une plus vaste échelle spatiale que le littoral algérien.

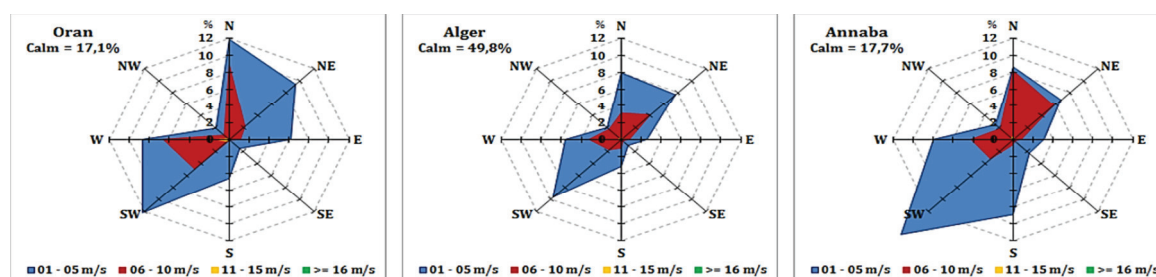


Figure 2. Distribution fréquentielle du vent en 5 classes de vitesses et 16 directions.

A l'échelle synoptique, la figure 3 présente la géographie barométrique moyenne des jours où le vent souffle du secteur nord-ouest à nord-est avec des vitesses 5 m/s, de façon synchrone sur les stations côtières de 1950 à 2010. Les résultats sont ici présentés du jour J-5 au jour J pour analyser l'évolution de la situation synoptique lors de la formation de telles tempêtes. A partir de 5 jours avant le jour J, une dépression se forme sur l'Atlantique Nord au niveau de l'Islande (figure 3). Elle suit ensuite une trajectoire méridionale jusqu'à stagner et se renforcer autour du Golfe de Gascogne où elle atteint le minimum d'environ 1000 hPa, le jour J. Le vent tournant dans le sens antihoraire autour d'une dépression, l'ensemble du littoral algérien se trouve alors sous des vents de nord-ouest dont la vitesse dépasse 5 m/s.

Les conditions atmosphériques des tempêtes sont enfin isolées à l'échelle du NAO et de l'OA. Très nettement, plus les indices NAO et/ou OA mensuels moyens sont proches de +1, plus la fréquence mensuelle des vents du secteur nord-ouest à nord-est est importante dans le littoral algérien (figure 4) ainsi que la fréquence mensuelle des jours où une dépression, transite autour du Golfe de Gascogne. La formation des vents forts, du secteur nord-ouest à nord-est, dans le littoral algérien est donc associée aux phases positives du NAO et de l'OA, surtout à celles de l'OA. En d'autres termes, les conditions atmosphériques à l'échelle du NAO et de l'OA interagissent avec la circulation atmosphérique à l'échelle synoptique et ont finalement un impact sur les conditions de vent dans le littoral algérien.

2.2. Tempêtes/Oscillations Nord-Atlantique et Arctique : variabilité au 20^{ème} siècle

Dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle, la fréquence annuelle des vents du secteur nord-ouest à nord-est dont la vitesse dépasse 5 m/s montre une augmentation significative aux stations météorologiques du littoral algérien occidental et central (Oran et Alger). L'inverse est observé au littoral oriental (Annaba), particulièrement à partir de la moitié des années 70 (figure 5a). Cette augmentation est suivie d'une diminution significative à partir du début du

21^{ème} siècle. L'augmentation s'accompagne logiquement d'une intensification et d'une multiplication des pics du niveau marin extrême dans le littoral algérien.

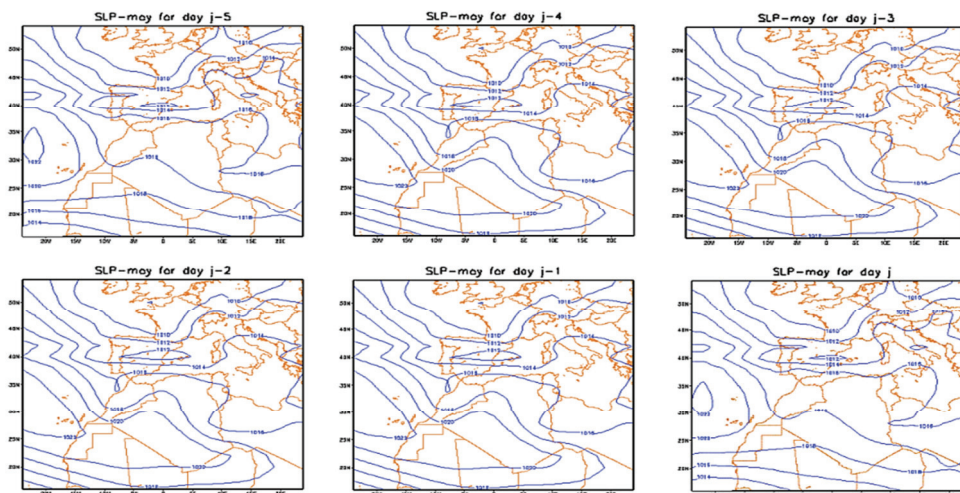


Figure 3. Pression atmosphérique moyenne des jours où le vent souffle sur le littoral algérien du secteur nord-ouest à nord-est avec des vitesses supérieures 5 m/s.

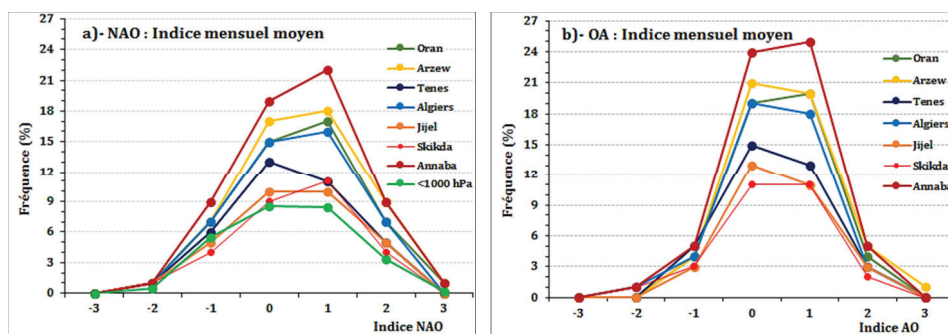


Figure 4. Fréquence mensuelle moyenne (%) des vents de 280°-80° supérieures à 5 m/s par indice mensuel moyen (a) du NAO et (b) de l'OA. Idem pour la fréquence des dépressions inférieures à 1000 hPa sur un secteur de [15°W-0°W], [40°N-45°N].

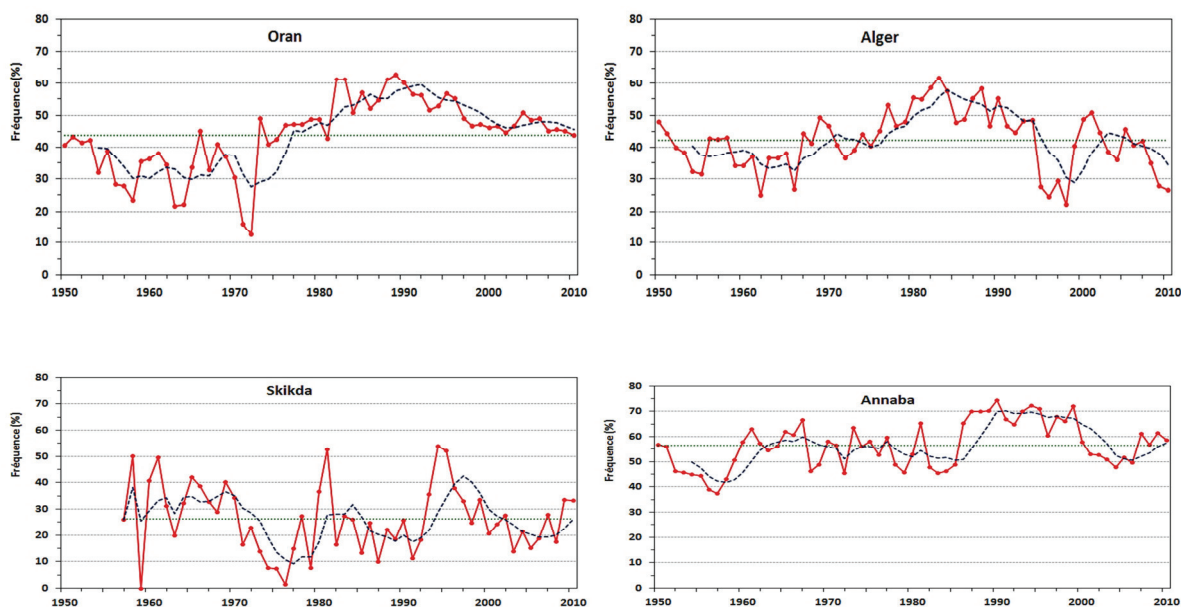


Figure 5a. Fréquence annuelle du vent aux stations côtières algériennes. En trait tireté bleu, les moyennes mobiles sur 5 ans.

Les indices NAO et OA annuels moyens montrent une déviation positive durant la même période, particulièrement pour l'indice NAO (figure 5b). Mais paradoxalement, ces indices sont relativement neutres voire négatifs, à partir du début de la décennie 2000. En conséquence, dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle, la variabilité lente des conditions atmosphériques à l'échelle du NAO et de l'OA donne une bonne idée sur l'évolution des conditions météorologiques associées aux tempêtes à l'échelle du littoral algérien. Cette idée est devenue faible, voire fausse, à partir du début du 21^{ème} siècle.

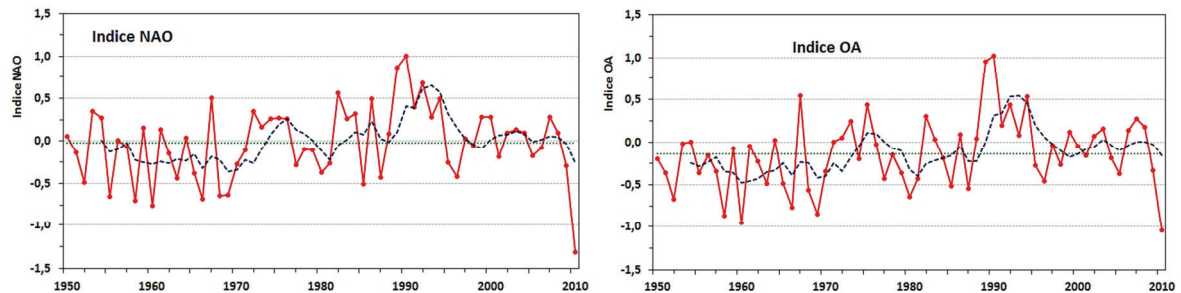


Figure 5b. Indices annuels du NAO et de l'OA. En trait tireté bleu, les moyennes mobiles sur 5 ans.

2.3. Relation Tempêtes/Oscillations Nord-Atlantique et Arctique : variabilité au 20^{ème} siècle

Afin de tenter d'expliquer le paradoxe observé, les corrélations glissantes sont calculées de 1950 à 2010 entre les indices NAO et OA mensuels moyens et la fréquence mensuelle des vents du secteur nord-ouest à nord-est (280°-80°) aux stations météorologiques du littoral algérien. Très nettement, à partir de 2004, la corrélation devient de plus en plus négative aux stations considérées (figure 6). Ce renforcement de la corrélation indique que les phases négatives du NAO et de l'OA deviennent de plus en plus défavorables à la formation des vents de nord-ouest à nord-est dans le littoral algérien.

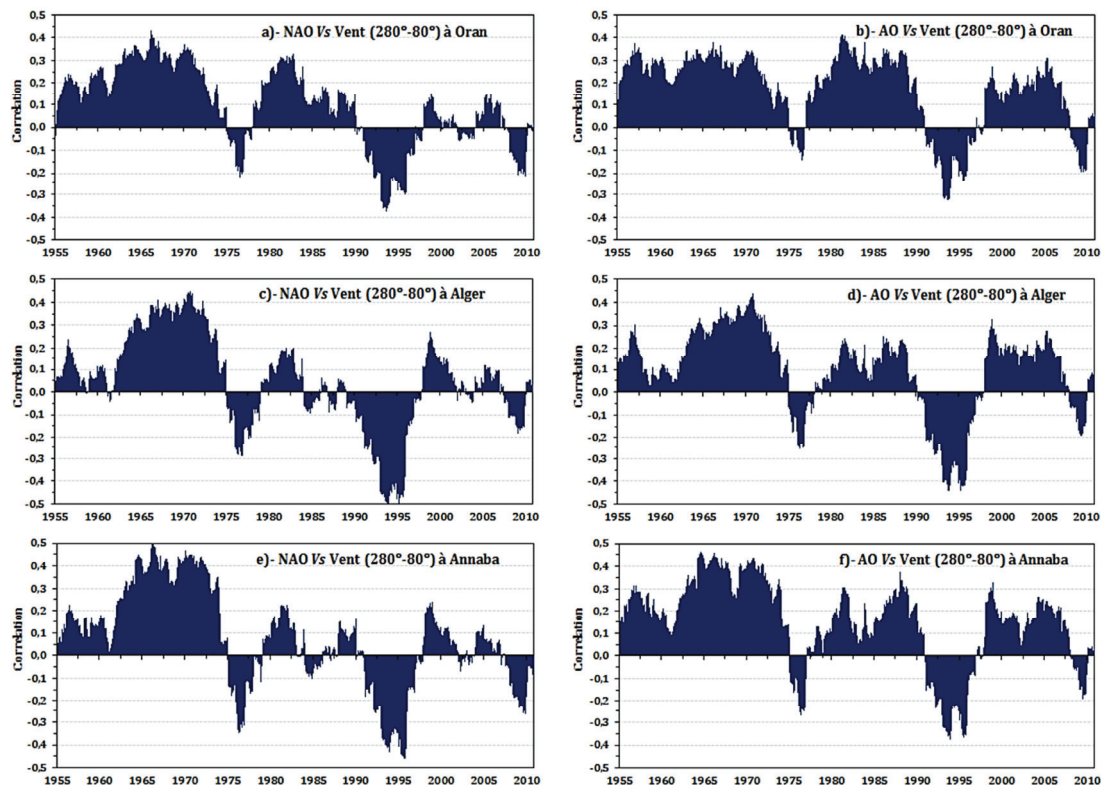


Figure 6. Corrélations coulissantes, sur un segment de 60 mois, entre les indices NAO et AO mensuels moyens et la fréquence mensuelle des vents du secteur nord-ouest à nord-est à Oran (a et b), à Alger (c et d) et à Annaba (e et f), sur la période 1955-2010.

Des changements dans les conditions moyennes du NAO et de l'OA peuvent intervenir sur la relation entre ces oscillations et les conditions météorologiques à l'échelle régionale (Christoph, 1999 ; Wakelin *et al.*, 2003). En effet, le renforcement de cette relation peut être expliqué par le décalage vers des principaux pôles de ces oscillations à partir de 2004. A l'échelle synoptique, ce changement a diminuée la probabilité de passage d'une forte dépression autour du Golfe de Gascogne durant les phases négatives du NAO et de l'OA. Par conséquent, il a réduit le risque d'occurrence des tempêtes et des forts vents à l'échelle du littoral algérien lors des phases négatives du NAO et de l'OA.

Conclusion

Les tempêtes du littoral algérien sont associées au passage d'une dépression autour du Golfe de Gascogne qui engendre des forts vents de mer de secteur nord-ouest à nord-est, capable de pousser et d'accumuler la masse d'eau vers les côtes. Cette circulation atmosphérique est principalement associée aux phases positives du NAO et de l'OA qui favorisent le passage des dépressions autour du Golfe de Gascogne. La circulation atmosphérique sur l'Atlantique nord, l'hémisphère nord et la région Méditerranéenne peut donc être synthétisée comme un système multi-scalaire dynamique dans lequel des modes de variabilité atmosphérique agissant à différentes échelles spatio-temporelles et interagissent entre eux.

Dans la seconde moitié du 20^{ème} siècle, la fréquence des vents du nord-ouest à nord-est augmente significativement dans l'ensemble du littoral algérien. La phase du NAO et celle de l'OA présentent une déviation positive. Des changements dans les conditions atmosphériques moyennes à l'échelle de ces deux oscillations ont progressivement modifié la dynamique du système de la circulation atmosphérique, notamment aux échelles plus fines. En effet, durant les phases positives du NAO et de l'OA, ces changements ont augmentés la probabilité d'occurrence des dépressions d'échelle synoptique transitant autour du Golfe de Gascogne et donc le risque de tempêtes et de forts vents de nord-ouest à nord-est à l'échelle des zones côtières algériennes. Ainsi, l'approche par intégration d'échelles spatio-temporelles semble pertinente pour analyser la variabilité climatique et ses impacts, notamment sur les événements extrêmes aux échelles régionales et locales.

Bibliographie

- Barnston, A. G., and Livezey R. E., 1987 : Classification, seasonality, and persistence of low frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, **115**, 1083-1126
- Cassou C., 2004 : Du changement climatique aux régimes de temps : l'Oscillation Nord-Atlantique. *La Météorologie*, **45**, 21-32.
- Hurrell J.-W., Deser C., 2010 : North Atlantic climate variability: the role of the North Atlantic Oscillation. *Journal of Marine Systems*, **79**, 231-244.
- Pirazzoli P.-A., Costa S., Dornbusch U., Tomasin A., 2006 : Recent evolution of surge-related events and assessment of coastal flooding risk on the eastern coasts of the English Channel. *Ocean Dynamics*, **56**, 498-512.
- Rogers J.-C., 1997: North Atlantic storm track variability and its association to both North Atlantic Oscillation and climate variability of Northern Europe. *Journal of Climate*, **10**, 1635-1647.
- Trigo R.-M., Xoplaki E., Zorita E., *et al.*, 2006 : *Relationship between variability in the Mediterranean region and mid-latitude variability*. Mediterranean Climate Variability, Elsevier, 179-226.
- Ullmann A., Pirazzoli P.-A., 2007 : Caractéristiques spatiales de la formation des surcotes marines dans le Golfe du Lion. *Cybergéo*, **362**, pp 13. Available at <http://www.cybergeo.eu/>.
- Wakelin S.-L., Woodworth P.-L., Flather R.-A., Williams J.-A., 2003 : Sea-level dependence on the NAO over the NW European continental shelf. *Geophysical Research Letters*, **30**, 56-59.

VARIABILITE ET EVOLUTION DECENNALES DES TEMPERATURES ET SALINITES DE SURFACE EN MEDITERRANEE

BACHARI N.E.I.^{1*}, NACEF L.¹, BOUDA A.², LAZREG D.³

¹Université des Sciences et Technologies Houari Boumediene (USTHB), LOBEM/EEM/FSB, El-Alia, BP : 32, Bab-Ezzouar, 16111, Alger, Algérie ; noure_hydraulique@yahoo.fr, nacef_l@yahoo.fr

²Ecole Nationale Supérieure de la Marine Marchande, Bou-Ismaïl 42000, Tipaza, Algérie.abderbouda@yahoo.f

³Université des Sciences et Technologies d'Oran (USTO), LAAR/F.S.Physique, Adresse : Bp 1523 Oran Elmnaouer; Algérie, jimioran@yahoo.fr

Résumé – Sur la base des données de la base Med-Atlas 2002, l'analyse des variations spatio-temporelles des températures et des salinités de surface en Méditerranée, ainsi que, la recherche d'éventuelles tendances dans les deux paramètres sont les objectifs principaux de ce travail. Des techniques statistiques nous ont permis de réaliser divers champs climatologiques, sur une période de 45 ans (1955–1999). L'analyse spatio-temporelle de ces deux paramètres montre un gradient nord-sud plus faible que le gradient est-ouest. La variabilité, dans les deux champs, est plus nette dans les zones de formation que partout ailleurs. Les variations décennales indiquent un refroidissement de la surface Méditerranéenne durant les années 1970 suivi d'un réchauffement, vers le nord, depuis les années 1980, accéléré durant les années 1990. Le bassin Méditerranéen oriental présente un taux de réchauffement plus élevé que bassin occidental, avec une augmentation moyenne de 0,2°C/décennie.

Mots clés : Méditerranée, Température et salinité de surface, Variabilité spatio-temporelle, Evolutions décennales.

Abstract – Variability and decadal evolution of temperature and salinity in the Mediterranean Sea surface

Based on the Med-Atlas 20002 database data at Mediterranean Sea surface, analysis of spatial and temporal variations of temperature and salinity, as well as, the search of its possible trends are the main goals of this work. The used statistical techniques allowed us to obtain various climatological fields, on a period of 45 years (1955-1999). Spatial and temporal analysis of those fields shows that the north-south gradient is weaker than the east-west gradient. The strongest variability in both mean fields is sharper in downwelling areas than anywhere else. The decadal variations indicate a cooling of Mediterranean Sea surface in 1970s and a northward warming since 1980s that accelerated in 1990s. The eastern Mediterranean Sea exhibits a higher warming rate as compared to the western basin, but the average increase is about 0.2 °C/decade.

Keywords: Mediterranean, Surface temperature and salinity, Spatio-temporal variability, Decadal evolutions.

Introduction

La circulation océanique en Méditerranée est déterminée par les échanges de chaleur, à travers la température de surface et l'eau douce qui dépendent des conditions météorologiques et des caractéristiques océaniques. Le flux d'eau et la SST jouent un rôle crucial dans la circulation Méditerranéenne (Barnier *et al.*, 2006). Il peut influencer également les propriétés atmosphériques à des niveaux inférieurs (Castellari *et al.*, 1998; Li, 2006).

Les climatologies de température et de salinité en surface de la mer Méditerranée (SST et SSS), réalisées à partir de différentes bases de données, montrent une large gamme de divergences que nous cherchons toujours à les réduire (Hewitt et Griggs, 2004 ; Sanchez Gomez *et al.*, 2008). Pour surmonter ces insuffisances, la variabilité des SST et des SSS est un outil efficace qui permet de définir les exigences de précision des mesures. En plus, c'est un défi de taille pour la communauté scientifique dans le domaine des mesures et de la modélisation dans la région Méditerranéenne. Obtenir des estimations précises de ces paramètres est important pour comprendre la circulation et le climat Méditerranéen ainsi que leur évolution dans le contexte du changement climatique.

Dans cette étude, nous essayerons de profiter de la base de données *MEDATLAS 2002* pour construire différentes climatologies de température et de salinité en surface Méditerranéenne, à différentes échelles spatiales et temporelles. Utiliser ces climatologies pour évaluer la variabilité spatio-temporelle et d'en déduire les évolutions décennales. Nous concentrons nos efforts sur l'étude des variations et des tendances décennales. Nous nous attendons à ce que

cette description améliore la précision des mesures et augmente notre compréhension des processus méditerranéens.

1. Description et traitement de données

Les données de 1889 à 2000 des profils de température et de salinité, contenues dans la base *MEDATLAS 2002*, sont la principale source de données utilisées dans cette étude. Les procédures de contrôle de qualité de données, déjà réalisées par le groupe *MEDAR/MEDATLAS* (Groupe Medar, 2002 ; Fichaut *et al.*, 2003), nous ont permis d'extraire uniquement les données, au niveau de la surface de la Méditerranée, de bonne qualité. La répartition spatiale et temporelle des données extraites montre que le plus grand nombre de données réfère la période 1946-2000, avec une forte densité couvre le Golfe de Lyon, la mer Ligure, l'Adriatique Nord et la mer d'Alboran. Le sud du bassin Levantin et les côtes Tunisiennes et Libyennes souffrent d'un manque sévère de données.

Nous avons adopté 29 zones définies par *MEDAR/MEDATLAS 2002*. Ce choix est justifié par l'utilisation de ce zonage dans le contrôle de qualité et la paramétrisation régionale des données *MEDATLAS 2002*. Ces zones représentent la grille spatiale avec laquelle on peut filtrer la plupart des caractéristiques de la circulation de surface en Méditerranée. Nous avons appliqué une analyse de variance pour regrouper les zones dépendantes et des régressions linéaires entre une variable dans une zone donnée et la même variable située dans des zones adjacentes pour remplir les valeurs manquantes, uniquement les régressions avec un coefficient de corrélation élevé ($r \geq 0,9$) ont été prises en compte. Les résultats de ces analyses nous a permis de sélectionner 18 zones indépendantes (Fig. 1) sur lesquelles les données pour chaque variable sont ensuite moyennées mensuellement sur la période de janvier 1955 à décembre 1999.

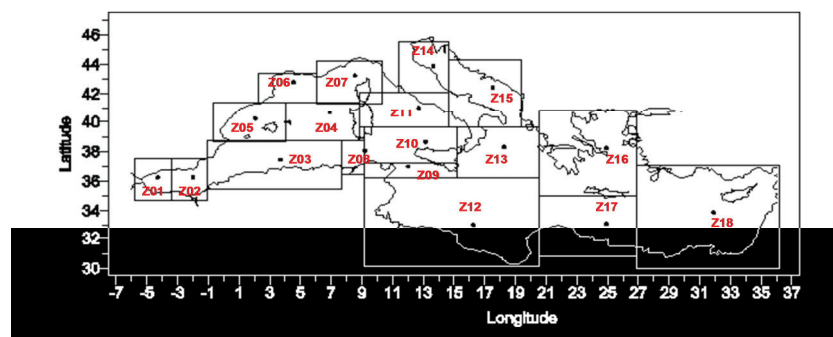


Figure 1. Domaine d'étude définie par une grille spatiale de dix-huit points (chaque point représente une sous-région de la Méditerranée).

Par ailleurs, les données sont trop rares pour être interpolées. Sur cette base, nous avons construit les champs annuels moyens et leurs champs d'écart-type pour caractériser les variations spatiales et détecter les zones de forte variabilité. Les champs moyens de contraste saisonnier pour étudier les variations saisonnières. Pour de détecter les tendances dans chaque champ, nous avons construit la moyenne pendant 4 décennies (1958-1969, 1970-1979, 1980-1989 et 1990-1999).

2. Résultats et discussion

2.1. Variabilité annuelle

Le champ moyen du contraste thermique saisonnier (Fig. 2) montre que les températures estivales (juin à août) sont plus élevées que celles d'hiver (décembre à février). Le plus faible

écart saisonnier est localisé dans la mer d'Alboran ouest et dans le Golfe du Lion, tandis que la plus forte différence se situe dans l'Adriatique, notamment dans sa partie nord. Concernant la salinité, les eaux de surface des parties nord de la Méditerranée sont moins salées en été qu'en hiver, notamment dans l'Adriatique nord.

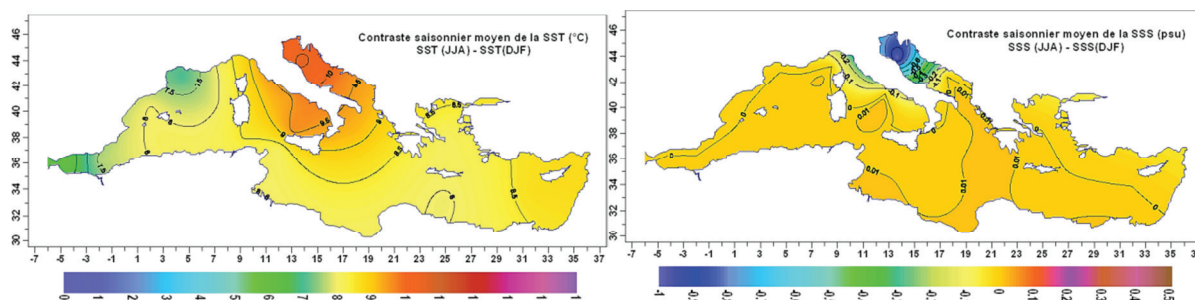


Figure 2. Champs moyens du contraste saisonnier de la SST et de la SSS en Méditerranée (1955–1999).

2.2. Variabilité spatiale

Le champ thermique annuel moyen et de son champ d'écart-type (Fig. 3) montre que le gradient thermique nord-sud (3 °C) est plus faible que le gradient ouest-est (4 °C). La plus grande variabilité de la SST est observée dans le Golfe du Lion et au sud de la mer Égée. Ces zones possèdent également les eaux de surface les plus froides. Par contre, les eaux de surface les plus chaudes se trouvent dans le bassin Levantin sud-est. La plus faible variabilité est observée dans la mer d'Alboran et dans le sud de la mer Tyrrhénienne.

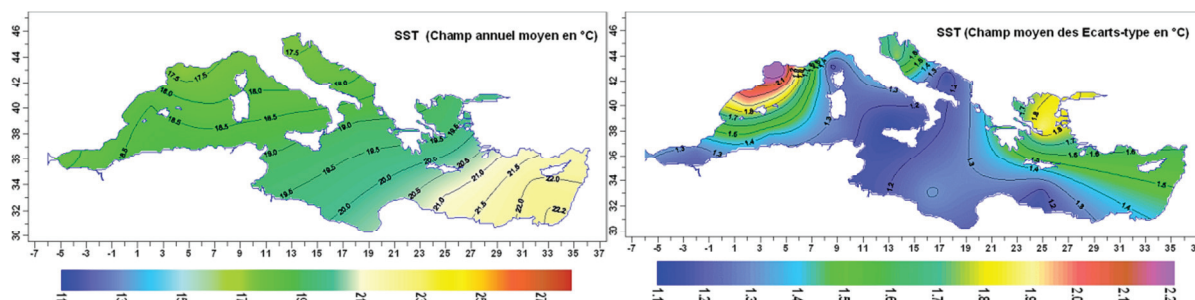


Figure 3. Champ annuel moyen de la SST et son champ d'écart type (1955-1999).

En ce qui concerne la salinité, l'augmentation continue de la mer d'Alboran (37,2) au sud-est du bassin Levantin (38,9) est la caractéristique la plus remarquable, à l'exception de la mer Adriatique du nord qui présente une salinité moyenne de 36,5 (Fig. 4). Le gradient nord-sud (0,3) est plus faible que le gradient ouest-est (1,7). La surface du sud de la mer Égée maintient un niveau de salinité supérieur à 38, avec une configuration relativement similaire à celle de la température.

2.3. Evolution décennale

L'évolution décennale de la SST (Fig. 5a à 5d) montre que la surface Méditerranéenne a subi un refroidissement durant les années 1970 et un réchauffement accéléré durant les années 90, avec une direction du sud vers le nord. Ceci est plus net dans le Golfe du Lion, dans l'Adriatique et dans la mer Égée. Le taux moyen d'accroissement est d'environ 0,2 °C/décennie, avec un taux de réchauffement maximum dans le bassin oriental. Au cours des années 60 (Fig. 5a), la SST augmentedans une direction sud-nord dans le bassin Méditerranéen occidental.

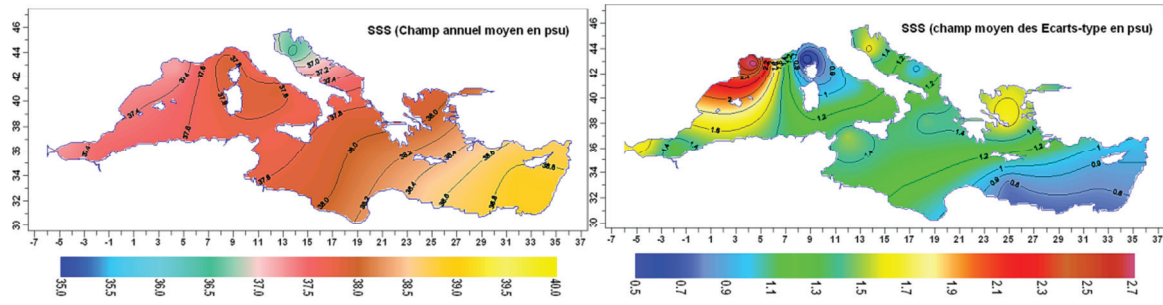


Figure 4. Champ annuel moyen de la SSS et son champ d'écart type (1955-1999).

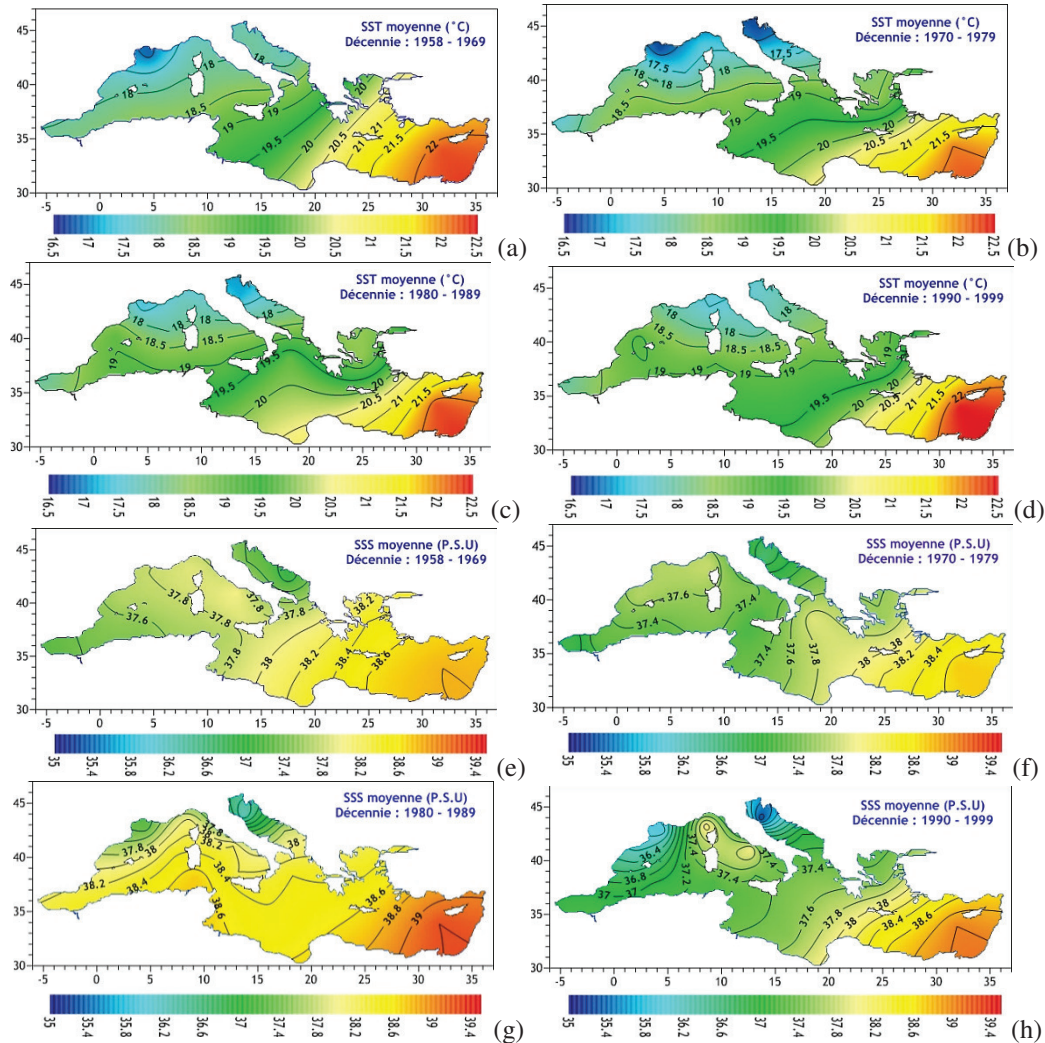


Figure 5. Températures et Salinités décennales moyennes en surface de la Méditerranée.

Elle augmente d'ouest en est dans la Méditerranée orientale, en particulier dans le bassin Levantin. La baisse moyenne des SST pendant les années 1970 (Fig. 5b) est particulièrement prononcée dans les parties septentrionales de la Méditerranée occidentale, de l'Adriatique et de la mer Egée. Au cours des années 1980 (Fig. 5c), il y a une tendance plus élevée au réchauffement dans le bassin occidental que dans le bassin Levantin. Au cours des années 90 (Fig. 5d), le taux de réchauffement devient plus important dans le bassin oriental que dans le bassin occidental. Au cours de cette décennie, la SST augmente dans une direction sud-nord dans la Méditerranée occidentale, alors qu'elle augmente vers l'est dans la Méditerranée orientale.

Concernant la salinité (Fig. 5e à 5h), elle montre une tendance à la hausse correspond aux périodes de refroidissement et une tendance à la baisse associée aux périodes de réchauffement. Ceci est plus visible dans la partie ouest de la Méditerranée occidentale, dans l'Adriatique et dans le bassin Levantin durant la décennie des années 1990. Durant les années 1970, la salinité de surface montre une tendance générale à la hausse, exception faite l'Adriatique nord qui présente l'inverse (Fig. 5f). La situation est inversée durant les années 1980 mais, la salinité à la surface de l'Adriatique nord a continué dans sa tendance décroissante (Fig. 5g). Durant les années 1990 (Fig. 5h), une tendance à la baisse accélérée est observée sur toute la surface Méditerranéenne, à l'exception du bassin Levantin qui présente une tendance relativement croissante.

L'application du test de tendance de Mann-Kendall au seuil de signification de 5% nous a permis de confirmer que les tendances à la hausse ou à la baisse, dans les deux champs (température et salinité), sont statistiquement significatives dans la partie nord-ouest de la Méditerranée occidentale, dans l'Adriatique et dans le bassin Levantin. Ces tendances plus significatives durant la décennie des années 80 et celle des années 90.

2.4. Discussion

Le faible contraste thermique, observé dans la mer d'Alboran occidentale et dans le Golfe du Lion, peut être expliqué par le phénomène d'*upwelling*, qui est plus actif dans le Golfe du Lion durant le printemps, qui réduit l'écart de température entre l'été et l'hiver. Dans la mer d'Alboran, il peut être expliqué par la nature des eaux de surface originaires de l'Atlantique et qui ont une température relativement homogène durant toute l'année. Le fort contraste thermique saisonnier dans le nord de la mer Adriatique peut être expliqué par les vents froids de l'hiver (Bora, Tramontane) qui refroidissent les eaux de surface dans ces régions. Dans le reste des surfaces méditerranéennes, le contraste thermique peut être expliqué par le Sirocco dans le sud de la Méditerranée et par le vent Etésien sur la mer Egée. De plus, ces vents peuvent réchauffer les eaux de surface dans ces régions et par conséquent, amplifier le contraste thermique été-hiver en Méditerranée. Dans l'Adriatique et le nord-ouest de la Méditerranée, le contraste dans le champ salin peut être expliqué par les apports d'eau douce des fleuves (Rhône, Pô) après la fusion, en printemps, de la neige (en Pyrénées, Alpes, ...). Dans la mer Egée, il peut être expliqué par l'échange d'eau entre la mer Noire et la mer Egée, également par l'évaporation qui est plus forte en été. Ainsi, les différences saisonnières dans les champs thermiques et salins reflètent clairement le forçage qui induit la circulation verticale en mer Méditerranée. Ces résultats sont en cohérence avec les observations et les résultats des études de la modélisation de la variabilité du climat méditerranéen (Levituset al., 2009; Somot, 2005).

La répartition spatiale des deux champs révèle un gradient nord-sud plus faible que le gradient est-ouest avec une variabilité plus forte et plus marquée dans les régions de *downwelling* que partout ailleurs. L'influence des masses d'eau superficielles externes détermine principalement cette variabilité spatiale, ainsi que la variabilité spatiale des flux de chaleur air-mer et les transports verticaux ascendants d'eau intermédiaire due à des processus de mélange turbulent et/ou d'*upwelling* (Mariotti, 2010). Nos résultats sont cohérents avec les connaissances existantes et les expériences majeures concernant la circulation à l'échelle des sous bassin (Bergamasco et Malanotte-Rizzoli, 2010).

La courte période de refroidissement survenue au début des années 90 peut être associée à un refroidissement plus prolongé dans la région Atlantique. Après le début des années 1990, le rythme de réchauffement devient plus important dans le bassin oriental que dans le bassin occidental. Ce comportement peut être expliqué par les processus océaniques locaux, tels que,

l'advection horizontale de la chaleur (du bassin de l'ouest) et/ou le mélange vertical qui contrôlent probablement l'accélération du réchauffement de surface dans le bassin oriental. En général, la température a fluctué d'un état froid, durant les années 60 et 70, à un état chaud débutée durant les années 80. Ces événements sont considérés comme une conséquence principale du changement climatique (Solomon *et al.*, 2007; Hoegh-Guldberg et Bruno, 2010).

Conclusion

Grâce à la base de données *MEDATLAS 2002*, nous avons réalisé différents champs climatologiques de température et de salinité à la surface de la mer Méditerranée. Les caractéristiques climatologiques peuvent servir de "benchmark" pour effectuer des analyses plus approfondies de changement dans les propriétés océanographiques qui ont pu se produire au cours des dernières années en Méditerranée. Elles peuvent contribuer à améliorer les interactions océan-atmosphère à l'échelle locale et affiner les contraintes pour les modèles couplés océan-atmosphère.

Les caractéristiques hydrologiques de surface en Méditerranée (température et salinité) montrent une tendance à long terme au cours des dernières décennies. Durant la période 1980 à 1990, il y a eu une augmentation significative de la température dans le bassin occidental, par contre, cette augmentation est lente dans le bassin oriental. Après une très courte période de refroidissement, au début des années 90, le rythme moyen de réchauffement de la surface Méditerranéenne s'est accéléré avec un changement de direction, d'ouest vers l'est.

Le réchauffement de surface à long terme peut avoir un impact sur l'avenir de la circulation thermohaline en Méditerranée. Une augmentation significative de la température peut diminuer la fréquence de formation d'eau dense dans les différents sites et, en conséquence, ralentir la circulation thermohaline. Les variations de la température et de la salinité des eaux sortantes de la Méditerranée, à travers le détroit de Gibraltar, peuvent influencer la circulation générale dans l'Atlantique nord qui est l'endroit principal de formation d'eau profonde contrôlant la circulation thermohaline globale.

Bibliographie

- Barnier B., Brodeau L. Penduff T., 2006 : Ocean surface forcing and surface fields. *Mercator Ocean Quaterly Newsletter*, 4-7.
- Bergamasco A. Malanotte-Rizzoli P., 2010 : The circulation of the Mediterranean Sea: a historical review of experimental investigations. *Advances in Oceanography and Limnology*, **1**(1), 11-28.
- Castellari S, Pinaridi N.,Leaman K., 1998 : A model study of air-sea interactions in the Mediterranean Sea. *Journal of Marine Systems*, **18**, 89-114.
- Fichaut M., Garcia M. J., Giorgetti A., Iona A., Kushmaro A., 2003. *MEDAR/MEDATLAS 2002: a Mediterranean and Black Sea database for the operational Oceanography. Oceanography Series*, **69**, 645-648.
- Hewitt C.D., Griggs D.J., 2004 : *Ensembles Based Predictions of Climate Changes and their Impacts*. EOS, **85**, 566 p.
- Hoegh-Guldberg O., Bruno J.F., 2010 : The impact of climate change on the world's marine ecosystems. *Science*, **328**, 1523-1528.
- Levitus S., Antonov J. I., Boyer T. P., Locarnini R. A., Garcia H. E., Mishonov A.V., 2009 : Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L07608, doi:10.1029/2008GL037155
- Li L., 2006 : Atmospheric GCM response to an idealized anomaly of the Mediterranean Sea surface temperature. *Clim. Dyn.*, Doi: 10.1007/s00382-006-0152-6
- Mariotti A., 2010 : Recent changes in the Mediterranean water cycle : a pathway toward long-term regional hydroclimatic change. *Journal of Climate*, **23**, 1513-1525.
- MEDAR Group, 2002 : *MED-ATLAS 2002 database: Mediterranean and Black Sea database of temperature salinity and biochemical parameters*. Climatological Atlas. IFREMER, France.
- Sanchez-Gomez E., Somot S. Déqué M., 2008 : Ability of an ensemble of regional climate models to reproduce weather regimes over Europe-Atlantic during the period 1961–2000. *Clim. Dyn.*, **10**, 1007/s00382-008-0502-7
- Solomon S., Qin D., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B., Tignor M., Miller H.L., 2007 : *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 996 p.
- Somot S., 2005 : *Modélisation climatique du bassin méditerranéen : Variabilité et scénarios de changement climatique*. Thèse de l'université Paul Sabatier, Toulouse III, France, 333 p.

ETUDE DE LA SECHERESSE AU NORD DE LA TUNISIE

FEKI M.

Université de Sfax, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, route de l'aéroport 4.5 km Sfax Tunisie, e-mail : m_feki@hotmail.com

Résumé : Pour caractériser les événements pluviométriques déficitaires, une analyse de la pluviométrie est proposée sur une période de 60 ans de mesure et pour quinze stations situées au nord de la Tunisie. Cette étude qui s'appuie sur le calcul de l'indice SPI (Standardized Precipitation Index) permet de rendre compte de l'extrême variabilité des pluies. Elle montre l'importance des séquences légèrement sèches qui représentent plus de 70% des cas de sécheresse entre 1975 et à 2008. Elle met aussi en évidence, des contrastes régionaux entre l'Ouest et l'Est de la région au niveau de la durée des périodes sèches.

Mots-Clés : sécheresse, SPI, pluies, Tunisie.

Abstract: Study of Drought in the North of Tunisia. To characterize deficit rainfall events, an analysis of the rainfall is proposed over a period of 60 years of measurement and fifteen stations in northern Tunisia. This study based on the calculation of the Standardized Precipitation Index (SPI), shows the extreme variability of rainfall. It shows the importance of slightly dry spells that represent over 70% of cases of drought between 1975 and 2008. It also highlights regional contrasts in terms of dry periods duration.

Keywords : drought, SPI, rains, Tunisia.

Introduction

L'une des caractéristiques principales du climat de la Tunisie est, sans doute, la variabilité des précipitations à l'échelle annuelle, saisonnière et mensuelle (Hénia, 2008). Cette variabilité représente un sérieux problème pour la Tunisie où de nombreux aspects de la vie quotidienne et de l'économie tels que l'agriculture et les ressources en eau y sont très sensibles. Les longues séquences sèches que subit l'année agricole entraînent une porosité de la couverture végétale, un assèchement des sols favorisant l'érosion et une baisse de la capacité de stockage des eaux superficielles. Elles entraînent, également, de nombreux dommages à l'agriculture et à l'environnement. De ce fait, une baisse et/ou une mauvaise répartition des quantités de pluies pendant l'année agricole, peuvent avoir des conséquences dramatiques sur la production agricole, entre autre les céréales, comme en témoigne la « mauvaise » saison actuelle des pluies. La Tunisie avait déjà connu de tels épisodes de sécheresse (Benzartiet *al.*, 2001) comme en 2001/02, et récemment en 2012/13.

Cette étude est basée sur les données de 15 postes pluviométriques couvrant le nord de la Tunisie (figure 1). Il s'agit d'étudier la sécheresse météorologique (déficit des précipitations, Boken, 2005). Outre la mise en évidence de l'ampleur des épisodes secs qui ont affectés la région, l'objectif est d'analyser les principales caractéristiques de la sécheresse au milieu de la saison agricole quelle que soit l'année, sèche ou humide.

1. Données et méthodes

Les données utilisées dans cette étude proviennent de la Direction Générale des Ressources en Eaux (Ministère de l'Agriculture), principale gestionnaire du réseau pluviométrique en Tunisie. Les stations sélectionnées sont réparties de manière hétérogène. Elles répondent aux critères selon lesquels chaque station doit couvrir au moins trois décennies, les lacunes ne doivent pas concerner plus de cinq années consécutives et la série doit présenter moins de 10% de lacunes à l'échelle mensuelle et décadaire. Ainsi, un total de 15 stations pluviométriques situées au nord de la Tunisie a été retenu (Tableau 1). Elles présentent des séries de données recueillies sur plus de 50 ans (de 1975 à 2008).

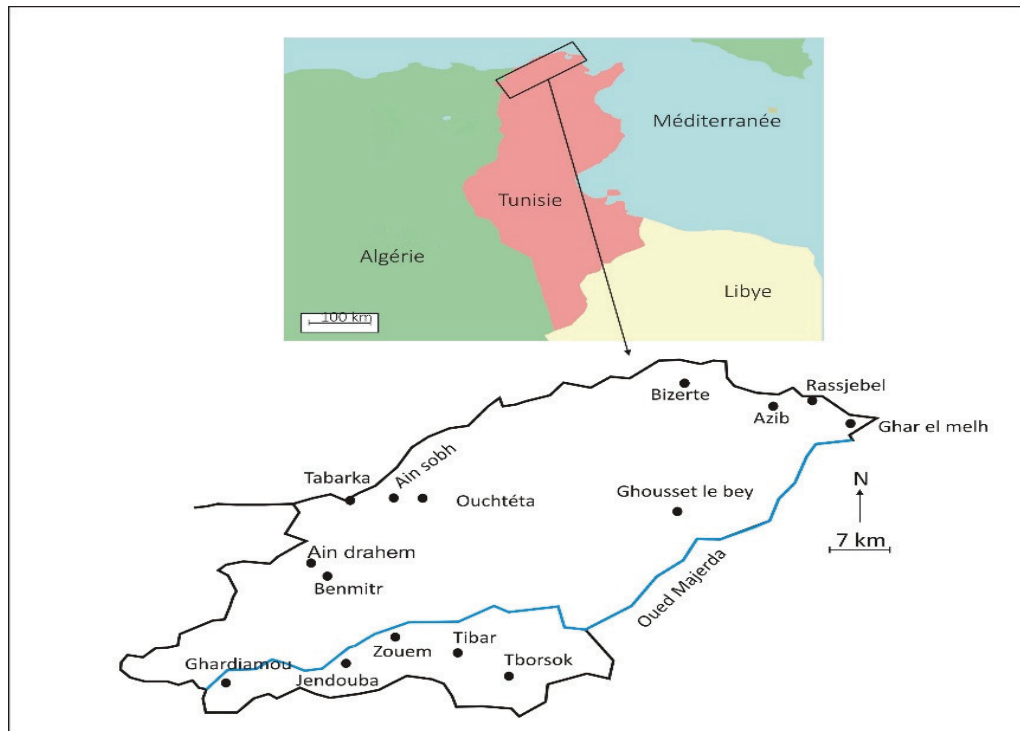


Figure 1. Cadre géographique

Tableau 1. Caractéristiques des stations

<i>Station</i>	<i>Latitude (°N)</i>	<i>Longitude (°E)</i>	<i>Altitude (m)</i>	<i>Moyenne (mm)</i>
Ain drahem	36,77	8,68	715	1631
Tabarka	36,89	8,82	10	993
Ain sobh	36,96	8,92	120	953
Ouchtéta	36,89	9	48	979
Benmtir	36,73	8,73	492	1078
Jendouba	36,5	8,78	143	443
Ghardiamou	36,45	8,43	195	465
Zouem	36,58	8,92	132	433
Tibar	36,5	9,1	385	531
Tbarsok	36,45	9,24	440	570
Bizerte	37,27	9,75	50	646
Rassjebel	37,2	10,12	35	568
Ghar el Melh	37,16	10,18	10	592
Azib	37,2	10	55	580
Ghousset el Bey	36,91	9,72	70	506

Les données issues des postes pluviométriques ont servi pour calculer l'indice de précipitations standardisé (Standardized precipitation index, SPI). Le SPI permet de déterminer le déficit de précipitations pour une région donnée pendant un laps de temps déterminé. Il "est un indice à la fois puissant, souple d'utilisation et simple à calculer. Les données sur les précipitations constituent en fait le seul paramètre requis" (OMM, 2012). Le SPI représente une transformation de la série des précipitations en une distribution normale standardisée de moyenne nulle et d'écart-type unitaire, également appelée *z-distribution*, (distribution gaussienne). Il est obtenu par ajustement de la densité de probabilité de la distribution de fréquences des pluies pour une période bien déterminée (Bergaoui et Alouini, 2001 ; Klein, 2009 ; Nouaceur et Laignel, 2015). Les échelles temporelles couramment

utilisées sont 1, 3, 6, 9 et 12 mois en fonction de type de sécheresse étudié Enfin, chaque valeur du *SPI* est reliée à un degré de sévérité repris dans le tableau 2.

Tableau 2. Classes de SPI (OMM, 2012)

Valeur du SPI	Proportion de sécheresse / humidité
> 2	extrêmement humide
de 1,5 à 1,99	très humide
de 1 à 1,491	modérément humide
de 0 à 0,99	légèrement humide (proche de la normale)
de 0 à -0,99	sécheresse légère (proche de la normale)
de -1 à -1,49	sécheresse modérée
de -1,5 à 1,99	sécheresse sévère
< -2	sécheresse extrême

2. Résultats

2.1. Fréquences des classes de sécheresse

Le calcul de SPI aux différentes échelles temporelles (toutes les stations et toutes les années), montre au nord de la Tunisie un caractère toujours irrégulier de la pluviométrie. Les années sèches - relativement plus importantes que les années humides- représente à l'échelle annuelle 53% des cas sur la période 1950/2010 (Tableau 3). Toutefois, la région n'a pas connu de sécheresse extrême ($SPI \leq -2$), et seules quelques années de grande sécheresse (7%) ou modérée (21%). En revanche, les années de légère sécheresse (SPI entre 0 et -0,99) prédominent avec 38% des années et 72% des années sèches. Le même résultat s'observe à l'échelle saisonnière où la variabilité des pluies est similaire quelle que soit la saison ; le nombre d'années sèches est un peu plus marqué (56%) que les saisons intermédiaires (automne 55% et printemps 54%, respectivement). Mais il s'agit d'une légère sécheresse qui s'observe dans plus de 72% des cas (40% total des années), suivie d'une sécheresse modérée (22%) alors que les années extrêmes sont très faibles (6%).

Tableau 3. Fréquence des années et des saisons sèches (en % des années) selon les classes de SPI (1950-/2010, 1 = toute année confondue ; 2 = année sèche)

Descripteurs	année		automne		hiver		printemps	
	1	2	1	2	1	2	1	2
sécheresse légère	38	72	39	72	42	74	40	73
sécheresse modérée	11	21	12	22	12	21	11	20
sécheresse sévère	4	7	4	6	2	4	3	5
sécheresse extrême	0	0	0	0	1	1	1	2

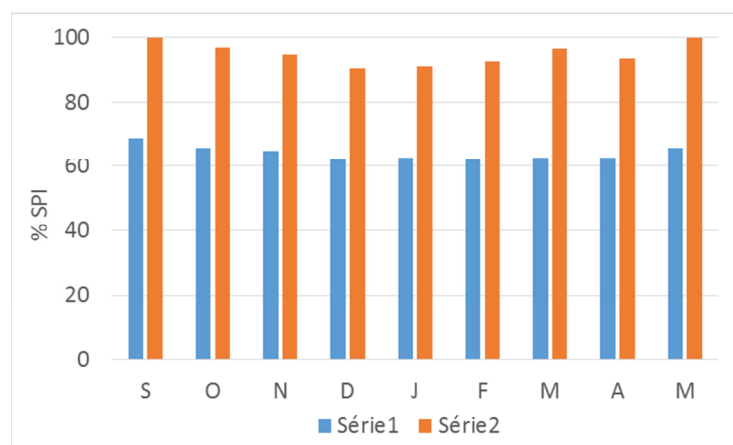
A l'échelle mensuelle (Tableau 4), on remarque toujours la prédominance de la sécheresse légère (plus de 70% des cas) et l'absence des années extrêmes. Toutefois, la fréquence minimale des années proches de la normale (73%) est enregistrée en janvier et mai ; elle témoigne d'une importante variabilité des précipitations au cœur et à la fin de la saison des

pluies, où les accidents pluviométriques sont plus fréquents, avec une proportion qui 27% du nombre des années sèches. En revanche, la fréquence maximale des années dites légères s'observe au début de l'automne et du printemps, avec plus de 80% des cas. Elle reflète des précipitations proches de la normale et une faible variabilité des pluies en septembre et mars. Les autres mois occupent une position intermédiaire dont la fréquence des années légèrement sèches varie entre 74% et 78%.

Tableau 4. Fréquence des mois secs (en % des années agricoles) selon les classes de SPI (1950/2010)

<i>Descripteurs</i>	<i>S</i>	<i>O</i>	<i>N</i>	<i>D</i>	<i>J</i>	<i>F</i>	<i>M</i>	<i>A</i>	<i>M</i>
sécheresse légère	84	78	76	76	72	75	80	74	73
sécheresse modérée	16	21	21	21	23	23	17	22	26
sécheresse sévère	0	1	3	3	4	2	3	4	1
sécheresse extrême	0	0	0	0	0	0	0	0	0

En considérant toutes les décades des années étudiées, les conditions de sécheresse l'emportent dans plus de 60% de cas sur la période 1950/2010 (Figure 2). Ces conditions



dépassent les deux-tiers des cas au début et à la fin de l'année agricole (septembre et mai, respectivement). Cependant, il s'agit d'un faible déficit pluviométrique puisque plus de 90% des décades présentent une légère sécheresse avec un SPI qui varie de 0 à -0,99. Ce déficit est, encore, très faible en septembre et en mai, où 100% des décades ont connu des précipitations proches de la normale.

Figure 2. Fréquences (%) des décades légèrement sèches (série 1) de 1975 à 2008 (série 2 : Totalité des décades sèches)

2.2. Variabilité spatiotemporelle du SPI

Pour mieux cerner la variabilité spatiotemporelle de la sécheresse au nord de la Tunisie, nous avons appliqué une analyse en composante principale (ACP) sur les SPI de 9 mois. Ces derniers permettent de fournir des indications sur les régimes de précipitations inter saisonniers, sans tenir compte de leurs sévérités (Wu et al, 2007). L'ACP montre un signal unipolaire avec des corrélations significatives et positives pour toutes les stations à la première composante (56% de la variance), sauf la station de Ghardimaou (3^{ème} composante, 6% de la variance) et celle Ghoussel bey (5^{ème} composante, 4% de la variance). La projection des variables sur les axes factoriels (Figure 3) reflète une opposition Ouest/Est et la présence de deux ensembles géographiques bien individualisés :

- Le premier concerne la Kroumirie centrale (la région la plus arrosée), l'Ouest de la vallée de Majerdaet les monts du Haut Tell (Tibar et Téborkok) où les SPI dévoilent une prédominance des conditions humides ($SPI > 1$) qui l'emportent sur les conditions sèches. Dans cet ensemble, la projection de la station de Ghardimaou (plaine d'Arrogba) sur le plan factoriel montre une importance des événements pluviométriques extrêmes ($SPI > 1,5$)

- Le deuxième concerne le littoral septentrional et oriental (sauf la région de Ghar el melh), les Mogods (avec ses environs) et la moyenne et la basse vallée de Majerda. Dans cet ensemble, ce sont plutôt les années déficitaires ($SPI < -1$) qui l'emportent sur les années humides. La projection de la station de Ghousselbey sur le plan factoriel témoigne d'une sécheresse plus accentuée dans la moyenne vallée de Majerda ($SPI < -1,5$) que le reste de la région.

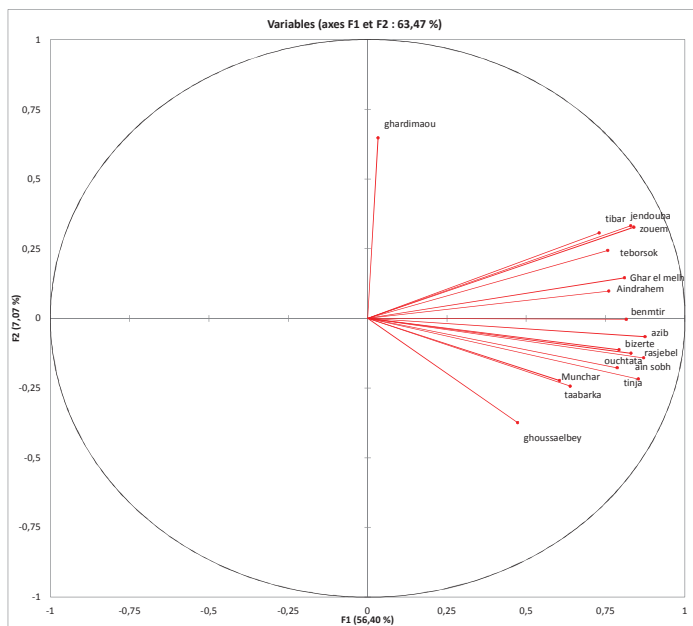


Figure 3. Projection des variables (stations) sur les axes 1 et 2 de l'ACP

Les scores du premier facteur représentant l'évolution temporelle du SPI de la première composante (Figure 3), mettent en relief l'alternance équitable entre années humides et années sèches (au nombre de 6, respectivement) qui s'observe depuis 1986. Ils confirment donc une accentuation de la variabilité spatiotemporelle des précipitations à partir de l'année 1986. Cependant, aucune tendance significative à la baisse et/ou à la hausse des précipitations n'a été observée.

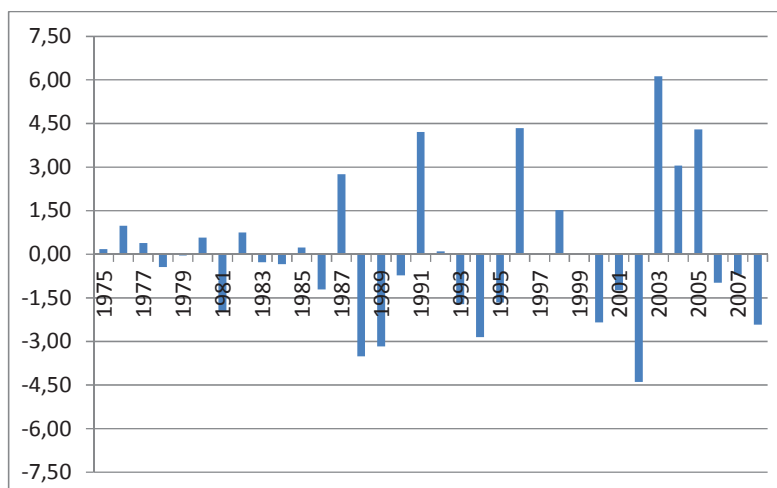


Figure 4. Evolution des SPI de 1975 à 2008 (score du premier facteur)

Une rotation sur les 3 premiers axes factoriels de l'ACP a été appliquée pour clarifier les structures spatiales de chaque composante et dégager des sous-ensembles, mais nous avons eu un ajustement mauvais du nuage de points et par conséquent une dispersion de l'information. Egalement, les corrélations entre les indices de la NAO et les SPI ne sont pas significatives, ce qui témoigne de la présence d'autres facteurs qui expliquent la variabilité des pluies.

Conclusion

Au terme de ce travail, on retient que le nord de la Tunisie a été affecté par plusieurs périodes sèches sur la période allant de 1975 à 2008. Les indices de précipitations standardisés (Standardized precipitation index, SPI) ont permis de montrer le caractère irrégulier des précipitations, puisque les séquences sèches l'emportent dans environ 60% de cas de 1975 à 2008, et ce, quelle que soit l'échelle de temps considéré. Ils ont également montré une prépondérance de la sécheresse légère dans plus de 70% des cas et une quasi-absence des années extrêmes et sévères. Les SPI ont mis en évidence une grande variabilité spatiotemporelle de la durée des périodes sèches, avec des contrastes régionaux existant entre la Kroumirie, le littoral et l'Ouest et le Sud de la moyenne vallée de Majerda. Toutefois, le calcul des SPI hebdomadaires et l'intégration d'autres stations pourraient mieux dégager les contrastes régionaux.

Bibliographie

- Benzarti Z, Habaieb H., 2001 : Etude de la persistance de la sécheresse en Tunisie par utilisation des chaînes de Markov (1909-1996). *Science et changements planétaires / Sécheresse*, **4**, 215-220.
- Bergaoui M, Alouini A., 2001 : Caractérisation de la sécheresse météorologique et hydrologique : cas du bassin versant de Siliana en Tunisie. *Science et changements planétaires / Sécheresse*, **4**, 205-213.
- Boken V.K., 2005 : Agricultural drought and its monitoring and prediction : some concepts. Boken, V.K., Cracknell A.P. & Heathcote R.L. (éditeurs) : *Monitoring and Predicting Agricultural Drought : A Global Study*, Oxford-New-York : Oxford University Press, pp. 3-10.
- Ghenim A N., Megnounif A., 2013 : Ampleur de la sécheresse dans le bassin d'alimentation du barrage Meffrouche (Nord-Ouest de l'Algérie). *Physio-Géo*, **7**, URL: <http://physio-geo.revues.org/3173>; DOI: 10.4000/physio-geo.3173.
- Hénia L., 2008 : *Atlas de l'eau en Tunisie*. Publications de l'Université de Tunis, 186p.
- Nouaceur Z., Laignel B., 2015 : Caractérisation des événements pluviométriques extrêmes sur la rive sud du bassin méditerranéen : études du cas du « quart nord-est » algérien. *In XXVIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Liège*, 573-578.
- Klein T., 2008 : Comparaison des sécheresses estivales de 1976 et 2003 en Europe occidentale à l'aide d'indices climatique. *BSGLg*, **53**, 75-86
- Organisation météorologique mondiale, 2012 : Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé (M. Svoboda, M. Hayes et D. Wood) (*OMM-N° 1090*), Genève.
- Wu H., Svoboda M D., Hayes M J., Wilhite D A., Wenc F., 2008 : Appropriate application of the Standardized Precipitation Index in arid locations and dry seasons. *International Journal Climatology*. **27**, URL : www.interscience.wiley.com ; DOI : 10.1002/joc.1371.

Thème : Géomatique et modélisation climatique

EVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES ZONES CÔTIÈRES À L'ÉLEVATION DU NIVEAU DE LA MER À PARTIR DES PARAMÈTRES PHYSIQUES ET SOCIO-ÉCONOMIQUES: CAS DE LA CÔTE DU GOLFE DE BEJAÏA, ALGÉRIE

BOUTIBA M., DJOUDER F.

Laboratoire de Géomorphologie et Géo-risques (LG & G), Faculté des Sciences de la Terre de Géographie et de l'Aménagement du Territoire (FSTGAT), Université des Sciences et de la Technologie Houari BOUMEDIENE (USTHB), BP 32, El Alia, Bab Ezzouar, 16111, Alger, Algérie E-mail : mboutiba61@yahoo.fr / fa.amen.hem@gmail.com

Résumé : Le présent travail concerne l'élaboration d'une cartographie de la vulnérabilité physique et socio-économique de la côte du golfe de Bejaïa (centre-Est du littoral algérien) face à l'élévation du niveau de la Mer Méditerranée, à partir du calcul des Indices Côtiers de Vulnérabilité (I.C.V) et l'utilisation des outils de la géo-spatialisation. Les résultats du calcul de l'IVC physique montrent que sur un linéaire côtier total de 60 km, 22.42 km présentent un risque très élevé, 21.68 km élevé et 15,83 km sontrangés dans la classe de vulnérabilité basse, face à l'élévation du niveau de la mer. Selon les valeurs de IVC socio-économiques obtenues, les zones les plus vulnérables, de haut et très haut risque, occupent 38.19 km du littoral étudié. Elles sont localisées le long de la côte occidentale (Béjaïa, Boukhelifa) et orientale (Tichy, Aokas et souk El Tenine), tandis que les tronçons les moins vulnérables, couvrant 21,74 km de la longueur totale de la côte, sont localisés au niveau des falaises rocheuses de Tichy et d'Aokas, ainsi que sur la côte orientale (Melbou, Ziamma-Mansouria) du golfe de Bejaïa. Plusieurs zones d'expansion touristique pour le développement futur de la côte du Golfe de Béjaïa sont programmées dans des sites identifiés comme très vulnérables. Cette étude met en lumière les zones qui seront les plus touchées par la hausse future du niveau de la mer (MSLR) et les tempêtes. Les résultats de cette étude peuvent aider les décideurs locaux à élaborer des plans de gestion côtière dans les zones les plus vulnérables.

Mots-Clés : Indices Côtiers de Vulnérabilité (ICV), Outils de la géo-spatialisation, Risques naturels, Bejaïa

Abstract : Vulnerability assessment of coastal areas to sea level rise from the physical and socio-economic parameters: case of the gulf coast of Bejaïa, Algeria.

The present work concerns the mapping of the physical and socio-economic vulnerability of the gulf coast of Bejaïa facing to sea level rise, using Coastal Vulnerability Index (CVI) and geospatial tools. The CVI (physical) calculation results show, out of the 60 Km of the total coastline, length 22.42 Km present a very high risk, 21.68 Km is at high risk and 15.83 Km are classified in the class of low vulnerability, facing to sea level rise, indicating the most part of coastline is exhibit to erosion. According to the obtained values of CVI *socio-economic*, the most vulnerable areas, of high and very high risk, occupy 38.19 Km of the studied coastline, they were found along the western (Béjaïa, Boukhelifa) and eastern (Tichy, Aokas and souk El Tenine) coast, while the least vulnerable stretch, covering 21.74 Km of the total length of the coast, appertain to the rocky cliffs along the central (Tichy, Aokas) and eastern (Melbou, Ziamma-mansouria) shore of Bejaïa gulf coast. Several tourist expansion zones for the future development of Béjaïa Gulf coast are programmed in sites identified as very vulnerable. This study highlights areas that will be most affected by future sea level rise (SLR) and storm events. The results of this study can guide local decision-makers in elaborating coastal management plans in the most vulnerable areas.

Keywords : Coastal Vulnerability Index (CVI), Geospatial tools, Natural risks, Bejaïa

Introduction

Les zones côtières subissent de nombreuses pressions liées à la présence sans cesse croissante et invasive des populations humaines. Par conséquent, elles sont devenues densément peuplées et très productives. Elles cachent des écosystèmes naturels d'une importance incommensurable et abritent les principales organisations sociales de la majorité des pays. Cette occupation a sévèrement perturbé la dynamique naturelle et l'équilibre de ces zones et a engendré de nombreux problèmes avec leurs risques associés. Pour ces zones côtières de la planète, évolution et risques ont été, toujours, inséparables. Avec le réchauffement climatique effectif et attendu de la planète et son empreinte sur la hausse moyenne du niveau de la mer, ces risques sont particulièrement appelés à s'intensifier au cours de ce siècle et même au-delà. En effet, la hausse du niveau moyen de la mer (MSLR) est certainement la conséquence la plus reconnue et la plus médiatisée de ce nouvel épisode

du réchauffement climatique (Allen et Komar, 2006). Au cours du 20^{ème} siècle, les surfaces marines et océaniques mondiales ont enregistré une augmentation de 1 à 2 mm par an (Douglas et Crowell, 2000 ; Church et White, 2006). Selon le Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) dans son quatrième rapport de 2007, le niveau global de la mer va augmenter de plus 59 cm d'ici 2100 (IPCC, 2007). Les récentes estimations, comme celle menée par Strohecker (2008), basée sur un nouveau modèle retraçant l'évolution du niveau de la mer au cours des 2000 dernières années, ont montré que le niveau des mers pourrait s'élever de près de 1,5 m d'ici la fin de ce siècle suite à la fonte des glaciers, la disparition des calottes glaciaires et la dilatation thermique des eaux des océans. En 2014, le GIEC est revenu avec un 5^{ème} rapport d'évaluation renforçant sa certitude sur le rôle majeur de l'homme et de ces activités dans le réchauffement climatique mondial et l'élévation du niveau de la mer. Dans ce dernier rapport, le GIEC a révisé ces estimations à la hausse. Il prévoit une hausse de 0,98 m d'ici la fin du 21^e siècle par rapport à la période 1986-2005 (IPCC, 2014).

Face à tout cela, les zones côtières sont très vulnérables. Cette vulnérabilité réside dans la prédisposition de ces territoires à être négativement affectés par les effets de ce phénomène (IPCC 2014). Aujourd'hui, la plupart des pays ont procédé à des évaluations de la vulnérabilité de leurs côtes à des échelles nationales, régionales ou locales. Contrairement à la côte algérienne qui n'a, jusqu'à présent, pas fait l'objet d'études similaires.

Longue d'un peu plus de 1200 km, la côte algérienne constitue un atout indéniable pour le développement économique et social de tout le territoire national algérien. Cependant, cette côte présente certains risques pour son exploitation et son développement, y compris les problèmes liés à l'érosion et les inondations côtières. Ces impacts peuvent augmenter avec l'élévation attendue du niveau marin (Jiménez et Sánchez-Arcilla, 1997). Qu'elle qu'en soit son degré de manifestation, l'élévation effective et attendue du niveau de la mer Méditerranée représente l'un des enjeux majeurs pour l'Algérie durant les années à venir. Face à ce nouvel épisode de hausse du niveau moyen des eaux marines méditerranéennes et l'amplification des phénomènes d'érosion et de submersions marines, la côte du golfe de Béjaïa, à l'instar de toutes les côtes du pays, est fragile. Une fragilité inscrite dans son évolution naturelle (topographie basse de la côte) et qui est accentuée par une occupation humaine excessive et parfois anarchique. Les principaux objectifs de cette étude ont les suivants : 1) Détecter et cartographier les zones côtières menacées par l'érosion et les submersions marines ; 2) évaluer la vulnérabilité de la côte du golfe de Béjaïa.

1. Présentation de la zone d'étude

La côte du golfe de Béjaïa est située dans la partie centre-est de la côte algérienne à 300 km à l'Est d'Alger. Il s'étend, entre le Cap Carbon à l'Ouest et le Cap Ziama Mansouria à l'Est, sur un linéaire côtier estimé à 70 km entre les parallèles 36°37'37"N - 36°46'32"N et les méridiens 5°00'55"E - 5°25'13"E (figure 1). Sa zone côtière est constituée par des plaines et des plages. Celles-ci prennent forme à partir de la rive droite de l'embouchure de l'oued Soummam à l'Ouest jusqu'aux falaises de Melbou à l'Est, et sont surplombées par une zone montagneuse dont les altitudes moyennes excèdent les 200 mètres. Le contact entre la chaîne de montagnes et les plaines se fait par des versants courts, abrupts et entrecoupés par des vallées plus ou moins larges, dont les altitudes varient entre 2 et 4 mètres. En quelques endroits, ces reliefs montagneux se rattachent directement à la mer Méditerranée à travers les caps et les falaises qui départagent la zone en de petites baies.

2. Données et Méthodes

Pour l'ensemble de la côte du golfe de Béjaïa, entre le cap Carbon et le cap ZiamaMansouria, la vulnérabilité, par ces deux aspects physique et socio-économique, a été déterminée sur la base de l'utilisation d'indices.

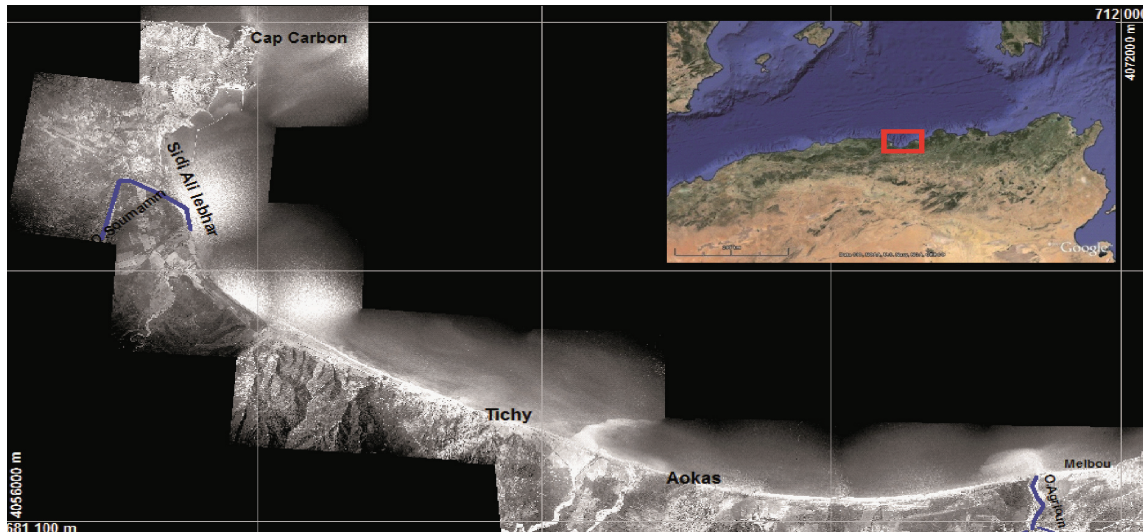


Figure 1. Localisation de la zone d'étude

2.1. Vulnérabilité physique

La méthodologie utilisée pour évaluer la vulnérabilité physique de la côte du golfe de Béjaïa, repose sur l'utilisation de sept (07) variables physiques dont six sont les mêmes que celles proposées par Hammar-Klose et Thieler (2001) qui ont modifié l'indice initial élaboré par Gornitz et al. (1994). Les six variables sont : la géomorphologie, la pente côtière, le taux relatif de l'élévation du niveau de la mer, les taux érosion/accrétion du trait de côte, l'amplitude moyenne de la marée et enfin l'amplitude moyenne de la houle significative. Quant au septième paramètre, il s'agit de l'élévation régionale moyenne de la côte. Ce dernier paramètre a été utilisé par Gornitz *et al.* (1991,1994) dans le calcul du tout premier ICV. Par la suite, nombreux sont ceux qui l'ont utilisé dans leurs études de la vulnérabilité. On cite notamment Diez *et al.* (2007) ; Kumar *et al.* (2010) ; Di Paola *et al.* (2011) ; Mahendra *et al.* (2011) ; Kumar et Kunte (2012) ; Addo (2013) ; Kunte *et al.* (2014).

Ainsi, l'indice côtier de vulnérabilité physique (ICV_{Physique}) a été calculé comme la racine carrée du produit des sept variables, citées plus haut, divisées par leur nombre total suivant la formule (Eq. 1):

$$ICV = \sqrt{\frac{a \times b \times c \times d \times e \times f \times g}{7}} \quad (\text{Eq. 1})$$

Avec, **a** = Géomorphologie ; **b** = Pente de la côte ; **c** = Elévation régionale côtière moyenne ; **d** = Taux relatif de l'élévation du niveau de la mer ; **e** = Taux (érosion/accrétion) du trait de côte ; **f** = Amplitude moyenne de la marée ; **g** = Amplitude moyenne de la houle.

Selon les valeurs de l' ICV_{Physique} , quatre classes de risque sont proposées : risque bas ($0 < ICV_{\text{Phys.}} \leq 20$) ; modéré ($20 < ICV_{\text{Phys.}} \leq 40$) ; élevé ($40 < ICV_{\text{Phys.}} \leq 60$) et très élevé ($ICV_{\text{Phys.}} > 60$).

2.2. Vulnérabilité socio-économique

L'indice côtier de vulnérabilité socio-économique ($ICV_{\text{Socio-économique}}$) est calculé comme étant la somme des valeurs de risque correspondant aux six variables, divisée par 30 puis multiplié par 100, suivant la formule (Eq. 2):

$$ICV_{\text{Socio-économique}} = \frac{a+b+c+d+e+f}{30} \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

Avec : a = communauté de population ; b = patrimoine culturel ; c = route ; d = voie ferrée ; e = occupation du sol ; f = désignation de conservation.

Une fois calculées, les valeurs de l' $ICV_{\text{Socio-économique}}$ sont regroupées en quatre classes de vulnérabilité : faible ($20 \leq ICV_{\text{éco.}} \leq 30$) ; modérée ($31 \leq ICV_{\text{éco.}} \leq 50$) ; élevée ($51 \leq ICV_{\text{éco.}} \leq 70$) et très élevée ($71 \leq ICV_{\text{éco.}} \leq 100$).

3. Résultats et Discussion

3.1. Valeurs de l'Indice côtier de Vulnérabilité physique (ICV_{Physique})

Une fois combinées, les sept variables physiques ont permis de calculer l'indice côtier de vulnérabilité physique pour toute la côte du golfe de Béjaïa. Les valeurs de cet indice obtenues le long de la côte du golfe de Béjaïa oscillent entre 3.53 et 81.83 avec une valeur moyenne de 42,68. La figure 2 ci-dessous montre la répartition géographique de la vulnérabilité de la côte du golfe de Béjaïa face à l'élévation potentiel du niveau de la mer. En dehors de la partie artificialisée (10,06 km) représentée par le port de Béjaïa, cette figure met en valeur trois classes de vulnérabilité : basse, élevée et très élevée. Les tronçons côtiers avec des valeurs d'ICV (Physique) inférieures à 5.67 sont rangés dans la catégorie de vulnérabilité basse. Ces tronçons côtiers qui représentent une longueur de 22.42 km (soit 32%) de la longueur totale de la côte étudiée (figure 2) englobent les formations rocheuses des caps Carbon, Bouak, Tichy et Aokas, et celles de la pointe noire et de Melbou. Cependant les tronçons côtiers ayant un ICV (Physique) supérieur à 46.9 sont considérés comme tronçons à vulnérabilité élevée et très élevée. Ces deux classes de vulnérabilité représentent 37,5 km (soit 53,6 %) de la longueur totale de la côte correspondant aux reliefs bas à l'exemple des plaines côtières de Souk El Tenine et Tichy et la basse vallée d'oued Soummam. La vulnérabilité élevée des ces reliefs est due principalement à leurs faibles pentes et à la nature lithologique des terrains facilement érodables (sols lâches).

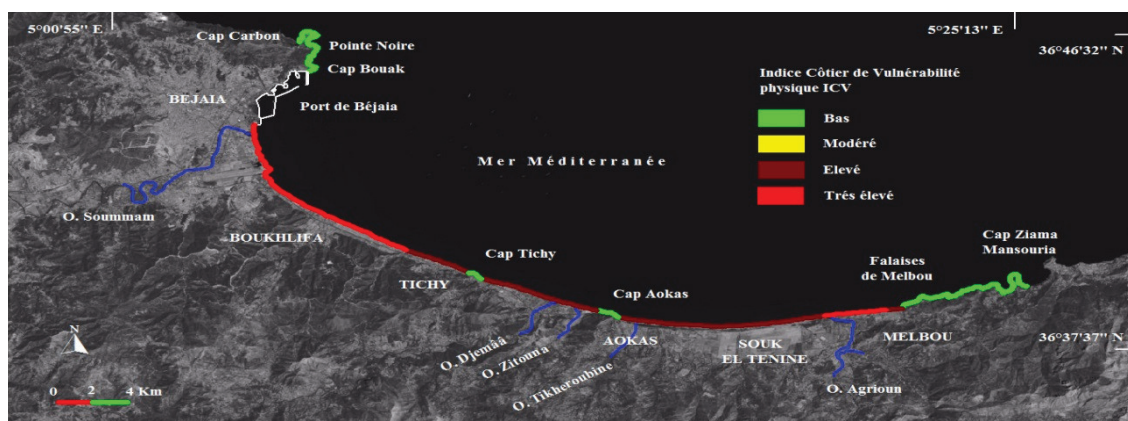


Figure 2. Carte des classes de vulnérabilité du littoral du golfe de Bejaia, relative à l'indice de vulnérabilité côtière (ICV_{Physique})

3.2. Valeurs de l'Indice côtier de vulnérabilité Socio-économique ($ICV_{\text{Socio-économique}}$)

L'ICV (socio-économique) a été calculé pour l'ensemble de la côte du Golfe de Bejaia. Les valeurs obtenues varient de 33 à 93 avec une valeur moyenne de 63. Ces résultats nous ont

permis de distinguer trois classes de vulnérabilité : modérée, élevée et très élevée (figure 3). Les étendues côtières du golfe de Bejaia classées comme vulnérabilité modérée représentent 39,19 km (soit 56%) de la longueur totale du littoral, couvrant des parties des caps Carbon, Tichy, Aokas et Ziama Mansouria ainsi que les falaises de Melbou. Ces parties de la côte sont caractérisées par une topographie difficile, qui reste dissuasive pour toute urbanisation et développement d'activités économiques. Cette classe de vulnérabilité concerne également une grande partie des plaines côtières peu peuplées couvrant la totalité des côtes de Boukhlifa, une partie du littoral de Tichy (entre le village de Vaccarro et l'embouchure de la rivière Djemaa), des portions d'Aokas où se trouvent les villages d'Azemmour et Thala Khaled, une importante partie du littoral de Souk El Tennine et une partie de la côte de Melbou (figure 3). Dans ces domaines, la présence humaine est limitée aux villages isolés construits autour d'anciennes exploitations agricoles. Ainsi, la faible urbanisation de ces zones explique leur faible vulnérabilité par rapport aux autres parties de la côte du golfe.

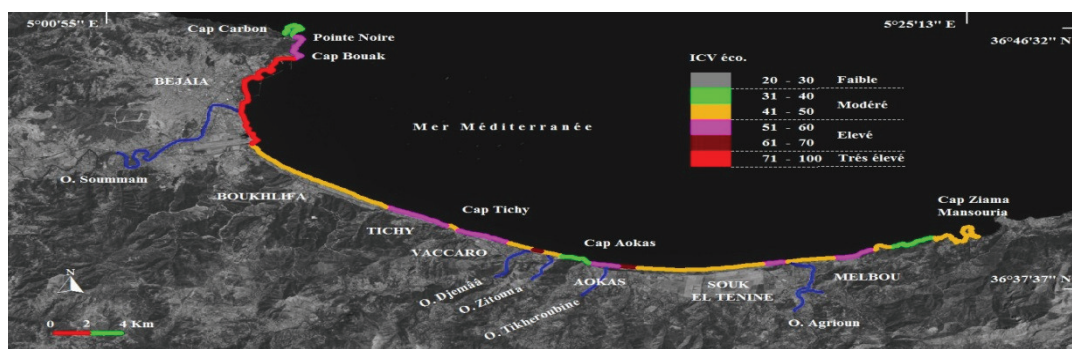


Figure 3. Carte des classes de vulnérabilité du littoral du golfe de Bejaia, relative à l'indice de vulnérabilité côtière (ICV_{socio-économique})

Cette étude a également révélé que 17,42 km du littoral du golfe de Bejaia présentent une forte vulnérabilité socio-économique face à l'érosion et aux inondations marines. Les zones concernées abritent quatre grandes villes (Tichy, Aokas, Souk El Tenine et Melbou) et la petite ville de Vaccaro. Ces zones sont fortement urbanisées et vont recevoir d'importants projets touristiques (ZET Aokas et ZET Souk El Tenine). Actuellement, elles rassemblent à elles seules l'essentiel des infrastructures de logement et de tourisme. Elles comportent aussi la quasi-totalité des équipements administratifs, de santé et d'éducation des communes respectives. Ainsi, le caractère urbain et touristique a fortement influencé la vulnérabilité de plusieurs parties de la côte du golfe. Pour les autres, c'est l'héritage historique et archéologique qui a pesé sur leur vulnérabilité.

Environ 14,39 km de la longueur totale du littoral étudié couvrant la partie côtière du centre urbain de Bejaia présentent une vulnérabilité élevée (figure 3). Cette très forte vulnérabilité est due à la présence d'un port pétrolier et commercial, d'un aéroport international et du complexe industriel de Cevital. Elle est également due à la présence de nombreuses unités de production qui forment la zone industrielle, d'un parc logement impressionnant, d'équipements de santé et d'éducation d'ordre wilayal ainsi que des infrastructures touristiques et routières très développées. Dans cette partie de la zone d'étude, le danger suscité par l'élévation du niveau de la mer ne concerne pas seulement le cadre bâti ou artificialisé. Il menace aussi de nombreux vestiges historiques ainsi que des zones humides à l'instar du lac de Tamelaht et la vallée de l'oued Soummam, classée site Ramsar en 2009.

Conclusion

La présente étude a révélé que 32,03 % du linéaire côtier du golfe de Béjaïa a une vulnérabilité physique faible, 30,97 % une vulnérabilité élevée et 22,62 % une vulnérabilité

très élevée face à l'élévation du niveau de la mer. Elle a également mis en évidence la vulnérabilité de ces composantes socio-économiques. Les valeurs de l'ICV_{socio-économique} le confirment bien. En effet, 56 % de la côte du golfe présente une vulnérabilité socio-économique modérée, 24,88 % une vulnérabilité élevée et 20,56 % une vulnérabilité très élevée. En termes de vulnérabilité globale, plusieurs secteurs de la zone étudiée ont vu leur sensibilité naturelle aggravée par la forte empreinte humaine à l'exemple de Béjaïa, Sidi Ali Lebher, Tichy (de part et d'autre du cap), Aokas (à l'Est immédiat du cap), Souk El Tenine (à l'ouest immédiat de l'embouchure de l'oued Agrioun) et Melbou (à l'entrée des falaises). Ces derniers correspondent à l'emplacement des principales villes de la côte. De par cette vulnérabilité tant physique que socio-économique, ces portions de la côte nécessitent une attention particulière et des actions concrètes et urgentes de protection et d'adaptation.

Bibliographie

- Addo K., 2013 : Assessing coastal vulnerability index to climate change: the case of Accra - Ghana, Proceedings 12th International Coastal Symposium (Plymouth, England). *Journal of Coastal Research*, **65**, 1892-1897.
- Allen J.C. and Komar P.D., 2006 : Climate controls on US west coast erosion processes. *Journal of Coastal Research*, **22**, 511-529.
- Church J.A., and White N.J., 2006 : A 20th century acceleration in global sea-level rise. *Geophysical Research Letters* **33**, L01602. doi: 10.1029/2005GL024826.
- Di Paola G., Iglesias J., Rodriguez G., Benassai G., Aucelli P., Pappone G., 2011 : Estimating coastal vulnerability in a meso-tidal beach by means of quantitative and semi-quantitative methodologies. *Journal of Coastal Research*, 303-308.
- Diez P.G., Perillo G.M.E. and Piccolo M.C., 2007 : Vulnerability to sea-level rise on the coast of the Buenos Aires Province. *Journal of Coastal Research*, **23(1)**, 119-126.
- Douglas B.C. and Crowell M., 2000 : Long-term shoreline position prediction and error propagation. *Journal of Coastal Research*, **16 (1)**, 145-152.
- Gornitz V.M., White T.W. and Cushman R.M., 1991 : Vulnerability of the U.S. to future sea-level rise. *Coastal Zone '91 (ASCE)*, 2354-2368.
- Gornitz V.M., Daniels R.C., White T.W., Birdwell K.R., 1994 : The development of a coastal risk assessment database: Vulnerability to sea level rise in the U.S. southeast. *Journal of Coastal Research*, **12**, 327-338.
- Hammar-Klose E.S. and Thieler E.R., 2001 : Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: A Preliminary Database for the U.S. Atlantic, Pacific, and Gulf of Mexico Coasts: *U.S. Geological Survey, Digital Data Series DDS-68, 1 CD-ROM*.
- IPCC, 2014 : *Climate Change 2014 : Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.
- IPCC, 2007 : *Climate Change 2007 : Synthesis Report*. In: Core Writing Team, Pachauri R.K., Reisinger A. (Eds.), Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p.
- Jiménez J.A., Sánchez-Arcilla A., 1997 : A conceptual model for barrier coasts behaviour at decadal scale: Application to the Trabucador Bar. *Proceedings Coastal Dynamics, (ASCE)*. 913-922.
- Kumar T.S., Mahendra R.S., Nayak S., Radhakrishnan K., Sahu K.C., 2010 : Coastal Vulnerability Assessment for Orissa State, East Coast of India. *Journal of Coastal Research*, **26**, 523-534.
- Kumar A.A., Kunte P.D., 2012 : Coastal vulnerability assessment for Chennai, east coast of India using geospatial techniques. *Natural Hazards*, **64**, 853- 872.
- Kunte P.D., Nitesh J., Utkarsh M., Kotha M., Andrew S.H., Alexandre S.G., 2014 : Multi-hazards Coastal Vulnerability Assessment of Goa, India, using Geospatial Techniques. *Ocean Coast. Manage*, **95**, 264-281.
- Mahendra R.S., Mohanty P.C., Bisoyi H., Kumar T.S., Nayak S., 2011 : Assessment and management of coastal multi-hazard vulnerability along the Cuddalore-Villupuram, east coast of India using geospatial techniques. *Ocean Coast Manage*, **54**, 302-311.
- Strohecker K., 2008 : *World sea levels to rise 1.5 m by 2100* : scientists, an Environmental News Network and Reuter's publication. Available: <http://www.enn.com/wildlife/article/34702> (Accessed on 24 July 2008).

RECONSTRUCTION DE L'ÉVOLUTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE REÇU EN SURFACE EN EUROPE OCCIDENTALE SUR LA PÉRIODE 1900-2014 À L'AIDE DU MODÈLE ATMOSPHÉRIQUE RÉGIONAL MAR

WYARD C.¹, BELLEFLAMME A.¹, DOUTRELOUP S.¹, ERPICUM M.¹, FETTWEIS X.¹

¹Laboratoire de Climatologie et de Topoclimatologie, Université de Liège, Quartier Village 4, Clos Mercator 3, 4000 Liège, Belgique (Coraline.Wyard@ulg.ac.be)

Résumé – De nombreuses études ont montré que le rayonnement solaire avait subi de grandes variations au cours de la deuxième moitié du 20^e siècle en raison de la variation de la nébulosité et de la quantité d'aérosols dans l'atmosphère. Quant à son évolution antérieure, elle est très difficile à retracer étant donné la rareté des observations avant 1950. Des simulations couvrant les années 1900-2014 ont ainsi été réalisées sur la Belgique à l'aide du Modèle Atmosphérique Régional MAR à une résolution spatiale de 5 km afin de reconstruire l'évolution du rayonnement solaire. Le modèle a été forcé à ses frontières par quatre réanalyses : les ERA-interim (1979-2014) complétées par les ERA40 (1958-1978), les NCEP/NCAR-v1 (1948-2014), les ERA-20C (1900-2010) et les 20CRV2C (1900-2010). Cette étude montre que les réanalyses peuvent générer des tendances divergentes alors qu'elles assimilent des observations et sont supposées représenter exactement le même climat.

Mots-Clés : Belgique, rayonnement solaire, nuages, modèle climatique régional

Abstract - Reconstruction of the 1900-2014 surface solar radiation evolution in Western Europe using the regional climate model MAR. Many studies show that the surface solar radiation has undergone large variations over the second half of the 20th century as a result of variations in cloud cover and aerosol loading in the atmosphere. However, it is difficult to build strong conclusions before the 1950s because of the observations scarcity. The evolution of the surface solar radiation has been reconstructed over 1900-2014 using the regional model MAR (« Modèle Atmosphérique Régional ») in Belgium. Boundary conditions were provided by four reanalysis products : the ERA-interim (1979-2014) completed by the ERA40 (1958-1978), the NCEP/NCAR-v1 (1948-2014), the ERA-20C (1900-2010) and the 20CRV2C (1900-2010). Results show that the reanalyses can generate divergent trends while they assimilate observations and are supposed to represent the same climate.

Keywords : Belgium, solar radiation, clouds, regional climate model

Introduction

Le rayonnement solaire reçu à la surface de la Terre (SSR) régit un grand nombre de processus qui permettent à la vie d'exister sur notre planète. Des variations de ce rayonnement peuvent avoir des impacts sur ces processus et affecter notre environnement (Wild, 2009). D'autre part, dans un monde de plus en plus demandeur de sources d'énergie non-émettrices de carbone, on a vu, au cours de cette dernière décennie, l'implantation d'un nombre croissant de centrales solaires et de panneaux photovoltaïques. Cependant, leur rendement dépend, entre autre, du rayonnement solaire perçu de sorte qu'il est crucial de connaître sa variation pour leur développement et leur gestion (Jerez *et al.*, 2015).

Des variations significatives de SSR ont été observées dans le passé. La période 1950-1980 a ainsi connu une diminution globale de SSR tandis qu'une récupération partielle a pu être observée par la suite en Europe et en Amérique du Nord (Wild, 2009 ; De Bock *et al.*, 2014). Ces variations ont été attribuées à des fluctuations de la nébulosité combinées à des variations de la quantité d'aérosols présents dans l'atmosphère. Les nuages bas et les nuages moyens ont en effet un pouvoir réfléchissant sur le rayonnement solaire tandis que les aérosols capturent et/ou réfléchissent le rayonnement solaire (effet direct). En outre, les aérosols peuvent modifier les propriétés des nuages (effet indirect) en changeant le nombre de noyaux de condensation ce qui affecte leur albédo et leur durée de vie. Étant donné la complexité de ces phénomènes et le manque d'observations robustes, il est ainsi très difficile de quantifier la part de chacun de ces facteurs dans la variation du SSR (Wild, 2009).

La période 1930-1950 aurait connu plus de SSR que la période qui l'a suivie en Europe (Wild, 2009). Cependant, la rareté des observations avant 1950 ne permet pas d'établir de conclusion robuste ni d'en établir les causes.

Ainsi, les modèles climatiques peuvent s'avérer être des outils utiles pour simuler les variations passées et futures du SSR de même que pour en quantifier les causes. Plus particulièrement, les modèles climatiques régionaux permettent d'effectuer des simulations à hautes résolutions spatiales sur des régions bien précises. Par exemple, de par leur haute résolution spatiale, ils permettent la modélisation de phénomènes complexes et spatialement restreints tels que la formation des nuages, leurs propriétés optiques et leurs interactions avec le rayonnement solaire.

Dans cette étude, nous étudierons les variations du SSR en Belgique au cours de la période 1900-2014 en utilisant le Modèle Atmosphérique Régional (MAR) forcé par diverses réanalyses. Nous nous focaliserons sur le rôle potentiel des nuages dans ces variations.

Après une brève description des simulations réalisées avec MAR, les résultats de la comparaison du MAR avec des observations seront exposés. Les tendances seront ensuite analysées et critiquées avant de conclure.

1. Simulations climatiques et données d'évaluation

Les simulations climatiques ont été réalisées en utilisant la version 3.7 du MAR. Par rapport à la version 3.6 utilisée par Wyard *et al.* (2016), la version 3.7 réduit les biais de températures de 20% et simule plus de nuages. Cependant, les quantités d'aérosols atmosphériques y sont constantes de sorte que l'effet direct et indirect des aérosols sur le rayonnement solaire n'est pas pris en compte. C'est pourquoi, nous nous focaliserons uniquement sur l'influence de la nébulosité sur le SSR. Dans cette étude, MAR a été forcé à ses frontières par quatre réanalyses différentes : les ERA-interim (1979-2014) (Dee *et al.*, 2011) complétées par les ERA40 (1958-1978) (Uppala *et al.*, 2005), les NCEP/NCAR-v1 (1948-2014) (Kalnay *et al.*, 1996), les ERA-20C (1900-2010) (Poli *et al.*, 2016), les 20CRV2C (1900-2010) (Compo *et al.*, 2011). Les deux dernières réanalyses sont des produits très récents qui ont jusqu'à présent été peu utilisés dans la littérature. Cette étude permettra ainsi d'évaluer leur fiabilité.

Les mesures de SSR nécessaires à l'évaluation du MAR proviennent de la Global Energy Balance Archive (GEBA) (Gilgen *et al.*, 1998). La plus longue série temporelle à notre disposition est celle d'Uccle (50.80°N ; 4.36°E) et couvre la période 1966-2007. Des observations de nébulosité provenant de Belgocontrol pour la station de Bierset (50.63°N ; 5.45°E) ont également été utilisées. La période commune la plus longue à ces deux sets d'observations s'étend de 1966 à 2007. C'est pour cette raison que cette période a été retenue comme période d'évaluation.

2. Résultats et discussion

2.1. Évaluation des SSR simulées par MAR et par les réanalyses

Une évaluation complète des températures, précipitations et hauteurs de neige modélisées par MAR est présentée dans Wyard *et al.* (2016). Dans cette étude, nous évaluons le SSR et la nébulosité simulés par MAR forcé par les ERA40/ERA-interim (appelé MAR-ERA par la suite), par MAR forcé par les NCEP/NCAR-v1 (MAR-NCEP1), par MAR forcé par les ERA-20C (MAR-ERA-20C), par MAR forcé par les 20CRV2C (MAR-20CRV2C). Nous évaluons aussi le SSR et la nébulosité modélisés par les réanalyses brutes. Les variables modélisées ont

été comparées aux mesures de SSR de Uccle et aux observations de nébulosité de Bierset, réalisées au cours de la période 1966-2007.

Les résultats montrent que le SSR modélisé par MAR a de meilleurs coefficients de détermination (R^2) et des biais moyens annuels (BM) bien plus réduits que ceux issus des réanalyses brutes (Tableau 1). Les R^2 du MAR oscillent entre 20 % (MAR-NCEP1) et 51 % (MAR-ERA) tandis que ceux des réanalyses brutes présentent des R^2 allant de 0.03 % à 33 %. Les BM du MAR vont de $+0.2 \text{ W m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (MAR-NCEP1) à $+4.9 \text{ W m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (MAR-ERA) alors que les BM des réanalyses brutes vont de $+34.4 \text{ W m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (20CRV2C) à $+68.8 \text{ W m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ (NCEP/NCAR-v1). Ces biais sont constants dans le temps.

Tableau 1: Comparaison entre le SSR modélisé par le MAR et les réanalyses avec des mesures couvrant la période 1966-2007 : coefficient de détermination (R^2), écarts moyens quadratiques (RMSE), biais moyen annuel (BM), écart-type (σ), moyenne annuelle.

	R^2 (%)	RMSE ($\text{W m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)	BM ($\text{W m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)	σ ($\text{W m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)	Moyenne annuelle ($\text{W m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$)
OBS	-	-	-	7.0	111.1
MAR-ERA	51	6.9	+4.9	5.4	116
MAR-NCEP1	20	7.7	+0.2	7.7	111.3
MAR-ERA-20C	45	6.3	+3.6	4.4	114.7
MAR-20CRV2C	43	5.5	+1.7	4.8	112.9
ERA40/ERA-interim	0.03	38.8	+55.4	39.6	166.5
NCEP/NCAR-v1	18	6.8	+68.8	5.3	179.9
ERA-20C	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
20CRV2C	33	11.0	+34.4	6.2	145.6

En ce qui concerne la nébulosité (statistiques non montrées ici), les R^2 ne présentent pas de différences entre MAR et les réanalyses brutes, n'atteignant que 50 % pour MAR-ERA-20C et ERA-20C. Les BM sont dans tous les cas légèrement positifs et atteignent les $+13.4 \%$ pour MAR-NCEP1. Comme souligné par plusieurs études, ces biais dans la nébulosité pourraient provenir de la difficulté rencontrée par les modèles à simuler la couverture nuageuse notamment les nuages convectifs (Träger-Chatterjee *et al.*, 2010 ; Wyard *et al.*, 2016). En outre, la fiabilité des observations de nébulosité est aussi discutable étant donné qu'elles sont soumises à la subjectivité de l'observateur humain scrutant le ciel depuis le sol (Wild, 2009).

Les biais de SSR sont probablement dus aux difficultés qu'ont les modèles à simuler la nébulosité, ses propriétés et ses interactions avec le rayonnement solaire. Enfin, une partie des biais est sûrement imputable à la non-prise en compte des aérosols dans le modèle.

2.2. Variations de SSR et de la couverture nuageuse simulés par MAR

Les variations décadales de SSR ont été mises en évidence en filtrant les SSR modélisés par MAR à l'aide d'un filtre gaussien de 11 ans (Figure 1(d)). Afin de mettre en relation les variations de SSR et de nébulosité, les fractions de nuages à trois niveaux d'altitudes (850 hPa, 700 hPa et 500 hPa correspondant aux nuages bas (LCC), moyens (MCC) et hauts (HCC)) ont également été filtrées (Figure 1 (a)-(b)-(c)).

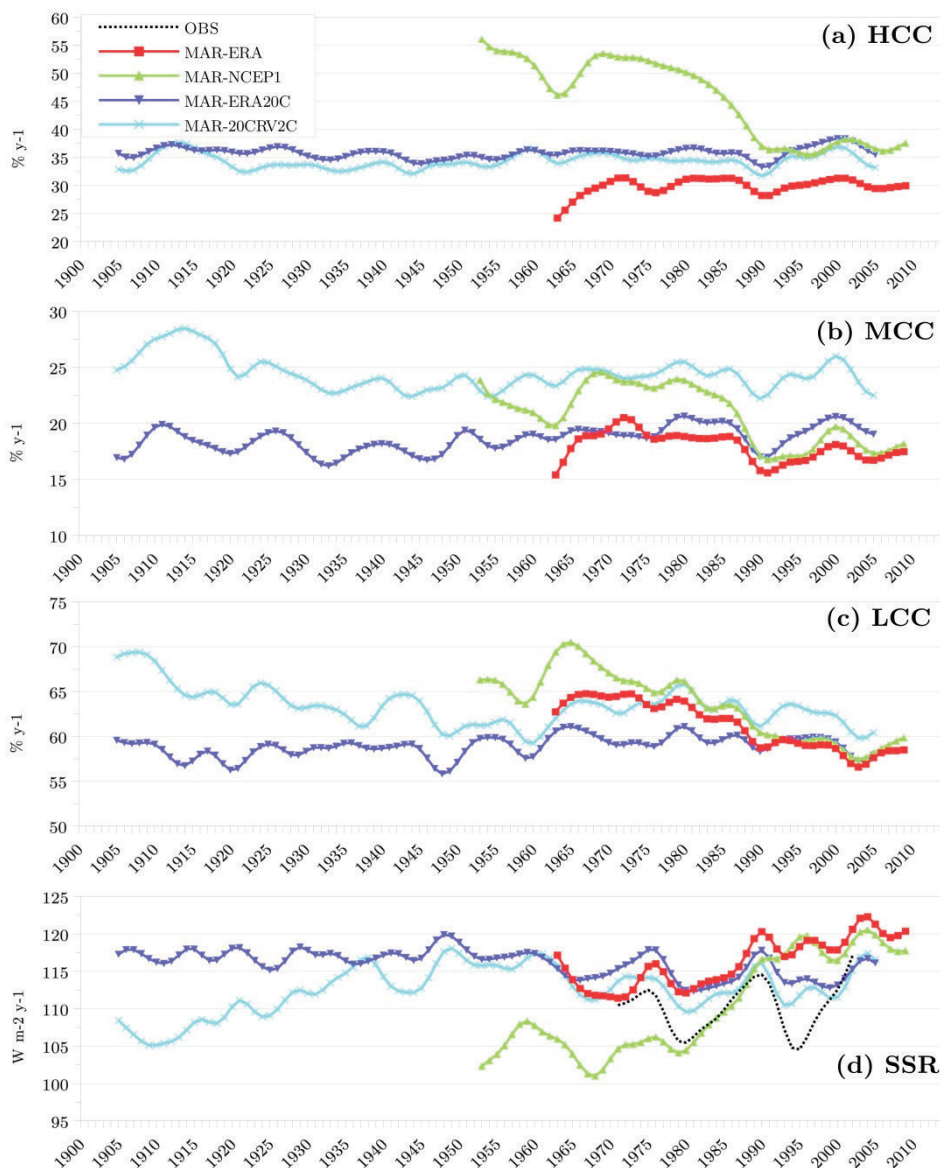


Figure 1. Évolution au cours de la période 1900-2014 des séries temporelles filtrées à l'aide d'un filtre gaussien de 11 ans de (a) la couverture de nuages hauts (HCC), (b) la couverture de nuages moyens (MCC), (c) la couverture de nuages bas (LCC), (d) le rayonnement solaire incident à la surface (SSR), modélisés par MAR.

MAR-ERA et MAR-NCEP1 montrent une tendance à des SSR stables entre les 1960s et les 1980s (Figure 1(d)) ce qui coïncide avec la période de diminution globale de SSR décrite dans la littérature. L'IRM (2015) a mis en évidence une diminution significative du SSR à Uccle, de l'ordre de -6.3 % au cours de la période 1951-1984. Ils attribuent cette tendance à une augmentation soutenue des émissions d'aérosols anthropogéniques dans l'atmosphère. Or, nos résultats ne montrent pas cette diminution de SSR étant donné qu'on ne tient pas compte de l'effet direct et indirect des aérosols sur le rayonnement solaire. Cependant, nos résultats montrent une diminution de la couverture naturelle de nuages bas tandis que la couverture de

nuages moyens est stable (Figure 1(b)-(c)). Ceci confirme que le facteur dominant ayant causé la diminution observée du SSR au cours de cette période est l'augmentation des émissions d'aérosols.

MAR-ERA et MAR-NCEP1 montrent aussi une tendance à une augmentation de SSR à partir des 1980s ce qui coïncide avec la période de récupération partielle de SSR observée dans certaines parties du monde dont la Belgique. De Bock *et al.* (2014) et IRM (2015) ont en effet mis en évidence une augmentation significative de SSR à Uccle de l'ordre de $+4 \pm 1$ % par décennie. Parallèlement, ils ont aussi mis en évidence une diminution significative de la profondeur optique des aérosols à Uccle entre 1985 et 2014 de l'ordre de -8 ± 5 % par décennie avec une stabilisation après 2002. Cette diminution découle probablement de la diminution des émissions de carbones noirs et sulfurés après 1989 (date d'entrée en vigueur du protocole de Montréal). Nos résultats montrent une diminution de la couverture naturelle de nuages bas et de nuages moyens au cours de la même période ce qui corrobore l'étude d'Eastman et Warren (2013) qui a aussi mis en évidence une diminution de la nébulosité en Europe de l'Ouest entre 1971 et 2009. Ceci suggère donc que la période de récupération de SSR observée en Belgique résulte de la combinaison de la diminution des émissions d'aérosols et de celle de la couverture des nuages bas et moyens. Toutefois, après 2002, la diminution de la nébulosité serait devenue le facteur dominant. Matteos *et al.* 2014 ont tiré des conclusions similaires en Espagne.

Enfin, ni MAR-ERA20C ni MAR-20CRV2C ne montrent les tendances décrites ci-dessus, que ce soit dans le SSR ou dans les nuages. Cela peut s'expliquer par le fait que seules les pressions de surface et les vents sont assimilés dans les réanalyses ERA-20C et 20CRV2C.

2.3. Origine des changements de couverture nuageuse simulés par le MAR

Pour expliquer les tendances dans la couverture des trois types de nuages (bas, moyens et haut) du MAR mises en évidence au point 2.2, nous avons analysé le comportement des températures, de l'humidité spécifique et relative dans les réanalyses brutes de forçage aux trois niveaux d'altitudes correspondant aux différents étages des nuages dans le MAR (graphiques non-montrés ici). Cette analyse montre une diminution de l'humidité relative de l'air ce qui aurait inhibé la formation de nuages. Cependant, les résultats montrent que cette diminution de l'humidité relative n'est pas due à une diminution de l'humidité spécifique de l'air mais une augmentation de la température de l'air aux différents niveaux de la troposphère.

Conclusion

Le but de cette étude était d'étudier l'évolution du SSR en Belgique au cours de la période 1900-2014. Pour ce faire, des simulations ont été réalisées avec le modèle MAR version 3.7 forcé à ses frontières par quatre réanalyses : les ERA-interim (1979-2014) complétées par les ERA40 (1958-1978), les NCEP/NCAR-V1 (1948-2014), les ERA-20C (1900-2010) et les 20CRV2C (1900-2010). Comme MAR ne tient pas compte des aérosols, seul l'effet des nuages sur le SSR a été investigué.

La comparaison des SSR modélisés par MAR et par les réanalyses brutes à des mesures de SSR réalisées à Uccle au cours de la période 1966-2007 a montré que MAR fournit de bien meilleurs résultats que les réanalyses. Les biais subsistants dans les SSR modélisés par MAR ont été attribués à une mauvaise représentation des nuages (notamment les nuages convectifs) et de leurs propriétés mais aussi à la non-prise en compte des aérosols. L'analyse des tendances de SSR et des fractions de nuages bas, moyens et hauts, lissés avec un filtre gaussien de 11 ans, a mis en évidence que seuls MAR-ERA et MAR-NCEP1 étaient capables de simuler les grandes tendances observées dans le SSR. MAR-ERA-20C et MAR-20CRV2C n'ont montré aucune de ces tendances sans doute parce que les réanalyses ERA-20C et

20CRV2C n'assimilent que la pression de surface et le vent. Ainsi, nous n'avons pas pu mettre en évidence des tendances robustes avant les 1950s. Les résultats ont aussi montré qu'en Belgique, l'augmentation de SSR à partir des 1980s mais surtout à partir des 2000s pouvait être en grande partie expliquée par une diminution de la couverture de nuages bas et moyens. Après une analyse des températures, humidité spécifique et relative de l'air à différents niveaux de la troposphère dans les réanalyses de forçage, nous expliquons cette diminution de la nébulosité par une diminution de l'humidité relative engendrée par un réchauffement de la troposphère.

Bibliographie

Compo G.P *et al.*, 2011 : The Twentieth Century Reanalysis Project. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137(654)**, 1-28. doi:10.1002/qj.776.

De Bock V *et al.*, 2014 : Relations between erythemal UV dose, global solar radiation, total ozone column and aerosol optical depth at Uccle, Belgium. *Atmos. Chem. Phys.*, **14(22)**, 12251-12270. doi:10.5194/acp-14-12251-2014.

Dee D.P *et al.*, 2011 : The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **137(656)**, 553-597. doi:10.1002/qj.828.

Eastman R and Warren S G, 2013 : A 39-yr survey of cloud changes from land stations worldwide 1971-2009: Long-term trends, relation to aerosols, and expansion of the tropical belt. *J. Clim.*, **26(4)**, 1286-1303. doi:10.1175/JCLI-D-12-00280.1.

Gilgen H, Wild M, and Ohmura A, 1998 : Means and trends of shortwave irradiance at the surface estimated from global energy balance archive data. *J. Clim.*, **11(8)**, 2042-2061. doi:10.1175/1520-0442-11.8.2042.

IRM, 2015 : Vigilancia Climatique. Edité par D. Gellens, Institut Royal Météorologique de Belgique, Bruxelles.

Jerez S *et al.*, 2015 : The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. *Nature communications*, **6**. doi:10.1038/ncomms10014.

Kalnay E *et al.*, 1996 : The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **77(3)**, 437-471. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.*

Mateos D *et al.*, 2014 : Quantifying the respective roles of aerosols and clouds in the strong brightening since the early 2000s over the Iberian Peninsula. *J. Geophys. Res. Atmos.*, **119**, 10382-10393. doi:10.1002/2014JD022076.

Poli P *et al.*, 2016 : ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century. *J. Clim.*, **29(11)**, 4083-4097. doi:10.1175/JCLI-D-15-0556.1.

Träger-Chatterjee C *et al.*, 2010 : Evaluation of ERA-40 and ERA-interim re-analysis incoming surface shortwave radiation datasets with mesoscale remote sensing data. *Meteorol. Zeitschrift*, **19(6)**, 631-640. doi:10.1127/0941-2948/2010/0466.

Uppala S.M *et al.*, 2005 : The ERA-40 re-analysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **131(612)**, 2961-3012. doi:10.1256/qj.04.176.

Wild M., 2009 : Global dimming and brightening: A review. *J. Geophys. Res.*, **114**, D00D16. doi:10.1029/2008JD011470.

Wyard C., Scholzen C., Fettweis X., Van Campenhout J., and François L., 2016 : Decrease in climatic conditions favouring floods in the south-east of Belgium over 1959-2010 using the regional climate model MAR. *Int. J. Climatol.* doi:10.1002/joc.4879.

ÉVALUATION DE LA CAPACITÉ DU MODÈLE ATMOSPHÉRIQUE RÉGIONAL (MAR) À SIMULER LA SAISON DES PLUIES EN AFRIQUE INTERTROPICALE

DOUTRELOUP S. ⁽¹⁾, WYARD C. ⁽¹⁾, BELLEFLAMME A. ⁽¹⁾, FRANCOIS L. ⁽²⁾, FETTWEIS X. ⁽¹⁾, ERPICUM M. ⁽¹⁾

¹Laboratoire de Climatologie et Topoclimatologie (LCT), Université de Liège, 3, Clos Mercator, 4000 Liège, Belgique [s.doutreloup@ulg.ac.be]

²Unité de Modélisation du Climat et des Cycles Biogéochimiques (UMCCB), Département Astrophysique Géophysique et Océanographie, Université de Liège, Belgique

Résumé – En Afrique intertropicale, le climat est essentiellement caractérisé par les quantités de précipitations et leur régime annuel. Ces précipitations et leur évolution au cours de la période 1970-1999 ont été modélisées à l'aide du Modèle Atmosphérique Régional (MAR), développé à l'ULg, en le forçant par les réanalyses NCEP1 ainsi que par les sorties de trois modèles globaux (GCM) de la base de données CMIP5. Ces simulations ont ensuite été comparées aux observations maillées du Climate Research Unit (CRU). Il ressort de nos investigations que la simulation du modèle MAR forcé par les réanalyses NCEP1 parvient à mieux reproduire les lames d'eau et leur régime annuel dans les régions semi-arides qu'en régions équatoriales. En revanche, les simulations du MAR forcé par les sorties des GCM sont peu voire très peu satisfaisantes sur l'ensemble du domaine intertropical tant au niveau des quantités que de la saisonnalité des précipitations.

Mots-clés : Précipitations, régime des pluies, Modèle Atmosphérique Régional, zone intertropicale, Afrique

Abstract : Evaluation of model "Modèle Atmosphérique Régional" (MAR) capacity to simulate rainfall season in Intertropical Africa.

In Intertropical Africa, climate is essentially characterized by the amount of precipitation and its annual regime. These precipitations and their evolution during the period 1970-1999 are simulated thanks to the Regional Atmospheric Model (MAR), developed at the ULg, and forced by the NCEP1 reanalyses and by the outputs of three global models (GCM) of the CMIP5 database. These MAR simulations are compared to the gridded data of the Climate Research Unit (CRU). It is clear from our investigations that the simulation of the MAR model forced by the NCEP1 reanalyses is better reproducing the quantities as well as the annual rainfall regime in the semi-arid regions than in equatorial regions. On the other hand, simulations of the MAR forced by the outputs of the GCMs are globally unsatisfactory throughout the intertropical domain in terms of quantities as well as the seasonality of precipitation.

Keywords : precipitations, rainfall season, climate model, Intertropical Africa

Introduction

Le projet AFRIFORD, financé par la politique scientifique fédérale belge, a pour mission de comprendre la manière dont les changements climatiques du passé lointain (Holocène moyen et dernier maximum glaciaire) ont modifié la distribution et la composition des forêts tropicales d'Afrique Centrale. C'est dans ce cadre que le Laboratoire de Climatologie et de Topoclimatologie de l'Université de Liège (LCT) est chargé de simuler le climat sur l'Afrique intertropicale, d'abord sur la période récente (1970-1999), ensuite sur les périodes passées, c'est-à-dire il y a environ 6 000 ans (Holocène moyen) et 21 000 ans (dernier maximum glaciaire).

Les simulations réalisées dans le cadre de cette recherche ont été effectuées à l'aide du Modèle Atmosphérique Régional (MAR) développé par le LCT dans le but d'étudier les régions polaires (Fettweis *et al.*, 2016) ou encore les chutes de neige dans des régions plus tempérées (Wyard *et al.*, 2016). Le modèle MAR a également déjà été utilisé avec succès par Gallée *et al.* (2004) pour simuler le climat de l'Afrique de l'Ouest et plus particulièrement la saisonnalité des pluies.

La saisonnalité des pluies en Afrique intertropicale est directement liée au déplacement de la Zone de Convergence Intertropicale (ZCIT) formée par de la convection d'air provenant des tropiques. La ZCIT fluctue de part et d'autre de l'équateur géographique, et se retrouve en

moyenne à sa position la plus septentrionale le 21 juin et à sa position la plus méridionale le 21 décembre. De nombreux cumulonimbus sont présents au sein de la ZCIT et apportent souvent des averses intenses. La quantité de précipitations observée à une station dépend donc de la position de cette station sur le trajet de la ZCIT : de manière schématique, plus on s'éloigne de l'équateur plus la saison des pluies sera courte et la quantité de précipitations observée annuellement sera faible ; au contraire, plus on se rapproche de l'équateur, plus les précipitations seront présentes tout au long de l'année avec cependant des maxima observés lors des passages saisonniers de la ZCIT.

L'objectif de cette étude est donc de vérifier dans quelle mesure le MAR parvient à simuler cette saisonnalité des pluies en fonction de l'éloignement à l'équateur uniquement sur la période de référence récente qui s'étend pour notre étude de 1970 à 1999.

1. Description des modèles et données d'observations

Le MAR est un modèle régional climatique. Pour fonctionner, il a besoin d'être forcé aux frontières de son domaine d'intégration par des sorties d'un modèle global (GCM pour General Circulation Model) dont les réanalyses. Quatre GCMs ont été utilisés comme forçage, leur descriptif est repris au tableau 1. Il s'agit des réanalyses NCEP-NCAR1, et de trois GCMs provenant de la base de données CMIP5, à savoir les modèles CNRM-CM5, FGOALS-g2 et MRI-CGCM3.

Pour être utilisables par le MAR, les GCMs doivent respecter certaines contraintes. Ils doivent obligatoirement livrer les composantes U et V du vent, la température et l'humidité de l'air sur un minimum de 10 niveaux verticaux, la pression de surface, les températures de surface de la mer et des continents, et enfin, ces variables doivent être disponibles au pas de temps de 6 heures. Afin de respecter ces critères sur la période récente et sur les deux périodes du passé lointain, seulement 3 GCMs de la base de données CMIP5 ont pu être retenus. Nous nous limiterons donc également à ces 3 GCMs pour la période récente.

Tableau 1. Caractéristiques des GCMs utilisés pour forcer le MAR

Modèle	Résolution horizontale	Résolution verticale	Références
NCEP-NCAR1 (appelé ci-après NCEP1)	2.5°x2.5°	28 niveaux	Kalnay & al., 1996
CNRM-CM5 (appelé ci-après CNRM)	1.4° x 1.4°	31 niveaux	Volodire & al., 2011
FGOALS-g2 (appelé ci-après FGOALS)	2.8° x 2.8°	26 niveaux	Li & al., 2013
MRI-CGCM3 (appelé ci-après MRI)	1.12° x 1.12°	48 niveaux	Yukimoto & al., 2012

Le domaine couvert par les simulations du MAR s'étend du tropique du Cancer au tropique du Capricorne et de 30°W à 60°E (figure 1). Sa résolution horizontale est de 50 km, il contient 186 x 122 pixels horizontaux et 25 niveaux verticaux.

De manière générale, le continent africain est peu pourvu en stations d'observations synoptiques. Cependant, afin d'évaluer la qualité des simulations du MAR, nous utilisons les données d'observations maillées du Climate Research Unit (CRU), disponibles à la résolution horizontale de 0.5° (Harris *et al.*, 2014) sur la période 1970-1999. Outre que cette résolution correspond approximativement à la résolution du MAR, l'utilisation de données d'observations maillées permet également une comparaison plus aisée entre les simulations du MAR car elle est continue spatialement et temporellement. Il faut cependant être conscient

que les données du CRU ne sont pas exemptes de défauts étant donné la faiblesse des réseaux de mesures dans cette partie de la planète.

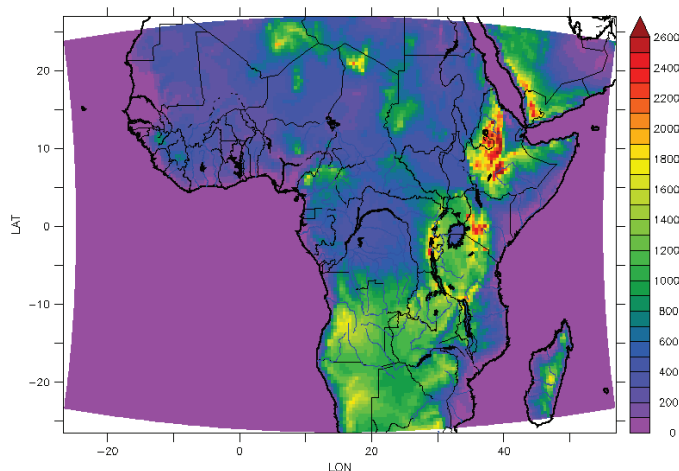


Figure 1. Domaine d'étude et topographie (en couleur et en mètre) du MAR

2. Résultats et discussions

Afin de vérifier la répartition des précipitations modélisées en Afrique intertropicale, quatre zones climatiques spécifiques ont été sélectionnées (figure 2) à l'intérieur desquelles les quantités de précipitations observées et simulées sont intégrées : la zone Z1 est centrée sur le bassin du Congo, Z2 est centrée sur la République Centrafricaine, Z3 est située le long de la côte du Ghana et de la Côte d'Ivoire, et enfin Z4, située plus au nord que Z3, est centrée sur le Burkina Faso.

Contrairement aux analyses réalisées sur des stations ponctuelles, le recours à ces zones témoins permet de s'affranchir en partie des défauts locaux liés au manque de données d'observation dans le CRU étant donné que ces zones agrègent les précipitations de plusieurs stations météorologiques. Notons également que ces zones possèdent volontairement une plus longue extension longitudinale que latitudinale afin de mieux tenir compte du passage de la ZCIT.

Pour chaque zone, les cumuls moyens mensuels de précipitations simulés sur la période 1970-1999 par les différents modèles sont comparés avec les valeurs fournies par le CRU. La capacité de chaque modèle à simuler à la fois la variabilité annuelle mais aussi les quantités moyennes mensuelles des précipitations ont ensuite été analysées graphiquement.

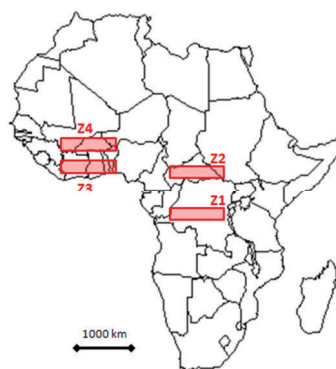


Figure 2. Localisation des 4 zones témoins

2.1. Zone 1 : le bassin du Congo

Les données du CRU (figure 3) montrent que cette région reçoit des précipitations toute l'année, avec un premier minimum de 80 mm en janvier et un second de 90 mm en juillet. Les mois d'avril-mai et octobre indiquent un maximum chacun, respectivement de 160 mm et 230 mm, correspondant aux deux passages de la ZCIT.

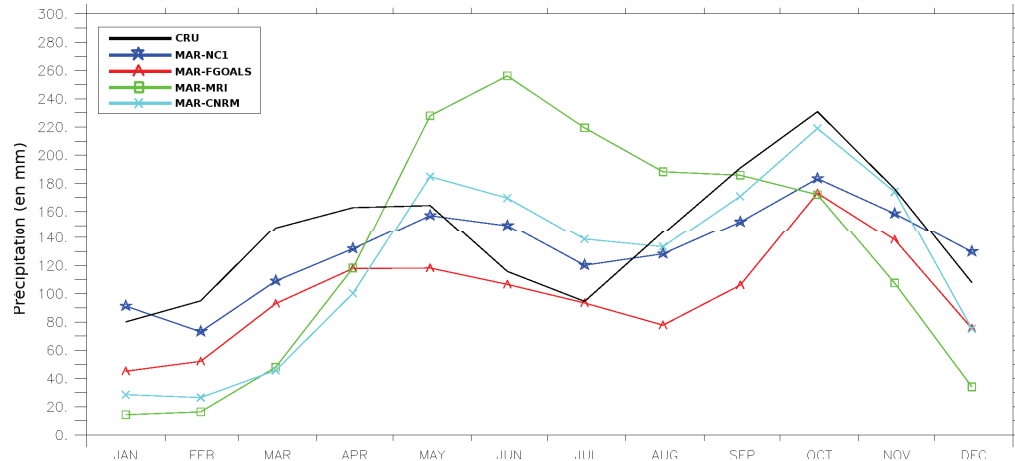


Figure 3. Cumuls moyens mensuels de précipitations sur la période 1970-1999 dans la zone 1 (bassin du Congo). La courbe noire représente les données du CRU, la courbe bleu celles du MAR-NCEP1, la courbe rouge celles du MAR-FGOALS, la courbe verte celles du MAR-MRI et la courbe cyan celles du MAR-CNRM.

Les précipitations modélisées par le MAR-NCEP2, le MAR-FGOALS et le MAR-CNRM reproduisent de manière satisfaisante la variation annuelle des précipitations fournies par les données CRU si ce n'est que ces précipitations modélisées sont légèrement décalées dans le temps pour le premier pic de précipitations qui se produit en avril-mai dans le CRU alors qu'il se situe plutôt en mai-juin pour ces trois modèles. Le second pic apparaît au mois d'octobre aussi bien dans le CRU que dans ces trois simulations. Cependant, les précipitations modélisées par le MAR sous-estiment de manière générale les valeurs mensuelles du CRU.

Le MAR-MRI ne permet pas de représenter la variabilité annuelle ni les valeurs mensuelles du CRU dans cette zone géographique. Il semblerait même que cette simulation ne détecte pas le deuxième passage de la ZCIT.

2.2. Zone 2 : la République Centrafricaine

Durant les mois de novembre à mars, les cumuls moyens mensuels de précipitations fournis par le CRU (figure 4) sont relativement faibles, la saison des pluies durant d'avril à octobre, avec un maximum durant le mois d'août.

Le MAR-NCEP1, comme le MAR-CNRM, représentent relativement bien la variabilité annuelle des précipitations régionales malgré des cumuls moyens mensuels de précipitations qui diffèrent de ceux du CRU : 1040 mm/an pour MAR-NCEP1 et 1330 mm/an pour MAR-CNRM contre 1430 mm/an pour le CRU.

Le MAR-MRI et le MAR-FGOALS ne parviennent pas à simuler cette variabilité annuelle des précipitations. La première simulation débute la saison des pluies au mois de mai et simule un pic de précipitations au mois de septembre (ce qui n'apparaît pas dans les données CRU), la deuxième fournit des cumuls moyens mensuels de précipitations très largement sous-estimés (MAR-FGOALS fournit seulement 500 mm/an en moyenne contre 1430 mm/an pour le CRU), tout en simulant un pic de précipitations au mois d'octobre.

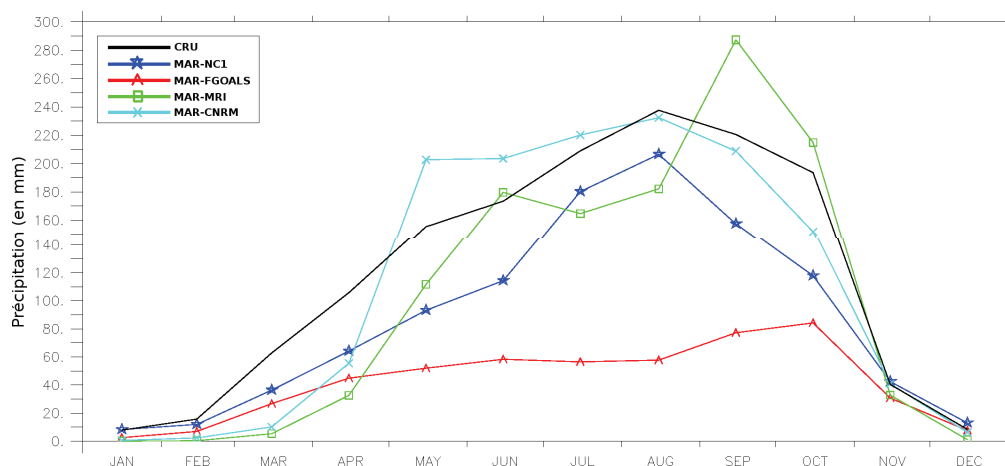


Figure 4. Cumuls moyens mensuels de précipitations sur la période 1970-1999 dans la zone 2 (République Centrafricaine). La courbe noire représente les données du CRU, la courbe bleu celles du MAR-NCEP1, la courbe rouge celles du MAR-FGOALS, la courbe verte celles du MAR-MRI et la courbe cyan celles du MAR-CNRM.

2.3. Zone 3 : la Côte d'Ivoire et le Ghana

Comme pour la Z2, d'après les cumuls moyens mensuels de précipitations du CRU (figure 5), la saison des pluies commence progressivement de février à mars, puis s'établit clairement en avril pour se terminer en octobre, alors que la saison sèche débute en novembre et se termine en février. Le pic de précipitation se produit en août, moment du passage de la ZCIT sur la région. La répartition moyenne annuelle des précipitations dans cette zone est relativement semblable à celle de la Z2 car ces deux zones sont situées à même latitude mais la Z3 obtient ~ 400 mm de cumuls annuels de précipitations en moins par rapport à Z2.

Le MAR-NCEP1 simule presque parfaitement la variabilité annuelle des précipitations, ainsi que les cumuls moyens mensuels, bien qu'il y ait une surestimation durant les mois de juin à septembre.

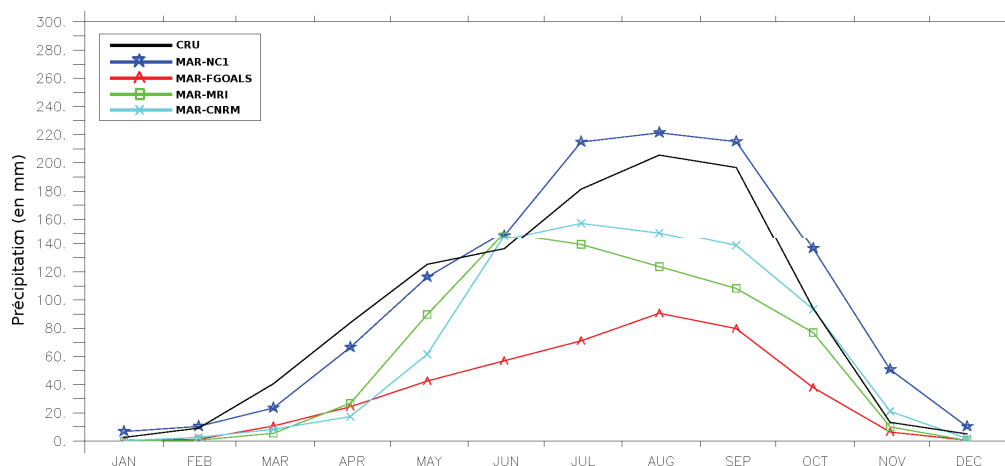


Figure 5. Cumuls moyens mensuels de précipitations sur la période 1970-1999 dans la zone 3 (Côte d'Ivoire et Ghana). La courbe noire représente les données du CRU, la courbe bleu celles du MAR-NCEP1, la courbe rouge celles du MAR-FGOALS, la courbe verte celles du MAR-MRI et la courbe cyan celles du MAR-CNRM.

En revanche, le démarrage de la saison des pluies est plus tardif pour les autres simulations où les précipitations n'augmentent qu'à partir d'avril. Le MAR-CNRM et le MAR-FGOALS indiquent bien des maxima de précipitations respectivement en juillet et août en sous estimant

toutefois les valeurs par rapport au CRU. Le MAR-MRI simule un pic de précipitations en juin et une lente décroissance jusqu'en octobre ce qui ne correspond pas à l'évolution annuelle des précipitations du CRU.

2.4. Zone 4 : le Burkina Faso

Dans cette zone (figure 6), la saison des pluies est beaucoup plus courte et s'étale de mai-juin à septembre, puisqu'elle se trouve plus au nord où la ZCIT n'intervient que brièvement durant l'année. Le pic de précipitations se produit en août. Seul le MAR-NCEP1 permet de simuler la variation annuelle des précipitations bien qu'il sous-estime les cumuls moyens mensuels.

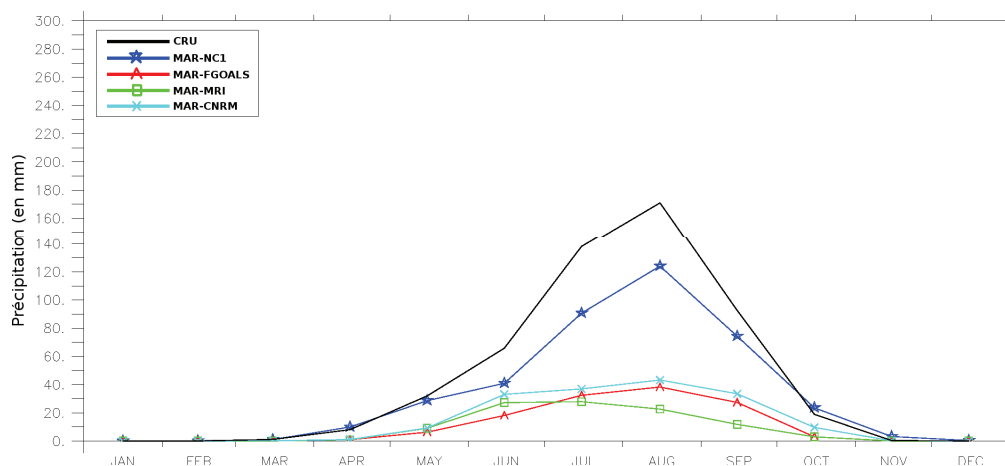


Figure 6. Cumuls moyens mensuels de précipitations sur la période 1970-1999 dans la zone 4 (Burkina Faso). La courbe noire représente les données du CRU, la courbe bleue celles du MAR-NCEP1, la courbe rouge celles du MAR-FGOALS, la courbe verte celles du MAR-MRI et la courbe cyan celles du MAR-CNRM.

Les trois autres simulations indiquent une certaine variabilité saisonnière, mais les quantités pluviométriques moyennes mensuelles sont très largement sous-estimées par rapport à celles du CRU.

Conclusion et perspectives

Il ressort que le MAR-NCEP1 parvient à simuler de manière satisfaisante la variabilité annuelle et les quantités mensuelles de précipitations alors que les trois autres simulations ne parviennent pas à reproduire soit la variabilité annuelle, soit les quantités mensuelles, voire les deux à la fois. Le modèle global NCEP1 étant un modèle de réanalyses, il assimile en partie des observations, il est donc logique qu'il soit meilleur que les autres GCMs qui ne sont pas « forcés » par des observations excepté les concentrations en gaz à effet de serre, ozone, ...

Le MAR-NCEP1 simule mieux les climats semi-arides (Z3 et Z4) que le climat équatorial ou tropical humide (Z1 et Z2). Cette différence de qualité de simulations est vraisemblablement influencée par deux raisons différentes. La première serait liée à la variabilité annuelle des précipitations en climat équatorial qui est moins marquée qu'en climat semi-aride, ce qui est plus difficile à modéliser. La deuxième serait liée au fait que sa végétation ombrophile joue un rôle plus important dans le climat des régions équatoriales, notamment en évapotranspirant une part significative de vapeur d'eau condensable dans les nuages, ce qui favorise l'apparition de précipitations, voire même auto-entretient ces précipitations. Des recherches futures chercheront à déterminer la sensibilité du MAR face à des changements de végétation.

Remerciements

Cette recherche a pu être menée dans le cadre du projet AFRIFORD financé par le programme « Belgian Research Action through Interdisciplinary Networks (BRAIN-be) » du service public de programmation de la Politique Scientifique Fédérale que nous tenons à remercier plus particulièrement.

Bibliographie

Dee, D. P., Uppala, S., Simmons, A., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M., Balsamo, G., Bauer, P., Bechtold, P., Beljaars, A., van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Delsol, C., Dragani, R., Fuentes, M., Geer, A. J., Haimberger, L., Healy, S., Hersbach, H., Hólm, E., Isaksen, I., Kållberg, P., Köhler, M., Matricardi, M., McNally, A., Monge-Sanz, B., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., de Rosnay, P., Tavolato, C., Thépaut, J.-N., Vitart, F., 2011 : The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Q.J.R. Meteorological Society*, 137: 553–597. doi: 10.1002/qj.828.

Fettweis X., Box J. E., Agosta C., Amory C., Kittel C., Gallée H., 2016: Reconstructions of the 1900–2015 Greenland ice sheet surface mass balance using the regional climate MAR model. *The Cryosphere Discuss.*, doi:10.5194/tc-2016-268.

Gallée H., Moufouma-Okia W., Bechtold P., Brasseur O., Dupays I., Marbaix P., Messenger C., Ramel R., Lebel T., 2004 : A high-resolution simulation of a West African rainy season using a regional climate model, *J. Geophys. Res.*, 109, D05108, doi:10.1029/2003JD004020.

Harris I., Jones P.D., Osborn T.J., Lister D.H., 2014 : Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *International Journal of Climatology*, 34: 623–642. doi:10.1002/joc.3711.

Kalnay E., Kanamitsu M., Kistler R., Collins W., Deaven D., Gandin L., Iredell M., Saha S., White G., Woollen J., Zhu Y., Leetmaa A., Reynolds R. 1996 : The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-470.

Li L., Lin P., Yu P., & al., 2013 The flexible global ocean-atmosphere-land system model, grid-point version 2 : FGOALS-g2, *Advances in Atmospheric Sciences*, 30 :543, doi :10.1007/s00376-012-2140-6.

Voltaire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Méliá, D. & al., 2013 : The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation, *Climate Dynamics*, 40: 2091. doi:10.1007/s00382-011-1259-y.

Wyard C., Scholzen C., Fettweis X., Van Campenhout J., François L., 2016 : Decrease in climatic conditions favouring floods in the south-east of Belgium over 1959-2010 using the regional climate model MAR, *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.4879.

Yukimoto S., Adachi Y., Hosaka M., Sakami T., Yoshimura H., Hirabara M., & al., 2012 : A new global climate model of the Meteorological Research Institute : MRI-CGCM3, model description and basic performance, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 90A, p.23-64, doi:10.2151/jmsj.2012-A02.

MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE KENNEBECASIS, NOUVEAU-BRUNSWICK, CANADA

FORTIN G.¹, THÉRIAULT F.¹, LONG M.-A.¹

¹Département d'histoire et de géographie, Université de Moncton, 18 avenue Antonine-Maillet, Moncton, Nouveau-Brunswick, Canada [guillaume.fortin@umoncton.ca]

Résumé - Une mise à jour des cartes des zones à risques d'inondation (ZRI) demande l'utilisation d'outils précis et performants. La modélisation hydrologique d'un bassin versant (BV) constitue une approche valable pour identifier les ZRI. Le modèle hydrologique HEC-HMSa été utilisé pour calculer les apports en eau dans le BV de la rivière Kennebecasis située dans le sud du Nouveau-Brunswick. Deux volets importants sont pris en considération par le modèle : (1) les conditions météorologiques (dont les précipitations) et (2) les caractéristiques géographiques. Le modèle a d'abord été calibré afin que les résultats des simulations concordent avec les données observées. Nous discutons des avantages et inconvénients du modèle ainsi que des principaux défis rencontrés. Finalement, les sorties du modèle HEC-HMS serviront dans le futur à alimenter le modèle hydraulique HEC-RAS en vue de la construction de nouvelles cartes des ZRI.

Mots-clés : modèle HEC-HMS, bassin versant, risque, inondation, précipitation

Abstract: Hydrological Modeling of the Kennebecasis River Watershed, New Brunswick, Canada. An updating of the flood maps requires the use of precise and efficient tools. Hydrological modeling of a watershed is a valuable approach for identifying flood prone areas. The HEC-HMS hydrological model was used to calculate water inputs into the Kennebecasis River basin, a particularly sensitive flood area located in southern New Brunswick. Two important aspects are considered by the model: (1) weather conditions (precipitation) and (2) geographical characteristics. The model was calibrated and the results obtained thereafter were consistent with the observed data. We discuss the advantages and disadvantages of the model as well as the main challenges encountered. Finally, the outputs of the HEC-HMS model will be used in the future to supply the HEC-RAS hydraulic model for the construction of new flood maps.

Keywords : HEC-HMS model, watershed, risk, flood, precipitation

Introduction

Les inondations représentent un risque naturel important en raison de leur fréquence élevée et des coûts considérables qui y sont associés. Un effort accru de la part des divers niveaux de gouvernements a été consenti au cours des dernières années afin de développer des stratégies et des plans de gestion visant à en réduire les impacts sur les sociétés. On anticipe que le nombre de gens qui vivent dans des zones inondables devrait tripler d'ici 2030, ce qui représente près de 54 millions de personnes (Ward *et al.*, 2013). Au Canada on estime que les coûts des dommages associés aux inondations, pour la période de 2016 à 2021, devraient s'élever à près de 2 430 millions de dollars canadiens (\pm 1 745 millions d'euros) ce qui place les inondations au premier rang en termes de coûts pour les risques naturels (Story, 2016). Dans la province du Nouveau-Brunswick (N.-B.) la situation est similaire, ce qui a mené le gouvernement provincial à élaborer une «Stratégie de réduction des risques d'inondation» en 2014 dans le but d'améliorer la gestion et la prévention des risques d'inondation sur son territoire (Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2014). Pour aider la prise de décision concernant l'aménagement du territoire il est crucial de disposer de données probantes ce qui nécessite dans ce cas une mise à jour des cartes des zones inondables puisque ces dernières datent des années 1980 et qu'elles sont actuellement désuètes.

Certains bassins versants dans la province sont particulièrement sensibles aux risques d'inondation c'est notamment le cas du bassin versant de la rivière Kennebecasis. La principale ville de la région, Sussex, est située au centre de la zone d'étude. On compte une cinquantaine d'inondations depuis 1854 dans cette région, le nombre maximal enregistré au cours d'une même année est de quatre en 2014 ce qui a totalisé des coûts avoisinant les 39,1 millions de dollars canadiens (\pm 28,1 millions d'euros) ce qui est bien supérieur à tout ce qui a été enregistré auparavant (Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2016). En 2015 nous avons

réalisé une cartographie hydrogéomorphologique de deux sous-bassins considérés comme étant les plus à risque soit : Trout Creek et Millstream River (Fortin *et al.*, 2016). Par la suite, une modélisation hydrologique de l'ensemble du bassin a été réalisée à l'aide du modèle HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System*) qui a été développé par l'armée des États-Unis (disponible en accès libre au <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>). Le but de cet article consiste à présenter les résultats de la modélisation hydrologique réalisée pour l'ensemble du bassin versant à l'aide du modèle HEC-HMS. Ces résultats serviront ultérieurement de données d'entrée pour le modèle HEC-RAS (*River Analysis System*) afin de déterminer les hauteurs d'eau associées à certains temps de retour (précipitations/débits) et ainsi à réaliser une carte des risques d'inondation s'appuyant sur la combinaison des données issues de modèles hydrologiques/hydrauliques.

1. Secteur d'étude

Le bassin versant de la rivière Kennebecasis couvre une superficie totale d'environ 1346 km² (figure 1) et il est situé dans le sud de la province. Ce bassin est composé de plusieurs tributaires qui forment cinq sous-bassins principaux. Le relief est vallonné et la région est située à la limite nord des collines calédoniennes.



Figure 1. Localisation du bassin versant de la rivière Kennebecasis au Nouveau-Brunswick. L'étoile noire identifie l'emplacement de la station de jaugeage d'Apohaqui. Les points noirs et les lettres majuscules représentent les différentes stations météorologiques utilisées dans le cadre de cette étude soit respectivement : A : Oak Point; B : Saint-John; C : Coles Island; D : Sussex; E : Mechanic Settlement; F : Wolf Lake CS; G : Parkindale. Les carrés blancs et les chiffres les différents endroits où les débits ont été simulés : 1 : exutoire; 2 : station d'Apohaqui; les trois autres emplacements correspondent à la confluence des tributaires et de la rivière Kennebecasis soit 3 : Millstream; 4 : Trout Creek / Lower Kennebecasis; 5 : Upper Kennebecasis.

Les eaux froides de l'Atlantique et celles de la baie de Fundy provoquent un refroidissement prononcé le long de la région côtière du sud-est pendant la saison de croissance de la végétation (Colpittset *al.*, 1995) mais la région d'étude est relativement peu

influencée par cet effet maritime. C'est plutôt un climat continental que l'on retrouve dans le bassin versant de la rivière Kennebecasis où l'on subit parfois des influences maritimes mais où les étés sont assez chauds et les hivers plutôt froids, en comparaison avec les autres régions plus côtières (Zelazny, 1996).

Les quantités annuelles moyennes de précipitations totales pour les stations météorologiques de Sussex (45°43' N; 65°32' O; altitude : 21,3 m) et de Moncton A (46°06'44" N ; 64°40'43" O; altitude 70,7 m) sont respectivement de l'ordre de 1142,2 mm et de 1223,1 mm (1962-2009) et leur distribution est relativement homogène tout au long de l'année. Les températures présentent d'importantes variations saisonnières, les températures mensuelles maximales avoisinent les 25°C en juillet et en août tandis que les températures mensuelles minimales sont plutôt de l'ordre de -15°C en janvier, ce qui en fait le mois le plus froid de l'année.

2. Données et méthodes

Pour effectuer la modélisation dans le bassin versant nous avons utilisé les données de précipitations provenant de stations météorologiques du réseau national (Environnement Canada, 2016), les données de précipitations radar (Environnement Canada, 2016) ainsi que les données des débits observés provenant de la station de jaugeage d'Apohaqui (Division des relevés hydrologiques du Canada, 2016).

HEC-HMS est un modèle empirique qui simule les composantes précipitation/débit à l'intérieur d'un bassin versant. Il comprend une partie qui concerne les dimensions physiques du bassin versant, une partie météorologique traitant les apports en précipitation et une dernière partie qui sert à assurer le contrôle des spécifications des simulations (notamment la durée allouée pour la simulation). Un sous-modèle appelé HEC-GeoHMS a été utilisé afin de préparer plusieurs paramètres d'entrée nécessaires à HEC-HMS. La première étape a consisté à récupérer toutes les données brutes requises par la simulation hydrologique ce qui inclut un modèle numérique de terrain (MNT) ayant une résolution spatiale de 22,5 mètres. Ensuite nous avons utilisé HEC-GeoHMS, qui fonctionne dans ArcView, pour obtenir différentes caractéristiques relatives aux précipitations, aux caractéristiques de la rivière et du bassin qui sont des paramètres requis pour HEC-HMS. Une étape importante a consisté à créer la carte des numéros de courbe (*CurveNumbers* ou CN) qui s'appuie sur l'utilisation du sol et le type de sol. Le CN permet de moduler le délai entre le moment où les précipitations sont reçues et où elles atteignent le cours d'eau (suite aux écoulements). Par la suite, une série d'étapes ont permis de simplifier l'organisation du bassin versant et de déterminer les points de connexions entre les sous-bassins, les tronçons, les jonctions et les limites des sous-bassins. Pour tester le modèle nous avons utilisé trois inondations passées qui correspondent respectivement aux épisodes suivants : (1) 23, 24, 25 septembre 1999 (pluies intenses) ; 6,7 septembre 2008 (tempête tropicale Hanna) ; 5,6 juillet 2014 (ouragan Arthur) (Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2016). Les précipitations provenant de plusieurs stations météorologiques (figure 1), ont été distribuées spatialement en utilisant la méthode des polygones de Thiessen pour le calcul d'une pluie surfacique (Cosandey *et al.*, 2003), des données radar ont aussi été utilisées pour tester et calibrer le modèle. Les courbes simulées ont ainsi pu être comparées avec les débits observés (à la station d'Apohaqui). Finalement les débits ont pu être simulés à différents endroits dans le bassin.

3. Résultats et discussion

La figure 2 montre un exemple de simulation des débits, à la hauteur de la station de jaugeage d'Apohaqui, à partir de différentes sources de données lors de la phase de

calibration. Le modèle HEC-HMS a permis de simuler des hydrogrammes de crue avec une très bonne confiance. Le test de Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 1970) permet de tester la performance de la simulation en comparant les données observées avec les données simulées, une valeur près de 1 signifie une bonne simulation. Par exemple, les valeurs obtenues, à partir de l'exemple de Hanna, varient entre 0,47 (données quotidiennes à la station de Sussex) et 0,965 (données horaires régionalisées). On remarque d'une part que les données horaires présentent de bien meilleurs résultats (figure 2) et ; qu'il y a un écart plus marqué entre les débits simulés et observés à la fin de l'évènement de pluie abondante. Cela peut s'expliquer en partie par le fait que les écoulements souterrains ne sont pas considérés dans notre simulation ce qui ne peut pas contribuer à alimenter le cours d'eau et à maintenir un débit élevé suite à une précipitation abondante d'où la diminution plus rapide des débits simulés.

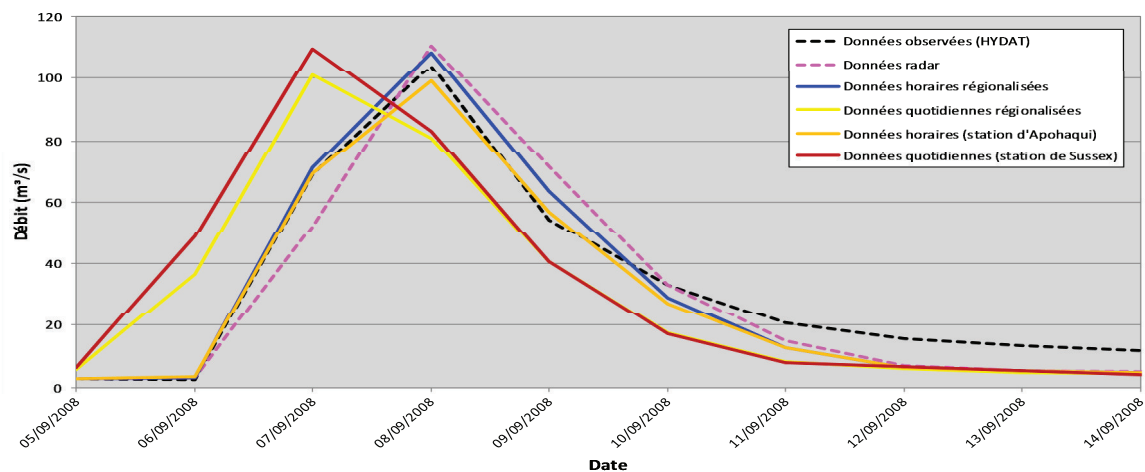


Figure 2. Comparaison du débit observé à la station de jaugeage d'Apoahqui et des débits simulés à partir de différentes sources de données de précipitations

Par la suite, une simulation des débits à différents endroits dans le bassin a été réalisée à partir des données horaires régionalisées. La figure 3 permet de mettre en évidence la relation précipitation/débit. De plus, on observe une augmentation du débit de la tête du cours d'eau vers l'exutoire ainsi qu'un léger décalage dans le temps (atteinte des pics de crue des différentes courbes) qui s'explique par les délais requis pour que l'eau s'écoule en aval du cours d'eau. Ces deux derniers éléments démontrent un comportement hydrologique typique de ce genre de situation (précipitation abondante/augmentation rapide du débit suivie d'un retour au débit de base) ce qui indique que le modèle simule assez bien ce à quoi on peut s'attendre dans de telles situations.

Parmi les principaux avantages du modèle utilisé il y a la grande flexibilité de celui-ci ce qui permet de l'utiliser dans plusieurs types d'environnements. HEC-HMS permet aussi de réaliser plusieurs calculs et des hydrogrammes à partir des précipitations. Du côté des inconvénients ils sont assez rares et ne concernent pas directement le modèle utilisé mais plutôt la qualité et la disponibilité des données d'entrées et des données observées qui peuvent constituer des limites importantes lors des étapes de calibration et de validation du modèle. Ces limites représentent le principal défi auquel nous avons été confrontés.

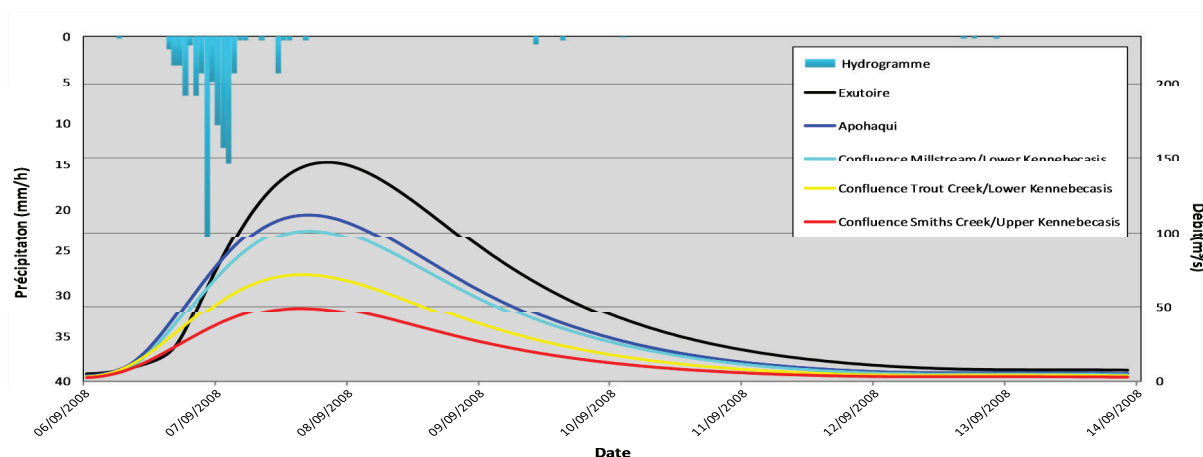


Figure 3. Simulation du débit de la rivière Kennebecasis différents endroits à partir des données horaires régionalisées

Conclusion

La modélisation hydrologique d'un bassin versant de taille moyenne, la rivière Kennebecasis au N.-B., Canada, a été menée avec succès à l'aide du modèle états-unien HEC-HMS. Ce modèle flexible et efficace a permis de mettre en relation les précipitations et les débits à l'échelle d'un bassin versant de taille moyenne. Le travail présenté s'insère dans un projet de plus grande ampleur dont l'étape précédente consistait à réaliser une cartographie hydrogéomorphologique des zones à risque d'inondation. Les résultats de la seconde partie, soit la modélisation hydrologique, serviront à élaborer une seconde carte des risques qui se basera sur une combinaison de modélisation hydrologique/hydraulique. La dernière étape consistera à combiner ces deux cartes de risque afin de créer une carte de gestion des risques d'inondation. Une telle carte sera un précieux outil d'aide à la décision pour les diverses instances politiques.

Remerciements

Ce projet a été financé par le Fonds en Fiducie pour l'environnement du Nouveau-Brunswick (projet # 160101).

Bibliographie

Cosandey C., Bigot S., Dacharry M., Gille E., Laganier R., et Salvador P.-G., 2003 : *Les eaux courantes*. Paris, France, Éditions Belin.

Colpitts M.C., Fahmy S.H., Macdougall J.E., McKinnis B.G.; Zelazny, V.F., 1995 : *Les sols forestiers du Nouveau Brunswick. Agriculture and Agri-Food Canada*, Ottawa, ON. CLBRR Contribution, 95–98.

Division des relevés hydrologiques du Canada, 2016 : Base de données HYDAT, Archives nationales des données hydrologiques Disponible en ligne : <ftp://ftp.tor.ec.gc.ca/HYDAT/>, page consultée le 14 juillet 2016.

Environnement Canada, 2016 : Données climatiques historiques. Disponible en ligne : <http://climat.meteo.gc.ca/>, page consultée le 30 juin 2016.

Fortin, G., Goudard, G., Albuquerque, A.M. et Thériault, F., 2016 : A utilização da abordagem hidrogeomorfológica para a cartografia de zonas de risco de inundação na bacia hidrográfica do rio Kennebecasis New Brunswick (Canada). *Proceedings of the XII - Simposio Brasileiro de Climatologia Geografica, 25-29 octobre 2016, Goiânia, Brésil*, 324-335.

Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2014 : Stratégie de réduction des risques d'inondation du Nouveau-Brunswick. Disponible en ligne : <http://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Publications/StrategieDeReductionDesRisquesDinondationDuNB.pdf>.

Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2016 : Base de données sur les inondations. Disponible en ligne : <http://www.elgegl.gnb.ca/0001/fr/Inondation/Index>, page consultée le 18 juillet 2016.

Nash J.E. et Sutcliffe J.V., 1970 : River flow forecasting through conceptual models. Part I: a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, **27**, 282-290.

Story, R., 2016 : *Estimation du coût annuel moyen des Accords d'aide financière en cas de catastrophe causée par un événement météorologique*. Rapport préparé pour le Bureau du directeur parlementaire du Budget, Ottawa, 49 p.

Ward, P. J., Jongman, B., Weiland, F. S.; Bouwman, A.; Van Beek, R.; Bierkens, M. F., ...Winsemius, H. C., 2013 : Assessing flood risk at the global scale: model setup, results, and sensitivity. *Environmental Research Letters*, **8**(4), 044019.

Zelazny, V. F., 1996 : Géologie du Substrat Rocheux du Nouveau-Brunswick. Ministère des Ressources naturelles.

APPLICATION DES TESTS DES RACINES UNITAIRES ET MODELISATION ARMA SUR LES SERIES DES PLUIES TORRENTIELLES EN TUNISIE

DALLEL J.

Faculté des Lettres et Sciences Humaines de Sousse, Tunisie. Mail : dallel_jalel@yahoo.com

Résumé : En Tunisie, les pluies torrentielles qui sont fréquemment observées sont à l'origine d'inondations et des dégâts paroxysmiques notamment dans les grandes agglomérations (grand Tunis, Sfax, Sousse, etc.). La recherche de leurs évolutions dans un espace restreint et homogène surtout avec des données brutes et sans tester leurs stationnarités donne souvent des résultats aléatoires voire même contradictoires. Les tests des racines unitaires et la modélisation par ARMA est devenue aujourd'hui une des techniques incontournables et prometteuses. En effet, toutes variables aléatoires qui évoluent doit être testées en terme de stationnarité c'est-à-dire si sa moyenne et sa variance dépendent du temps ou non. Si la variable est stationnaire, sa modélisation peut se faire par des processus de types ARMA, sinon des transformations peuvent être appliquées pour la rendre stationnaire.

Mots-clés : Pluies torrentielles, série temporelle, tests des racines unitaires, modèles ARMA, Tunisie, etc.

Abstract : In Tunisia, torrential rains that are frequently observed are causing flash floods and paroxysmal damage, especially in the big urban areas (Tunis, Sfax, Sousse etc.). The search for their evolution in a restricted and homogeneous space, especially with raw data and without testing their stationarities often gives random and even contradictory results. Unit root testing and ARMA modeling has now become one of the most promising and unavoidable techniques. Indeed, any random variables that evolve must be tested in terms of stationarity, that is to say whether its average rate and its variance depend on time or not. If the variable is stationary, its modelization can be done by processes of type ARMA otherwise transformations can be applied to make it stationary.

Keywords : Torrential rains, time series, unit root tests, ARMA models, Tunisia, etc.

Introduction

L'étude de la notion de stationnarité par les tests des racines unitaires est devenue aujourd'hui incontournable dans la modélisation et la prévision des séries pluviométriques notamment dans le contexte de changement climatique global (EL Mahi, 2015). Les travaux de modélisation par différents processus ARMA (Auto Regressive-Moving Average) débutent ainsi fréquemment par une analyse de la stationnarité avec l'application de divers tests de racine unitaire notamment de Dickey-Fuller Augmenté (ADF).

Dans cette étude, nous examinerons la stationnarité³⁵ des séries de précipitations torrentielles³⁶ en Tunisie par les tests des racines unitaires afin de mieux modéliser leurs projections par différents processus ARMA.

1. Données

Pour mener ce travail, nous avons eu recours à des données pluviométriques journalières de 12 stations bien réparties sur l'ensemble du pays (figure 1). Ces données pluviométriques sont issues du réseau de la Direction Générale des Ressources en Eau (DGRE).

³⁵Une série chronologique est stationnaire lorsque ses caractéristiques statistiques (autocovariance et moyenne) ne dépendent pas (ou pas trop) de la fenêtre de temps dans laquelle on les observe (Rossignol, 2011).

³⁶ Dont l'apport est égal ou supérieur à 30 mm par jour.

Bien que ces stations présentent des chroniques pluviométriques de bonne qualité (vérifiées par la méthode de Bois), elles sont entachées par des lacunes comprises souvent entre 2 et 4 %. Pour les combler, nous avons recouru aux méthodes d'interpolations basées sur l'analyse de la régression multiple [Dallel, 2009]. Avec cette méthode, nous avons pu allonger la période d'étude à 100 ans s'étendant du mois de septembre 1912 jusqu'au mois d'août 2012.

1.1. Tests des racines unitaires et modélisation ARMA

○ Tests des racines unitaires ou de non stationnarité

Soit X_t est stationnaire au second ordre (stationnarité faible).

Si $E(X_t^2) < \infty, E(X_t) = m, m \in \mathbb{R}, cov(X_t, X_{t+k}) = \gamma_k$ la covariance est uniquement fonction du temps.

Il existe deux catégories de test en fonction de la nature de l'hypothèse nulle H_0 :

H_0 : non stationnarité : test de Dickey-Fuller Augmenté et test de Phillips Perron.

H_0 : stationnarité: test de Kwiat, Kowski, Philips, Schmidt et Shin : KPSS.

Hypothèse nulle de non stationnarité

H_0 : la série est non stationnaire c'est-à-dire elle compte au moins une racine unitaire.

H_1 : la série est stationnaire elle ne comprend aucune racine unitaire.

Une série non stationnaire est également appelée série intégrée si X_t est non stationnaire et si ΔX_t est stationnaire alors X_t est intégrée d'ordre 1.

Le test de Dickey-Fuller Augmenté (ADF) estime trois modèles :

- Un premier modèle comportant une constante et une tendance ou dérive temporelle ;
- Si la tendance n'est pas significative le test ADF, estime un second modèle avec constante, mais sans tendance ;
- Et enfin, si la constante n'est pas significative, le test ADF estime un troisième et dernier modèle sans constante ni tendance.

2.2. Modélisation ARMA

On appelle processus Autorégressif d'ordre p noté $AR^{37}(p)$ un processus X_t stationnaire vérifiant une relation $X_t - \varphi_1 X_{t-1} - \dots - \varphi_p X_{t-p} = \varepsilon_t$ qui est égal $\psi(L)X_t = \varepsilon_t$

On appelle processus moyenne mobile d'ordre q noté $MA^{38}(q)$ un processus stationnaire vérifiant $X_t = \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}$ $\Rightarrow \beta\beta$ (bruit blanc).

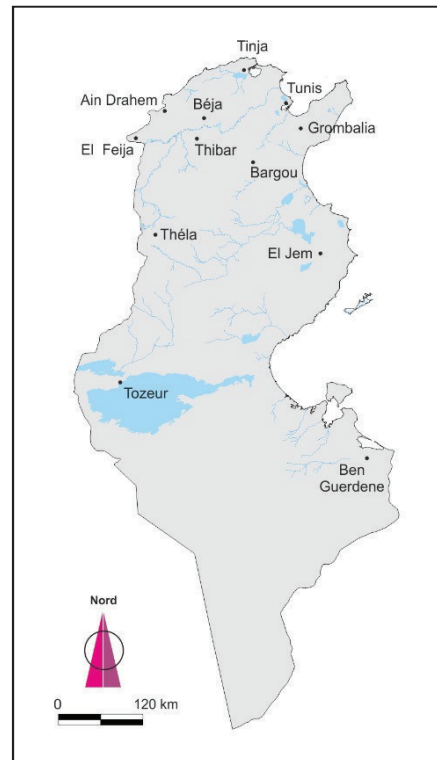


Figure 1 : Les stations pluviométriques retenues dans l'étude

³⁷ La modélisation autorégressive (AR) a été introduite pour la première fois par Yule en 1927. Elle prend en compte une dépendance linéaire du processus à son propre passé (Romain et Gwladys, 2005).

³⁸La modélisation moyenne mobile a également été introduite en 1927, par Slutsky. Un processus «moyenne mobile» est la somme d'un bruit blanc et de ses retards (Romain et Gwladys, 2005).

Un processus X_t suit un ARMA (p,q) s'il vérifie une relation de type $\psi(L)X_t = \theta(L)\varepsilon_t$

3. Résultats

Le test de stationnarité des séries des pluies torrentielles se fait selon les deux étapes suivantes :

- observation des graphiques et des fonctions d'autocorrélation ;
- et le test de stationnarité notamment de Dickey-Fuller augmenté (1981).

3.1. Observation des graphiques et des fonctions d'autocorrélation

L'observation des 12 graphiques semble indiquer que toutes les séries des pluies torrentielles sont alternantes et ne mettent pas en évidence une tendance nette. De plus, les fonctions d'autocorrélation³⁹ et d'autocorrélation partielle (AC et PAC dans les figures 2,3 et 4) ne sont pas statistiquement différentes de 0, les probabilités critiques associées sont toutes significativement supérieures au seuil α de 5 % (nombre de retard ou lag 1). Nous pouvons, donc, en conclure que toutes les séries des pluies torrentielles retenues dans cette étude sont bien stationnaires (figures 2 à 4).

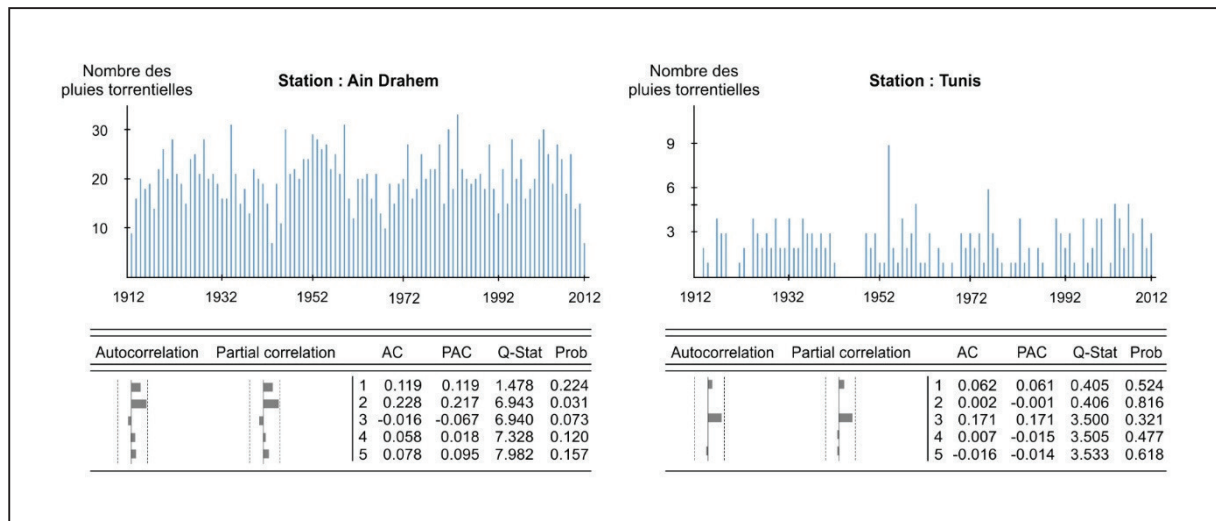


Figure 2. Fréquence des pluies torrentielles et corrélogrammes de quelques stations du Nord tunisien (1912-2012)

³⁹L'autocorrélation d'une série fait référence au fait que dans une série temporelle, la mesure d'un phénomène à un instant t peut être corrélée aux mesures précédentes (au temps $t-1$, $t-2$, $t-3$, etc.) ou aux mesures suivantes (à $t+1$, $t+2$, $t+3$, etc.). Une série autocorrélée est ainsi corrélée à elle-même, avec un décalage (lag) donné (Cowpertwait and Metcalfe, 2009). La fonction d'autocorrélation s'écrit :

$$r_k = \frac{\sum_{t=k+1}^T (y_t - \bar{y})(y_{t-k} - \bar{y})}{\sum_{t=1}^T [(y_t - \bar{y})]^2}$$

Avec k est le décalage ou lag de la série temporelle Y

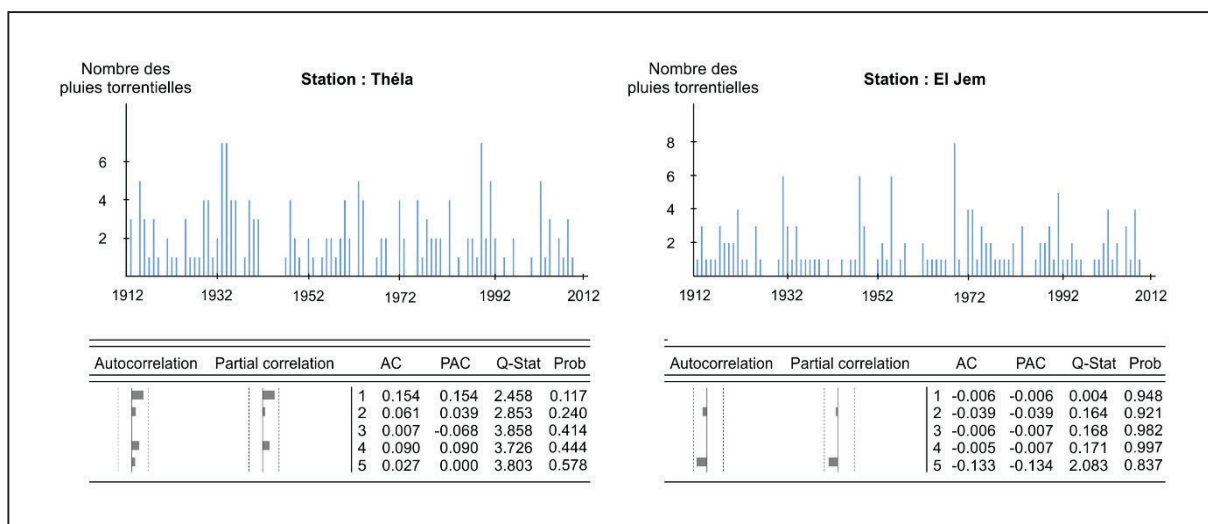


Figure 3 : Fréquence des pluies torrentielles et corrélogrammes de quelques stations du Centre tunisien (1912-2012)

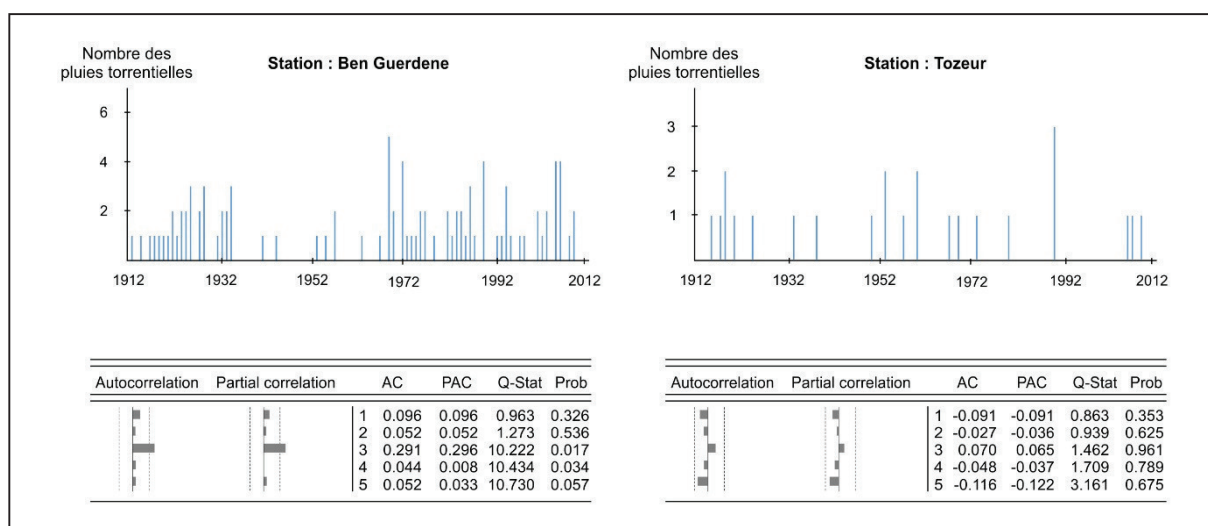


Figure 4. Fréquence des pluies torrentielles et corrélogrammes de quelques stations du Sud tunisien (1912-2012)

Cette stationnarité pourra aussi être vérifiée en effectuant le test de Dickey-Fuller augmenté (Augmented Dickey-Fuller) aussi au seuil de signification α de 5 %.

3.2. Test de stationnarité de Dickey-Fuller Augmenté (ADF)

Dans la littérature des séries temporelles, plusieurs tests de racine unitaire sont utilisés pour mettre en évidence le caractère stationnaire ou non d'une chronique. Toutefois, le test de Dickey-Fuller Augmenté (ADF) reste le plus simple et le plus utilisé (Bourbonnais, 1998). L'idée de ce test est d'estimer la régression par moindres carrés et de tester ensuite $\rho = 1$ au moyen de la statistique de Student (Lubrano, 2008).

Le tableau suivant montre que les valeurs du test de Dickey-Fuller augmenté (ADF) sont supérieures aux valeurs critiques du t de Student au seuil α de 5 % tabulées par Dickey et Fuller en 1981. Par conséquent, nous acceptons donc l'hypothèse H_0 de la stationnarité des séries des pluies torrentielles des 12 stations retenues dans ce travail.

Tableau 1 : Test de racine unitaire augmenté de Dickey-Fuller (ADF)

Station	Valeurs du test ADF	Valeur critique du t de Student ($\alpha < 5$)
---------	---------------------	--

		(%)
Ain Drahem	-4.98	-2.89
El Feija	-8.01	-2.89
Béjà	-10.27	-2.89
Tinja	-9.63	-2.89
Tunis	-9.22	-2.89
Tibar	-10.29	-2.89
Grombalia	-10.78	-2.89
Bargou	-10.80	-2.89
Théla	-8.42	-2.89
El Jem	-9.92	-2.89
Ben Guerdene	-8.95	-2.89
Tozeur	-10.85	-2.89

3.3. Validation des modèles de prévision par processus ARMA

Le test de stationnarité étant vérifié, il nous est important de passer à la validation des modèles de prévision des pluies torrentielles dans la classe des processus ARMA. Nous procéderons, en premier lieu, au modèle autorégressif (AR), puis au modèle des moyennes mobiles (MA) et enfin au modèle combiné (ARMA). Dans ce travail, nous avons déterminé les ordres p et q du processus ARMA principalement à l'aide des corrélogrammes simple et partiel. En estimant les probabilités critiques des t-statistiques pour les processus AR(1), MA(1) et ARMA(1,1), nous avons remarqué que tous les modèles n'étaient pas significatifs et la constante (c) a été partout supérieure au seuil α de 5 %. A cette étape, nous avons retiré la constance de différents processus. Les résultats obtenus cette fois sont satisfaisants puisque les probabilités critiques associées à la statistique de Student sont devenues inférieures au seuil α de 5 % (tableau 2).

Tableau 2 : Estimation et significativité des coefficients des modèles de prévision pour les pluies torrentielles en Tunisie selon les régions (après retrait de la constante c)

Station	Région	Modèle de prévision	Coefficient	Erreur standard	t-statistique
Ain Drahem	Nord	AR(1)	0.95	0.03	29.38
El Feija		AR(1)	0.85	0.05	15.84
Béjà		AR(1)	0.68	0.07	9.06
Tinja		AR(1)	0.63	0.08	8.09
Tunis		AR(1)	0.64	0.08	8.35
Tibar		AR(1)	0.68	0.07	9.18
Grombalia		AR(1)	0.63	0.08	8.13
Bargou		Centre	AR(1)	0.67	0.07
Théla	AR(1)		0.59	0.08	7.23
El Jem	AR(1)		0.49	0.09	5.62
Ben Guerdene	Sud	ARMA(1,1)	1.00	0.21	4.72
			-0.91	0.04	-20.62
Tozeur		ARMA(1,1)	1.00	0.52	1.92
			-1.00	0.00	-867.18

Niveau de signification α 5 %

Les résultats fournis dans le tableau précédent montrent, donc, qu'en Tunisie, deux modèles de prévision peuvent être appliqués après le retrait de la constante (c) :

- un premier modèle autorégressif d'ordre 1. Ce modèle semble être correctement ajusté pour les stations situées au Nord et au Centre. Dans ces régions, ce modèle est statistiquement significatif au seuil de confiance α de 5 % ;
- un deuxième modèle ARMA aussi d'ordre 1 qui combine les deux types de processus autorégressif et des moyennes mobiles. Ce modèle semble correctement ajusté, mais cette fois dans le Sud (figure 5).

Conclusion

L'application des tests des racines unitaires sur les précipitations torrentielles est indispensable pour tester leurs stationnarités et mieux modéliser leurs prévisions par différents processus ARMA. D'après cette étude les données des pluies torrentielles, des 12 stations retenues, sont stationnaires. Ceci est confirmé notamment par le test statistique de Dickey-Fuller augmenté (ADF) avec un niveau de signification α inférieur à 5 %. Après validation des processus de prévision, deux modèles ont été dégagés : le modèle autorégressif sans constante AR(1) qui s'applique le mieux dans les régions du Nord et du Centre et le modèle combiné ARMA(1,1) aussi sans constante, mais qui s'applique au Sud. Ces résultats de bonne qualité pourraient aider les décideurs pour une meilleure gestion du risque d'inondation et des impacts qui leur sont associés.

Bibliographie

- Bourbonnais R. et Terraza M., 1998 : *Analyse des séries temporelles en économie*. Edition Presse Universitaire de France.
- Cowpertwait, P. S., Metcalfe A. V., 2009 : *Introductory Time Series with R*. New York: Springer-Verlag.
- Dallel J., 2009 : Les événements pluviométriques exceptionnels en Tunisie : *Recherche d'une téléconnexion avec les Oscillations Nord Atlantique et étude d'impacts hydrologiques*. Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, 348 p.
- Dickey Y. D., Fuller W., 1979: Distribution of the Estimator for the autoregressive Time Series with a Unit Root. *Journal of the American Statistical Association*, **74**, 427-431.
- EL Mahi A. ; Bouregba N.; Benadela L.et Meddi M., 2015 : L'ampleur de la variabilité climatique dans le bassin versant de l'oued El Hammam (nord-ouest d'Algérie). *Conférence Internationale sur l'Hydrologie des Grands Bassins Fluviaux de l'Afrique*, Hammamet, 12 p.
- Romain F. et Gwladys T. (2005) : *Séries Temporelles*. Institut de Statistiques de l'Université de Paris. 22 pages.
- Rossignol R. et Dumont Th., 2011 : *Analyse spectrale et séries chronologiques*. Orsay, 90 p.
- Wold H., 1938 : *A study in the Analysis of Stationary Time Series*. Almgvist and Wiksell.
- Yul U., 1927: On a method of investigating periodicities in disturbed series, with special reference to wolfer's sunspot numbers. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, **226**. 267-298.

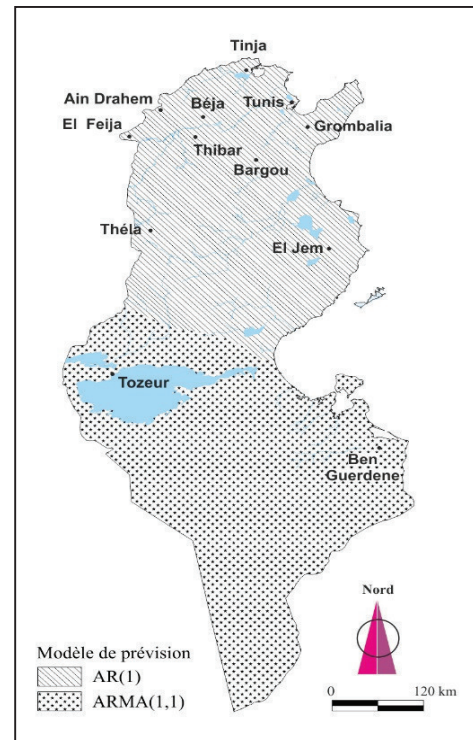


Figure 5 : Application des modèles de prévision en Tunisie selon les régions

ADAPTATION DE LA FORMULE DE GINADOTTI AUX CONDITIONS ALGÉRIENNES À L'AIDE DES ALGORITHMES GÉNÉTIQUES

OULAD NAOUI N.¹, CHERIF EL-A.², DJEHICHE A.R.³

¹ Université Ammar Telidji –PB37G- Laghouat (Algérie), noure_hydraulique@yahoo.fr

² Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf - Oran (Algérie), cherif_ea@yahoo.fr

³ Université Ammar Telidji –PB37G- Laghouat (Algérie), djehichea@yahoo.fr

Résumé –La gestion des ressources en eau comprend plusieurs disciplines, la modélisation de la relation pluie – débit est la discipline la plus importante pour la lutte contre les risques d'inondations. Il existe plusieurs modèles empiriques pour la prédétermination de la valeur du débit de crue pour une période de retour dans un bassin versant non-jaugée. Cependant, la majorité de ces modèles ne sont pas applicables dans tous les bassins du monde. Pour cela nous proposons dans cette étude l'application d'une méthode d'optimisation stochastique basée sur des algorithmes génétiques pour adapter la formule de GINADOTTI aux conditions de la région de Ghardaia située au sud-est de l'Algérie.

Mots-Clés : modélisation, algorithme génétique, GINADOTTI.

Abstract - Adaptation of the GIANDOTTI formula to Algerian conditions using genetic algorithms.

Water resources management includes several disciplines, the modeling of rainfall-runoff relationship is the most important discipline to prevent flooding risks. There are several empirical models for predetermining flood flow value for a period of return in a watershed. However the majority of these models is not applicable in all basins of the world. For this reason we propose in this study the application of a calibration method based on genetic algorithms to adapt the formula of GINADOTTI for the condition of Ghardaia region situated in south east of Algeria.

Keywords : modeling, genetic algorithms, GINADOTTI.

Introduction

La gestion des ressources en eau consiste à manipuler des systèmes naturels productifs de ressources pour optimiser leur productivité à long terme tant pour l'utilisation humaine que pour la production biologique (P.B.Hooper, 2003). Si l'on considère le problème de la gestion des ressources en eau, la modélisation de la relation pluie-débit est une discipline très importante (Vannier, 2013, Moradkhani, 2004). L'une des questions controversées dans la modélisation hydrologique a été les mérites et les démérites des modèles empiriques par rapport à ceux des modèles causaux (V. Klemes, 1982). Dans cette étude, une technique d'optimisation à l'aide des algorithmes génétiques est proposée pour modéliser le comportement hydrologique du bassin versant MZAB pour valider et vérifier l'adaptation de la formule empirique de GIANDOTTI utilisée en Algérie. Cette technique est appliquée au bassin de L'Wadi MZAB située à la wilaya de Ghardaia (région sud-est de l'Algérie).

1. Méthodes

1.1. Algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques constituent un modèle computationnel qui simule le processus de sélection génétique et d'élimination naturelle dans l'évolution biologique. Des travaux pionniers dans ce domaine ont été conduits par Holland dans les années 1960. Il a été proposé de trouver une solution optimale globale ou locale dans l'énorme espace de recherche. Comparé aux algorithmes de recherche traditionnels en intelligence artificielle (IA), l'algorithme génétique est capable d'acquérir et d'accumuler automatiquement les connaissances nécessaires sur l'espace de recherche au cours de son processus de recherche et d'auto-adapter le processus de recherche par une technique d'optimisation aléatoire (Qishi WU, Jeffrey J. SHAN, 2000).

1.1.1. Principe d'un algorithme génétique

Un algorithme évolutif est une méthode de recherche globale stochastique qui imite le processus d'évolution biologique naturelle en opérant sur des "populations" de solutions potentielles et en appliquant la loi de la jungle où la survie est pour les plus aptes, produisant de meilleures approximations à une solution donnée. Jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint (par exemple, impliquant un certain nombre de générations ou un écart moyen dans la population), un nouvel ensemble d'approximations est créé à chaque génération en sélectionnant des «individus» ou des solutions pour la «reproduction». Le concept général de recherche évolutive peut donc être décrit comme une application itérative des opérateurs variation (v) et sélection (s) à une population de solutions (P). Ceci est illustré dans l'équation 1 où P [t] est la population au temps t.

$$P[t+1]=s(v(p[t])) \quad (1)$$

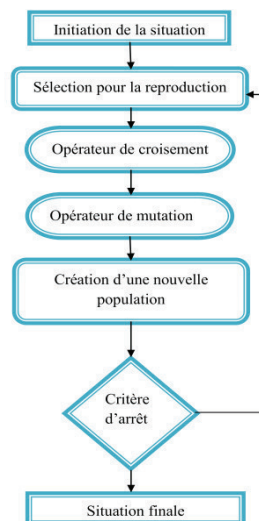


Figure 1. Organigramme d'un algorithme génétique

1.1.2. Fonction objectif

La fonction objective est le paramètre important d'un algorithme génétique qui définit l'aptitude de chaque chromosome où les valeurs des paramètres génétiques sont adaptées à mesure que l'évolution génétique progresse. À chaque génération, la valeur de forme de chaque chromosome est calculée en utilisant la fonction de forme physique. Si la condition physique de deux chromosomes est égale, alors le taux de mutation est augmenté, afin d'aider l'évolution génétique à sortir de questions telles que les maxima locaux ou les minima locaux, selon le cas. Une fois qu'il y a une amélioration de la condition physique globale, le taux de mutation d'origine est restauré pour continuer l'évolution normale. Si l'évolution se stabilise, mais la condition physique ne semble pas s'améliorer pendant plusieurs générations et la recherche ne trouve aucune erreur, un nouveau groupe de population initiale est généré en utilisant les valeurs des paramètres par défaut initiaux et une nouvelle graine est générée de façon aléatoire.

1.1.3. Croisement

L'opérateur croisement est un opérateur génétique qui combine deux chromosomes (parents) pour produire un nouveau chromosome (progéniture). L'idée derrière le croisement

est que le nouveau chromosome peut être mieux que les deux parents s'il prend les meilleures caractéristiques de chacun des parents. Le croisement se produit pendant l'évolution selon une probabilité de croisement définie par l'utilisateur. Pour les besoins de ce travail, seuls les opérateurs croisés qui opèrent sur deux parents et qui n'ont pas de propriétés d'auto-adaptation seront considérés (Yılmaz KAYA et al, 2011).

1.1.4. Mutation

La mutation est un processus important qui permet d'introduire un nouveau matériel génétique dans une population. Une probabilité de mutation est spécifiée qui permet des mutations aléatoires à des gènes individuels (Manoj P. Samuel et Madan K. Jha, 2003).

1.1.5. Formulation du problème

Si Q_p est le débit de projet à la période de retour et si Q_s est le débit simulé, alors la somme de l'erreur carrée (EMG) a été calculée comme suit :

$$EMG = \sum_{i=1}^n (Q_p - Q_s)^2 \quad (2)$$

1.2. Modèle empirique GIANDOTTI

La formule GIANDOTTI utilisée pour obtenir la valeur de débit maximal correspond à une période de retour par la relation suivante:

$$Q_{\max\%} = \frac{C.S.(H_{\text{moy}} - H_{\text{min}})^{1/2}}{4(S)^{1/2} + 1.5L} . P_t \quad (3)$$

2. Résultats

La performance des algorithmes génétiques est validée par la stabilité de l'erreur le long de la génération et le nombre de tests pour donner la chance de sélectionner les meilleurs individus comme montre dans le tableau 1.

Tableau 1. Influence du nombre d'essais sur la performance du modèle.

Génération	T1	T2	T3	T4	T5	T6
10	781,80	733,86	2350,70	733,86	781,80	733,86
20	1143,50	1475,30	903,80	918,36	781,80	9468,60
30	733,86	781,80	733,86	6134,80	918,36	1428,20
40	774,52	1859,70	8268,70	1428,20	733,86	6134,80
50	7070,10	918,36	2350,70	781,80	1823,30	781,80
60	1143,50	4355,30	774,52	1121,70	5128,00	3598,50
70	733,86	1859,70	1823,30	2350,70	2879,30	2350,70
80	781,80	2930,30	5200,80	903,80	733,86	733,86
90	733,86	5200,80	781,80	918,36	918,36	918,36
100	781,80	781,80	733,86	918,36	918,36	903,80
200	774,52	903,80	918,36	733,86	903,80	733,86

500	733,86	733,86	733,86	903,80	733,86	733,86
800	733,86	733,86	733,86	733,86	733,86	733,86
1000	733,86	733,86	733,86	733,86	733,86	733,86
2000	733,86	733,86	733,86	733,86	733,86	733,86

Le tableau montre une convergence assez rapide à partir de 200 générations sur le 6^{ème} test (T6). Les fluctuations sont principalement dues aux opérateurs génétiques (croisement et mutation). La figure 2 présente les fluctuations de la fonction objective le long de générations pour 6 tests.

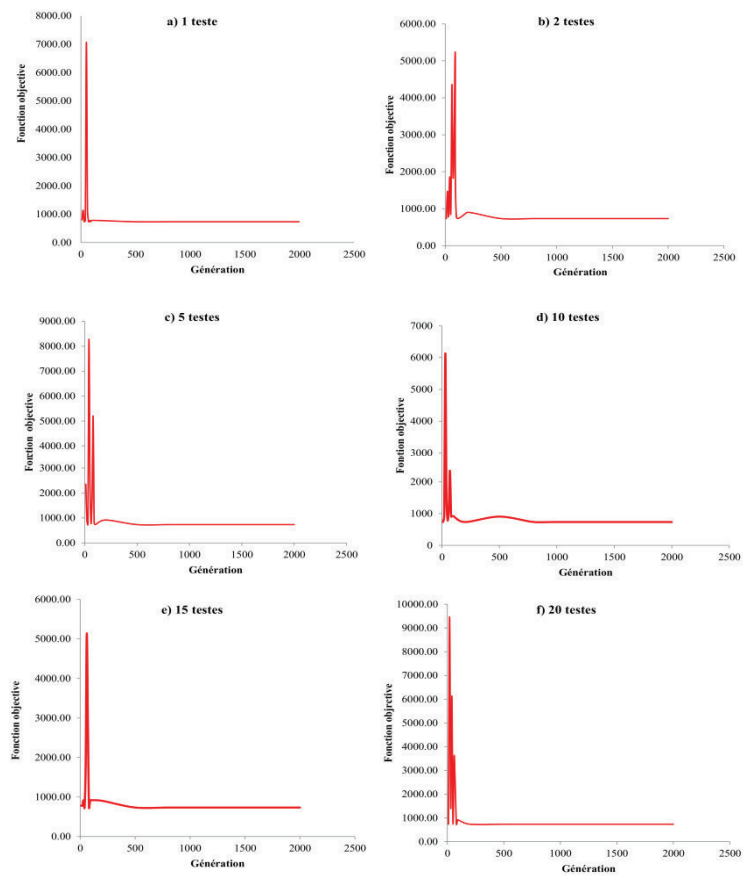


Figure 2. Fluctuations de la fonction d'adaptation pour les tests 1-6.

La figure 2 représente la fluctuation de la fonction objective pour 2000 générations, et pour 6 tests. Les 6 tests a pour objectif augmenter le nombre de simulations pour favoriser le nombre de chance et également l'émergence des meilleurs individus.

2.1 Validation et performance des algorithmes génétiques

Pour mieux comprendre la performance de cette adaptation, plusieurs indicateurs de performance deviennent nécessaires. Les indicateurs de performances utilisés dans ce point sont : L'erreur moyenne des carrés **MSE** (Mean Square Error), le coefficient d'efficacité de Nash–Sutcliffe **NSC** (Nash–Sutcliffe coefficient of efficiency), l'erreur root- moyenne-carrée- **RMSE** (Root-Mean-Square Error) et Erreur de pourcentage absolue moyenne **MAPE** (Mean Absolute Percentage Error).ces indicateurs sont données par les équations suivantes :

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Qt_i - \hat{Q}t_i)^2 \quad (4)$$

$$NSC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Qt_i - \hat{Q}t_i)^2}{\sum_{i=1}^N (Qt_i - \bar{Q}t)^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Qt_i - \hat{Q}t_i)^2} \quad (6)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{Qt_i - \hat{Q}t_i}{\hat{Q}t_i} \right| \times 100 \quad (7)$$

où Qt_i est la valeur mesurée du débit, $\hat{Q}t_i$ est le débit calculé par le modèle, $\bar{Q}t$ est le débit moyen mesuré $\bar{Q}t$ est le débit moyen simulé et N est le nombre de données.

Tableau 2. Les indicateurs de performances pour différents lois statistiques

	Gumbel	Lognormale	Lognormale (3P)
MES	2.096	2.793	2.839
RMES	0.457	0.528	0.532
MAPE	141.98	209.94	215.38
NSC	0.674	0.99998	0.99998

Le tableau 2 représente les résultats obtenus par les différentes méthodes statistiques. A titre de discussion de ces résultats, on peut dire que la valeur de débit estimée par la méthode statistique Gumbel c'est la valeur la plus proche de la valeur de débit de projet par une référence de 812.87 (tableau 3) qui représente 42% d'estimation (Fig.3.a).

La figure 3.b montre une superposition entre les valeurs de débit de projet Q_p et les valeurs obtenues par l'utilisation des algorithmes génétiques (GIAN). Nous avons utilisé un codage mono-objectif avec la fonction objectif (OBJFUN). Pour cela, nous utilisons des algorithmes génétiques comme un algorithme d'optimisation. Le bon choix des opérateurs d'un algorithme génétique (croisement et mutation) donnent une bonne concordance par rapport à la somme de l'erreur carrée (EMG) ce qui indique qu'ils peuvent fournir des résultats très satisfaisantes.

Tableau 3. Récapitulatif des résultats de débit de crue pour les différentes méthodes

	Giandotti	Q projet
--	-----------	----------

Gumbel	812.87	1967.00
Lognormale	634.64	
Lognormale (3P)	623.70	

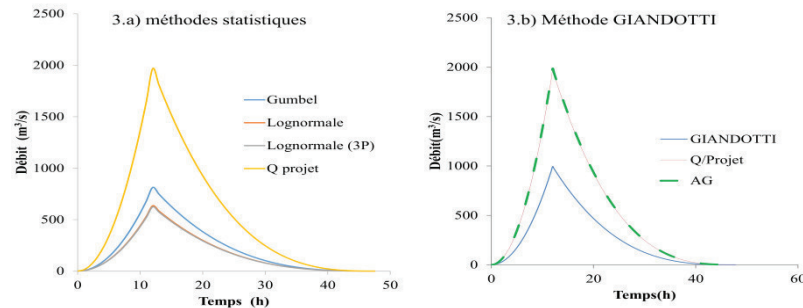


Figure 3. Hydrogrammes de crues.

Conclusion

Ce travail repose sur une technique d'optimisation pour l'étude du comportement hydrologique d'un bassin hydrographique. Cette technique est celle des algorithmes génétiques où nous avons utilisé la formule de GINADOTTI. La qualité des résultats dépend grandement du bon choix des paramètres de l'algorithme génétique (nombre de construction, nombre de tests, mutation, croisement). La productivité des algorithmes génétiques dans le domaine de la prédétermination du flux d'inondation a été démontrée par les résultats obtenus. L'utilisation de cette méthode est un choix absolument justifié. Les algorithmes génétiques sont des outils très puissants utiles pour l'optimisation. À cet égard, nous rappelons que ces techniques requièrent des données précises et fiables. Nous pensons que l'application d'algorithmes génétiques dans le domaine de l'hydrologie devrait être popularisée et testée sur d'autres cas valident cette approche émergente.

Bibliographie

- Bruce P. Hooper, 2003 : Integrated Water Resources Management and River Basin Governance. *Water resources update*, **126**, 12-20.
- Manoj P. Samuel, Madan K. Jha., 2003 : Estimation of Aquifer Parameters from Pumping Test Data by Genetic Algorithm Optimization Technique. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **129**, 348–359.
- Moradkhani, 2004 : Improved streamflow forecasting using self-organizing radial basis function artificial neural networks. *Journal of Hydrology*, **295**, 246–262.
- Qishi WU., Jeffrey J. Shan, 2000 : The application of genetic in GIS network analysis. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, **33**, 1184-1191
- Vannier O., 2013 : *Apport de la modélisation hydrologique régionale à la compréhension des processus de crue en zone méditerranéenne*. Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Terre, Univers, Environnement, 273 p.
- Klemes V, 1987 : Empirical and Causal Models in Hydrologic Reliability Analysis. *Engineering reliability and risks in water resources*, **124**, 391-403.
- Yilmaz kaya & al, 2011 : Novel Crossover Operator for Genetic Algorithms: Ring Crossover. *Computing Research Repository*, abs-1105-0355.

ANALYSE SPATIALE ET TEMPORELLE DE LA PERTINENCE D'UN INDICE DE SECHERESSE EN RELATION AVEC LE RISQUE INCENDIES EN TUNISIE

BELHAJ KHEDHER CH.¹, EL MELKI T.², MOUILLOT F.³

¹U.R. Géomatique et Géosystèmes, Université de La Manouba (Tunisie), FSHST-IRD Tunisie [chiraz_belhadj@yahoo.fr]

²U.R. Géomatique et Géosystèmes, Université de La Manouba (Tunisie), [lmlkitfik@gmail.com]

³CEFE, UMR 5175, CNRS-Université de Montpellier-Université Paul-Valéry Montpellier-EPHE-IRD [florent.mouillot@ird.fr]

Résumé : L'objectif de ce papier est de tester la pertinence de l'utilisation d'un indice de sécheresse (Drought Index : DI) basé sur le bilan hydrique journalier des écosystèmes forestiers pour estimer le risque d'incendie en Tunisie. Celle-ci se caractérise par un gradient climatique latitudinal très contrasté ; allant du méditerranéen humide au nord, au saharien au sud. Pour réaliser cet objectif, la base de données nationale de référence des incendies de forêts fournie par la DGF a été corrigée en premier lieu. Des sous-estimations des surfaces brûlées allant jusqu'à 70% ont été observées pour certains incendies. Ensuite, les surfaces incendiées BA (Burned Areas) ont été corrélées au pas de temps mensuel avec l'indice de sécheresse « DI » pour chaque gouvernorat. L'indice s'est révélé performant quant à la description de la saisonnalité des surfaces incendiées sur l'ensemble du couvert forestier de Tunisie. La relation BA/DI s'est cependant avérée différente pour chaque gouvernorat, et corrélée à la surface forestière pour indice générique valable sur le gradient climatique Tunisien.

Mots-clés : incendies, Tunisie, indice de sécheresse, modélisation.

Abstract : *Spatial and temporal analysis for the relevance of a drought index for fire risk assessment in Tunisia.* We tested the relevance of using a generic drought index based on the daily water balance of ecosystems to estimate the seasonal fire risk in Tunisia, offering a contrasting climatic gradient from the Mediterranean sub-humid to the semi-arid. We initially corrected the reference fire database provided by the Tunisian forest services and in which we have identified an underestimation up to 70% of burned surfaces. We then correlated the monthly burned areas (BA) with the drought index for each governorate. We have shown the relevance of this index to describe the seasonality of burned areas on the entire climate gradient in Tunisia, and identified the local forest cover as an indicator of the slope of the relationship between BA and DI as a generic fire risk index for the Tunisian climate gradient.

Keywords : fire, Tunisia, Drought indices, modelling.

Introduction

La Tunisie se localise à la marge sud de l'aire bioclimatique tempérée, et se caractérise par un gradient bioclimatique latitudinal très contrasté allant de l'étage méditerranéen humide à l'étage saharien au sud. Son climat présente une saison sèche centrée sur le trimestre estival, de plus en plus sévère et longue vers le sud du pays. Dans ce contexte climatique, les incendies de forêts affectent de manière récurrente les ressources forestières du pays. Les incendies de forêts sont contrôlés par l'état hydrique de la végétation, par les conditions météorologiques au moment de l'incendie, par le volume disponible du combustible (biomasse), par la continuité du couvert végétal et par des facteurs anthropiques variés. Nous proposons dans cette étude une analyse régionale du risque incendie en Tunisie à partir d'une nouvelle base de données spatialement explicite et corrigée, et de tester la variabilité de la relation sécheresse/incendie dans cette zone de transition à partir d'un indice fonctionnel empirique de sécheresse.

1. Matériel et Méthode

1.1. Base de données incendies et climatiques

La Direction Générale des Forêts de Tunisie effectue un recensement systématique des incendies sur tout le territoire du pays depuis 1985. Chaque événement est caractérisé par sa

localisation (gouvernorat, délégation, secteur et lieu-dit), sa superficie en hectares, des indications concernant la cause effective/probable de son déclenchement, et sa date/heure. La première tâche effectuée a été de géolocaliser les incendies sur une carte topographique et de vérifier et corriger les surfaces référencées à partir d'une analyse des images landsat. Les informations de précipitation et température journalières sont issues de l'Institut National de la Météorologie (INM) de Tunis.

1.2. Méthodologie

Parmi les indices de sécheresse existants dans la littérature (Dai, 2010), l'indice journalier de Linacre (1973) a été retenu parce qu'il est basé sur l'évapotranspiration potentielle ET_0 , la précipitation ainsi que sur la réserve utile AWC du sol pour prendre en compte les dimensions climatiques et édaphiques de la sécheresse.

L'évapotranspiration potentielle ET_0 est obtenue selon la formule de Priestley-Taylor (package 'Sirad', intégré dans R cran, avec la constante de Priestley Taylor = 0.26) à partir des valeurs du rayonnement net R_n , et de la température moyenne du jour. Le rayonnement net est calculé à partir de la constante solaire $C_s = 1369 \text{ m}^{-2}$ à l'aide des packages R cran 'Solar' et 'Insol' selon la chaîne de processus proposée par Kumar et al. (1997), puis de l'interception par l'atmosphère calculé à partir des T_{\min} et T_{\max} selon la formule de Hargreaves (Allen et al., 1998). Le rayonnement net R_n est finalement estimé pour un albédo choisi à 0.2.

Le modèle de bilan hydrique journalier de Linacre (1973) estime l'évapotranspiration réelle du jour i (ETR_i) d'un sol selon l'équation (1) :

$$ETR_i = \min[AET_{\max} * (W_{i-1}/AWC)^2, ET_{0i}] \quad (eq1)$$

avec $\min[A, B]$ représentant la valeur minimum entre A et B, AET_{\max} : transpiration maximum fixée à 5 mm (cf mesures de transpiration sur forêt de chêne liège en Tunisie Chakroun et al. 2014) ; W_i : teneur en eau disponible du sol (en mm) au jour i (qui varie entre 0 et AWC); AWC: teneur en eau disponible maximum du sol (en mm); ET_{0i} : évapotranspiration potentielle du jour i . La teneur en eau du sol au jour i (W_i) est ensuite calculée selon l'équation 2 (Boulant et al. 2008) :

$$W_i = \min [AWC, W_{i-1} + P_i - ETR_i] \quad (eq2)$$

avec W_i : la teneur en eau du sol au jour i , P_i la précipitation au jour i (en mm), et ETR_i l'évapotranspiration réelle au jour i .

La teneur en eau disponible maximum du sol AWC pour la Tunisie a été choisie à 400mm pour les terrains fertiles du Nord de la Tunisie (Ben Hassine et al. 2003, Zribi et al. 2015) et 200mm pour les zones de la dorsale plus rocailleuses.

Afin de tester la relation « sécheresse-risques d'incendies » en Tunisie, la saisonnalité journalière de l'indice de sécheresse DI_i est calculé à partir du taux de remplissage du sol W_i/AWC , soit $DI_i = 1 - W_i/AWC$ (=0 lorsque W_i est à la capacité au champ FC, et =1 lorsque W_i est au point de flétrissement). La somme mensuelle des DI_i a été corrélée avec la saisonnalité des surfaces incendiées (après correction) issues de la base de données DGF, et ceci pour chaque gouvernorat. De même, la corrélation linéaire entre les surfaces totales incendiées annuelles par gouvernorat et la somme annuelle des intensités journalières de la sécheresse D_i comme indicateur de risque a été testée. L'ensemble des analyses a été effectué par analyse des corrélations linéaires avec le logiciel libre R cran, fonction 'lm'.

2. Résultats

2.1. Surfaces incendiées par gouvernorat en Tunisie : 1985-2010

La figure 1A représente la première carte des surfaces incendiées corrigées et géoréférencées pour la Tunisie à partir des informations DGF, et représente la distribution du risque incendie sur le pays. La figure 1B représente plus en détail la variabilité interannuelle des surfaces incendiées en Tunisie au cours de la période 1985-2010. La surface incendiée moyenne est de 1480ha/an et 804ha/an pour toute la Tunisie sur les périodes 1985-2000 et 2000-2010 à partir de la base de données DGF. Après corrections, nous obtenons 1788 ha/an pour la période 1985-2000 et 1330 ha/an pour la période 2000-2010, soit une augmentation de 20% et 70% par rapport aux données officielles. Les gouvernorats les plus affectés sont Jendouba (JE), El Kef (KF), Zaghouan (ZA) et Siliana (SI). La variabilité interannuelle est importante avec une superficie maximale en 1995 de 6800ha, l'année 2000 avec 4500 ha obtenue après corrections et largement sous estimée par la DGF.

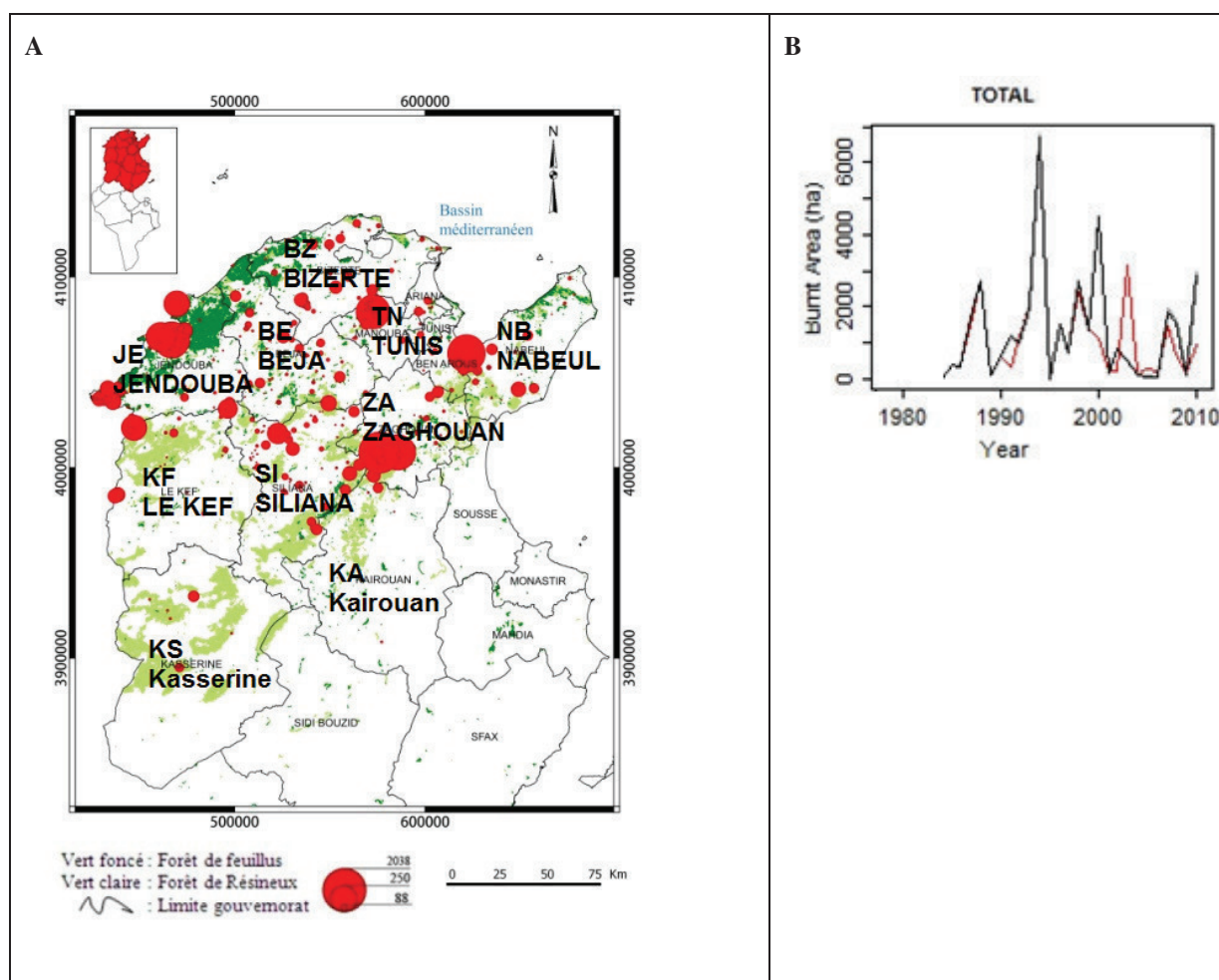


Figure 1. A) carte de la distribution nationale des incendies en Tunisie pour la période 1985-2010. Chaque cercle rouge représente un incendie >10ha dont la taille est proportionnelle à sa surface. B) Surfaces incendiées annuelles (en ha) sur l'ensemble de la Tunisie (Total). Source: Base de données DGF (ligne rouge). Surfaces corrigées par analyses d'images landsat (ligne noire)

2.2. Saisonnalité de la sécheresse et des incendies

La figure 2 représente la distribution saisonnière des surfaces incendiées pour chaque gouvernorat ainsi que la variabilité journalière de l'intensité de la sécheresse estimée par l'indice DI. Les surfaces incendiées sont plus importantes pendant les mois de sécheresse

pour les jours pendant lesquels $DI > 0.4$, un seuil identique pour tous les gouvernorats. Pour les gouvernorats situés plus au sud (Siliana SI, Kasserine KS, Kairouan KA, Nabeul NB, Zaghouan ZA), la sécheresse démarre en moyenne entre les jours n° : 90 et 120 de l'année (1 Avril-1er Mai) et prend fin au jour n° 260 (20 sept) soit une durée totale de 4 à 5,5 mois. Plus au nord (gouvernorats de Jendouba JE, Beja BE, Le Kef KF et Bizerte BZ) la sécheresse démarre vers le jour n° 120-180 (1er Mai-1 Juillet) et prend fin au jour n° 250 (10 sept), soit une durée totale de 2 à 4 mois. Nous remarquons que la saison des incendies est incluse dans la période de sécheresse supérieure à $DI = 0.4$ (ligne verticale noire figure 2), avec une période des feux plus réduite (juillet aout) dans les gouvernorats du nord par rapport aux gouvernorats du sud (juin-septembre).

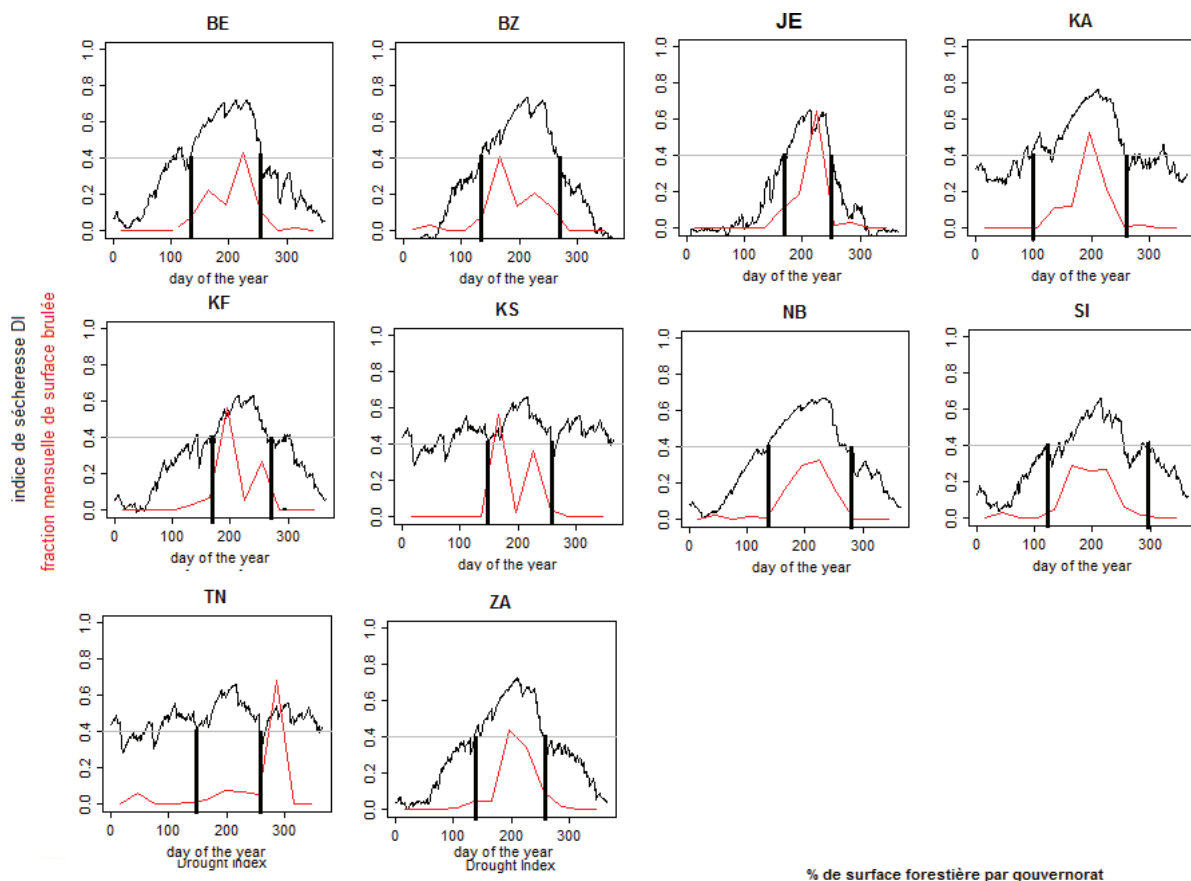


Figure 2. Variabilité saisonnière de l'indice de sécheresse (DI, ligne noire) et des surfaces incendiées (fraction mensuelle de la surface incendiée totale de l'année, ligne rouge) pour chacun des gouvernorats calculée sur la moyenne saisonnière de la période 1985-2010. La ligne horizontale grise représente le seuil de $DI = 0.4$ et les lignes noires verticales représentent les bornes de la période pour lesquelles $DI > 0.4$.

2.3. Relation sécheresse/incendie sur le gradient climatique

La figure 3 représente, pour chaque gouvernorat, la corrélation linéaire entre l'indice de sécheresse DI mensuel et les pourcentages mensuels de surface forestière incendiée. Nous observons que pour tous les gouvernorats, aucune surface incendiée n'est enregistrée lorsque $DI < 0.4$. Une fois ce seuil dépassé, nous observons pour les $DI > 0.4$, une corrélation significative (p -value < 0.1 pour JE, TN, KF, KS et BZ, p -value < 0.05 pour BE, SI KA, NB et

ZA) entre DI et la fraction de surface forestière incendiée mensuelle pour tous les gouvernorats. Cependant, nous observons que la pente des régressions entre DI et le pourcentage de surface forestière incendiée n'est pas constante entre gouvernorats. Les pentes les plus importantes sont enregistrées pour JE, BE et ZA. Nous obtenons une corrélation linéaire significative ($p < 0.05$, $R^2 = 0.63$) entre les pentes de la corrélation surface incendiée/DI pour chaque gouvernorat obtenues en figure 2, et les pourcentages du gouvernorat occupé par de la forêt ou maquis. En conclusion, plus un gouvernorat est occupé par de la forêt ($P_{\text{forêt}}$ grand), plus la fraction de surface forestière incendiée pour un même indice sécheresse est importante. Nous obtenons un modèle générique pour le risque mensuel de surface incendiée en Tunisie (équation 3)

$$BA(\text{ha}) = S_{\text{forêt}} * (0.034 + 10^{(0.07 * P_{\text{forêt}})}) * (DI - 0.3) \text{ quand } DI > 0.4 \text{ (Eq 3)}$$

$$BA(\text{ha}) = 0 \text{ quand } DI < 0.4$$

avec DI: indice de sécheresse de Linacre [0-1]; $P_{\text{forêt}}$: Pourcentage d'occupation du sol par la forêt [0-100]; $S_{\text{forêt}}$: Surface forestière (en ha); BA: surface incendiée (en ha)

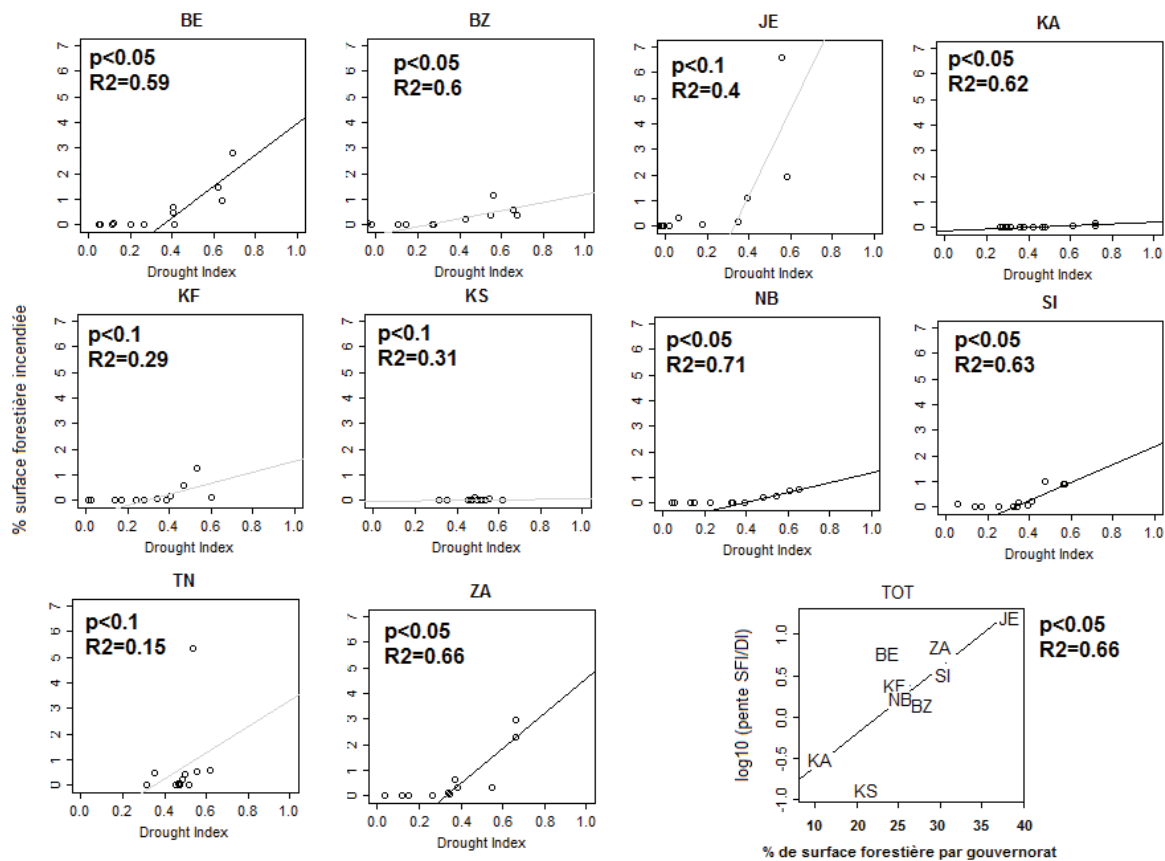


Figure 3. Corrélations entre l'indice de sécheresse mensuel (drought index DI) et le pourcentage de surface forestière incendiée (%) mensuelle pour chaque gouvernorat de Tunisie. Les droites de corrélation grises représentent les corrélations ayant un p-value < 0.1 et noires une p-value < 0.05 pour les valeurs de DI > 0.4. La corrélation entre les pentes des régressions pour chaque gouvernorat et le pourcentage de surface forestière dans chaque gouvernorat est aussi représentée. JE: Jendouba, TN: Tunis, KF: el Kef, KS: Kasserine, BE: Beja, BZ: Bizerte, SI: Siliana, KA: Kairouan, NB: Nabeul, ZA: Zaghuan.

3. Discussion

Notre analyse régionale des surfaces incendiées en Tunisie utilise une base de données corrigée et réévaluée sur la base d'informations historiques d'images landsat. Nous avons

montré une sous estimation de 70% des surfaces incendiées enregistrées par les services nationaux depuis 2000, notamment lors du référencement des grands incendies. Les informations brutes de la DGF ont généralement été utilisées pour les analyses nationales du risque incendie en Tunisie (Sebei 2015 ; Abdelmoula, 2013 ; Chriha et Sghari, 2013), et nous suggérons l'utilisation de notre mise à jour pour les futures analyses. Le référencement erroné des surfaces incendiées est un phénomène courant (Pereira *et al.*, 2011 ; Short, 2015 ; Husson, 1985) dû aux investigations rapides sur le terrain ou à une volonté politique de minimiser la divulgation des dommages (Kasischke *et al.* 1999). Les apports de la télédétection haute résolution (en accès libre) et les méthodes semi automatiques de traitement du signal (Koutsias *et al.* 2013) permettent maintenant une analyse efficace des surfaces incendiées, ainsi que leur localisation précise.

A partir de cette base de données corrigée, nos résultats ont montré que la saisonnalité de la sécheresse calculée par notre indice DI était un bon indicateur de la période d'incendies pour chaque gouvernorat, avec l'avantage de prendre en compte les informations climatiques et édaphiques contrastées de la Tunisie. Les gouvernorats les plus au sud observent une sécheresse précoce et une saison des incendies précoce, tandis que les gouvernorats du nord observent une période de sécheresse courte et une saison des feux proportionnellement plus courte. Cependant, nous avons aussi montré une modification de la relation sécheresse/surface incendiée en fonction du pourcentage de couvert forestier. Le gradient de sécheresse seul ne peut donc pas être utilisé comme indicateur régional du risque incendie en Tunisie. Le pourcentage de surface forestière est apparu comme un bon indicateur correctif, où les surfaces forestières plus importantes peuvent générer une continuité du couvert plus importante facilitant la propagation des incendies. Pour une estimation du risque journalier, les variables de température, humidité de l'air et de vitesse du vent devront être considérées. Nous pouvons donc recommander notre indice climato-édaphique simple de sécheresse pour une estimation de la variabilité saisonnière et interannuelle des surfaces incendiées en Tunisie pour une première approche. La sécheresse est le principale facteur de contrôle du risque incendie en Méditerranée, et nous obtenons des coefficients de corrélation (R^2 entre 0.3 et 0.7) similaires à ceux obtenus en Europe Méditerranéenne et USA (Urbietta *et al.* 2015). La disponibilité de la biomasse combustible sur ce gradient climatique sont aussi à explorer plus avant, ainsi que les aspects humains, les différents systèmes forestiers de la Tunisie n'ayant pas la même importance économique de service écosystémique, de mise en réserve, ni de tensions sociales pouvant conduire à des mises à feux plus ou moins importantes.

Bibliographie

- Abdelmoula K., 2013 : Etude de la régénération du chêne liège après incendie en Tunisie. *Journées d'étude sur la réhabilitation des subéraies incendiées et reboisements*. 16-17 Janvier 2013. Tlemcen (Algerie).
- Allen R.G., Pereira L. S., Raes D., Smith M., 1998 : Crop evapotranspiration —guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization*, Rome.
- Boulant N., Kunstler G., Rambal S., Lepart J. 2008 : Seed supply, drought and grazing determine spatio temporal patterns of recruitment for native and introduced invasive pines in grasslands. *Diversity and distribution*, **14**, 862-874.
- Chakroun H., Mouillot F., Nasr Z., Nouri M., Ennajah A., Ourcival J.M. 2014 : Performance of LAI-MODIS and the influence on drought simulation in a Mediterranean forest. *Ecohydrology*, **7**(3), 1014-1028.
- Chriha S., Sghari J., 2013 : Les incendies de forêt en Tunisie. Séquelles irréversibles de la révolution de 2011. *Méditerranée* 2/2013, **121**, 87-93.
- Dai A., 2010 : Drought under global warming, a review. *Wiley interdisciplinary reviews. Climate change*.
- Husson A., 1985 : Télédétection des incendies de forêt en Corse entre 1973 et 1980. *Méditerranée*, **54**(1), p.53-59

Kasischke ES., Bergen K., Fennimore R., Sotelo F., Stephens G., Janteos A., Shugart H.H., 1999 : Satellite imagery gives clear picture of Russia's Boreal forest fires. *EOS Eath Space Science News*, **80**(13), 141-147.

Koutsias N., Pleniou M., Mallinis G., Nioti F., Sifakis N.I., 2013 : A rule based semi automatic method to map burned areas : exploring the USGS historical landsat archives to reconstruct recent fire history. *Int. J. Remote Sensing*, **34** (20), 7049-7068.

Kumar L., Skidmore A.K., Knowles E., 1997 : Modelling topographic variation in solar radiation in a GIS environment. *International Journal of Geographical Information Science*, **11**(5), p. 475-497.

Linacre E.T., 1973 : A simpler empirical expression for actual evapotranspiration rates – a discussion. *Agricultural Meteorology*, **11**, 451-452.

Pereira M.G., Malamud B.D., Trigo R.M., Alves P.I., 2011: The history and characteristics of the 1980-2005 Portuguese rural fire database. *Natural hazards and earth system sciences*, **11**(12), 3343-3358.

Sebei S., 2015 : Le degré météorologique du risque incendie de forêt (DMRIF) : méthode d'évaluation du risque d'incendie en Tunisie. *Actes du XXVIII^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège (Belgique), 1-4 juillet 2015, 212-217.

Urbieto IR, Zavala G., Bedia J., Gutierrez J.M., San Miguel Ayanz J., Camia A., Keeley J.E., Moreno JM. 2015 : Fire activity as a function of fire weather seasonal severity and antecedent climate across spatial scales in southern Europe and Pacific western USA. *Environmental Research Letters*, **10**(11): 114013/

Zribi L., Mouillot F., Gharbi F., Ourcival J.M, Hanchi B., 2015 : Warm and fertile sub humid conditions enhance litterfall to sustain high soil respiration fluxes in a Mediterranean Cork Oak Forest. *Forests*, **6**(9), 2918-2940.

TELEDETECTION ET SIG EN APPUI A LA CARACTERISATION DU CLIMAT EN MAURITANIE: CAS DU PARC NATIONAL DU DIAWLING (PND) ET SA ZONE PERIPHERIQUE

O.ABIDINE.M. M.¹, EL ABOUDI. A.¹, INEJIH. C. A.², O. SOULE. A.³

¹Laboratoire de botanique, Mycologie et Environnement, Faculté des Sciences, Université Mohamed V, Rabat-Maroc, 4 avenue ibn battouta BP 1014 (hmd108@yahoo.fr ; elaboudi@gmail.com)

²DDECOMAR (Réseau Développement Durable et Ecosystèmes Marins) (inejihca@gmail.com)

³Ecole Normale Supérieure de Nouakchott_Mauritanie BP 990 (ahmdous@yahoo.fr)

Résumé-Le climat est le facteur fondamental qui détermine les milieux naturels sahélien. La Mauritanie est l'un des pays sahéliens les plus touchés par les sécheresses qui se sont succédées depuis 1970. Cette succession de sécheresse a fragilisé la végétation et provoqué l'appauvrissement des sols. La présente étude analyse l'évolution du climat du Parc National du Diawling (PND) et sa zone périphérique sur la période de 2000-2013. Elle cherche à mettre en évidence l'intérêt des données spatiales pour la caractérisation du climat dans une région sahélienne. A cet effet, les températures maximales et minimales sont dérivées des images MODIS (avec une résolution de 0,05° soit 5 km) et les précipitations de données TRMM (avec une résolution spatiale de 0,25° soit 25 km). Ces deux paramètres ont été comparés à l'indice de végétation (NDVI, dérivé des images MODIS avec une résolution temporelle de 16 jours et une résolution spatiale de 250m). Les résultats issus des données spatiales ont été validés en référence à la station météorologique de Rosso.

Mots-clés : NDVI, TRMM, MODIS, sécheresse, Mauritanie.

Abstract : Remote sensing and GIS in support of the characterization of the climate in Mauritania: case of the Diawling National Park (PND) and its peripheral zone- The climate is the fundamental factor that determines the Sahelian natural environments. Mauritania is one of the Sahelian countries most affected by droughts that have followed since 1970. This succession of drought has weakened vegetation and caused soil depletion. This study characterizes the climate trends of Diawling National Park (PND) and its peripheral area over the period 2000-2013. It seeks to highlight the importance of space data for climate characterization in the Sahel region, using maximum and minimum temperatures derived from MODIS imagery (with a resolution of 0.05 ° or 5 km) and rainfall data derived from TRMM (with a spatial resolution of 0.25 ° or 25 km). These two parameters were compared with the vegetation index (NDVI, derived from MODIS images with a temporal resolution of 16 days and a spatial resolution of 250m). The results from the spatial data were validated referring to Rosso meteorological station.

Keywords: NDVI, TRMM, MODIS, PND, drought, climate, Mauritania.

Introduction

En Mauritanie comme dans tous les pays sahéliens, la sécheresse observée depuis plus de trente années a eu des conséquences souvent graves sur tous les écosystèmes terrestres et aquatiques (Servat *et al.*, 1998; Nicholson, 1978 et 1998). Cette sècheresse s'explique par un déficit pluviométrique important observé depuis la fin des années 1970 (Ozer, 2000 ; Ozer *et al.*, 2014) ; un déficit qui a affecté en profondeur tous les écosystèmes agricoles, steppiques, etc.

Le suivi du climat par les mesures directes des paramètres pour caractériser les états et tendances n'ayant pas été toujours possible et ou assuré de manière continue, on a souvent recours aux estimations issues de sources indirectes.

Dans cette perspective, notre étude vise à étudier l'évolution temporelle et spatiale de quelques paramètres climatiques en particulier les précipitations et voir l'impact de ce déficit hydrique sur la végétation du Parc National du Diawling (PND) et sa zone périphérique sur la période de 2000-2013. Pour ce faire, nous avons testé l'apport de données spatiales comme

source indirectes avec les données TRMM pour les précipitations et les données MODIS pour les températures de surface et l'indice de végétation NDVI. Le recours aux données spatiales se justifie par le fait que les postes météorologiques en Mauritanie comme dans la plupart des pays africains font défaut et quand ces données existent, elles sont souvent fragmentaires. Par ailleurs, sur le plan pratique, la caractérisation du climat à partir des données spatiales n'a jamais été réalisée pour le Parc National du Diawling (PND) et rarement en Mauritanie.

1. Aperçu général sur la zone d'étude

Le Parc National du Diawling (PND) appartient à la wilaya de Trarza. Il a été créé par le décret n° 91-005 du 14 janvier 1991. En 1994, ce Parc est classé comme zone humide d'importance internationale (site de Ramsar). Cette zone humide s'étend sur une superficie de 16000 ha. Sa zone périphérique couvre une superficie 52000 ha. Le PND se situe entre les 16°05' et 16°35' de latitude nord, et les 16°20' et 16°30' de longitude ouest (Fig.1).

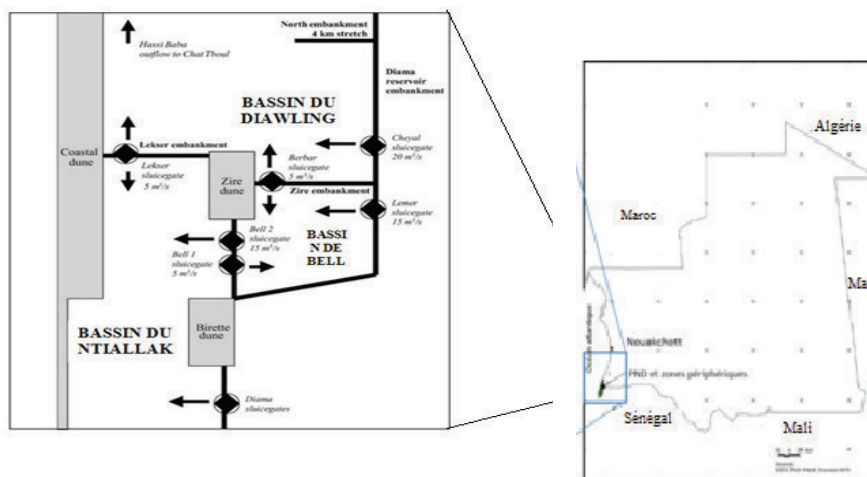


Figure 8. Localisation du Parc national du Diawling et sa zone périphérique

Le PND est constitué, du Nord au Sud, du bassin du Diawling (10 000 ha dont 8 000 dans le parc) alimenté par l'ouvrage du Cheyal, du bassin du Bell (4 000 ha) alimenté par l'ouvrage de Lemer et évacué par l'ouvrage du Berbar vers le Nord et par les ouvrages Bell1 et Bell2 et le bassin du Gambar qui fait partie de la retenue d'eau de Diama (*Hamerlynck O., 1997 ; Duvail S., 2001*). L'ensemble s'inscrit entre la dune côtière au Nord-Ouest, les dunes de Birette et Ziré ainsi que la digue les reliant, à l'Ouest et les rives du fleuve Sénégal à l'Est. En effet, le PND est sous les effets d'eau douce venant du fleuve Sénégal et d'eau salée d'origine marine liée aux marées.

Le PND compte un ensemble d'écosystèmes terrestres et aquatiques très diversifiés, organisés autour de plaines d'inondation alimentées par les eaux de pluies et de crue artificielle (à travers des ouvrages hydrauliques du fleuve), de dunes continentales et côtières ainsi que d'îles abritant des mangroves à *Avicennia germinans* et *Rhizophora racemosa*. Ce milieu est une zone de frayère pour un bon nombre de poissons dulçaquicoles et estuariens et les crevettes. C'est un important lieu de nidification d'oiseaux tels que, entre autres, les flamants, les cormorans, les hérons, les aigrettes, les spatules. La flore est principalement constituée des *Sporobolus robustus*, *Acacia nilotica*, et *Nymphaea lotus*, espèces servant de base pour les activités économiques des populations.

2. Données utilisées

Pour atteindre les objectifs visés, nous avons téléchargé les images des précipitations TRMM avec une résolution (en degrés) de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, les images des températures maximales et minimales MODIS avec une résolution de $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ (5 kilomètres) et l'Indice de végétation (NDVI) MODIS avec une résolution de 250m, ceci pour une période de 13 ans allant du 2000 à 2013.

Les données climatiques sont disponibles dans les sites de la NASA et JAXA sous plusieurs formes (données journalières ou mensuelles). Dans cette étude nous avons utilisé les données mensuelles de TRMM 3B43 qui ont été jugées de bonne qualité par *Collischonn et al. 2006 et Collischonn et al. 2007*. Pour chaque année 12 images ont été téléchargées séparément, chaque image correspondant à un mois, la même chose pour les températures. En revanche pour l'indice de végétation, deux images par mois ont été téléchargées soit au total 24 images par an.

Toutes les images ont été géoréférencées à l'aide du programme ENVI : pour les précipitations, les données sont enregistrées en mm/heure et les températures en degré Kelvin, les précipitations sont converties en mm/mois et les températures en degré Celsius.

3. Résultats et Discussion

L'étude des précipitations annuelles a clairement montré une variation des totaux annuels durant la période d'étude avec des moyennes annuelles variant entre 175.8 et 478.5 mm (Fig.2). Nous constatons d'après cette figure que la moyenne annuelle des précipitations enregistrées durant la période 2000-2013 dans le Parc National du Diawling (PND) et sa zone périphérique est de l'ordre de 308 mm. Les années 2004, 2007, 2008 et 2011 présentent un déficit important en eau avec des moyennes des précipitations inférieures à 308 mm. En revanche, 2009, 2010 et 2013 sont les plus arrosées de cette période avec des moyennes annuelles supérieures à 308 mm, l'année 2010 est la plus pluvieuse avec une moyenne de 478,5 mm. L'allure générale de la courbe obtenue montre bien que le climat du Parc National du Darling (PND) est de type sahélien et se caractérise par une importante variation des précipitations d'une année à l'autre.

En ce qui concerne les variations des températures de la zone d'étude durant la période 2000-2013, la figure 3B montre que la température moyenne annuelle du Parc National du Diawling (PND) est presque constante et oscille entre 24°C et 25°C durant la période 2000-2013. Cependant, on note au cours de cette période, une variation importante des moyennes mensuelles. Les températures maximales (M) dépassent régulièrement 34°C . Ces valeurs sont enregistrées pendant les mois les plus chauds (avril et mai) tandis que les températures minimales enregistrées varient entre 15.5 en janvier et 23.4°C en septembre, les mois de décembre et janvier sont les mois le plus frais (figure 3A)

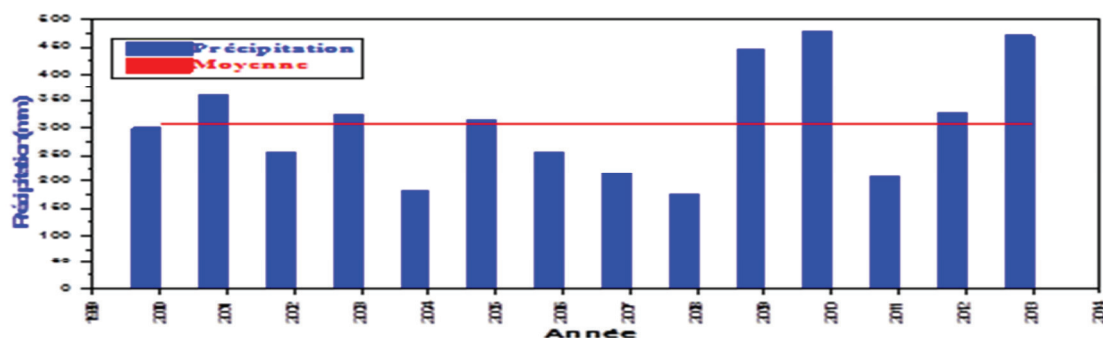


Figure 2. Evolution annuelle des précipitations du Parc National du Diawling de 2000 à 2013

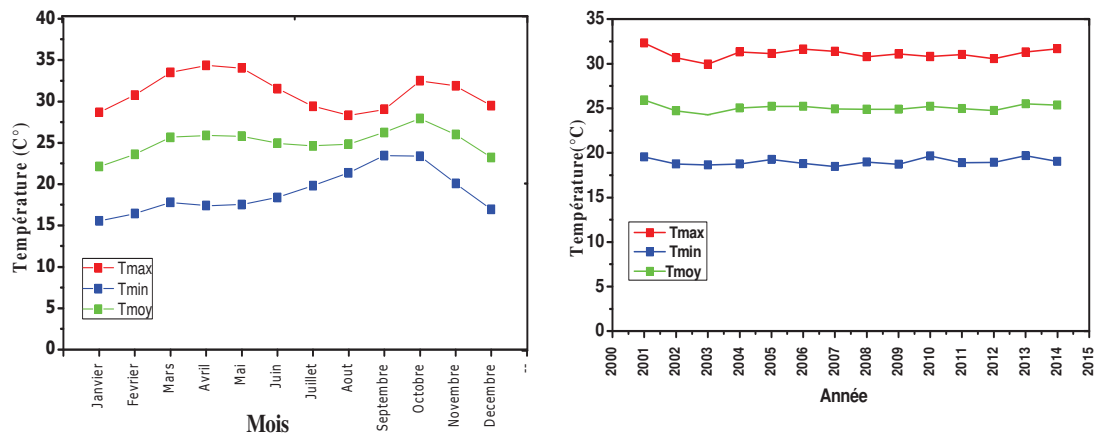


Figure 3. Evolution des températures mensuelles (A) et Evolution des Températures annuelles (B) dans le Parc National du Diawling

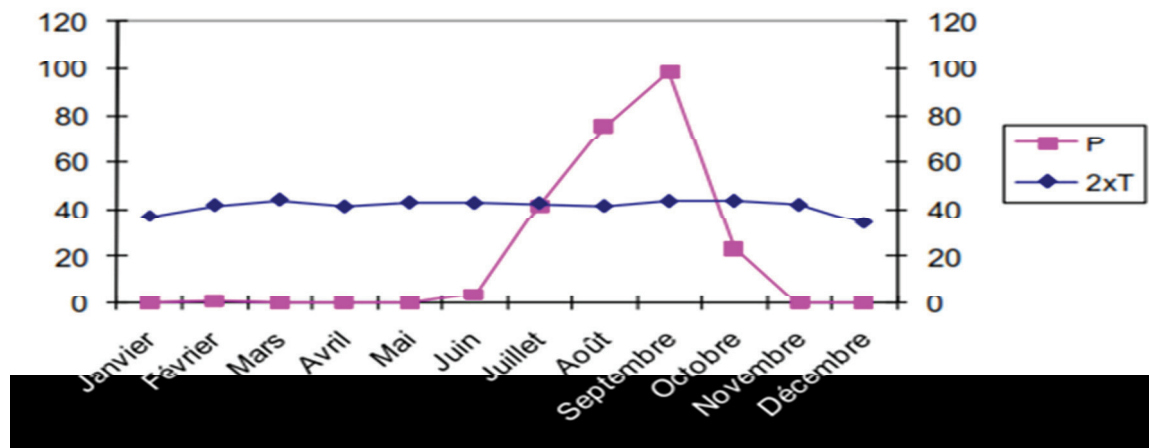


Figure 4. Diagramme Ombrothermique du Parc National du Diawling et sa zone périphérique
Le diagramme ombrothermique du Parc national du Dawling et sa zone périphérique (Fig. 4) établie à partir des données de Station de Bouhajra (Siège du PND) a montré que le climat de la zone d'étude peut être subdivisé en trois saisons : une saison pluvieuse et chaude "ou hivernage" correspondant aux mois d'aout-septembre ; une saison sèche et froide d'octobre à janvier; une saison sèche et chaude de mars à juillet.

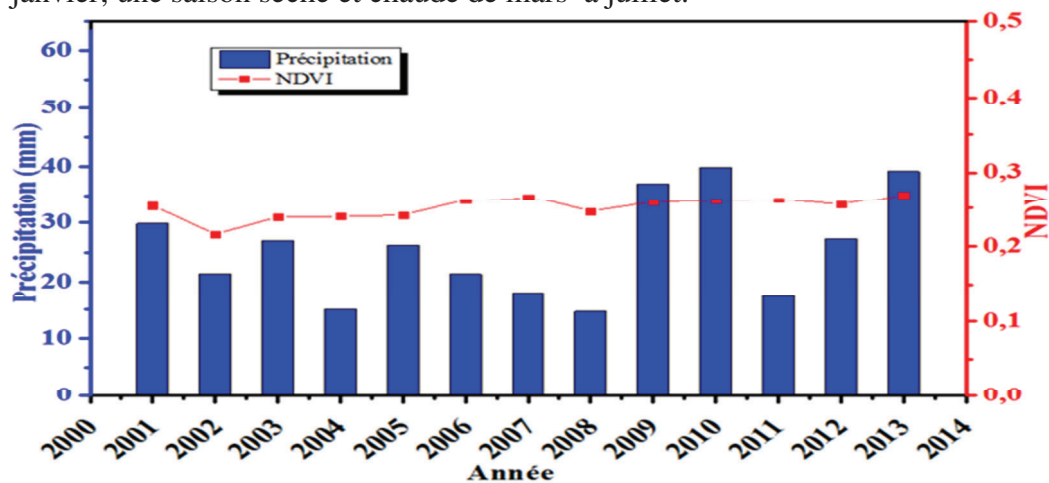


Figure 5. Relation entre la moyenne annuelle des précipitations et la moyenne annuelle de NDVI du Parc National du Diawling et sa zone périphérique

L'indice de végétation normalisé (NDVI) est largement utilisé dans le monde entier comme une mesure de la vitalité de la végétation, avec des valeurs élevées de NDVI indiquant une végétation vigoureuse. La relation entre les indices de végétation et des précipitations a été utilisée par plusieurs auteurs pour surveiller la couverture végétale (Evans et Geerken, 2004). Le NDVI est un bon indicateur des changements de l'état de la végétation, par conséquent, il a été utilisé pour suivre la sécheresse dans la zone d'étude.

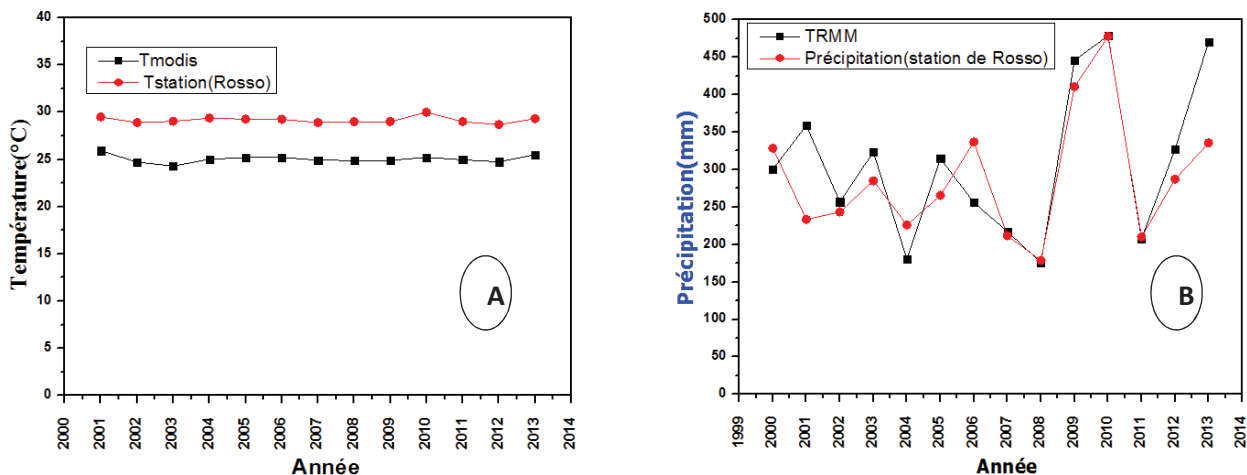


Figure 6. Diagrammes de relation entre les données satellites et la station météorologique de Rosso : températures annuelles (A) et précipitations annuelles (B)

Les données de TRMM et la moyenne annuelle de l'indice de végétation calculée à partir des images téléchargées du site de MODIS sont croisées afin de détecter l'évolution de l'état de la végétation en fonction des précipitations du Parc National du Diawling et sa zone périphérique. La figure 5 montre que l'indice NDVI évolue dans le même sens que les précipitations sauf pour les années 2006 et 2007 où l'indice de végétation a montré une augmentation malgré la baisse des précipitations, probablement en raison des effets de variations de la durée et des quantités d'eau des crues artificielles. Les valeurs de NDVI varient entre 0,21 à 0,27. On note également que les NDVI moyens ne dépassent jamais 0,27, traduisant la faible densité de la végétation sur le Parc.

Les données TRMM 3B42 sont utilisées pour caractériser la variabilité spatiotemporelle de la station de Rosso (WMO 61489) qui existe depuis le 2 janvier 1957, une première étape de validation des données est nécessaire pour s'assurer de leur qualité. Elles montrent que la relation est fortement positive sauf pour certaines années (2001, 2007 et 2013). S'agissant de la relation entre les températures moyennes, on montre qu'il n'y a pas de corrélation significative entre les LST Modis (entre 24°C et 25°C) et les Tsol (entre 29°C et 30°C) de la station météorologique de Rosso (fig.7). Cela s'explique en partie par l'effet de la proximité de la mer sur le littoral ; la température moyenne varie de 25°C, par contre la température de l'air à l'intérieur se situe à 30°C (Hamerlynch, 1997).

Conclusion

Ce travail a été effectué sur le Parc National du Darling (PND) et sa zone périphérique qui est considéré, à juste titre, comme un écosystème fragilisé, exposé au phénomène de la désertification (Ould Mohamedou Abdallahi., 1998). Le Parc National du Dawling a connu l'apparition d'une espèce aquatique envahissante *Typha australis*, qui a infligé des dégâts inestimables sur les zones humides de la vallée du fleuve Sénégal, et qui est une menace

directe pour la santé humaine, animale et la biodiversité dans le Parc National du Diawling (Diawara, 1997).

L'utilisation de la télédétection et SIG permet d'avoir des informations précises relatives aux précipitations et températures et de végétation sur la zone d'étude.

Les résultats ont également permis de construire des connaissances de compréhension sur le climat et la végétation du Parc National du Dawling et sa zone périphérique. L'évolution de la moyenne annuelle de l'indice de végétation (NDVI) suit celle des précipitations sauf pour certaines années (2006 et 2007).

Bibliographie

- Collischonn B., Allasia D., Collischonn W. et Tucci C. E. M., 2006 : Estimativas de precipitação por sensoriamento remoto passivo : desempenho do satélite TRMM na bacia do alto Paraguai até Descalvados. Anais 1º simposio de geotecnologias no Pantanal, Campo Grande (Brésil), 11-15 novembre 2006, 47-56.
- Collischonn B., Allasia D., Collischonn W. et Tucci C. E. M., 2007 : Desempenho do satélite TRMM na estimativa de precipitação sobre a bacia do Paraguai superior. *Revista Brasileira de Cartografia*, **59**, 93-99.
- Diawara Y., 1997 : *Rapport de consultation : actualisation des données de la végétation et validation des relevés cartographiques du Parc National du Diawling*, MDRE, UICN, p 23.
- Duvail S., 2001 : *Scénarios hydrologiques et modèle de développement en aval d'un grand barrage. Les usages de l'eau et le partage des ressources dans le delta mauritanien du fleuve Sénégal*, Thèse de doctorat de géographie, Université Louis Pasteur Strasbourg I, 313 p.
- Evans J., Geerken R. 2004 : Discrimination between climate and human-induced dryland degradation. *Journal of Arid Environment*, **57**, 535-554.
- Hamerlynck O. 1997 : *The Diawling National Parc, Mauritania: joint management for the rehabilitation of a degraded coastal wetland*. PND, Mauritanie : 18 pp.
- Nicholson S.E., 1978 : Climatic variations in the Sahel and other African regions during the past five centuries. *Journal of Arid Environments*, **1**, 3-24.
- Nicholson S.E., 1998 : Interannual and interdecadal variability of rainfall over the African continent during the last two centuries. *Water resources variability in Africa during the XX century* (Servat, Hugues, Fritsch et Hulmeeds), IAHS Publication n° 252, 107-116.
- Ouldi Mohamedou Abdallahi., 1998 : *Contribution a l'étude du Parc National du Diawling, eaux, sols, végétation. Contribution to study of the Diawling National Park water-soils-vegetation*, 155 p.
- Ozer P. 2000 : Les lithométéores en région sahéenne : un indicateur climatique de la désertification. — *GEO-ECO-TROP*, **24**, 1-317.
- Ozer P., Hountondji Y. C. Gassani J. Djaby B. , DE Longueville F., 2014 : Evolution récente des extrêmes pluviométriques en Mauritanie (1933-2010). *Actes du XXVII Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 2-5 juillet 2014 – Dijon (France)*, 394-400.
- Servat E., Paturol J.E., Kouame B., Travaglio M., Ouedraogo M., Boyer J.F., Lubes-Niel H., Fritsch J.M., Masson J.M., Marieu B., 1998 : Identification, caractérisation et conséquences d'une variabilité hydrologique en Afrique de l'Ouest et Centrale. *Water Ressources Variability in Africaduring the XXth Century*, 323-337

RELATIONS ENTRE LE CLIMAT ET LA RÉPARTITION DE LA VÉGÉTATION DANS LES AURÈS (CAS DU MONT CHÉLIA) : APPORT DES SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE (SIG) DANS LEUR MISE EN ÉVIDENCE

BEZZIH H., MALKI H., AISSI A.

Département d'agronomie, Université Batna 1. Mail : houdabezih@gmail.com ; malkiham@hotmail.com ; abdeldjalil@gmail.com

Résumé : Après la présentation du mont de Chélia (le cadre géographique et climatique) et après avoir souligné les grands traits de la végétation, on procède à la mise en valeur des relations qui existent entre les formations végétales et le climat. L'apport du SIG nous a permis de mieux présenter les principales formations forestières du point de vue de leur localisation dans la région et de leur répartition altitudinale. La présente étude conduit à essayer d'exprimer la valeur bioclimatique de chaque espèce et à l'intégrer dans un étage de végétation.

Mots-clés : Chélia- Etage bioclimatique -SIG – Formation végétale.

Abstract -Relationship Between the climate and the distribution of the vegetation in the Aures Mountains (case of Chelia) : Contribution of geographic information systems (GIS) in their highlighted. After establish the presentation of the Mount of Chelia concerning the geographical framework, climate and stressed the major traits of the vegetation, the next step is to master in place the relations that exist between the plant formations and the climate. The contribution of the SIG allows us to present better the main forest formations of point of view their location in the region and their altitudinal distribution. The present study leads to try to express the value bioclimatic of each species and to integrate it in a vegetation stages.

Keywords : Cheia- bioclimatic stage – GIS- plant formation.

Introduction

Le massif montagneux de l'Aurès (Est algérien) se caractérise par son homogénéité physique, sa végétation diversifiée et ses différents étages bioclimatiques.

Le mont de Chélia fait partie de ce massif. Il se distingue par la présence du sommet le plus haut de l'Algérie du Nord (Ras Kelthoum: 2 328m d'altitude) et des plus beaux peuplements du cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica* M.) en Algérie. Il se localise au Nord –Est de l'Aurès. Il s'allonge dans une direction SW – NE, dans le prolongement du Djebel Zellatou. Il s'étire sur une longueur d'environ 15 km pour une largeur de 6 km en moyenne.

Le climat du mont de Chélia est de type méditerranéen, semi-aride à subhumide avec deux périodes bien tranchées : une période humide et froide (hiver- printemps) et une période sèche et chaude (été- automne). Ces vingt dernières années, on assiste à un véritable réchauffement du massif. Les neiges qui persistaient sur le sommet de Ras Kelthoum jusqu'au mois de Mai sont un lointain souvenir.

Il semble évident que le climat soit le principal facteur écologique dans la région des Aurès qui modèlera d'une façon très précise le paysage végétal (Schoenenberger, 1972). La présente contribution s'inscrit dans l'optique de rechercher la relation entre les étages bioclimatiques et la répartition de la végétation dans le mont de Chélia.

La cartographie du mont de Chélia, en utilisant les outils d'analyse spatiale et les systèmes d'information géographique permet de générer plusieurs cartes thématiques : altitude, précipitations, température et formations végétales.

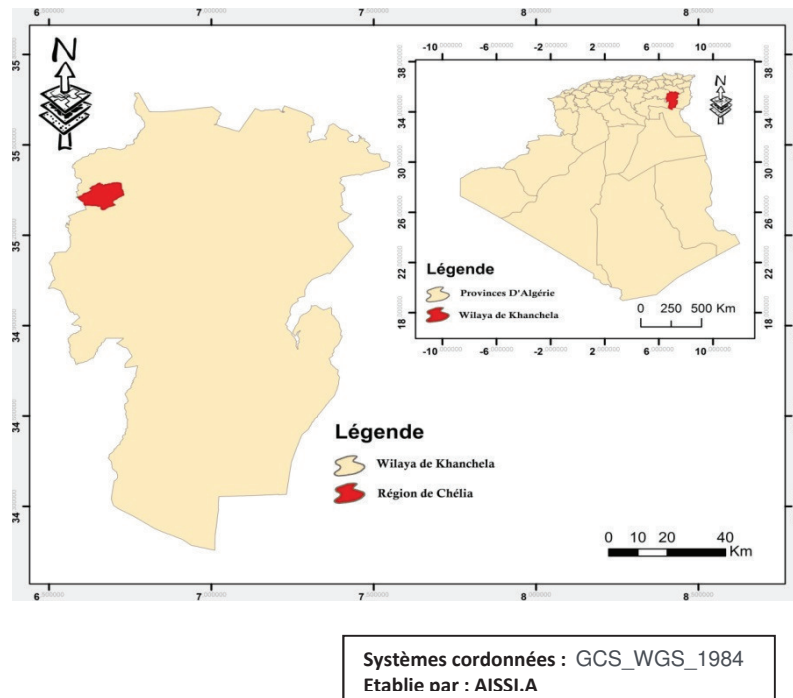


Figure 1. Carte de situation de la zone d'étude

1. Etude de climat

Pour caractériser le climat de la région, nous avons exploité les données climatiques émanant des 2 stations météorologiques les plus proches de notre zone d'étude (Bouhmama sur exposition sud et Chélia sur exposition nord) (tableau 1), car aucune station n'est installée ni en hautes altitudes ni en ambiance forestière.

Elles constituent de ce fait les stations de références à partir desquelles des extrapolations à différentes altitudes seront réalisées. Les principaux paramètres étudiés sont surtout la pluviométrie et les températures.

Tableau 1. Situation des postes météorologiques (ONM, 2008)

Station	Code	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Nombre d'années d'observation	Versant
Bouhmama	06-18-03	35, 28°	6,73°	1160	32	Sud
Chélia (Cantina)	07-06-06	35, 19°	6, 75°	1260	31	Nord

1.1. Les précipitations

Les précipitations varient en fonction de l'altitude, de l'orientation des chaînes de montagne et de l'exposition. De ce fait, les versants Nord et Nord-Ouest reçoivent plus de précipitations que les autres expositions. Aussi les quantités de pluies augmentent de bas en haut, selon un gradient pluviométrique altitudinal (Seltzer, 1946 ; Kadik, 1987).

Dans notre travail, les valeurs utilisées sont les moyennes des précipitations mensuelles et annuelles pour la période allant de 1975 à 2006 (tableau 2).

Tableau 2. Les observations mensuelles et annuelles des précipitations pour les 2 stations (1975 -2006)

Station/Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc	Totaux
Bouhmama	36.3	35.8	42.4	30.9	34.3	24	17.7	20.9	36.7	32.4	42.3	34.5	388.13
Chélia	44.9	41	57.7	52.5	38.6	32.5	33	43.9	48.8	50.8	42.1	47.8	533.6

Ces données ont été utilisées pour cerner les quantités de pluies que reçoivent les versants nord et sud, à différentes altitudes en utilisant des gradients pluviométriques altitudinaux adoptés par Abdessemed (1981) pour 100 m dénivelée. Ils varient selon les versants : 20 mm pour versant sud et 40mm pour le versant nord. La figure 2 montre que le versant nord est relativement le plus arrosé avec une moyenne de 990 mm/an à une altitude de 2326 m. Le versant sud, est marqué par une moyenne de 416 mm/an à l'altitude 1200 m.

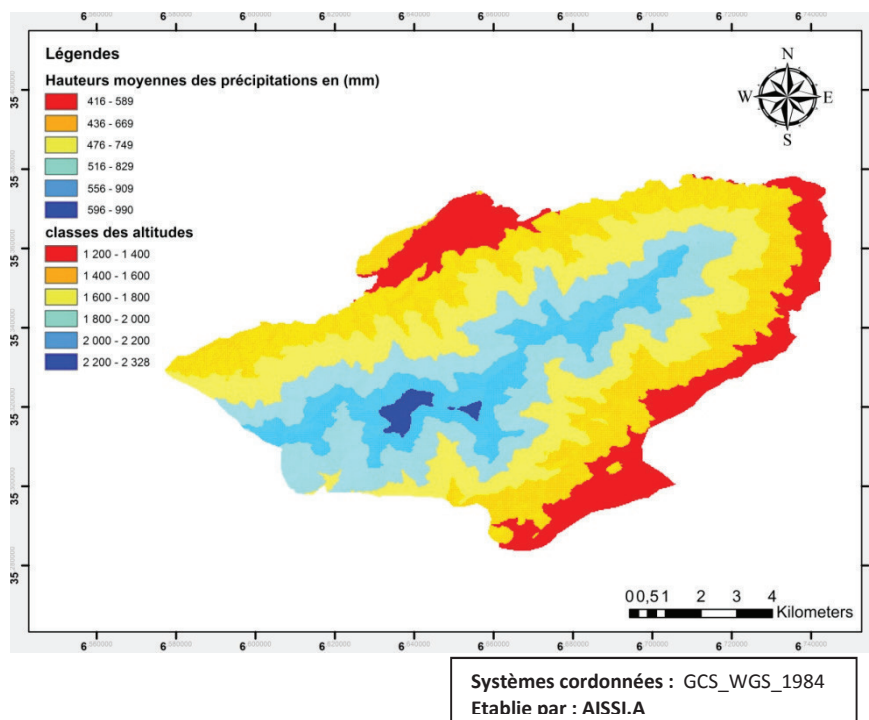


Figure 2. Carte des hauteurs des précipitations

1.2. Les Températures

La température joue un rôle déterminant dans la vie du végétal. Admettant que la température baisse avec l'altitude, SELTZER (1946) donne un gradient thermique pour 100m de dénivelée de 0.70°C pour (M) et 0.45°C pour (m). (M) est la moyenne des maxima du mois le plus chaud et (m) la moyenne des minima du mois le plus froid.

L'absence des données de température au niveau de la station météorologique de Chélia (exposition nord) nous a contraints à n'utiliser pour ce travail que des mesures issues de la station de Bouhmama (exposition sud) (tableau 3).

Après une analyse des données thermométriques qui apparaissent sur le tableau 3, on remarque :

- Juillet est le mois le plus chaud avec une moyenne de 35.95 °C
- Janvier est le mois le plus froid avec une moyenne de 2.08°C.

Tableau 3. Températures moyennes mensuelles de Bouhmama pour la période 1975-2006

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
M	13.01	14.65	18.7	22.19	26.63	31.86	35.95	35.1	28.92	25.58	21.61	9.1
M	2.08	2.66	5.57	7.36	11.79	16.37	18.47	18.82	14.79	11.7	6.29	3.56

L'extrapolation des moyennes thermiques de Bouhmama donne pour le mont Chélia les cartes des figures 3 et 4.

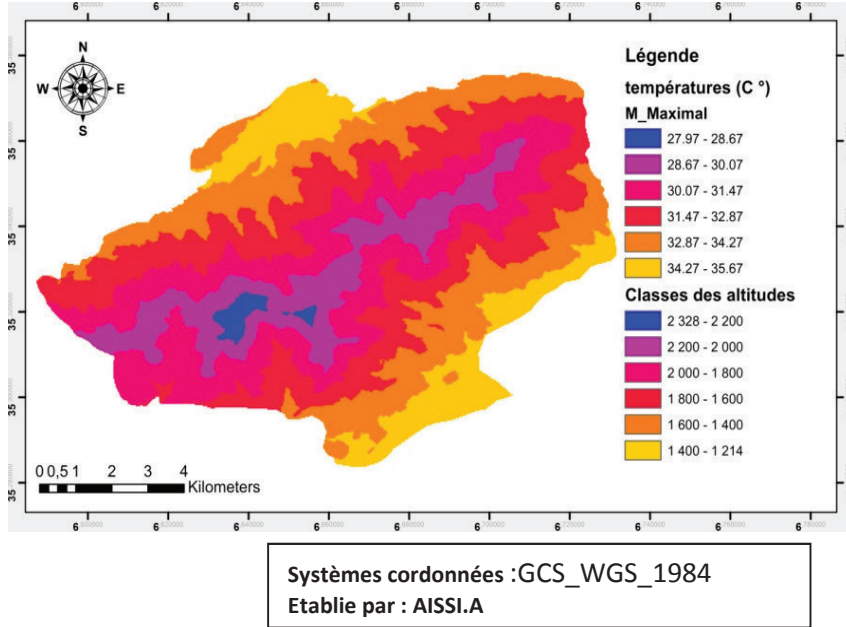


Figure 3. Carte des températures maximales mensuelles

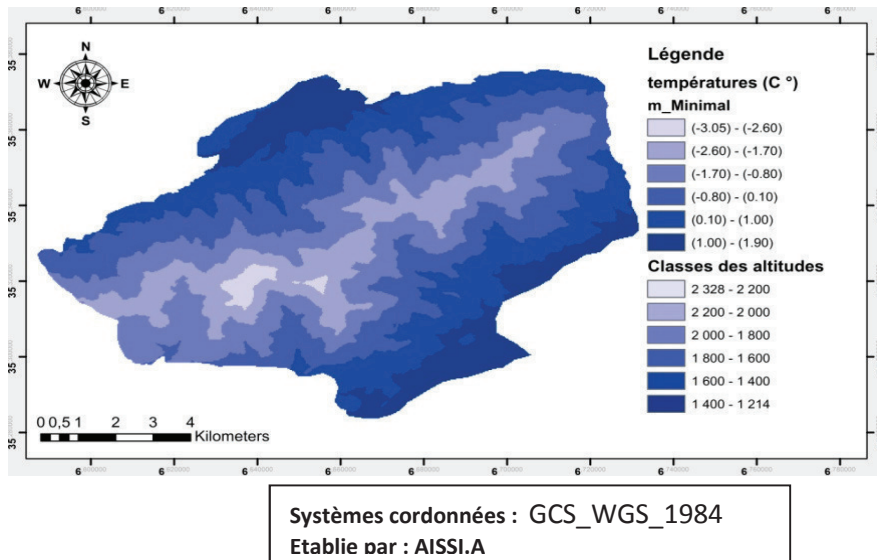


Figure 4. Carte des températures minimales mensuelles

2. Étages bioclimatiques et végétation

2.1. Les étages bioclimatiques

Suite à une extrapolation des températures du versant sud, nous avons calculé le quotient pluviométrique Q2 qui permet de déterminer les différents étages bioclimatiques des formations végétales de notre zone d'étude.

Tableau 4. Différents paramètres climatiques et bioclimatiques

Versant sud (Bouhmama)					
Altitude	M	m	P	Q2	Etage
1160	35.67	1.90	396.13	40.43	S.A
1300	34.97	1.45	416.13	42.58	S.A
1400	34.27	1.00	436.13	44.96	S.A
1500	33.57	0.55	456.13	47.48	S.A
1600	32.87	0.10	476.13	49.84	S.A
1700	32.17	-0.35	496.13	52.33	S.H
1800	31.47	-0.80	516.13	54.86	S.H
1900	30.77	-1.25	536.13	57.43	S.H
2000	30.07	-1.70	556.13	60.04	S.H
2100	29.37	-2.15	576.13	62.69	S.H
2200	28.67	-2.60	596.13	65.39	S.H
2300	27.97	-3.05	616.13	68.13	S.H

2.2. Classification supervisée des images satellitaires

Pour réaliser une classification supervisée, il faut avoir une bonne connaissance du terrain pour permettre une sélection d'échantillons de terrain la plus pertinente possible. Notre travail sur terrain consiste à recenser 45 placettes d'entraînement décrites par leur situation géographique (avec des coordonnées GPS), et par une description sommaire de l'utilisation du lieu. Toutes ces données sont indispensables et sont les plus objectives pour lancer une classification supervisée sur les images à haute résolution Bing de la zone d'étude.

Pour éviter la confusion de la classification entre les espèces à spectres semblables tel que le Cèdre et le Pin d'Alep, on a fait recours à une fragmentation de la carte sous différentes parties. Durant la classification, les polygones et les points tests utilisés sont : cèdre de l'Atlas, chêne vert, pin d'Alep, agricultures, pelouses, sols nus (figure 6).

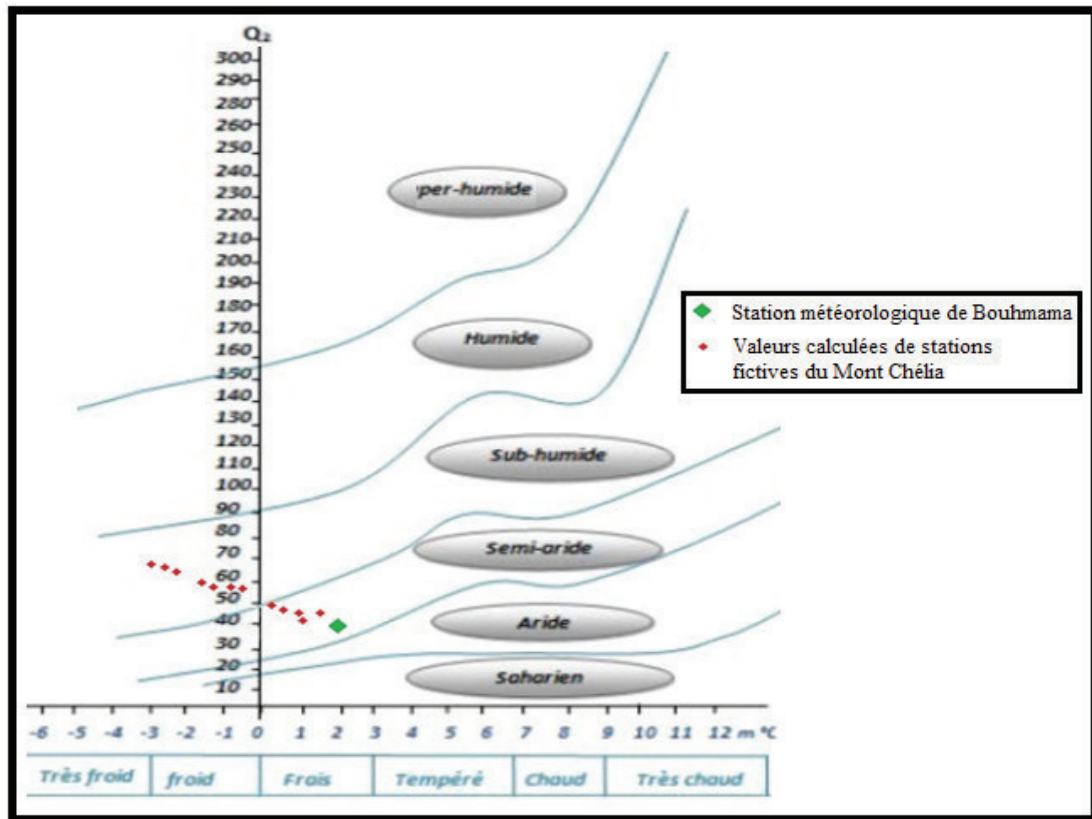


Figure 5. Diagramme des étages bioclimatiques méditerranéens d'Emberger

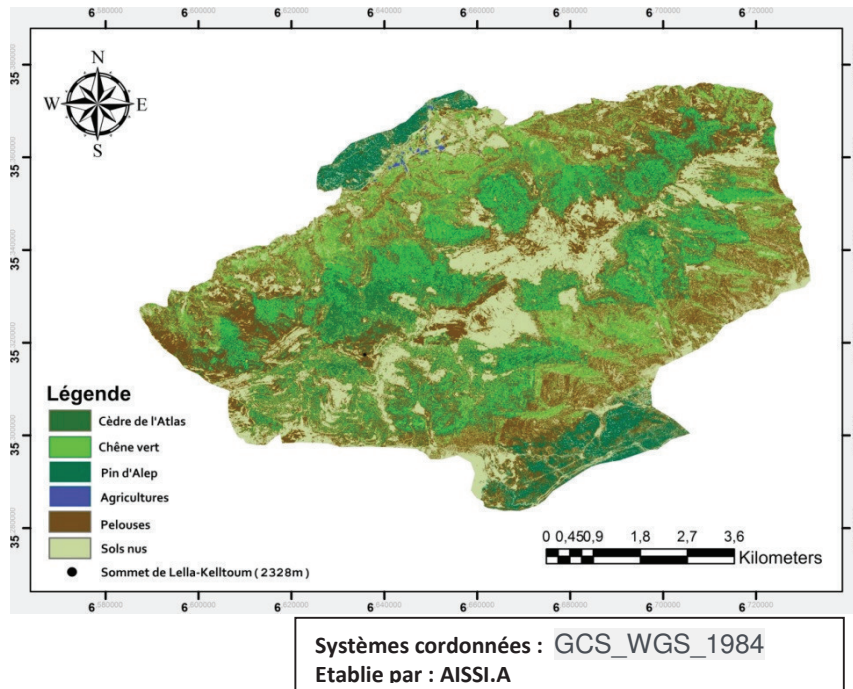


Figure 6. Carte des formations végétales

L'évaluation de la précision de la classification (*classificationassessment*) obtenue exige la comparaison de l'image classée avec des zones de vérification sur terrain opération effectuée durant les sorties d'exploration et de reconnaissance de la zone.

Des confusions entre certaines classes apparaissent, tandis que d'autres sont très correctement classifiées. Avec une précision globale de 94.64% et un indice de Kappa de 0.92, la classification peut être considérée comme excellente.

2.3. Relations climat-végétation

D'après les valeurs du quotient pluviothermique (tableau 4) la zone d'étude présente à basse altitude l'étage bioclimatique semi-aride à hiver frais de 1160m jusqu'à 1600m.

L'étage bioclimatique subhumide à hiver frais s'étale d'environ 1700m jusqu'à 2300 m où commence l'étage bioclimatique subhumide à hiver froid sur le versant nord du sommet. Donc on distingue dans notre zone d'étude trois étages bioclimatiques, qui sont : l'étage semi-aride à hivers frais, l'étage subhumide à hiver frais, l'étage subhumide à hiver froid.

Comparant la carte des formations végétales (figure 6) avec le (tableau 4) on constate que la formation à cèdre pure appartient à l'étage bioclimatique subhumide à hiver froid.

La (figure 6) montre que la cédraie pure s'observe sur des altitudes allant de 2100m jusqu'à 2200m avec des individus isolés s'observant jusqu'à 2 300 m où commence la pelouse de haute altitude.

Le mélange cèdre de l'Atlas et chêne vert s'étale entre 1500 et 2100 m d'altitude et reçoit une tranche pluviométrique comprise entre 650 et 950 mm/an avec des valeurs de m comprises entre 0 et -2°C. Du point de vue bioclimatique, ce groupe se cantonne dans l'étage subhumide à hiver frais.

Le chêne vert se rencontre à basse altitude de 1200 m jusqu'à 2100m souvent à l'état buissonnant. De point de vue bioclimatique on trouve le chêne vert dans l'étage semi-aride à hiver frais jusqu'à l'étage subhumide à hiver froid.

Sur une altitude de 1100 - 1400 m, on observe le pin d'Alep accompagné par le *Genévrier oxycèdre*. Le chêne vert toujours présent dans la pinède mais son recouvrement devient faible. Ce groupe reçoit une tranche pluviométrique comprise entre 300 et 450 mm/an avec des valeurs de m comprises entre 1.9 et 1°C, donc la formation à pin d'Alep appartient à l'étage semi-aride à hiver frais.

Conclusion

Les résultats des analyses climatiques effectuées montrent qu'il est évident que le climat est le principal facteur écologique dans le massif de Chélia. Il modèlera d'une façon très précise le paysage végétal.

Le manque de données climatiques nombreuses et précises, notamment dans les massifs montagneux, rend cette étude très délicate. Notre contribution doit être complétée par une étude de l'autoécologie de chaque espèce et l'étude phytosociologique détaillée de toutes les formations végétales pour combler dans une certaine mesure le manque de données climatiques.

Bibliographie

Abdessemed K., 1981 : *Le cèdre de l'Atlas (Cedrus atlantica M.) dans les massifs de l'Aurès et Belezma (Algérie), étude phytosociologique et problèmes de conservation et d'aménagement*. Thèse de docteur ingénieur, Univ. Aix -Marseille, 199 p.

Beghami Y., 2003 : *Contribution à l'analyse de la flore et de quelques paramètres de l'environnement de la cédraie du massif de Chélia (Aurès)*. Université de Batna. Mémoire de magistère, Faculté des Sciences, 104 p + 17 p d'annexes.

Benmessaoud H., 2010 : *Étude de la vulnérabilité à la désertification par des méthodes quantitatives numériques dans le massif des Aurès (Algérie)*. Thèse de docteur en aménagement du territoire, Université de Batna, 227 p.

Emberger L., 1971 : Considérations complémentaires au sujet des recherches bioclimatiques et phytogéographiques - écologiques. in « *Travaux de botanique et d'écologie de Louis Emberger* », 291-301 ; Masson, Paris.

Kadik B., 1987 : *Contribution à l'étude du pin d'Alep (Pinus halepensis Mill.) en Algérie : Ecologie dendrométrie morphologie*. OPU, Alger, 1987, 580 p.

M'hirit O., 1982 : *Etude écologique et forestière des cédraies du Rif marocain. Essai sur une approche multi-dimensionnelle de la phyto-écologie et de la productivité du cèdre (Cedrus atlantica Manetti)*. Thèse Doct. es-sciences, Univ. Droit Econ. Sci. d'Aix - Marseille, 436 p + annexes.

Schoenenberger A., 1972 : Présentation géobotanique du massif des Aurès (Algérie). *Comptes rendus des séances mensuelles de la Société des Sciences Naturelles et Physiques du Maroc*, **38**, 68-77.

Seltzer P., 1946 : *Le climat d'Algérie*. Trav. Inst. Mét.Phys.Glo., Algérie, Alger. Carbonel, 219 p.

BASES DE DONNÉES URBAINES POUR LA MODÉLISATION CLIMATIQUE DES VILLES : CARTOGRAPHIE EN ZONES CLIMATIQUES LOCALES D'UN PANEL DE VILLES DE LA ZONE MENA

MHEDHBI Z. ¹, HIDALGO J. ², MASSON V. ³, HAOUES-JOUVE S. ⁴

¹LISST-CIEU/CNRS, Université Toulouse Jean Jaurès, et CNRM/GAME Météo-France/CNRS, zohra.mhedhbi@etu.univ-tlse2.fr

²LISST-CIEU/CNRS, Université Toulouse Jean Jaurès, julia.hidalgo@univ-tlse2.fr

³CNRM/GAME Météo-France/CNRS, valery.masson@meteo.fr

⁴LISST-CIEU/CNRS, Université Toulouse Jean Jaurès, sinda.haoues-jouve@univ-tlse2.fr

Résumé –Il est aujourd'hui indispensable de disposer d'une description détaillée de la surface urbaine qui soit acquise d'une manière standardisée pour faciliter la comparaison et le transfert des connaissances scientifiques entre les villes du monde. Dans ce cadre, ce travail correspond à l'application de l'approche WUDAPT (World Urban Database and Access Portal Tools) sur un panel de villes d'Afrique du Nord et du Moyen Orient (MENA). Cette méthode consiste à recueillir les données urbaines cohérentes nécessaires pour réaliser des modélisations climatiques urbaines dont les résultats permettront d'appuyer les politiques d'adaptation au changement climatique. L'approche se base sur un découpage en zones climatiques locales (LCZ).

Mots-Clés : Adaptation, changement climatique, base de données urbaines, classification supervisée.

Abstract - Urban databases for climate modeling of cities: Mapping in local climate zones of a panel of cities in the MENA zone. There is an urgent need to have a detailed description of the urban surface that is acquired in a standardized way to facilitate the comparison and transfer of scientific knowledge between the cities of the world. In this framework, this work corresponds to the application of the World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT) approach to a panel of cities in Middle East and North Africa (MENA). This approach involves gathering coherent urban data necessary for urban climate modelling, the results of which will support climate change adaptation policies. This approach is based on a division into local climatic zones (LCZ).

Keywords : Adaptation, climate change, urban data base, supervised classification.

Introduction

L'adaptation au changement climatique est un nouvel enjeu pour toutes les villes du monde. Plusieurs efforts sont entrepris dans celles du Nord pour aider les acteurs urbains à intégrer les problématiques climatiques dans la planification et l'aménagement urbains. Les villes du Sud quant à elles, éprouvent des difficultés à faire de l'adaptation une priorité en matière d'urbanisme, compte tenu des nombreux défis urbains plus classiques auxquels elles sont confrontées : pauvreté massive, forte croissance démographique, etc. (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014).

Il est donc crucial de penser l'adaptation aux contextes particuliers des villes du Sud, de certaines solutions et outils conçus et mis en œuvre dans les villes du Nord. Pour cela, les inscrire dans une dynamique internationale qui s'appuie sur des opens sources s'avère essentiel. Cela peut aider les pays du Sud, non seulement à avoir des données gratuites pour l'étude du climat urbain sur leurs territoires, mais aussi à intégrer cette problématique dans la planification et l'aménagement urbain.

L'initiative WUDAPT (<http://www.wudapt.org/>), portée par de nombreux chercheurs de l'association internationale de climat urbain, a déjà permis de réaliser la description du tissu urbain pour la climatologie sur quelques dizaines de villes dans le monde, principalement des mégapoles mais aussi des villes de taille moyenne, en particulier en Europe (<http://www.wudapt.org/cities/>). Seule une d'entre elles se trouve sur le continent africain, et aucune au Moyen-Orient. Cet article propose d'expliquer la spécificité de l'application de la méthode de WUDAPT sur un panel de villes de la zone MENA et présente quelques

ajustements nécessaires compte tenu de la spécificité climatique de cette zone et de l'absence de données issues de Google Street View.

1. Les Zones Climatiques Locales

Stewart et Oke (2012) ont proposé une nouvelle typologie de couverture du sol (fig.1). Cette approche a reçu une très forte adhésion de la communauté de climatologie urbaine comme le montre l'affluence qu'a connu la session dédiée à ce thème lors de la 9ème conférence internationale sur le climat urbain (Toulouse, 20-24 juillet 2015, www.meteo.fr/icuc9), session à laquelle ont assisté plus de 200 chercheurs. L'intérêt de classer le tissu urbain en LCZ est qu'il a été démontré que ces types de structures urbaines sont en général homogènes en terme de conditions micro-climatiques (Leconte et al., 2014). Ceci permet donc une première estimation des impacts climatologiques à l'échelle des quartiers au sein d'une ville.

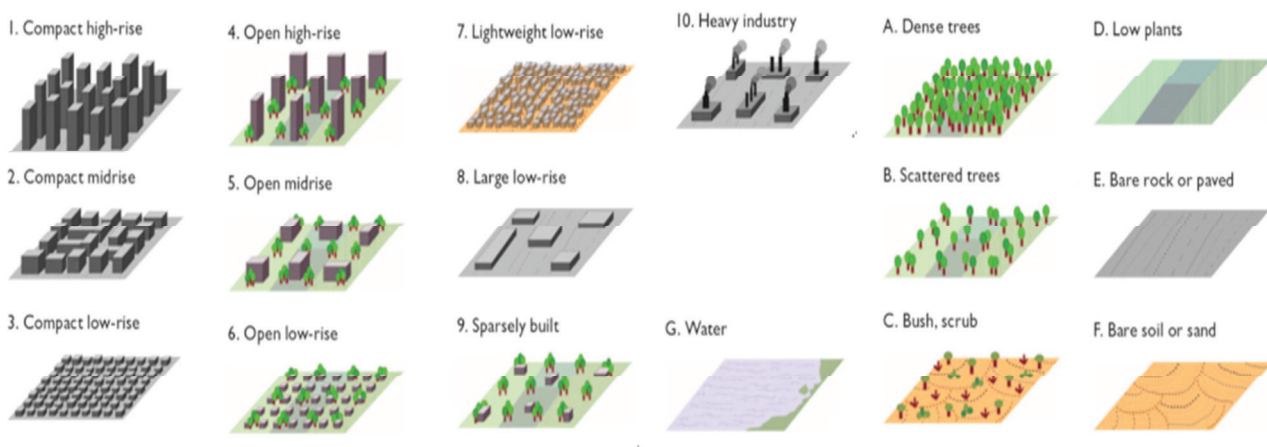


Figure 1. Classification des zones urbaines et rurales en « Zones Climatiques Locales » (LCZ)

2. Introduction de WUDAPT

WUDAPT est une initiative internationale qui répond à la nécessité actuelle de construire une base de données mondiale sur les villes fournissant les données nécessaires aux études climatiques. Cette initiative vise à décrire la surface urbaine en recueillant des données sur les formes et les fonctions associées aux villes à travers le monde. Le projet adopte une approche hiérarchique en trois niveaux pour recueillir les données :

- Niveau 0 : Les villes sont cartographiées en se basant sur une classification en zones climatiques locales LCZ (Stewart and Oke, 2012) qui compte 10 types urbains et 7 types naturels. Chaque type de LCZ est caractérisé par un panel d'indicateurs utilisés pour la modélisation climatique.

- Niveau 1: ce niveau propose des valeurs plus précises pour les paramètres de chaque LCZ en mettant l'accent sur les formes (hauteur du bâti, longueur de rue, etc.) et les fonctions (bureau, industriel, résidentiel, etc.). Ces précisions sont obtenues par échantillonnage des LCZ pour affiner les plages de paramètres. Pour cela, l'utilisation de nouvelles approches de collecte de données -telles que des photos géo-référencées- s'avère nécessaire.

- Niveau 2 : Il s'agit du niveau le plus précis et le plus riche en détails. Il fait référence aux données urbaines recueillies à une échelle spatiale spécifiée (par exemple 250 m) de l'ensemble de la zone urbaine. Les sources de données peuvent comprendre des données de

télétection, des modèles tridimensionnels d'une ville ou des bases de données locales sur les matériaux de construction et l'âge des bâtiments, si cela est disponible.

3. Méthode proposée par WUDAPT

Dans le cadre de WUDAPT, un protocole a été conçu pour cartographier les villes au niveau 0 (Bechtel et *al.*, 2015). Les données utilisées sont essentiellement des images Landsat, disponibles gratuitement sur le site USGS de la Nasa. Les logiciels utilisés sont essentiellement des logiciels libres : Google Earth et le système d'information géographique SAGA.

La méthode proposée est une classification supervisée qui repose sur des zones d'apprentissage correspondant aux 17 typologies de LCZ qu'il faut identifier et dessiner sur Google Earth. En partant de ces zones d'apprentissage, une classification semi-automatique de la région d'intérêt est effectuée en utilisant des données de télétection multi-spectrale, multi-temporelles et des méthodes statistiques telles que les réseaux de forêt aléatoire. Ensuite, la qualité de la classification est vérifiée en utilisant l'approche statistique de *bootstrapping*.

4. Terrain d'étude

WUDAPT a déjà réalisé la description en LCZ (niveau 0) de Khartoum au Moyen-Orient. Notre équipe sera responsable au niveau international de l'application de l'approche WUDAPT sur les villes de la zone MENA.

La zone MENA présente une homogénéité climatique selon la classification de Köppen (Kottek et *al.*, 2006). En effet, elle est classée BWH⁴⁰. Elle présente également des caractéristiques urbanistiques, socio-économiques et culturelles comparables. Même si la variabilité de la structure urbaine au sein de la zone d'étude peut être importante, il est possible de distinguer les grands traits d'un modèle de ville commun à cette grande zone. Compte tenu des contraintes de temps, il est impossible de classer toutes les villes de la zone MENA. Le panel est donc constitué de 50 villes (fig.2) parmi lesquelles toutes les agglomérations de plus de 2 millions d'habitants. Il est complété par un échantillon d'agglomérations dont la population est supérieure à 500 000 d'habitants.

Pour le choix de cet échantillon, nous avons mobilisé la base de données des Nations-Unies relative au programme intitulé « The Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations »⁴¹. Ce programme publie tous les deux ans le rapport « World Urbanization Prospects » contenant des estimations et des projections de population de toutes les grandes agglomérations du monde. Nous nous référons aux principaux résultats de révision de l'année 2014 de « World Urbanization Prospects ».

⁴⁰ B : Arid, W : winter dry, H: hot arid

⁴¹ <https://esa.un.org/unpd/wup/>

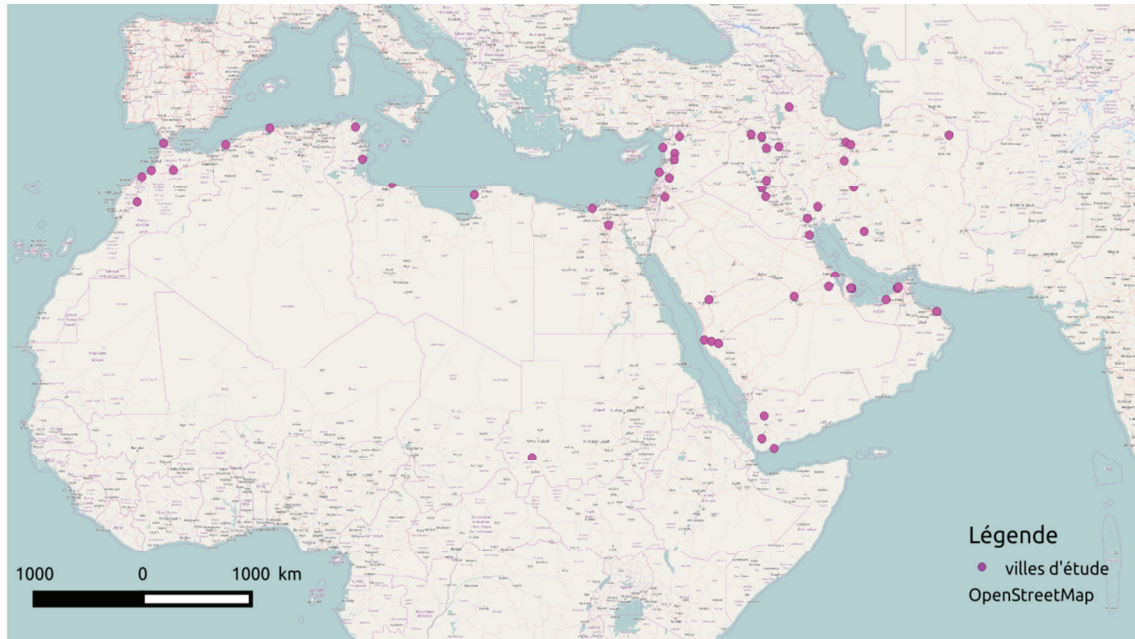


Figure 2. Terrains d'étude

5. Obstacles et spécificité d'application de la méthode WUDAPT

Afin d'identifier les zones d'apprentissage, il est prévu dans le protocole proposé par WUDAPT d'utiliser la vue 3D des villes fournie par Google Street view. Dans la région qui nous intéresse, seule la ville de Dubaï dispose de cet outil. Pour les autres villes, nous envisageons d'utiliser des images géoréférencées avec l'aide d'experts locaux que nous sommes en train d'identifier dans chaque ville. Bien que plus longue à mettre en place, cette solution nous permet d'appliquer la méthode WUDAPT.

Concernant les données satellitaires, pour classifier notre panel de ville, nous avons décidé de travailler avec Sentinel 2a au lieu de Landsat 8, puisque Sentinel 2a a une résolution radiométrique plus fine. Le climat de notre panel de villes étant aride, la couverture végétale est limitée et les matériaux de construction ressemblent souvent à la surface naturelle aux alentours de la ville. Une bonne résolution radiométrique pourrait améliorer la classification. En outre, Sentinel2a a une fauché plus grande que celle de Landsat 8 (290 km au lieu de 185 km). Ceci permet d'avoir plus de chance de couvrir toute la tache urbaine relative à une ville sur la même scène. La différence de résolution spatiale entre ces deux satellites ne pose pas de problème étant donné que nous optons pour un ré-échantillonnage dans une grille commune de 100 m. Enfin, l'équipe WUDAPT a eu de bonnes expériences avec Sentinel 2a, ainsi que le montre l'exemple de Beyrouth qui a été classifiée avec des images Landsat et des images Sentinel (Kaloustian and Bechtel, 2016).

6. Premiers résultats et perspectives

Dubaï est notre premier cas d'étude dans la mesure où c'est la seule ville du panel pour laquelle nous disposons des données de Google Street View. La classification a été réalisée selon la méthodologie WUDAPT décrite par (Bechtel et al., 2015). Au total, 132 zones d'entraînement ont été collectées en utilisant Google Earth et un modèle fourni par WUDAPT (www.wudapt.org). L'extension spatiale de la tache urbaine a été acquise par Sentinel 2a. Elle comprend non seulement Dubaï et ses banlieues, mais aussi les agglomérations de La Sharjah, Ajman et Oum Al Qaiwain. La classification a été réalisée avec SAGA-GIS (Conrad et al.,

2015) en utilisant comme méthode statistique une forêt aléatoire de 128 arbres. Nous avons opté pour un traitement post classification qui consiste en un filtre majoritaire de rayon 2. Comme données caractéristiques, nous avons utilisé 3 Scènes de Sentinel 2a niveau 1C. Toutes les scènes ont été acquises entre décembre 2015 et octobre 2016, en tuiles orthorectifiées. Les bandes atmosphériques (1,9 et 10) ont été exclues. Toutes les bandes restantes ont été ré-échantillonnées à une grille commune de 100 m. Les zones d'apprentissage couvrent tous les types de LCZ identifiés dans l'agglomération (fig. 3).

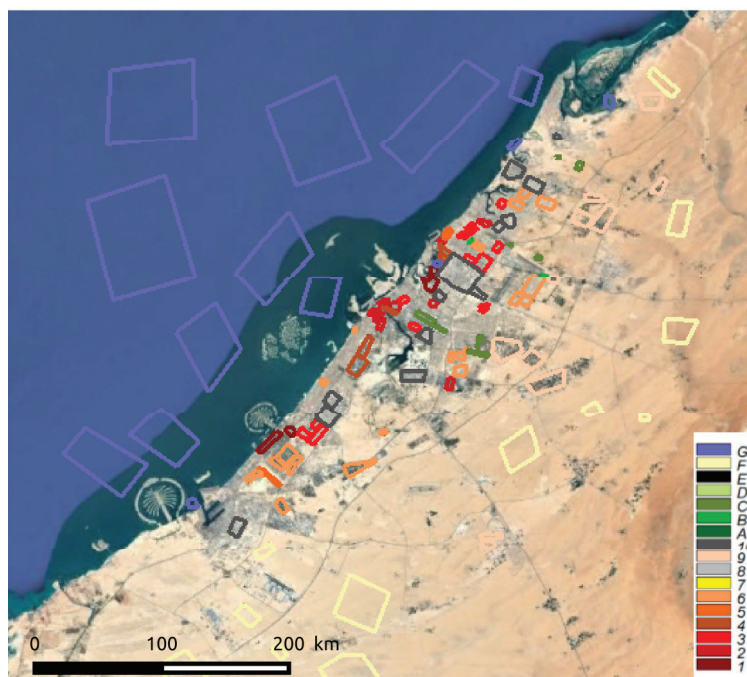


Figure 3. Zones d'apprentissage pour Dubaï pour la première phase de la méthodologie WUDAPT

Le traitement statistique en forêt aléatoire a permis d'obtenir ensuite une classification de la région d'intérêt en LCZ (fig.4). La robustesse et la précision de la classification ont été testées en utilisant une approche *bootstrap*. Ces tests statistiques sont en cours de réalisation.

Par la suite de la thèse, nous appliquerons dans un premier temps l'approche WUDAPT au panel des 50 villes retenues de la zone MENA. Ensuite, l'analyse sera focalisée sur le cas de Tunis pour lequel nous pratiquerons une descente d'échelle spatiale afin de tester la chaîne d'outils développée dans le projet MAPUCE (Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme : Climat urbain et Énergie) : cartographie climatique ; modélisation d'impacts microclimatiques ; transfert d'expertise vers les acteurs urbains.

Des applications cartographiques permettant de spatialiser des données observées de température et d'îlot de chaleur urbain à l'échelle intra-urbaine (i.e. des quartiers) pourraient aussi être mises en œuvre, en croisant les données d'observation disponibles (issues des stations météorologiques classiques ou de méthodes de crowdsourcing) avec les informations typologiques en LCZ et des informations topographiques.

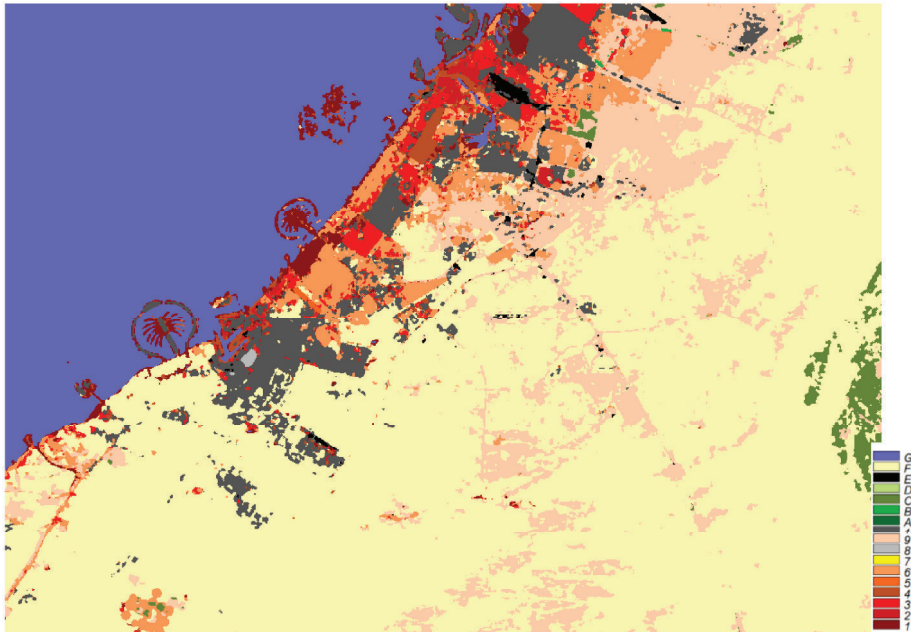


Figure 4. Carte en LCZ de Dubaï obtenue à partir de Sentinel 2 en suivant la méthodologie WUDAPT

Bibliographie

- Bechtel B., Paul J A., Jürgen B., Jason Ch., Olaf C., Johannes F., Gerald M., Linda S., Iain S. 2015 : Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. *ISPRS International Journal of Geo-Information* **4** (1): 199-219.
- Conrad O., Benjamin B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Jürgen B. 2015 : System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1. 4. *Geoscientific Model Development* **8** (7): 1991–2007.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014 : *Climate Change 2014—Impacts, Adaptation and Vulnerability : Regional Aspects*. Cambridge University Press.
- Noushig K., Bechtel B., 2016 : Local Climatic Zoning and Urban Heat Island in Beirut. Accessed October 5. http://www.academia.edu/download/46187953/KALOUSTIAN___BECHTEL.pdf.
- Markus K., Grieser J., Beck Ch., Rudolf B., Rubel F., 2006 : World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification Updated. *Meteorologische Zeitschrift* **15** (3) : 259–63.
- Leconte F., Bouyer J., Claverie R., Petrisans M., 2014 : Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment : Evaluation of the method using mobile measurements, Building and Environment, DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.05.005
- Ian D S., Oke Tim R. 2012 : Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **93** (12) : 1879-1900.

Thème : Climat et Ressource en eau

MOBILISATION DES RESSOURCES EN EAU DE SURFACE A DES FINS AGRICOLES DANS LE BASSIN VERSANT DU ZOU A L'EXUTOIRE DE DOME

ETENE C. G.

Laboratoire Pierre PAGNEY "Climat, Eau, Ecosystème et Développement" (LACEEDE), Département de Géographie, Université d'Abomey-Calavi (République du Bénin, Email : cyr_gervais_etene@hotmail.com)

Résumé : Dans le bassin du Zou à l'exutoire de Domè, les activités agricoles occupent une place essentielle pour les populations. Mais, depuis quelques années, la production agricole est mise à mal par les aléas pluviométriques dans le dit bassin. La présente étude vise à analyser les impacts de la mobilisation des ressources en eau de surface à des fins agricoles à Domè. Les données utilisées concernent les hauteurs pluviométriques mensuelles extraites de la base de l'ASECNA-Cotonou pour la période 1960-2010. Ces données sont complétées par des informations issues des investigations auprès des principaux acteurs de la région étudiée (producteurs, agents de la promotion agricole, etc.) de même que les observations directes de terrain. L'analyse tendancielle, l'utilisation des fréquences, et l'utilisation du modèle Force, Pression Etat Impacts Réponses (FPEIR), ont été mis à contribution pour traiter les données. Les résultats montrent une fréquence plus accrues des perturbations pluviométriques caractérisées par une installation tardive et une fin précoce de la saison pluvieuse dans le milieu d'étude. En raison de la nature des sols, l'anomalie pluviométrique provoque des assèchements prononcés des sols, ce qui affecte considérablement le rendement des produits agricoles. Les efforts de mobilisation des eaux de surface à des fins agricoles constituent la principale mesure d'adaptation aux conséquences des aléas pluviométriques dans le bassin. Ces efforts méritent d'être poursuivis et soutenus pour une production agricole durable.

Mots-clés : Bassin du Zou à Domè (Bénin), aléas pluviométriques, mobilisation de l'eau, production agricole.

Abstract : In the basin of the Zou at Domè, agricultural activities occupy an essential place for the populations. But in recent years, agricultural production has been undermined by the rainfall in this basin. The data used relate to the monthly rainfall heights extracted from the ASECNA-Cotonou database for the period 1960-2010. These data are supplemented by information obtained from the investigations of the main actors in the region studied (producers, agricultural promotion agents, etc.) as well as direct field observations. Trend analysis, use of frequencies, and use of the Force, Pressure State Impacts Responses (FPEIR) model were used to process the data. The results show a greater frequency of rainfall anomalies characterized by late and early rainy season ending in the study environment. Due to the nature of the soils, the rainfall anomaly causes severe soil drying, which greatly affects the yield of agricultural products. Efforts to mobilize surface water for agricultural purposes are the main measure to adapt to the consequences of rainfall events in the basin. These efforts deserve continued and sustained support for sustainable agricultural production.

Keywords : Zou basin at Domè (Benin), rainfall hazards, water mobilization, agricultural production.

1. Introduction et justification

A l'instar des autres pays d'Afrique au sud du Sahara, au Bénin, le secteur agricole occupe 70 % de la population active, contribue pour 39 % à la constitution du Produit Intérieur Brut (PIB) et assure 90 % des recettes d'exportation du pays (MAEP, 2009).

En effet, l'agriculture béninoise est pluviale et donc tributaire des incertitudes climatiques (Afouda, 1990). Mais, depuis la fin des années 1960, le pays est sujet à une forte variabilité pluviométrique dont les conséquences sont entre autres la modification du régime des précipitations (début tardif, rupture au cœur de la saison, fin précoce) et par une diminution des hauteurs annuelles (Bokonon-Ganta, 1987 ; Boko, 1988 ; Afouda, 1990 ; Houndénou, 1999 ; Yabi, 2002 ; Ogouwalé et al., 2005 ; Yabi et Afouda, 2007 ; etc.).

Ces aléas pluviométriques perturbent les activités agricoles et rendent peu opérationnel le calendrier traditionnel ; ce qui affecte les rendements des cultures, engendrant ainsi des crises alimentaires, socio-économiques et même politiques (Boko, 1988).

Face à cette nouvelle donne climatique, quelques initiatives d'atténuation ont été prises notamment la mobilisation des eaux de surface par les aménagements hydro-agricoles capables de réduire la dépendance des producteurs vis-à-vis de la pluviométrie et de promouvoir la production des cultures surtout de contre-saisons.

Situé entre 7 ° 15' et 8 ° 33' de latitude nord et 1° 35' et 2 ° 14' de longitude est (figure 1), le bassin du Zou à l'exutoire de Domé est localisé entièrement dans la partie centre-ouest du Bénin. En raison des potentialités hydro-agricoles du bassin de Zou à l'exutoire de Domé, plusieurs initiatives y sont prises dans le sens de l'utilisation des eaux de surfaces à des fins agricoles. La présente recherche analyse le contexte pluviométrique et examine les efforts d'aménagements hydro-agricoles dans cette zone de forte production agricole.

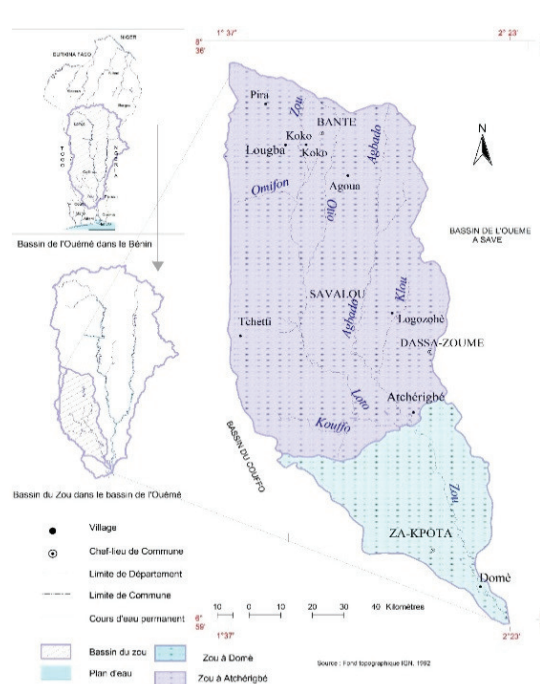


Figure 1 . Situation géographique du bassin du Zou à l'exutoire de Domé

2. Données et méthodes

Dans le cadre de la présente étude, les données utilisées sont les statistiques pluviométriques des stations de Bohicon, et de Zagnanado sur la période 1960-2010, et les types d'aménagements hydro-agricoles. En outre, des informations socio-agricoles ont été obtenues auprès de producteurs et des agents du développement rural. De même, les investigations de terrain ont permis d'appréhender les avantages de l'exploitation des périmètres hydro-agricoles.

Le calcul de l'indice pluviométrique a permis d'étudier la variabilité interannuelle dans la région de l'étude. Cet indice est déterminé à partir de la formule :

$$I = (X_i - X_{moy}) / \sigma$$

où I désigne l'indice pluviométrique, X_i est la hauteur de pluie pour une année, X_{moy} la pluviométrie moyenne et σ l'écart-type de la période étudiée. Lorsque $I > 0$, l'année est considérée comme humide et quant $I < 0$, l'année est considérée comme sèche.

Par ailleurs, l'utilisation de la moyenne mobile lissée sur 5 ans a permis de compléter la caractérisation de la variabilité pluviométrique, fondement des aménagements hydro-agricoles dans le sous bassin de Domé.

A partir de ces indices, la fréquence des années pluviométriques déficitaires (FAPD) est calculée suivant la formule :

$$\text{FAPD} = (\text{NAPD} / \text{NTA}) * 100$$

NAPD est le nombre d'années pluviométriques déficitaires ; NTA, le nombre total d'années étudiées.

Les résultats obtenus ont été analysés sur le modèle Pression-Etat-Impacts-Réponses (PEIR) dont les différentes composantes (figure 2).

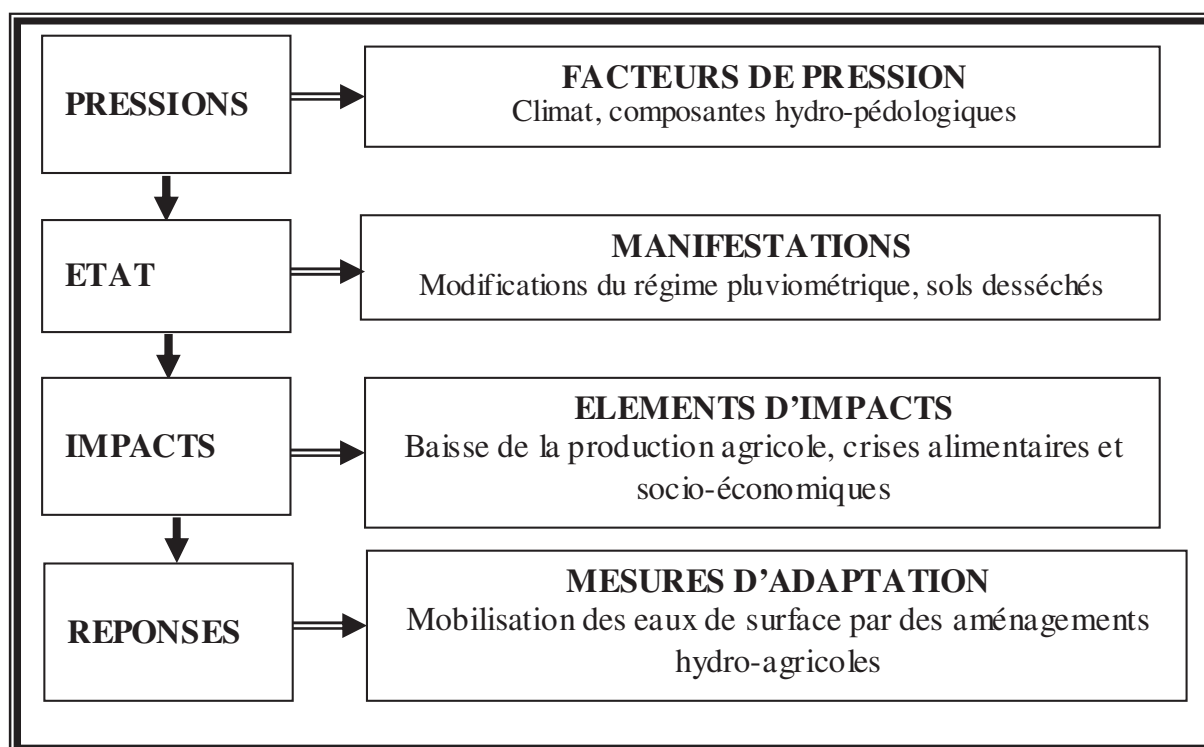


Figure 2. Modèle d'analyse des fondements de mobilisation des eaux de surface à des fins agricoles dans le bassin versant du Zou à Domè

3. Résultats et discussion

3.1. Variabilité pluviométrique à Domè

Les figures 3 et 4 présentent les indices pluviométriques et la moyenne mobile lissée sur 5 ans dans le bassin versant du Zou à Domè. Ces indices ont permis d'analyser la variabilité pluviométrique dans la zone d'étude.

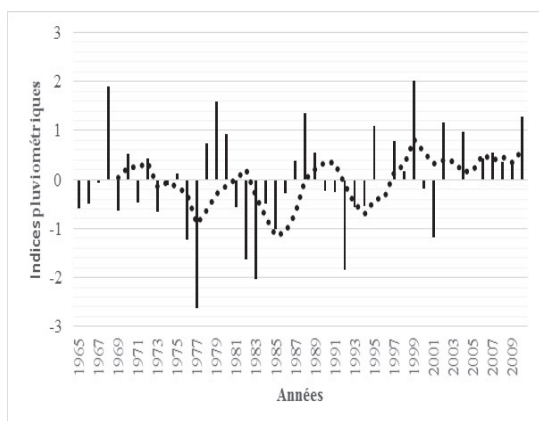


Figure 3. Caractéristiques pluviométriques interannuelles à Bohicon

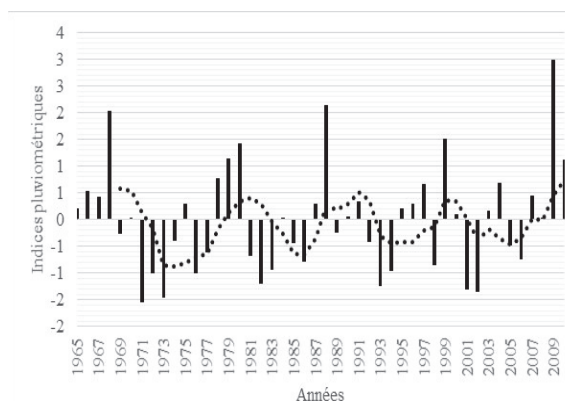


Figure 4. Caractéristiques pluviométriques interannuelles à Zagnanado

L'analyse des figures 3 et 4 a montré que sur la période 1965-2010, le bassin versant du Zou à l'exutoire de Domè a enregistré 30 années excédentaires contre 15 années déficitaires à la station de Zagnanado et 32 années excédentaires contre 13 années déficitaires à la station de Bohicon. Les années sèches se manifestent entre autres, par une installation tardive des pluies et/ou rupture pluviométrique au cœur de la saison pluvieuse (pouvant atteindre 3 décades) et une fin précoce des précipitations. Ainsi, les dates de semis sont repoussées et au cas où la semence est faite, les cultures subissent un déficit hydrique prononcé pouvant entraîner leur assèchement précoce selon Yabi (2010). Il convient de signaler, le caractère successif des années déficitaires (2 à 5 années consécutives (figures 3 et 4)) qui amplifie les impacts hydro-agricoles face auxquels des mesures d'adaptation ont été adoptées par les pouvoirs publics et les communautés locales.

3.2. Aménagements hydro-agricoles dans le bassin de Zou

Dans le contexte hydro-pluviométrique difficile, les producteurs, les différents acteurs ont pris des initiatives pour une utilisation optimale des ressources hydrographiques du bassin. Ainsi, quelques périmètres hydro-agricoles ont été mis en place par les populations, les groupements et les ONG. Les photos 1 et 2 présentent les périmètres hydro-agricoles exploités dans le milieu d'étude.



Photo 1. Site de culture de contre saison à Domè



Photo 2. Vue partielle de périmètre rizicole de Koussin

Prise de vue : EténéC. G., 2016.

Les photos 1 et 2 mettent en évidence un site de culture de contre saison et un périmètre rizicole dans le secteur d'étude. Ainsi, les investigations de terrain ont permis de comprendre

que ces aménagements dont la superficie varie entre 5 et 20 ha, permettent une maîtrise totale ou partielle de l'eau et plusieurs systèmes d'irrigation y sont pratiqués en fonction de la capacité financière des acteurs. Il convient de signaler que les producteurs de ces périmètres bénéficient de l'appui technique et financier des structures d'encadrement étatiques et des ONG à vocation hydro-agricole.

3.3. Mobilisation des eaux de surface pour la production agricole

Les photos 3 et 4 montrent les différentes techniques de mobilisation des eaux de surface à des fins agricoles à Domè.



Photo 3. Drain de conduite d'eau vers le périmètre irrigué
Prise de vue : Atchadé G., Octobre 2016



Photo 4. Système de drainage d'eau de la rivière Zou pour l'alimentation des cultures maraîchères à Koko

Prise de vue : Atchadé G., Octobre 2016

L'analyse des photos 3 et 4 indiquent les systèmes artisanaux et modernes de mobilisation des eaux de surface pour la production agricole dans le bassin. Selon les investigations, l'aménagement des périmètres hydro-agricoles permettent de multiplier les rendements culturaux par 2, 3, 4 voire 5 par comparaison aux cultures pluviales (MAEP, 2009 cité par Yabi ,2010). Cette performance sont non seulement que les cultures arrivent à satisfaire leur besoin hydrique mais aussi parce que les producteurs impliqués bénéficient des formations sur les itinéraires techniques des cultures notamment du riz. Ces formations portent entre autres sur la préparation des casiers ou planches, les modes de semis, les méthodes d'irrigation, le calendrier des travaux, etc.

Suite à la crise alimentaire des années 2007 et 2008 consécutives aux aléas climatiques tels que la sécheresse, les inondations, etc , la valorisation des eaux de surfaces à des fins agricoles a connu un regain d'intérêt de la part des acteurs agricoles au Bénin en général et dans le bassin du Zou à l'exutoire de Domè en particulier.

En effet, dans le cadre du Programme d'Urgence d'Appui à la Sécurité Alimentaire (PUASA), initié par l'Etat béninois bénéficiant aujourd'hui de l'appui de nombreux Partenaires Techniques et Financiers (FAO, BID, BAD, BOAD, FIDA, BM, UE, etc.) de petits périmètres hydro-agricoles ont été aménagés ou réhabilités dans la région de l'étude. Ce projet vise entre autres, à aider techniquement et financièrement les producteurs seuls ou en coopératives à mieux aménager et gérer les exploitations agricoles irriguées à partir des eaux de surface. De même, le Programme National de Promotion de l'Irrigation Privée (PNPIP) élaboré depuis 2000 a été actualisé en 2009 avec le concours financier du PNUD et l'appui

technique de la FAO. Ce programme vise essentiellement à créer les conditions objectives et matérielles favorables pour la promotion de l'irrigation par le secteur privé par la mise en place d'un système d'appui-conseil et d'un mécanisme de financement accessible aux promoteurs privés de l'irrigation.

Conclusion

La mobilisation des eaux de surface à des fins agricoles dans le bassin du Zou à l'exutoire de Domè initiée par les communautés locales permet aux producteurs de limiter les effets des aléas pluviométriques de plus en plus marqués dans le milieu d'étude. En plus de la sécurité alimentaire, cette stratégie offre d'autres avantages socio-économiques notamment la création d'emplois agricoles et l'implication des femmes.

Malgré les difficultés évoquées par les producteurs méritant des approches solution, les efforts de mise en valeur des ressources en eau de surface constitue une alternative intéressante et approuvée par tous les acteurs. Des efforts méritent donc d'être poursuivis dans un cadre inclusif et participatif afin de promouvoir le développement agricole durable dans ce bassin versant.

Bibliographique

Afouda F., 1990 : *L'eau et les cultures dans le Bénin central et septentrional : étude de la variabilité des bilans de l'eau dans leurs relations avec le milieu rural de la savane africaine*. Thèse de Doctorat nouveau régime, paris IV sorbonne, 520 pages.

Atchadé A.A.G., 2014 : *Impacts de la dynamique du climat et de l'occupation des terres sur les ressources en eau du bassin versant de la rivière zou dans le Bénin méridional*. Thèse de Doctorat en Géoscience de l'Environnement et Aménagement de l'Espace EDP/FLASH/UAC 235p

Boko M., 1988 : *Climat et communautés rurales du Bénin : Rythmes climatiques et rythme de développement*. Thèse d'Etat ès lettres, Dijon 607p.

Bokonon-Ganta E., 1987 : *Les climats de la région du Golfe du Bénin*. Thèse de Doctorat du 3^{ème} cycle. Institut de Géographie, Université de Paris-Sorbonne, Paris, 248 p + annexe.

Houndéno C., 1999 : *Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide, diagnostic et modélisation*. Thèse de doctorat Unique, UMR 50 80 du CNRS, climatologie de l'espace tropicale, 341 p.

MAEP, 2009 : *Projet de renforcement des capacités nationales de suivi des ressources en eau axe sur la gestion de l'eau agricole*. Edition définitive, MAEP, Cotonou, 75 p.

Ogouwalé E., Yabi I., Boko M., 2005 : Singularité de la variabilité pluviométrique entre les 9 et 10^{ème} parallèle au Bénin (Afrique de l'ouest). *Actes des 2^{ème} journées Scientifiques Internationales des Universités Nationales du Bénin*, Tome 2, 62-71.

Yabi I., 2002 : *Particularités de la variabilité pluviométrique entre 7° et 8°N au Bénin*. Mémoire de maîtrise de Géographie FLASH - UAC, Abomey-Calavi. 96p.

Yabi I. Afouda F. Ogouwalé R. et Adjahouto G., 2010 : *Stratégies d'adaptation à la péjoration pluviométrique au Bénin : cas d'aménagement du périmètre hydro-agricoles de Hlodo (Commune de Lokossa)*. (Sous presse)

Yabi I. et Afouda F., 2007 : *Variabilité pluviométrique du début de la saison agricole et mesures d'adaptation dans le département des Collines au Bénin (Afrique de l'ouest)*. *Actes du 1er colloque de l'UAC des Sciences, Cultures et Technologies, Géographie*, 315 – 327.

ETUDE DES INDICES DE DÉBITS JOURNALIERS EXTRÊMES A L'INONDATION DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUÉMÉ À L'EXUTOIRE DE BONOU

KODJA D. J.^{1,2,4}; MAHE G.⁴; VISSIN E. W.^{1,2,5}; AMOUSSOU E.^{1,2,3}; PATUREL J.-E.⁴; HOUNDENOU C.^{1,2}; BOKO M.^{1,2}

¹Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Écosystèmes et Développement (LACEEDE) 03 BP 1122 Cotonou (Bénin),

²Université d'Abomey-Calavi (Bénin) : DGAT/FLASH/UAC

³Université de Parakou (Bénin): DGAT/FLASH/UP

⁴UMR 5569 HydroSciences Montpellier / IRD-France

⁵Institut National de l'Eau (INE) du Bénin

conforlad@yahoo.fr; gil.mahe@ird.fr; exlaure@gmail.com; ajernest@yahoo.fr; jean-emmanuel.paturel@msem.univ-montp2.fr; bokomichel@gmail.com; constant500@yahoo.fr;

Résumé : L'étude vise à analyser la variabilité des débits journaliers extrêmes dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou. La démarche méthodologique s'est consacrée à la collecte de données hydrométriques journalières extraites des fichiers de la DGE au Bénin puis complétées par celles de la base du SIEREM/HSM de 1951 à 2015. Les indices comme 90^{ème}, 95^{ème} et 99^{ème} percentiles définis par l'ETCCDI ont servi respectivement à caractériser les fortes crues, les très fortes crues et les crues très extrêmes susceptibles d'occasionner les inondations. Les résultats indiquent que le secteur d'étude a connu deux ruptures de stationnarités en 1968 et en 1987 dans les chroniques de débits. Les fortes crues varient de 59 à 1123 m³/s, ceux de très fortes crues sont de 81 à 1161 m³/s, tandis que les crues très extrêmes sont de 104 à 1330 m³/s. Ces indices sont des indicateurs pour le suivi des débits extrêmes susceptibles d'engendrer des dommages préjudiciables sur les plans socioéconomiques et environnementaux.

Mots-clés : indices, débits, extrêmes, bassin versant.

Abstract: Analysis of the variability of extreme daily flow indexes in the watershed of Ouémé at the Bonou outlet. The study aims at analyzing the variability of extreme daily flows in the watershed of Ouémé at the Bonou outlet. The methodology has been dedicated to the collection of daily hydrometric data from the files of the DGEau / Benin then supplemented by the base of SIEREM / HSM from 1951 to 2015. The Indices such as the 90th, 95th and 99th percentiles defined by ETCCDI were used to characterize the high floods, the very high floods and the very extreme floods that could cause flooding. The results indicate that the study area has experienced two breaks stationarities in 1968 and 1987 in the flows data. High flows range from 59 to 1123 m³/s, with very high floods ranging from 81 to 1161 m³/s, while the very extreme floods range from 104 to 1330 m³/s. These indices are indicators for monitoring extreme flows that could cause harmful socio-economic and environmental damage.

Keywords: indices, flows, extremes, watershed.

1. Introduction

L'étude des évènements extrêmes constitue l'un des défis auxquels sont confrontés la plupart des pays de l'Afrique subsaharienne disposant de grands bassins fluviaux. En effet, le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou en République du Bénin, a connu ces dernières décennies, des inondations récurrentes suivies des dommages aux plans socioéconomiques et environnementaux surtout dans les plaines d'inondation et dans un contexte d'inadaptabilité des outils adéquats pour l'analyse ou pour la gestion des évènements extrêmes. Les années 1999, 2008, 2009, 2010, 2012 et 2013 ont été caractérisées par des inondations majeures avec des dégâts estimés à plus de 127 milliards de FCFA et une baisse du taux de croissance du PIB de l'ordre de 0,8 point (Kodja *et al.*, 2013). Cette recherche analyse la tendance des débits journaliers extrêmes afin de mieux caractériser les aléas hydrométriques à l'inondation dans le milieu d'étude. Le bassin versant de l'Ouémé à Bonou est situé en Afrique de l'Ouest en République du Bénin et couvre une superficie de 46 200 km² (Figure 1). Il est compris 10°12' et 7°58' de latitude nord et 1°35' et 3°05' de longitude est avec un léger débordement à l'est vers le Nigéria (Le barbé *et al.*, 1993).

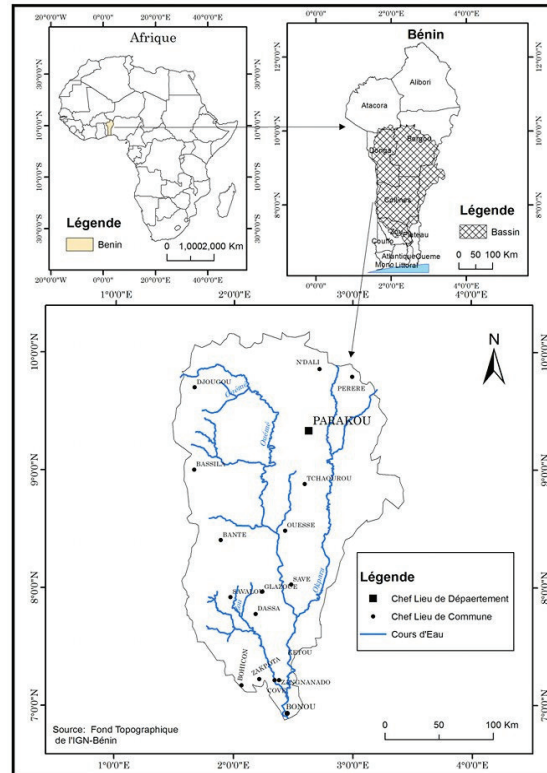


Figure 1. Localisation de la région d'étude

2. Données et méthodes

2.1. Données

Elles concernent les débits journaliers mesurés à l'exutoire de Bonou sur la période de 1951 à 2015 et extraites des fichiers du Service de l'Hydrologie de la Direction Générale de l'Eau (DGEau / Bénin) puis complétées par celles existantes dans la base de données du Système d'Informations Environnementales sur les Ressources en Eaux et leur Modélisation (SIEREM), Unité Mixte de Recherche (UMR) 5569, Hydrosociétés Montpellier (HSM).

2.2. Méthodes

2.2.1. Détection des ruptures au sein des séries hydrométriques

La détection de rupture de stationnarité constitue l'une des préoccupations au cœur de la problématique des études sur le changement ou la variabilité climatique. Elle a permis de mettre en évidence la variabilité hydrométrique sur le milieu d'étude à partir des tests statistiques intégrés au logiciel Khronostat 1.01, développé par l'UMR 5569, HSM. Il s'agit de la méthode de Buishand et l'Ellipse de Bois, la méthode non paramétrique de Pettitt, la méthode Bayésienne de Lee et Heghinian et la méthode de Segmentation de Hubert qui ont fait l'objet de beaucoup d'études en Afrique de l'Ouest et Centrale par Mahé et Olivry (1995), Fontaine *et al.* (1998) et en particulier au Bénin, par Vissin (2007), Kodja *et al.* (2013).

2.2.2. Identification des événements hydrologiques extrêmes

Elle est basée sur les indices qui caractérisent les événements extrêmes définis par le l'ETCCDI : Indices du Groupe des Experts pour les Détections des Changements Climatiques (Peterson, 2001). Il s'agit des indices comme 90^{ème}, 95^{ème} et 99^{ème} percentiles qui caractérisent respectivement des crues fortes, très fortes crues et crues très extrêmes.

Les indices standardisés des débits sont calculés avec le logiciel SPI_SL_6, mis au point par l'Organisation Mondiale de Météorologie (OMM, 2012) pour identifier les années sèches ou déficitaires, normales, excédentaires ou humides dans les débits observés de 1951 à 2015 avec une moyenne mobile calculée sur trois ans pour en faire un lissage entre les irrégularités dans les séries hydrométriques étudiées. Il est déterminé par la formule :

$$ISD = \frac{(X_i - \bar{X})}{\sigma}$$

où X_i est le débit de l'année i , \bar{X} = le débit moyen interannuel sur la période d'étude et σ : l'écart type de la série.

Si $ISD < 0$: l'année est sèche ou déficitaire ; si $ISD = 0$: l'année est dite moyenne ou normale ; si $ISD > 0$: l'année est humide ou excédentaire.

3. Résultats

3.1. Variabilité interannuelle des débits dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou

L'analyse de la figure 2, montre que dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou, les débits présentent une variabilité interannuelle et grâce à la moyenne mobile calculée sur trois ans, le lissage sur les irrégularités hydrométriques a permis d'identifier des séquences humides avec des anomalies positives en 1957, 1963, 1973, 1991, 2010 et des séquences déficitaires ou de diminution de la lame d'eau écoulee représentée par des anomalies négatives en 1959, 1969, 1977, 1983, 1988 dont la rupture de stationnarité a permis de mieux apprécier ces différentes séquences.

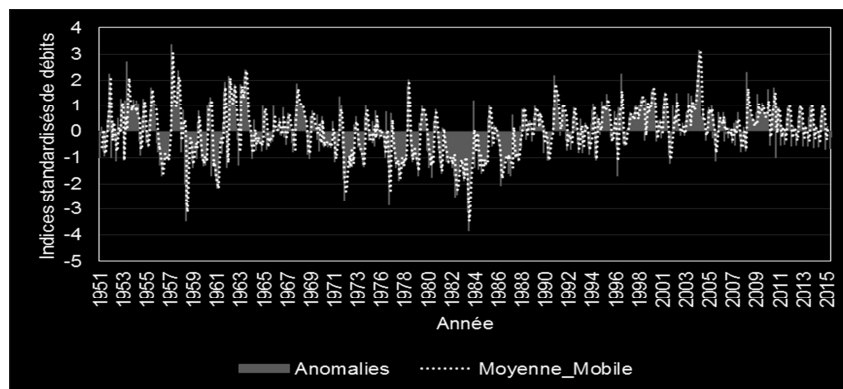


Figure 2. Variation interannuelle de débits standardisés de l' Ouémé a Bonou

3.2. Analyse de la rupture de stationnarité dans la chronique des débits

La figure 3 montre les résultats des tests de Buishand, ellipse de Bois, méthode non paramétrique de Pettitt et la segmentation de Hubert, relatifs à l'analyse de rupture de stationnarité des débits écoulés dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou.

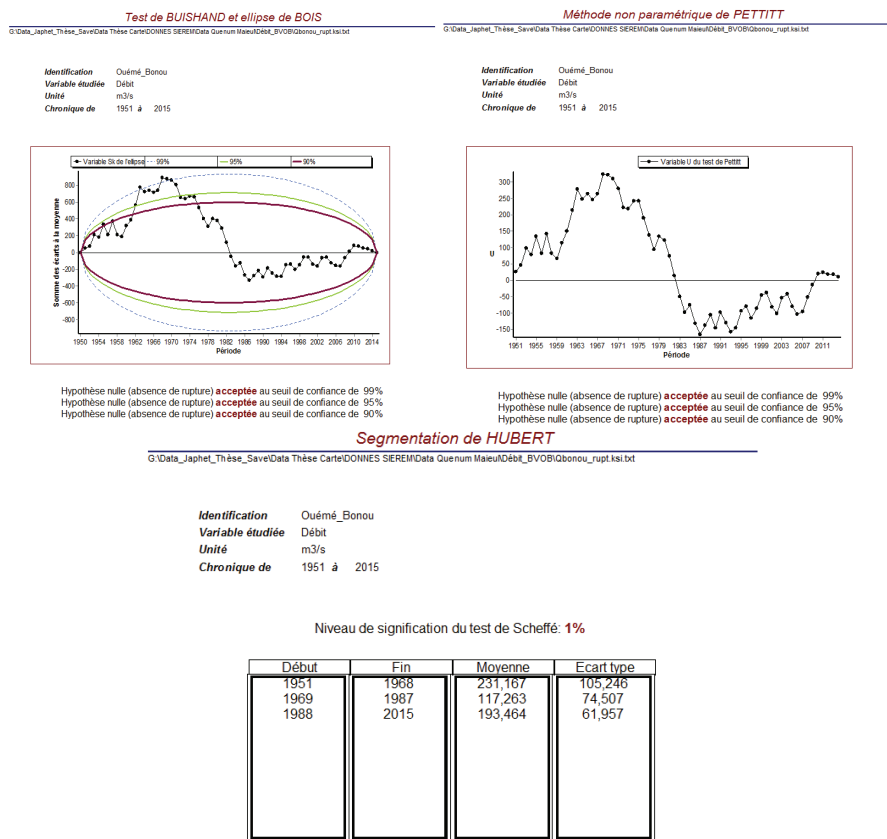


Figure 3. Rupture de stationnarité des débits de l’Ouémé à l’exutoire de Bonou illustrée par les testes statistiques

La rupture de stationnarité à travers la figure 3, montre qu’au seuil de signification de 99 % selon les tests de Buishand, ellipse de Bois et le test non paramétrique de Pettitt, les débits ont connu des ruptures de stationnarités en 1968 et 1987. Il ressort donc de cette analyse que la période 1951-1968 a un débit moyen de 231,16 m³/s contre 117,26 m³/s et 193,46 m³/s respectivement pour les périodes 1969-1987 et 1988-2015. On retient donc que la période 1951-1968 est supérieure à la période 1969-1987 soit un écart de – 49 % et que la période 1969-1987 présente un débit moyen inférieur à la dernière sous période soit 69 %. Le tableau de segmentation d’Hubert avec le niveau de signification de Scheffé de 1 %, en est une édification qui confirme réellement que les débits observés dans le milieu d’étude ont connu deux ruptures de stationnarité dans la série de 1951 à 2015.

3.3. Variabilité des débits maximaux journaliers pendant les sous périodes dans le bassin versant de l’Ouémé à l’exutoire de Bonou

La figure 4 présente la variabilité des débits maximaux journaliers sur les sous-périodes de 1951 à 1968, 1969 à 1987 et de 1988 à 2015. Son analyse révèle que les débits maximaux journaliers évoluent quasiment suivant le même rythme. Toutefois, la sous-période 1951 à 1968 est plus humide que la sous période 1969 à 1987 soit un écart de – 34 %, tandis que celle-ci est déficitaire par rapport à la dernière sous période de 1988 à 2015 avec un écart de 24 %. Il faut donc retenir que les lames d’eau écoulées dans le bassin versant de l’Ouémé à l’exutoire de Bonou sont confrontées à une variabilité marquée par des séquences sèches et humides qui peuvent être préjudiciables pour le développement local. Ce constat est en phase avec les études antérieures dans le milieu d’étude (Le barbé *et al.*, 1993 ; Amoussou, 2014)

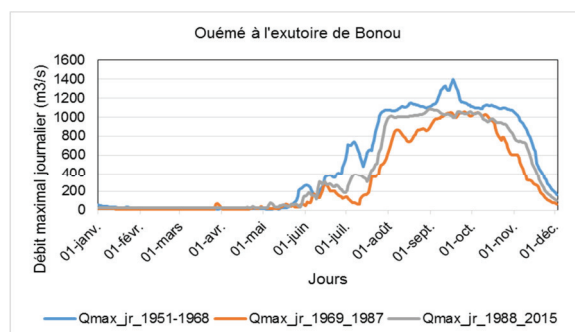


Figure 4. Rythme des débits maximaux journaliers sur le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou pour les périodes 1951 – 1968, 1969 – 1987 et 1988-2015

3.4. Évolution des débits maximaux journaliers dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou

La figure 5 montre la variation des débits maximaux journaliers dans le bassin versant étudié. De son analyse, il faut retenir que malgré que le coefficient de détermination R^2 soit légèrement supérieur à zéro, il y a globalement une diminution de la lame d'eau écoulée. Cette situation est illustrée avec la pente de l'équation de régression dont la valeur est négative soit -1.7 . Toutefois, les variabilités observées dans la série et supérieures à la moyenne de $828 \text{ m}^3/\text{s}$ peuvent occasionner des crues exceptionnelles suivies de dommages sur les plans socioéconomiques, humains et environnementaux.

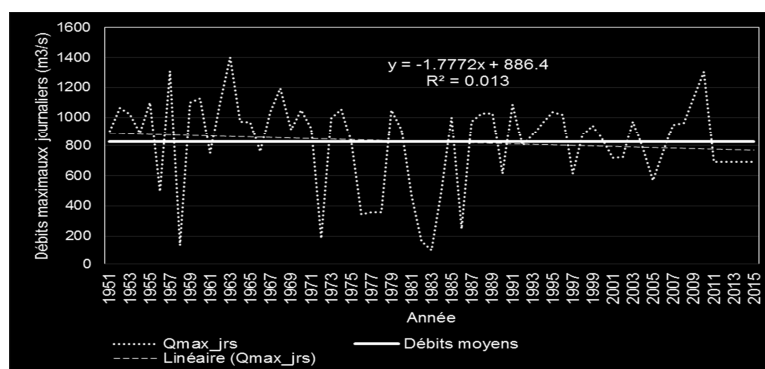


Figure 5. Évolution des débits maximaux journaliers sur le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou

3.5. Evolution des débits maximaux journaliers de forte crue, de très forte crue et de crues extrêmes dans le bassin versant de l'Ouémé à l'exutoire de Bonou

La figure 6 présente l'évolution des débits maximaux journaliers aux 90^{ème}, 95^{ème} et 99^{ème} percentiles. Tout comme les débits maximaux journaliers, il faut retenir de son analyse que les débits pouvant occasionner de fortes crues, de très fortes crues et des crues extrêmes sont aussi en régression avec respectivement des pentes de -0.57 , -1.10 et -2.05 . Cependant, les débits de fortes crues varient de 59 à $1123 \text{ m}^3/\text{s}$ soit un débit moyen de $636 \text{ m}^3/\text{s}$, ceux correspondants à de très fortes crues sont de 81 à $1161 \text{ m}^3/\text{s}$ avec un débit moyen de $737 \text{ m}^3/\text{s}$, tandis que les débits extrêmes sont de 104 à $1330 \text{ m}^3/\text{s}$ dont le débit moyen est de $809 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces différentes valeurs sont des indicateurs pour mieux analyser la survenance des crues, voire des crues exceptionnelles préjudiciables aux systèmes humains, environnementaux et au dimensionnement des infrastructures hydrauliques dans le milieu d'étude.

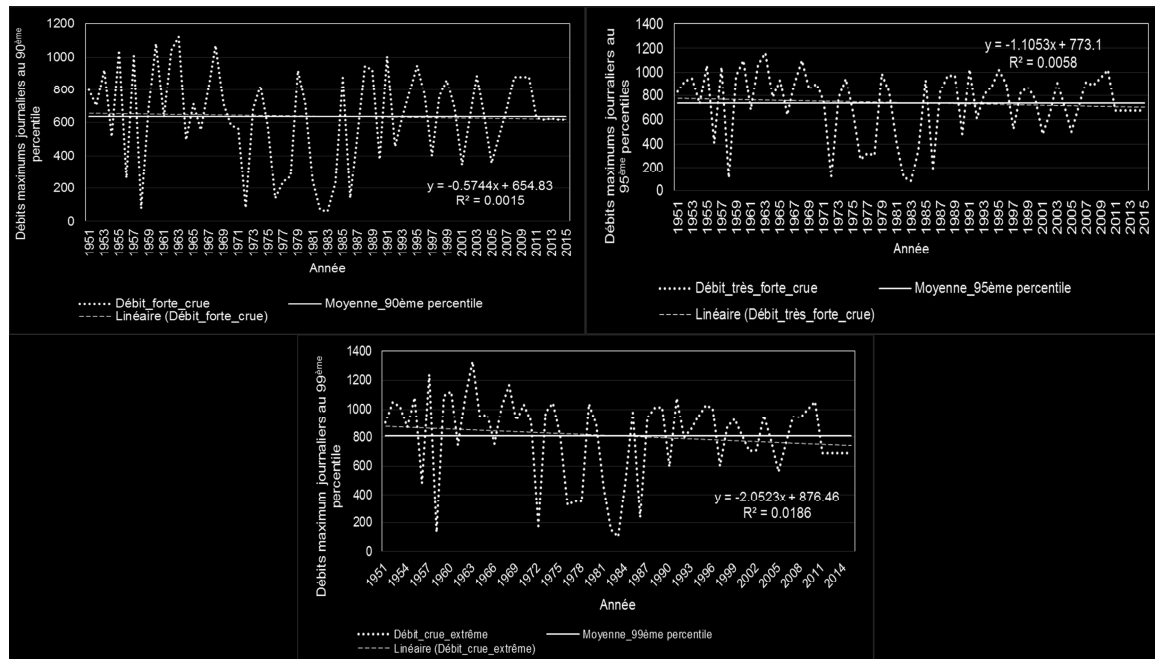


Figure 6. Évolution des débits maximaux journaliers de crues de différentes magnitudes

Conclusion

Il faut retenir que malgré la régression générale (cependant faible) indiquée par l'analyse de l'évolution des débits journaliers extrêmes, il est observé une variabilité dont les indices de certaines années sont au-dessus de la moyenne annuelle. Avec ce dernier cas, il est plausible d'observer des crues exceptionnelles qui peuvent occasionner des dommages aux plans socioéconomiques, humains et environnementaux. En perspective, cette analyse sera couplée aux évènements pluvieux extrêmes et comparée à l'historique des inondations afin de mieux apprécier les évènements hydroclimatiques extrêmes sur le milieu d'étude.

Bibliographie

- Amoussou E. 2014 : Analyse hydrométéorologique des crues dans le bassin versant du Mono en Afrique de l'Ouest avec un modèle conceptuel pluie-débit. FMSH-WP-2015-90.
- Fontaine, B., Trzaska, S., & Janicot, S. 1998 : Evolution of the relationship between near global and Atlantic SST modes and the rainy season in West Africa: statistical analyses and sensitivity experiments. *Climate Dynamics*, **14**(5), 353-368.
- Kodja D. J., Vissin E.W., Amoussou E., et Boko M., 2013 : Risques hydroclimatiques et problèmes d'aménagement hydroagricole dans la vallée de l'Ouémé à Bonou (Afrique l'Ouest), in Climat, agriculture ressources en eau d'hier à demain, *Actes du XXVI^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Cotonou (Bénin).
- Le Barbé L., Alé G., Millet B., Texier H., Borel Y. et Gualde R., 1993 : Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin. *Edition ORSTOM*, 540 p.
- Mahé G. et Olivry J.C., 1995. Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Rev. Sécheresse* n° **6**, 109-117.
- OMM 2012 : *Guide d'utilisation de l'indice de précipitations normalisé* (M. Svoboda, M. Hayes et D. Wood) (OMM-N° 1090), Genève.
- Peterson, T.C., 2001 : Report on the Activities of the Working Group on Climate Change Detection and Related Rapporteurs 1998-2001. *WMO, Rep. WCDMP-47, WMO-TD 1071*, Genève, Switzerland, 143 p.
- Vissin E.W., 2007 : *Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger*. Thèse de Doctorat de l'Université de Bourgogne, Dijon, France, 280 p.

IMPACT DU "NOUVEAU CLIMAT" RECHAUFFE SUR LES EXTRÊMES PLUVIOMETRIQUES AU MAGHREB

KARROUK M.S.¹,

¹Université Hassan II, FLSH Ben M'Sick, Dpt. Géographie, LCEAT, CEREC, Casablanca, ClimDev.Maroc@GMail.Com, CEREC@UnivH2M.Ac.Ma

Résumé – Le « Nouveau Climat » fait subir au Maghreb et à l'espace géoclimatique des latitudes moyennes les effets du nouveau régime atmosphérique caractérisé par la suprématie de la circulation méridienne (MAC : Meridian Atmospheric Circulation), faisant alterner des conditions de fraîcheur et d'humidité sous l'onde atmosphérique négative (vallée planétaire), et de chaleur et sécheresse sous l'onde atmosphérique positive (crête planétaire) le long de l'année. Ces nouvelles conditions mettent en difficultés les structures socio-environnementales existantes. Ce qui impose aux maghrébins une situation d'inquiétude et de perplexité vis-à-vis de leurs activités socio-économiques ; calendrier agricole bousculé, hésitations des décideurs, incertitude et attente, ...etc.

Mots-Clés : « Nouveau Climat », Extrêmes pluviométriques», Maghreb, MAC,

Abstract – *The impact of the "New Climate" Warmed on the Extreme Rainfall in the Maghreb*

The "New Climate" causes the effects of the new atmospheric regime characterized by Meridian Atmospheric Circulation (MAC) to cause the Maghreb and the geoclimatic space of mid-latitudes to alternate conditions of freshness and humidity Under the negative atmospheric wave (planetary valley), and heat and dryness under the positive atmospheric wave (planetary crest) along the year. These new conditions pose a challenge to existing socio-environmental structures. This imposes on the Maghreb people a situation of uneasiness and perplexity with regard to their socio-economic activities; Agricultural calendar shaken, decision makers' hesitations, uncertainty and expectations, etc.

Keywords : "New Climate", Extreme Rainfall, Maghreb, MAC.

Introduction

Depuis les années quatre vingt du siècle dernier, la recherche climatologique a effectué une grande avancée scientifique dans le domaine de la prédiction, dont la variabilité et l'évolution des différents paramètres climatiques commençaient à être plus claires ! (Karrouk M.S., 2007, 2009).

Mais aujourd'hui, principalement depuis 2005, certainement en raison du cumul thermique océanique, et du déplacement des zones climatiques vers les pôles sous formes sélectives (plus poussées en océans qu'au-dessus des continents) ; les événements climatiques n'évoluent plus selon les rythmes habituels et attendus : circulation atmosphérique, précipitations, températures, phénomènes saisonniers, ...etc. Ces événements connaissent une nouvelle évolution et distribution spatiotemporelles, qui caractérisent le « Nouveau Climat » planétaire.

Dans cette nouvelle situation, le Maghreb, situé en zone de transition climatique, subi pleinement les effets du « Nouveau Climat ». Habituellement, la réponse atmosphérique aux événements climatiques majeurs (ENSO) dans cette région telle que « El Niño » se caractérisait par l'installation de l'indice positif de la NAO, la stabilité et la sécheresse, en raison de la dominance de la circulation atmosphérique zonale en hiver. Par contre, en épisode « La Niña », c'était l'indice négatif de la NAO et la circulation méridienne qui prédominait, et les précipitations devenaient abondantes.

Depuis le début de ce siècle, des événements météorologiques qualifiés « d'exceptionnels ! » causant des crues n'ont cessé de se produire au Maghreb et ailleurs, avec une récurrence de plus en plus élevée, incitant à se demander sur le « nouveau » mode du fonctionnement hydro-thermique du système climatique induisant les pluies torrentielles, de même que son effet sur les milieux et les sociétés.

Le dernier événement en date est la catastrophe des inondations d'octobre 2016 dans la région de Laâyoune, au sud du Maroc, qui est due spécialement au retour non habituel des pluies, dans une région considérée aride et saharienne.

1. Données et méthodes

Les données utilisées dans ce travail sont issues, selon leurs catégories, des services suivants :

1.1. Cartes Synoptiques

Hémisphériques de la NOAA : NCEP/DFC, et Européennes de Aktion "Wetterpate", Institut für Meteorologie FU Berlin, de MetOffice et de Deutschen Wetterdienstes (DWD).

1.2. Cartes Géopotentielles

Hémisphériques et Européennes de Wetterzentrale : ECMWF, GFS, GPDM 500 et 850 hPa, Pression au Sol 1015 hPa, Précipitations mm, Températures à 2m du Sol °C.

1.3. Données météorologiques

De la Météorologie Nationale du Maroc (DMN) : vulgarisées directement ou reprises par autres.

La méthodologie utilisée est purement géographique ; celle d'observer, d'analyser, de confronter et de restituer. Il s'agit donc des événements vécus, que nous avons essayé d'analyser par les différentes cartes précitées. La période d'observation quotidienne est celle de 1990 à 2016 (25 ans).

2. La nouvelle circulation atmosphérique hémisphérique et ses effets sur les crues au Maghreb

2.1. La circulation atmosphérique « habituelle »

Cette circulation hémisphérique se caractérisait par le basculement extrême saisonnier des systèmes atmosphériques zonaux et méridiens. Les premiers prédominaient en saison froide lorsque le gradient énergétique est élevé entre les zones déficitaires et excédentaires, de sorte que les flux aériens rapides s'organisaient d'ouest vers l'est, séparant ainsi les zones froides et les zones chaudes au niveau du front polaire au nord de la région méditerranéenne. Les seconds prédominaient en saison chaude lorsque le gradient énergétique est faible, et les flux moins rapides ondulaient, prenant une forme méridienne nord-sud et sud-nord, instaurant ainsi une activité intense de transfert énergétique latitudinal entre les diverses régions des latitudes moyennes.

Pendant la saison froide, l'anticyclone subtropical des Açores repoussait le flux d'ouest vers le nord, protégeant / défavorisant ainsi la région nord africaine et ibérique des perturbations du front polaire ; ce qui a imposé les sécheresses, tout à fait normales sous ces conditions, qui ont caractérisé les liens séculaires Homme / Espace depuis l'aube des temps dans cette région (Fig. 1). Mais de temps à autre, lorsque les queues des perturbations polaires atteignaient notre région, les précipitations étaient de retour ; ce qui a toujours assuré le renouvellement des ressources hydriques dans cette région du monde.

Ce sont ces conditions thermo énergétiques qui ont assuré la stabilité de la circulation atmosphérique telle que nous l'avons connu au 20^{ème} siècle, et sur la base de laquelle s'est développée la littérature scientifique et l'ingénierie de ce domaine, de même que toutes les structures socio économiques humaines.

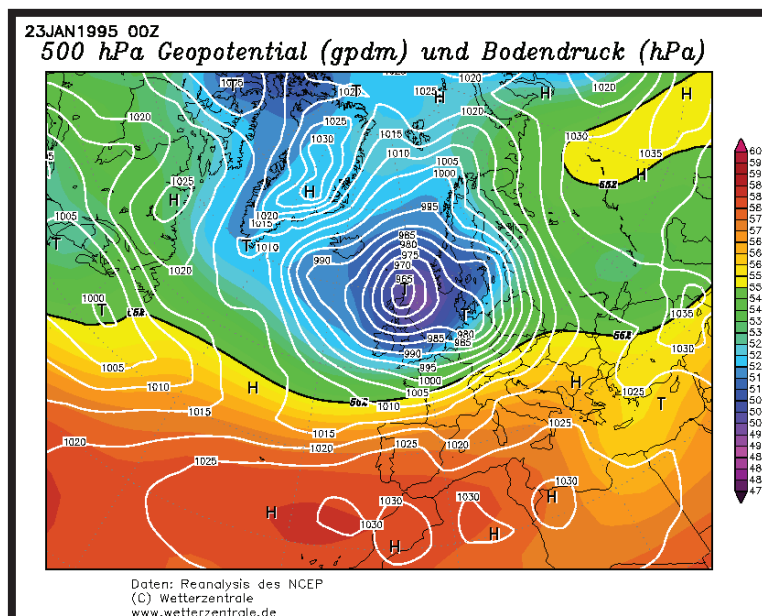


Figure 1. Situation du 23 janvier 1995 (Wetterzentrale)

2.2. La circulation atmosphérique « actuelle »

De nos jours, nous remarquons depuis la fin du siècle dernier, une nouvelle distribution thermo énergétique planétaire, caractérisée par l'élargissement de la zone chaude intertropicale et son déplacement vers les pôles, principalement dans les milieux océaniques (Karrouk M.S., 2016 a). Ce qui a conduit au rétrécissement de la zone froide polaire, et son envahissement des continents, particulièrement en saison froide (Karrouk M.S., 2017).

Cette situation impose une nouvelle circulation atmosphérique hémisphérique à prédominance méridienne. Les flux d'ouest, contraints de contourner les anticyclones subtropicaux largement poussés vers les pôles, se trouvent ramener à contourner à nouveau les dépressions subpolaires intruses profondément jusqu'aux confins des zones subtropicales (Karrouk M.S., 2015). Ce qui conduit à une succession de profondes ondes planétaires : des crêtes chaudes et stables succèdent à des vallées froides et perturbées sur toute la région de l'Afrique du Nord et de l'Europe Occidentale. Cette dernière se caractérise par des tempêtes de neige en hiver (2010, 2012), brèves et rigoureuses, causées par le blocage effectué par l'anticyclone subtropical océanique. Alors que les pays du Maghreb subissent les intrusions dépressionnaires froides qui donnent des précipitations abondantes au niveau du cisaillement méridien des flux, ou alors un franc froid si ce cisaillement est au-dessus de l'Atlantique, sinon c'est la chaleur diurne et le froid nocturne si la crête anticyclonique coiffe l'Afrique du Nord, ou en tout cas, sa partie occidentale.

La question de l'alternance crêtes/chaleur vallées/fraicheur impose des interactions hydro-thermiques très actives, qui se manifestent par une violence exceptionnelle vu l'excès du bilan énergétique latent et de l'humidité atmosphérique qui l'accompagne ; ce qui explique les pluies torrentielles et des inondations de ces dernières années, de même que les dégâts importants qui en découlent, particulièrement en saison d'automne (Karrouk M.S., 2016 b).

Ainsi, en septembre / mars 2008/2009 (phase La Niña), et décembre / février 2009/2010 (phase El Niño), la vallée planétaire installée sur le continent européen et l'Afrique du Nord, fait subir au Maghreb des conditions d'humidité « exceptionnelles » (Fig. 2) accompagnées par des inondations à travers toute la région (Karrouk M.S., 2015).

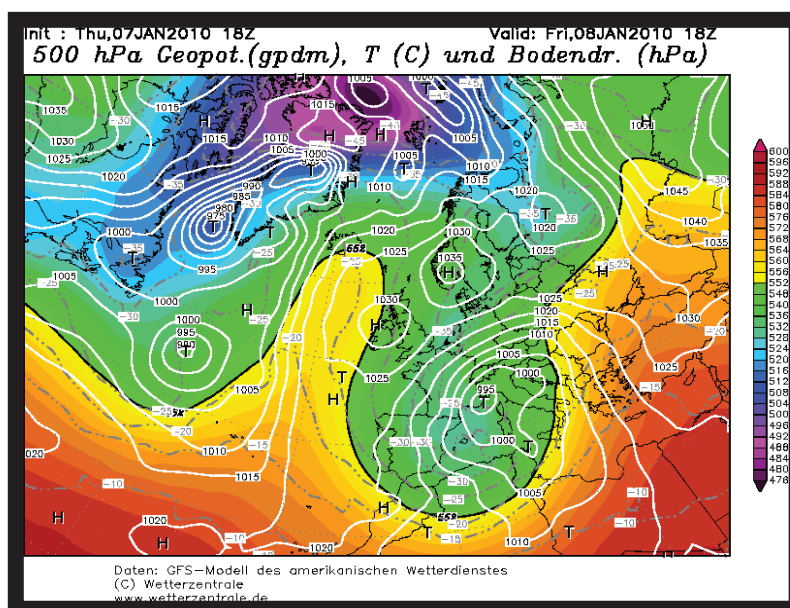


Figure 2. Situation du 07 janvier 2010 (Wetterzentrale)

Ces conditions atmosphériques sont « Nouvelles », et mettent l’Afrique du Nord sous l’emprise de l’humidité ; ce qui peut minimiser les effets de la sécheresse, de la désertification et du stress hydrique, si on s’adapte convenablement au nouveau régime climatique.

Dans ces nouvelles conditions, les processus et les mécanismes de la sécheresse et de l’humidité deviennent différents, et subissent une alternance successive dans le temps et dans l’espace, et par conséquent, nous assistons à un nouveau mode de distribution de l’humidité dans l’espace maghrébin (Karrouk M.S., 2016 c), caractérisé par sa brièveté d’une part, et sa sévérité de l’autre, d’où la nécessité d’une réflexion sur le devenir des ressources en eau et leurs impacts régionaux dans les pays du Maghreb.

Théoriquement, la disposition des chaînes montagneuses, le tracé des côtes et les milieux marins maghrébins, conjugués avec une circulation atmosphérique méso-régionale à tendance méridienne, devraient garantir aux pays une pluviométrie régulière et abondante sous différentes formes, mais avec un rythme et une distribution différents de ceux que nous avons connu au 20^{ème} siècle, et qui devraient remodeler les caractéristiques et les aspects des espaces naturelles et des activités humaines dans l’espace maghrébin.

3. Les conditions atmosphériques des récentes crues au Maroc

3.1. La crue d’octobre 2008 à Tanger (Maroc)

Une pluviosité de 199,5 mm et 10 millions de m³ d’eau en 5 heures. Du jamais vu !!! (Record national absolu, DMN).

Conséquences : deux morts, des infrastructures submergées, les installations d’une zone industrielle englouties, des routes défoncées, des chaussées dégradées, des tonnes de coulées de boue, des habitations, des commerces et des véhicules endommagés, des biens perdus, une circulation paralysée, des quartiers plongés dans l’obscurité, des milliers de personnes bloquées, des écoles fermées...

Ces pluies diluviennes sont considérées comme les plus fortes précipitations au Maroc depuis 35 ans (DMN). Telles étaient les conséquences de l’averse automnale qui a suivie une période chaude, causée par une goutte froide renforcée par une anomalie positive des

températures des eaux océaniques (NOAA) et une dépression sur le golfe de Cadix le 23/10/2008.

3.2. La crue de janvier/février 2010 au Gharb (Maroc)

Submersion de 168.000 hectares, dont 135.000 dans la région du Gharb⁴², déplacement de 22.000 habitants, coupure de plusieurs routes et de la voie ferroviaire.

Les dommages par km de route sont évalués à 500 000 MDH au Gharb, ceux subis par entité d'occupation du sol (Agriculture, Bâti, Réseaux de voiries) 668,17 million de MDH de janvier à mars 2010 (Fofana O., Bouabdli A., Baghdad B., Sossey-Alaoui F., 2013)

Les conditions atmosphériques étaient caractérisées par une vallée froide très profonde et intense dans un milieu chaud, ce qui a causé une pluie abondante et continue pendant plusieurs jours.

3.3. La crue de novembre 2010 à Casablanca (Maroc)

C'est du jamais vu au niveau de la capitale économique du Maroc. Dans une seule nuit, une première dans l'histoire de Casablanca, un pic de 178 mm de pluie, soit la pluie d'une demi-année (DMN). La goutte froide du 29/30 novembre 2010 a fait subir à la capitale économique des dégâts historiques.

3.4. La crue de novembre 2014 à Guelmim (Maroc)

Les conditions atmosphériques de cette période ont été marquées par une circulation atmosphérique méridienne renforcée, caractérisée par la persistance des températures élevées pendant cette période d'automne au Maroc, principalement au sud de l'Atlas, conjuguée à l'intrusion d'une goutte froide au début de l'événement le 17/11/2014 et l'installation franche d'une vallée planétaire très approfondie au large des côtes marocaines le 24/11/2014, qui a évolué en tempête (Xandra) où la dépression a atteint la valeur surprenante de 975 hPa le 28/11/2014 (Met Office, Fig. 3).

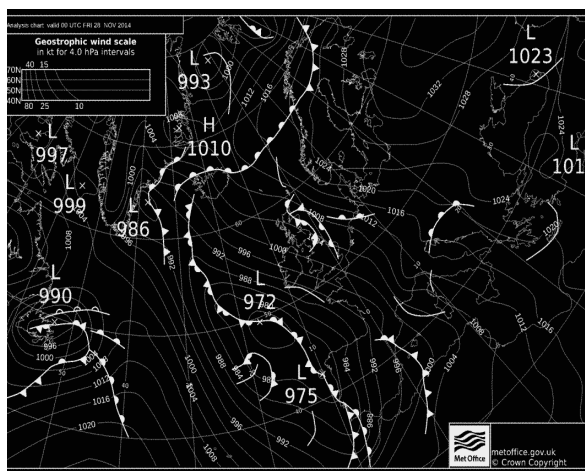


Figure 3. Situation du 28 novembre 2014 (Met Office)

Les dégâts humains et matériels causés par cette crue sont impressionnants : des personnes sont mortes, des routes et chaussées détruites, des barrages débordés, des cultures détruites, des infrastructures délabrées ; c'est la catastrophe.

4. Les conditions atmosphériques de la sécheresse de l'automne hiver 2015-2016 au Maroc

Des conditions inverses se sont installées l'année suivante. Pendant cette période, la chaleur estivale s'est prolongée jusqu'à la fin de l'automne 2015, voire même pendant l'hiver et les précipitations se sont contractées de plus de 51% du cumul pluviométrique automnal (DMN), en comparaison avec la même période d'une année normale. Un ralentissement de la croissance économique a été ressenti depuis le mois de décembre (Haut-Commissariat au Plan

⁴² Selon le ministre de l'Agriculture, qui présentait un exposé devant la commission de l'Agriculture et des affaires économiques à la Chambre des conseillers le 6 avril 2010.

2016) et s'est prolongé jusqu'au retour des pluies (et de la neige !) en mi février 2016. Les conditions météorologiques pendant cette période ont été marquées par la succession et la persistance des crêtes planétaires très actives, projetées jusqu'aux confins nord de l'Europe Occidentale (chaleur de Noël 2015 !), rejetant ainsi les ondes négatives à l'est : Algérie, Tunisie, Italie, Balkans, Anatolie, et même au Moyen Orient.

Conclusion

Ces événements, et d'autres semblables : crues de Mohammedia (Maroc) de novembre 2002, d'El Attaf, Aïn Defla et M'sila (Algérie) en Octobre 2007 où cinq personnes sont décédées (l'Expression), Ghardaïa en octobre 2008 où 100 personnes sont décédées (Ketrouti K, Meddi M, Abdesselam B, 2012) d'Alger en Octobre 2015, de Tunis en Octobre 2007 où huit personnes ont péri et huit autres sont portées disparues (TAP/AFP, Fehri, 2014), Sfax 2009 (Daoud et Dahech, 2012) ...etc., doivent être considérés comme cas laboratoire de référence pour la simulation des situations futures et l'intégration dans les plans de développement à l'avenir.

Bibliographie

- Daoud A., Dahech S., 2012 : Résilience de l'agglomération de Sfax (Tunisie méridionale) face au changement climatique : essai d'évaluation. *Climatologie* [En ligne], URL : <http://lodel.irevues.inist.fr/climatologie/index.php?id=738>, <https://doi.org/10.4267/climatologie.738>
- Fehri N., 2014 : L'aggravation du risque d'inondation en Tunisie : éléments de réflexion. *Physio-Géo* [En ligne], Volume 8, URL : <http://physio-geo.revues.org/3953> ; DOI : 10.4000/physio-geo.3953
- Fofana O., Bouabdli A., Baghdad B., Sossey-Alaoui F., (2013): Estimation des niveaux d'eaux en plaine inondée à partir d'images satellitaires radar et de données topographiques fines puis évaluation des dommages liés aux inondations - Plaine du Gharb, Maroc. ScienceLib Editions Mersenne: Volume 5, N° 130503, ISSN 2111-4706.
- Haut-Commissariat au Plan 2016 : Note de conjoncture N° 27, Janvier 2016, Rabat.
- Karrouk M.S., 2007 : Climate Change and its Impacts in Morocco. In: Mellouki A., Ravishankara A.R. (eds) Regional Climate Variability and its Impacts in The Mediterranean Area. NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences, vol 79. Springer, Dordrecht. DOI 10.1007/978-1-4020-6429-6
- Karrouk M.S., 2009 : Changement Climatique, Prédiction et Retour des Précipitations au Maroc : de l'Observation et le Suivi Spatiaux à la Modélisation », *Revue de Géographie du Maroc*, N°25, Rabat.
- Karrouk M.S., 2017: "New Climate" Warmed, "New Atmospheric Circulation" and "Extreme" Meteorological Phenomena. American Meteorological Society's 29th Conference on Climate Variability and Change, Seattle.
- Karrouk M.S., 2016 a: Effects of the "New Climate" warmed in Northern Africa and Western Europe: the situation of meteorological drought and floods 2015-2016. *American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco*.
- Karrouk M.S., 2016 b: "New Climate" Warmed, "New Atmospheric Circulation" and "Extreme" Meteorological Phenomena associated with El Niño 20152016. *American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco*.
- Karrouk M.S., 2016 c: New Planetary Energy Balance, Ocean-Atmosphere Interaction and their Effects on Extreme Events in North Atlantic. European Geosciences Union. Vienna.
- Karrouk M.S., 2015: "New Climate" New Atmospheric Events and "New Climate Risks": The case of Morocco, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco.
- Ketrouti K, Meddi M, Abdesselam B, 2012 : Etude des crues extrêmes en Algérie : cas du bassin-versant de la Tafna. *Secheresse* 23 : 297-305. doi : 10.1684/sec.2012.0353.

VARIABILITE CLIMATIQUE ET DYNAMIQUE HYDRO-ECOLOGIQUE DANS LE BASSIN-VERSANT DU FLEUVE OUEME AU BENIN

AMOUSSOU E.^{1&2}, TOTIN V. S. H.^{1&2}, VISSIN E. W.², DIEDHIOU A.³, HOUNDENOU C.², MAHE G.³ & BOKO M.²

¹Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université de Parakou, BP 123 Parakou, Bénin. ajernest@yahoo.fr, ernestamoussou@gmail.com, sourouhenri@yahoo.fr

²Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystème et Développement (LACEEDE), Université d'Abomey-Calavi, République du Bénin, 03 BP1122 Cotonou (Bénin). bokomichel@gmail.com

³IRD, Laboratoire HydroSciences de Montpellier, Université de Montpellier 2, Case courrier MSE, Place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex 5-France. gil.mahe@ird.fr, arona.diedhiou@ird.fr

Résumé- L'objectif de cette étude est d'analyser la répartition des précipitations, la caractérisation des hydro-écorégions du bassin et son fonctionnement. Les données utilisées sont les précipitations, l'ETP, les débits du fleuve Ouémé à Bétérou et à Bonou, les données planimétriques, d'occupation du sol extraites des images Landsat TM et de terrain ont permis de caractériser les hydro-écorégions et d'apprécier le fonctionnement de l'écosystème Ouémé. La détermination des débits écologiques à Bétérou et Bonou renseigne sur le mode de préservation de l'écosystème dans un contexte de changements environnementaux globaux. Les résultats obtenus montrent une inégale répartition des précipitations, marquée par une dégradation continue des conditions naturelles notamment climatiques qui déterminent la mise en valeur des terres dans la basse vallée. Une forte pression naturelle et anthropique altère les conditions de mise en valeur traditionnelle de cet écosystème.

Mots clés : Bénin, fleuve Ouémé, bassin-versant, péjoration climatique, hydroécologie.

Abstract-Climate worsening and dynamic hydro-ecological in the catchment area of the Oueme -Bonou river basin in Benin. The objective of this study is to analyze the distribution of precipitation, the characterization of the hydro-ecoregions of the basin and its functioning. The data used are rainfall, ETP, flows from the Oueme River to Beterou and Bonou, planimetric and land-use data extracted from Landsat TM and terrain images have been used to characterize the hydro-ecoregions, Assess the functioning of the Oueme ecosystem. The determination of ecological flows in Beterou and Bonou provides information on the way in which the ecosystem is preserved in the context of global environmental changes. The results show an uneven distribution of precipitation, marked by a continuous degradation of the natural conditions, particularly climatic conditions, which determine the development of land in the lower valley. Strong natural and anthropogenic pressure alters the conditions for the traditional development of this ecosystem.

Keywords: Benin, Oueme river, catchment basin, climatic pollution, hydroecology.

Introduction

Les cours d'eau sont des milieux d'attraction des populations du fait d'énormes potentialités qu'ils regorgent. Ils offrent d'excellentes opportunités techniques et économiques de gagner facilement sa vie.

En Afrique et au Bénin en particulier, les grands fleuves comme le fleuve Ouémé subissent une forte pression démographique liée à leur situation géographique (Mama, 2010). De multiples activités anthropiques sont exercées le long de ces cours d'eau sans que l'on puisse clairement responsabiliser les différentes parties prenantes. Les effets pervers de la forte anthropisation sur les écosystèmes naturels associés aux risques hydro-climatiques amplifient dangereusement la dégradation écologique de nos cours d'eau (Amoussou, 2010), indispensable pour la vie. Ainsi, les événements climatiques extrêmes notés actuellement sont en partie l'une des conséquences des changements des états du milieu et de la qualité des eaux dans nos bassins-versants. Les régimes fluviaux enregistrent des variations interannuelles très sensibles avec pour corollaire les inondations et l'assèchement des lits (Amoussou, 2010; Kodja, 2013). Alors quel que soit le type d'évènement climatique (inondations ou sécheresses), la vie des écosystèmes n'est pas épargnée. Ces dernières années, le bassin de l'Ouémé à Bonou est confronté à de fortes crues et des inondations qui ont entraîné des conséquences drastiques dont beaucoup de dégâts matériels, d'importantes pertes animales et de cultures maraîchères, des problèmes d'accès à l'eau et des maladies liées au débordement

des eaux usées (Ahouansou 2008). De nombreuses études ont été réalisées sur la variabilité hydroclimatique dans le bassin (Le Lay, 2006 ; Séguis *et al.*, 2011; Akognongbé, 2014) sans aborder de façon objective son implication sur la dynamique écologique. Or, par exemple, la survenance des crues liée aux événements pluvieux extrêmes cause d'énormes dégâts à leur passage, dont la dégradation précoce de l'environnement comme le ravinement des versants.

La dynamique hydro-écologique des cours d'eau, souvent très complexe dans un environnement de plus en plus anthropisé couplée à une récession pluviométrique rend de plus en plus vulnérable les écosystèmes comme c'est le cas du fleuve Ouémé. L'objectif de cette étude est d'analyser la répartition des précipitations tout en caractérisant la dynamique hydro-écologique du bassin de l'Ouémé à Bonou.

1. Présentation du secteur d'étude

Le bassin de l'Ouémé se situe au Bénin entre 6°24' et 10°12' Nord et entre 1°30' et 3°00' Est (Le Barbé *et al.*, 1993) (figure 1) et représente 40,5% de la superficie du territoire béninois. Il s'écoule du nord vers le sud où il crée dans sa partie aval une vallée très riche en minéraux organiques : la vallée de l'Ouémé, la 2^{ème} la plus fertile au monde après le Nil. Son climat est commandé par les centres d'action déterminés par la circulation atmosphérique ouest-africaine (Le Lay, 2006). L'anticyclone de Sainte-Hélène, dans l'hémisphère sud, gouverne le flux de mousson et le dirige sur le Bénin. C'est ce qui explique les pluies de mousson qui peuvent précipiter une journée au lieu d'être réparties sur tout un mois. La mousson couvre ainsi tout le secteur d'étude aux mois de juillet, août et septembre, influençant ainsi la dynamique hydro-écologique de l'hydrosystème Ouémé.

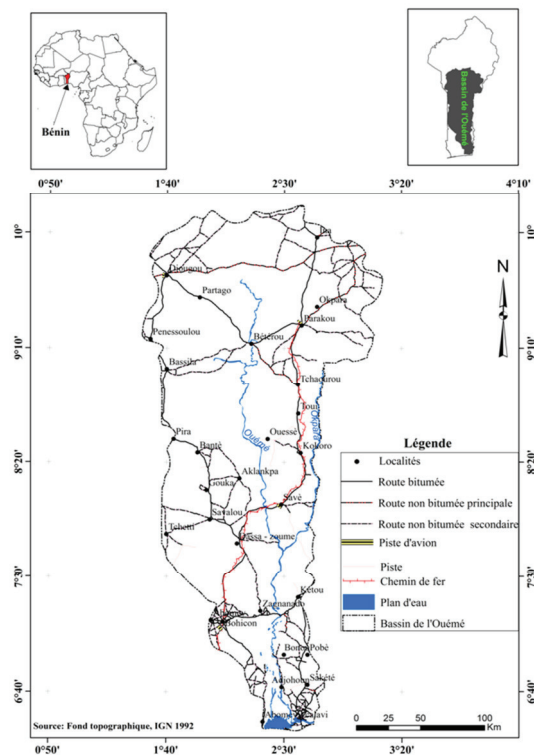


Figure 1. Localisation du secteur d'étude

2. Données et méthodes

Les données pluviométriques mensuelles (1960-2011) de trente-six (36) stations ont été utilisées. Quant aux données d'évapotranspiration (ETP), elle couvre la période 1965-2011 (du fait de l'indisponibilité des données d'ETP avant 1965) et concernent les stations synoptiques de Parakou et de Bohicon (encadré au rouge sur la carte), toutes extraites à la Direction Nationale de la Météorologie (DNM) du Bénin. Les statistiques hydrométriques mensuelles de l'Ouémé à Bétérou et à Bonou sur la période 1960-2011 utilisées ont été tirées des bases de données du Service de l'Hydrologie de la Direction Générale de l'Eau à Cotonou et ont permis la détermination des débits écologiques. Les données planimétriques, d'occupation du sol issues des images Landsat TM et écologiques ont permis de caractériser les hydro-écorégions du bassin.

La spatialiséation du champ de pluie du bassin a été réalisée avec les trente-six stations selon la méthode d'interpolation cubique spline, liant la régression linéaire multiple, les moyennes pluviométriques mensuelles des trente-six (36) stations à la latitude, à la longitude

et à l'altitude (Modèle Numérique de Terrain STRM30). Cette méthode s'inspire de celle de de Amoussou (2010). Une validation croisée de type « leave-one-out » développée par Lachenbruch et Mickey (1968) dans le cadre de recherches sur l'estimation de l'erreur de modèles d'analyse discriminante et utilisée par Philippon (2002) et Amoussou (2010), a permis enfin de vérifier la fiabilité des données estimées. Le bilan climatique (P-ETP) a été calculé respectivement à Bétérou et à Bonou pour apprécier la disponibilité des ressources en eau dans le bassin en domaine subsoudanien et subéquatorial.

La caractérisation des hydro-écorégions est réalisée à partir de la carte agroécologique du Bénin (Sinsin *et al.*, 2004) qui regroupe plusieurs variables biophysiques tels le relief, les aptitudes pédologique, pluviométrique, hydrographique, biogéographique et écologique du secteur d'étude. La confrontation de ces différentes données a conduit à la catégorisation des espaces homogènes. Le débit écologique qui n'est rien d'autre qu'un dixième du débit moyen annuel à chaque station hydrométrique (Bétérou et Bonou respectivement sous le climat subsoudanien et subéquatorial) est calculé pour apprécier l'état de l'écosystème et les périodes propices de son exploitation.

3. Résultats et discussion

3.1. Variabilité climatique spatiale du bassin

La variabilité pluviométrique en Afrique de l'Ouest en général et au Bénin voire dans le bassin versant du fleuve Ouémé en particulier, n'est plus à démontrer. Plusieurs études (Le Lay, 2006 ; Kamagaté, 2006 ; Totin *et al.*, 2007 ; Kodja, 2013) ont montré la variabilité climatique dans le bassin et son influence sur les ressources en eau sans aborder à fond son influence sur l'écologie, l'objet de cette étude.

La figure 2 présente les isohyètes en moyenne annuelle pour la période 1960-2011 l'évolution spatiale des précipitations dans le bassin de l'Ouémé. Le total pluviométrique annuel varie de 1055 mm (au nord et au centre est du bassin) à 1238 mm dans la basse vallée du secteur d'étude, soit 183mm seulement de différence entre la station la moins arrosée (Tchaourou) et la plus arrosée (Porto-Novo). Cette variabilité spatiale des précipitations conditionne la dynamique écologique du fleuve.

Les quantités de pluies enregistrées dans le bassin montrent que ce dernier est bien arrosé du Nord au Sud, ce qui lui offre d'énormes potentialités en matière de ressources en eau.

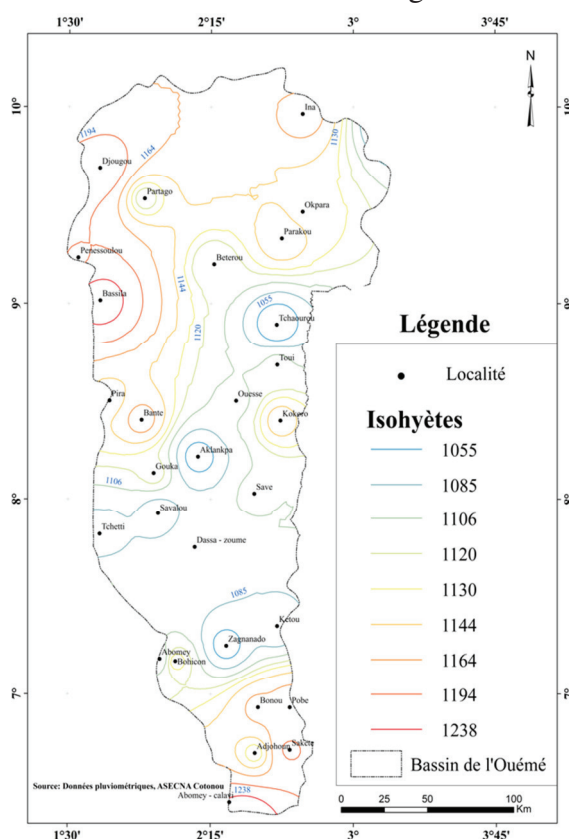


Figure 2. Distribution spatiale des précipitations annuelles dans le bassin du fleuve Ouémé (moyenne pour la période 1960-2011)

Cependant, la forte évapotranspiration observée dans le bassin suite à l'action conjuguée de la récession pluviométrique et de l'anthropisation poussée influence négativement les ressources en eau du bassin. Ainsi, le bilan climatique calculé (figure 3), traduit une succession saisonnière d'excédents et de déficits en eau dans l'hydrosystème Ouémé. Le climat devient sec quand les précipitations sont inférieures à l'évapotranspiration potentielle (pendant huit mois : mai à octobre), et qu'il n'y a pas de réserve suffisante d'eau disponible (Hufty, 1976) surtout dans le nord bassin (région de Bétérou). Ceci entraîne des dysfonctionnements des écosystèmes terrestres et aquatiques avec des pertes de biodiversité (Roche, 1998).

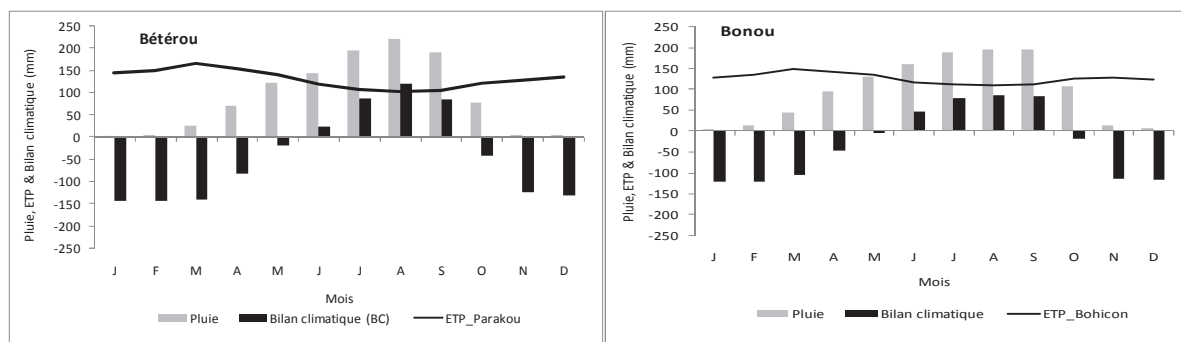


Figure 3. Bilan climatique dans le bassin du fleuve Ouémé à Bétérou et à Bonou (moyenne 1965-2011)

La période humide de quatre mois (juin à septembre) sur douze dans le bassin détermine la dynamique hydrologique et par conséquent la dynamique écologique du fleuve l'Ouémé. Ces informations orientent vers les différents usages à développer dans le bassin dans le temps pour une durabilité de l'hydrosystème, car dans d'autres bassins comme celui de Mono, cette période humide est de cinq mois voire six (Amoussou, 2010), donc le mode d'usage n'est pas le même d'un bassin à l'autre.

3.2. Débit écologique

La figure 4 illustre le débit écologique (encore appelé "débit de réserve") dans l'hydrosystème Ouémé qui permet de laisser en aval dans un cours d'eau, un débit suffisant pour une vie biologique satisfaisante. Il permet de garantir l'équilibre entre les usages de la ressource en eau et la protection des écosystèmes aquatiques. Ainsi, de la figure 4, il ressort de l'analyse que dans le bassin à Bétérou, c'est seulement au cours des mois de juillet à novembre (5 mois) que le débit écologique est supérieur au débit moyen mensuel. De façon pratique, l'abondance de l'écoulement s'observe surtout de juillet à octobre. Par contre, en aval du bassin à Bonou, l'exploitation intense peut se faire sur six mois (juin à novembre), toutefois avec une humidité des sols de décembre à janvier.

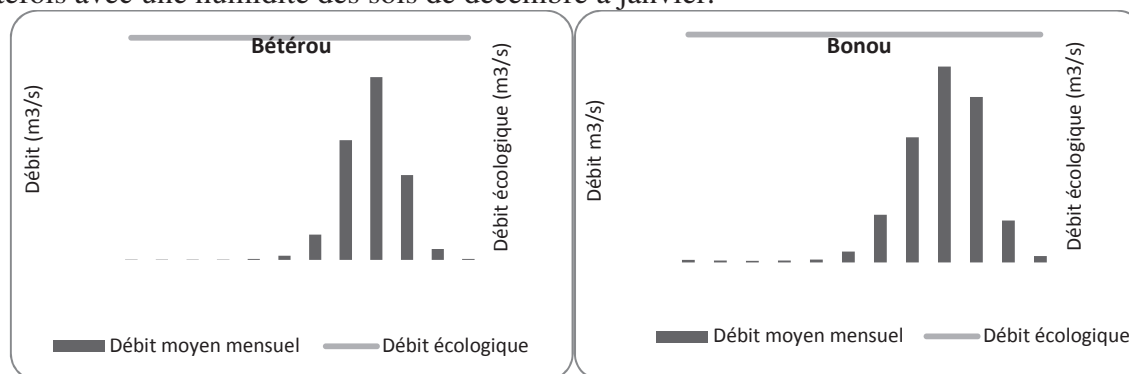


Figure 4. Débit écologique dans le bassin du fleuve Ouémé à Bétérou et à Bonou de 1960 à 2011

Le rude étiage est observé seulement au cours des mois de février à avril à Bonou et de décembre à mai à Bétérou. En dehors des périodes humides, tout usage des eaux doit être interdit à l'exception du mois de novembre à Bétérou et de juin à Bonou où il doit être contrôlé pour une préservation de la diversité biologique du bassin.

En outre, pour les usages ménagers des eaux du fleuve par les collectivités, des dispositions doivent être prises pour disposer des ressources alternatives comme les ressources en eau souterraines pour les périodes de soudure. Ainsi, le respect du débit écologique serait un des moyens de la reconquête de la qualité des milieux aquatiques pour une durabilité du biotope et de la biocénose (Heegaard *et al.*, 2006).

3.3. Caractérisation des hydroécotopes du bassin-versant du fleuve Ouémé

La caractérisation du bassin du point de vue homogène est induit par les déterminants physiques qui contrôlent l'organisation et le fonctionnement global des écosystèmes aquatiques (Chandesris *et al.*, 2005). De la définition de Wasson (2001), la diversité naturelle de l'hydrosystème Ouémé résulte de deux facteurs : le gradient hydroclimatique amont-aval et l'hétérogénéité des régions du point de vue environnemental.

Les pentes (2 à 3 m/km²) et altitudes élevées observées dans le bassin sont déterminantes dans la distribution des ressources en eau et la répartition des formations écologiques. Ainsi, les savanes saxicoles sont rencontrées dans la partie amont du bassin et précisément autour de Bétérou (figure 5). Par contre, les plantations de palmier à huile et les prairies à *Raphia* sont enregistrées dans la basse vallée au tour de Bonou (figure 5), du fait de leur besoin conséquent en eau. La détermination des hydroécotopes du bassin (figure 6) illustre mieux la répartition des formations végétales en fonction des paramètres biophysiques et physico-chimiques.

Ainsi, les galeries forestières sont plus denses dans la partie aval du bassin où l'humidité du sol règne en quasi-permanente. En amont du bassin, c'est la forêt claire, les savanes arbustives et saxicoles qui sont les plus dominantes. Les formations denses sont plus concentrées dans le bassin sédimentaire que sur le socle cristallin qui occupe les trois quarts (3/4) du bassin. Il est à noter deux grands hydroécotopes : le socle cristallin (HER1) et le bassin sédimentaire (HER2). Le HER1 est subdivisé en plusieurs sous espace homogène en fonction de la diversité biologique. Ainsi, on dénombre les hydroécotopes des forêts claires, semi-décidues et décidues, des savanes arborées et saxicoles. Par contre dans le HER2, les sous espaces homogènes sont celles des forêts marécageuses de *Raphiagigantea*, de galeries forestières, de plantations de palmier à huile, de teck, les mosaïques de culture et jachères à dominance d'espèces forestières, les savanes arborées.

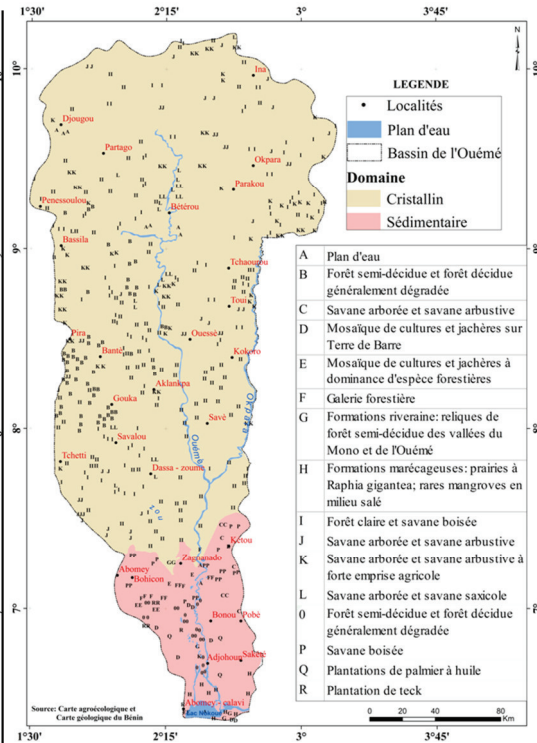
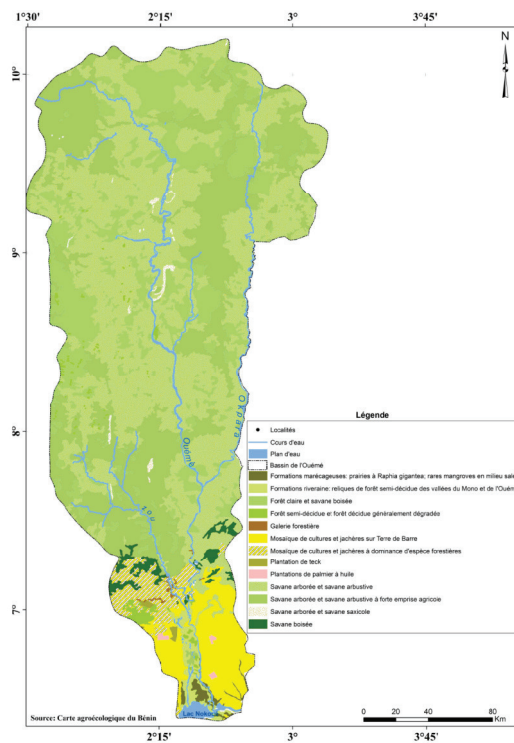


Figure 5. Ecologie de l'hydroystème Ouémé Figure 6. Structuration des hydro-écorégions du bassin du fleuve Ouémé

Conclusion

Il ressort de cette étude une variabilité pluviométrique plus marquée en amont qu'en aval avec une période humide plus longue au sud du bassin. Cette disponibilité quasi-permanente d'eau dans la basse vallée du fleuve Ouémé détermine la vie écologique de l'écosystème. Ainsi, l'inégalerépartition des précipitations dans le bassin conditionne la dynamique hydro-écologique et donc la répartition des espèces végétales et animales, terrestres et aquatiques.

La confrontation des cartes agroécologique et géologique de l'hydroystème a permis de structurer le bassin de l'Ouémé en deux grandes hydroécorégions : celle du socle cristallin (HER1) caractérisée par un régime unimodal et celle du bassin sédimentaire (HER2) caractérisé par un régime bimodal. Chaque hydroécorégion est subdivisée en plusieurs sous espace homogène du point de vue écologique. Ainsi, les espèces de savanes sont plus dominantes dans le HER1 alors que les forêts denses, les plantations de teck et de palmier à huile gouvernent le HER2. L'abondance d'eau dans le HER2 justifie la dominance des espèces de mangrove, de prairie, de fourré contrairement à HER1 gouvernée par la forêt claire et savanes boisées et saxicoles.

Dans le bassin de l'Ouémé, la restauration de l'équilibre morphodynamique par la régénération de la couverture végétale est un impératif pour éviter la généralisation de l'érosion et la perte de la biodiversité sur l'ensemble du bassin- versant.

Bibliographie

- Ahouansou M., 2008 : *Modélisation du fonctionnement hydrologique dans le bassin versant de l'Ouémé à Savè : contribution à la Gestion Intégrée des Ressources en Eau*. Dissertation, Université de Abomey-Calavi, 135 p.
- Akogongbé S. J.A., 2014 : *Influence de la variabilité climatique et des activités anthropiques sur les eaux de surface dans le bassin de l'Ouémé à Bétérou au Bénin*. Thèse de Doctorat Unique, Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 258 p.

- Amoussou E., 2010 : *Variabilité pluviométrique et dynamique hydro-sédimentaire du bassin versant du complexe fluvial lagunaire Mono-Ahémé-Couffo (Afrique de l'Ouest)*. Thèse de Doctorat Unique, Université de Bourgogne, France, 313 p.
- Chandesris A., Wasson J.G. et Pella H., 2005. *Hydro-écorégions de la Martinique : Propositions de régionalisation des écosystèmes aquatiques en vue de l'application de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau*. CEMAGREF, 19 p.
- Heegaard E., Lotter A. F. & Birks H.J.B., 2006 : Aquatic biota and the detection of climate change : are there consistent aquatic ecotones ? *Journal of Paleolimnology*, 35, 507-18.
- Hufty A., 1976 : *Introduction à la climatologie*. P.U.F. Collection Magellan, Paris. 264 p.
- Kamagaté B., 2006 : *Fonctionnement hydrologique et origine des écoulements sur un bassin versant tropical de socle au Bénin : bassin versant de la Donga (Haute vallée de l'Ouémé)*. Thèse de Doctorat de l'Université de Montpellier II, Montpellier (France), 320 p.
- Kodja D. J., 2013 : *Etudes des risques hydroclimatiques dans la vallée de l'Ouémé à Bonou*. Mémoire pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies (DEA), Université d'Abomey-Calavi, Bénin, 108 p.
- Lachenbruch P. A., Mickey P., 1968 : On Expected Probabilities of Misclassification in Discriminant Analysis, Necessary Sample Size, and a Relation with the Multiple Correlation Coefficient, *Biometrics* Vol. 24, No. 4 (Dec., 1968), 823-834
- Le Barbé L., Alé G., Millet B., Texier H., Borel Y. et Gualde R., 1993 : *Les ressources en eaux superficielles de la République du Bénin*. Edition ORSTOM; 540 p.
- Le Lay M., 2006 : *Modélisation hydrologique dans un contexte de variabilité hydro-climatique. Une approche comparative pour l'étude du cycle hydrologique à méso-échelle au Bénin*. Thèse de l'INPG, Grenoble, 251 p.
- Mama D., 2010 : *Méthodologie et résultats du diagnostic de l'eutrophisation du lac Nokoué (Bénin)*. Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges, France, 157 p.
- Philippon N., 2002 : *Une nouvelle approche pour la prévision statistique des précipitations saisonnières en Afrique de l'Ouest et de l'Est : méthodes, diagnostics (1968-1998) et applications (2000-2001)*. Thèse de Doctorat Université de Bourgogne, CRC – CNRS UMR5080, 241 p + Annexes.
- Roche P., 1998 : *Dynamique de la biodiversité et action de l'homme*. Rapport ENV-SRAE-94233, Paris, France, 6 p.
- Séguis L., Thierry L., Peugeot C., Bock O., Boone A., Cappelaere B., Gosset M., Meynadier R., et Redelsperger J.L., 2011 : Le cycle de l'eau dans le système de mousson d'Afrique de l'Ouest. *La Météorologie*, Spécial AMMA, 55-63.
- Sinsin B., Eyog Matig O., Assogbadjo A.E., Gaoué O. G. & Sinadouwirou T., 2004 : Dendrometric characteristics as indicators of pressure of *Azelia africana* Sm. Trees dynamics in different climatic zones of Benin. In "*Biodiversity and conservation*", **13**, 1555-1570.
- Totin V.S.H., Amoussou E. et Boko M., 2007 : Dynamique de la mousson ouest africaine, régime hydrologique et maîtrise de l'eau dans le Bassin Supérieur de l'Ouémé. *Climat et développement*, **Vol. 4**, 44-54.
- Wasson J.G., Chandesris A., Pella H. et Blanc L., 2002 : *Définition des hydro-écorégions françaises métropolitaines*. Rapport final MEDD, juin 2002, 190 p.
- Wasson J.G., Chandesris A., Pella H., 2004 : *Hydro-écorégion de la Guadeloupe – Propositions de régionalisation des écosystèmes aquatiques*. Rapport MEDD, mai 2004, 17 p.

Thème : Topoclimatologie et Agroclimatologie

IDENTIFICATION DES DATES DE DEBUT DE SAISON DE PLUIE POUR UNE UTILISATION AGROMETEOROLOGIQUE, CAS DES HAUTS PLATEAUX ALGERIENS.

L. BENAICHATA¹, K. MEDERBAL², M. HOUARI³

¹Université Ibn Khaldoun, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Laboratoire de Géomatique et Développement Durable, Tiaret, Algérie [llbb55@yahoo.com]

²Université Ibn Khaldoun, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Laboratoire de Géomatique et Développement Durable, Tiaret, Algérie [kmederbal@yahoo.fr]

³Office National de la Météorologie, Direction régionale Ouest, Algérie [mahmoud_houari@yahoo.fr].

Résumé : *Les perturbations incontrôlables des rendements des cultures céréalières du sud de la méditerranée sont imputées principalement à la méconnaissance des dates de démarrage de la saison agricole. Sachant que les dates de semis dépendent étroitement des dates de début de saison des pluies, une méthode est proposée pour définir des dates de début de saison des pluies en se basant sur les données pluviométriques journalières d'une station météorologique des hauts plateaux algériens. Cette méthode, d'une valeur climatique et agroclimatique, repose sur une analyse fréquentielle des précipitations, des dates de première occurrence. La variabilité des indices de début de saison de pluie sont très significatives. On note une relative stabilité de la durée de la saison sur le long terme et un retard significatif des dates de démarrage de la saison des pluies. Des perspectives de prévisions de rendements de céréales sont ouvertes, suite aux fortes liaisons constatées entre les dates de début de saison de pluie et les températures de l'océan pacifique équatorial, en l'occurrence le phénomène El-Nino.*

Mots clés : *Agrometeorologie, Elniño, Onset, Pluviométrie, Rendement.*

Title : *Identification of rainfall onset for agrometeorological use, case of Algerian high lands*

Abstract : *Uncontrolled disturbances in the cereal yields in the south of the Mediterranean sea are attributed mainly to the lack of knowledge of the start dates of the agricultural season. The sowing dates are closely related to the start dates of the rainy season, a method is proposed to define rainy season onset based on daily rainfall data from a weather station in the Algerian highlands. This method is based on a climatic and agroclimatic point of view, using a frequency analysis of precipitation, dates of their first occurrence. The variability of the onset indices is very significant. There is a relative stability of the rainy season length over the long term and a significant delay in the onset dates is observed. Prospects for cereal yield forecasts are due to strong linkages between the rainy season starting dates and the equatorial Pacific Ocean temperatures, in this case of El Nino phenomenon.*

Keywords : *Agrometeorology, Elniño, Onset, rainfall, yield.*

Introduction

La connaissance des dates de début et de fin de saison de pluie a toujours été une question cruciale. C'est le cas dans des pays dépendant de l'agriculture pluviale, particulièrement l'Afrique subsaharienne et une partie de l'Afrique tropicale. Les itinéraires techniques de l'agriculture Sud méditerranéenne étaient bien maîtrisés ; jusqu'aux dernières fluctuations et tendances climatiques constatées (Benaichata L. et al., 2016). Des travaux en cours sur le changement climatique analysant seulement les données journalières des précipitations des 30 dernières années, ont révélé que la saison pluvieuse est décalée vers des dates ultérieures en comparant les périodes avant et après les années 2000.

Depuis quelques années, la pratique des cultures pluviales, présente une décadence des rendements. Ces derniers semblent bien corrélés avec la pluviométrie; d'où l'intérêt à porter à la connaissance des dates de début de saison de pluie. Les méthodes de détermination de ces dates peuvent être considérées, soit du point agronomique, hydrologique ou atmosphérique en considérant l'installation des centres d'action et l'arrivée des types de perturbations.

Stern *et al.* (1981) et Stern (1982) ont défini le début de la saison des pluies comme étant la première occurrence de 20 mm de pluie en 2 jours consécutifs pour les régions subsahariennes. Cependant, en régions méditerranéennes et surtout dans les régions à climat aride et semi-aride, les pluies durent généralement moins de 5 jours avec de faibles intensités. Les critères des régions subsahariennes ne sont pas valables pour nos régions. La présente étude s'intéresse beaucoup plus à l'installation de la saison de pluie au profit de la céréaliculture. Les critères de début de saison de pluie se basent dans ce cas sur l'analyse d'une enquête faite auprès des agriculteurs de la région des hauts plateaux de l'Ouest Algérien. Plusieurs travaux sont réalisés dans ce sens pour les régions subsahariennes (Benoit, 1977 ; Cook et Heerdegen, 2001), mais peu de travaux ont été réalisés pour les régions méditerranéennes à l'exception d'une synthèse faite par Aviad *al.*, (2004). Fitzpatrick *et al.*, (2015) résume les différentes définitions utilisées pour l'Afrique de l'Ouest.

Les agriculteurs des régions méditerranéennes ne se souciaient pas des débuts de saison de pluie pour le choix des dates de semis. Par contre après les années 2000, ils ont constatés que les dates de semis pratiquées étaient obsolètes. La détermination du début de la saison de pluie s'est basée sur (I) l'occurrence et le cumul des précipitations en trois jours après le 1^{er} Septembre, (II) le nombre de jours sans pluies entre ces trois premiers jours de pluie et (III) le jour où le cumul de précipitations a atteint 20 mm. L'exemple pris ici est la station météorologique de Tiaret (Latitude : 35,34 ; Longitude : 1,46). L'objet de ce travail est la présentation d'une définition du début de saison de pluie et de montrer sa variabilité interannuelle en fonction des années Niño.

1. Données et Méthodologie

La saison pluvieuse de notre région d'étude, s'étale de Septembre à Juin où les régimes pluviométriques diffèrent selon les saisons. En été, la pluviométrie est d'origine orageuse localisée et en hiver, la pluviométrie est issue de perturbations organisées.

Les données journalières de 30 ans (1986-2015) sont téléchargées du site de la NOAA (www.ncdc.noaa.gov/cdo/CDO). Bien que ces données présentent des lacunes, elles sont nécessaires pour la recherche. Les données des services météorologiques sont disponibles à des prix exorbitants pour les chercheurs. Pour la détermination du début de saison de pluie, nous avons jugé utile de n'utiliser que les mois allant de Septembre à Décembre. Nous considérons que la saison de pluie est installée que si la pluie journalière a dépassé un certain seuil pluviométrique (0,1 ; 10 et 20 mm), que le nombre de jours sans pluie entre les trois premiers jours de pluie de la saison ne dépasse 15 jours et que le cumul pluviométrique a dépassé 20 mm. Ces critères ont été choisis suite à l'analyse d'une enquête faite auprès des agriculteurs et de l'Institut Technique des Grandes Cultures (ITGC) de Tiaret.

2. Détermination du début de la saison de pluie

Les quantités de précipitations journalières sont dressées dans un tableau dont le modèle est illustré dans le Tableau 1. Les étoiles représentent les journées sans pluie tant que les valeurs représentent la quantité de pluie en millimètre. Le Tableau 1, est un exemple de jeux de données de précipitations journalières de l'année (2015). Nous constatons que le premier jour de pluie mesurable ($\geq 0,1$ mm), correspond au 3 Septembre, le premier jour dépassant 10 mm coïncide avec le premier jour de pluie, le premier jour de pluie dépassant 20 mm correspond au 09 Octobre et le cumul pluviométrique dépassant 20 mm coïncide avec le 08 Octobre. Entre le premier jour et le second jour de pluie il y a plus de 20 jours d'intervalle sans pluie. Nous considérons alors que le

premier jour de pluie ne correspond pas au début de saison de pluie et ne rentre pas dans le calcul du cumul dont le seuil est 20mm (correspondant dans ce cas au début de la saison de pluie). Dans notre exemple la saison de pluie a débuté le 08 ou le 09 Octobre Figure 1 (a et b).

Tableau 6. Précipitations journalières de l'année 2015 pour la station de Tiaret (Source des données : NOAA)

DAYS	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
1	*	14.9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*	1.02	*	*	*	*	7.11	*
3	*	0.25	*	*	*	*	*	*	11.94	*	1.02	*
4	*	3.05	*	*	*	7.11	*	*	*	*	*	*
5	*	5.08	*	*	*	5.08	*	*	*	*	*	*
6	*	4.06	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
7	*	1.02	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
8	*	4.06	*	*	*	*	*	*	*	14.99	*	*
9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	26.92	*	*
10	*	*	*	*	*	1.02	*	*	*	1.02	*	*
11	*	*	*	*	*	*	*	2.03	*	*	*	*
12	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
13	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
14	*	2.03	*	*	*	1.02	*	*	*	6.10	*	*
15	*	0.25	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
16	*	7.87	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
17	0.51	2.03	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
18	1.02	3.05	*	*	*	*	*	*	*	3.05	*	*
19	2.03	0.22	*	*	*	0.25	*	*	*	*	*	*
20	7.87	*	*	0.51	*	*	*	*	*	*	*	*
21	2.03	7.87	*	*	*	*	*	*	*	2.03	*	*
22	9.91	9.91	2.03	*	*	*	*	7.11	*	13.97	8.89	*
23	2.03	2.03	*	*	*	*	*	*	*	*	0.51	*
24	*	*	*	*	2.03	*	*	*	*	*	*	*
25	*	2.03	2.03	*	7.11	*	*	*	*	3.05	2.03	*
26	*	2.03	5.08	*	5.08	*	*	0.51	*	0.51	*	*
27	*	3.05	2.03	*	*	*	*	*	*	7.87	*	*
28	*	6.10	*	*	*	*	*	*	*	*	2.03	*
29	*	*	*	*	0.76	*	*	*	*	*	*	*
30	*	*	*	*	0.76	*	*	*	6.10	*	*	*
31	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

3. Variabilité des dates de début de la saison de pluie

L'analyse des courbes (Figure 2) des dates d'occurrences du premier et du second jour de pluie mesurable par un pluviomètre ($\geq 0,1\text{mm}$) montre qu'il y a une grande variabilité de ces dates. Nous constatons aussi qu'il y a une tendance positive des dates. Cette tendance s'explique par le fait que les débuts des saisons de pluie sont de plus en plus tardifs durant ces dernières années et confirmant ainsi les travaux de Ati et *al.*, (2002).

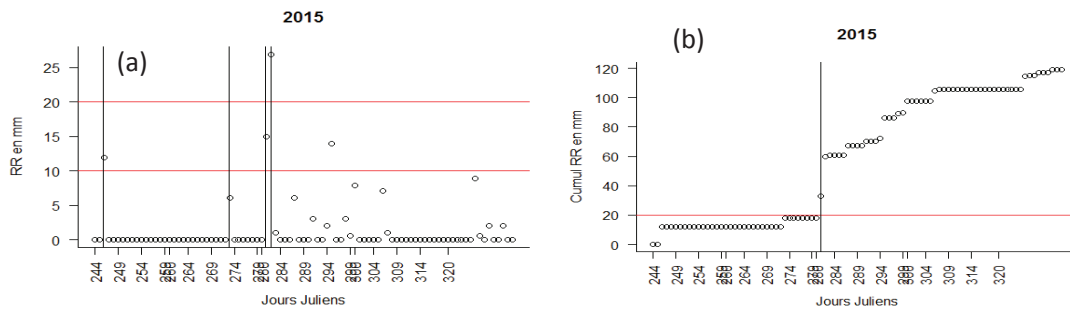


Figure 9. Illustration des seuils pluviométriques 10 et 20 mm (traits horizontaux rouges) (a) et du seuil de 20 mm cumulés (b) les traits verticaux noirs correspondent aux jours juliens qui coïncident avec les seuils pour la station de Tiaret.

D'après la figure 1b, le cumul de 20 mm coïncide avec le 08 Octobre (date qui correspond au début de saison de pluie).

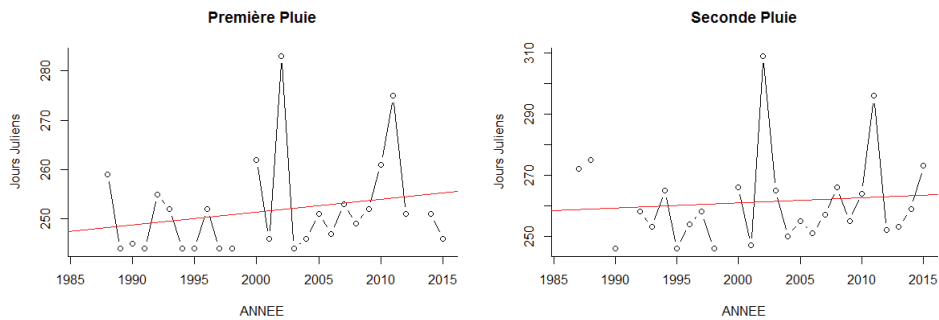


Figure 10. Dates d'occurrences des 2 premiers jours de pluies

L'interprétation des courbes de la Figure 3 montre une variabilité interannuelle des indices et une tendance positive. La figure 3 a expliqué le décalage temporel pour atteindre un cumul de 20mm de pluie à la station de Tiaret. Tandis que la figure 3b montre l'augmentation du nombre de fausses alertes de début de saison de pluie de chaque année. Cette grande variabilité est signalée par Reiser et Kutiel (2007).

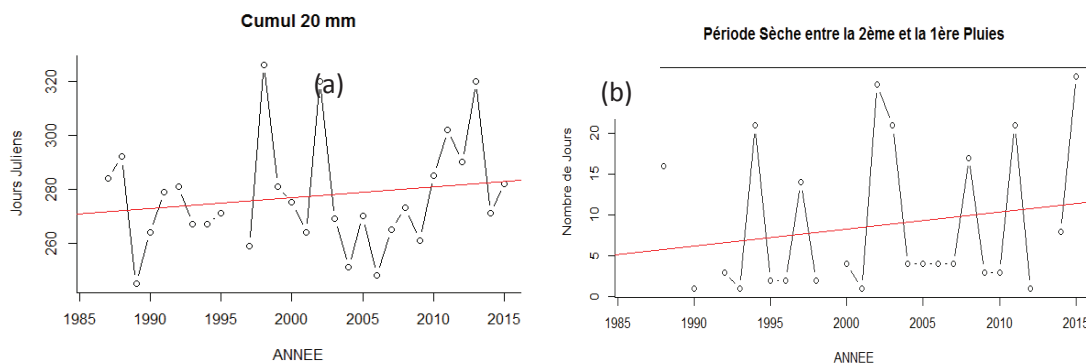


Figure 11. Variation des dates d'occurrence des premiers cumuls de pluie atteignant 20mm (a) et des séquences sèches séparant les 2 premières dates de pluies de la saison (b).

4. Relation entre le début de la saison de pluie et El Niño/La Niña

Pour rechercher une relation entre le début de saison de pluie et le phénomène El-Niño, la régression logistique (glm) est utilisée. Pour rappel, La régression logistique est largement répandue dans de nombreux domaines (Adams, K.A. et Lawrence, E.K., 2014), particulièrement en médecine. D'autres approches sont faites pour la recherche de cette relation (Joseph P.V., 1994). Cette analyse a pour objectif d'expliquer et de prédire les valeurs d'une variable qualitative Y, le plus souvent binaire (Démarrage de la saison de pluie ou non pour notre cas), à partir d'une variable explicative X (Modalités de l'indice Niño Océanique (ONI)), Cornillon et *al.*, (2012). Les données de l'indice ONI sont disponibles dans le site : <http://ggweather.com/enso/oni.htm>. Etant donné que l'indice ONI est considéré ici comme variable qualitative ayant 7 modalités (Tableau 2), nous avons procédé à une régression logistique (glm). Les résultats pour les deux variables : (I) Première occurrence de pluie égale à 10 mm et (II) celles avec une quantité de pluie égale à 20 mm. D'autres méthodes sont utilisées dans la recherche de télé-connexions entre El Niño et les précipitations (Camberlin et *al.*, 2001).

Tableau 7. Modalités et signification de la variable ONI les modalités en rouge correspondent à El-Niño et en bleu à La-Niña.

Modalités	Signification
WE	Weak El Niño
ME	Moderate El Niño
SE	Strong El Niño
VSE	VeryStrong El Niño
WL	Weak La Niña,
ML	Moderate La Niña,
SL	Strong La Niña

La régression logistique pour les dates du Premier jour de pluie atteignant 10mm comme variable à expliquer et l'indice ONI du phénomène El-niño comme variable explicative est réalisée avec le logiciel R. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau 3.

Tableau 8. Analyse de l'effet du phénomène El-Niño sur les dates des premières pluies atteignant 10mm par la régression logistique

	Estimate	Std. Error	T	value Pr (> t)
Intercept	300.5	14.3	20.99	7.6e-07 ***
ML	-31.2	18.5	-1.69	0.143
SL	-8.5	24.8	-0.34	0.743
VSE	-48.5	20.2	-2.40	0.054 .
WE	-47.5	18.5	-2.57	0.042 *
WL	-1.5	24.8	-0.06	0.954

D'après le tableau 3, les premières pluies de la saison sont négativement affectées par EL- niño (WE) au seuil de signification de 5%. Les années où ce phénomène s'installe auront des précipitations atteignant les 10 mm/j précoces.

Tableau 12. Analyse de l'effet du phénomène El-Niño sur les dates des premières pluies atteignant 20mm par la régression logistique

	Estimate	Std. Error	T	value Pr(> t)
(Intercept)	271.0	14.2	19.14	0.0027 **
ML	17.0	20.0	0.85	0.4853
SL	59.0	20.0	2.95	0.0985 .
VSE	0.5	17.3	0.03	0.9796
WE	-14.5	17.3	-0.84	0.4911
WL	61.0	20.0	3.05	0.0930 .

Pour les premières pluies atteignant les 20 mm, l'analyse montrent que ce type de pluie est affecté positivement (Tableau 4) par La-Niña. Ceci s'explique par le fait que les premières fortes pluies journalières atteignant 20mm, sont tardives lors des années La-Niña.

Conclusion

Plusieurs stations météorologiques de L'Ouest de l'Algérie en général à climat semi-aride ont été étudiées de la même manière que notre exemple. Toutes les stations de notre zone d'étude ont montré cette grande variabilité des occurrences des premiers jours de pluie et des occurrences des seconds jours de pluie. Cette variabilité est associée à une tendance positive montrant bien que le climat du Sud de la méditerranée continue à accentuer son aridité, que l'arrivée tardive de la saison de pluie est bien marquée. Le phénomène El-Niño par ces deux phases positives et négatives semble affecter nos débuts de saison de pluie. Si La-Niña s'installe, elle retarde les premières fortes pluies journalières atteignant 20 mm/j ; si El-Niño s'installe, il avance les premières journées de pluies atteignant 10 mm. Ces résultats permettront de faire des prévisions probabilistes du début des saisons de pluies, de leur cessation ainsi que leurs longueurs pour ensuite les interpréter en termes de prévision de rendements de certaines cultures pluviales. Des perspectives de prévision agrométéorologiques sont ouvertes si ce travail est généralisé. Signalons que la bibliographie est très riche pour les définitions des onsets et cessations de pluie mais l'utilisation de la régression logistique n'est pas très répandue.

Bibliographie

- Adams, K.A., Lawrence E.K. 2014 : Resarch Methods, Statistics, and Applications, Sage Publi., Calif.
- Ati O.F., Stigter C.J., Oladipo EO., 2002 : A comparison of methods to determine the onset of the growing season in Northern Nigeria. *International Journal of Climatology*, **22**, 731-742.
- Aviad Y., Kutiel H., Lavee H., 2004 : Analysis of beginning, end, and length of the rainy season along a Mediterranean-arid climate transect for geomorphic purposes. *Journal of Arid Environments*, **59**, 189-204.
- Benaichata L., Mederbal K. and Chouieb M. 2015 : Climate Change Detection with Extreme Weather Factors Concerning Algeria. *ESJ*, **11**, 220-232.
- Benoit, P., 1977 : The start of the growing season in northern Nigeria. *Agric. Meteorol.* **18**, 91-99.
- Camberlin P., Janicot S., Pocard I., 2001 : Seasonality and atmospheric dynamics of the teleconnection between African rainfall and tropical sea-surface temperature : Atlantic vs. ENSO. *Int. J. Climatol.*, **21**(8), 973-1005.
- Cook G.D., Heerdegen R.G., 2001 : Spatial variation in the duration of the rainy season in monsoonal Australia. *Int. J. Climatol.*, **21**, 1723-1732.
- Cornillon P.A., Guyader A., Husson F., Jélou N., Josse J., Kloareg M., Matzner-Lober E., Rouvière L., 2012 : *Statistiques avec R*. Presse Universitaire de Reines.
- Fitzpatrick R.G., Bain C.L., Knippertz P., Marsham J.H., and Parker, D.J., 2015 : The West African monsoononset : A concise comparison of definitions. *J. Clim.*, **28**(22), 8673-8694.
- Joseph P.V., Eischeid J.K., Pyle R.J., 1994 : International variability of the onset of the Indian Summer monsoon and its association with atmospheric features, El Nino, and sea surface temperatures. *J. Clim.*, **7**, 81-105.
- Reiser H., Kutiel H., 2007 : The rainfall regime and its uncertainty in Valencia and Larnaca. *Advances Geosciences, European Geosciences Union*, 101-106.
- Stern, R.D., 1982 : Computing a Probability Distribution for the Start of the Rains from a Markov Chain Model for Precipitation. *J. Appl. Meteor.*, **21**, 420-423.

IMPACTS SUR LE CLIMAT RÉGIONAL INDUITS PAR L'IMMERSION D'UNE ZONE ARIDE : CAS DE CHOTT JÉRID (SUD DE LA TUNISIE)

FATHALLI B.¹, CASTEL T.², POHL B.², SAFI M J.¹

¹ École Nationale d'Ingénieurs de Tunis, Université de Tunis El Manar – Tunisie. bilelfathalli@yahoo.fr

² Centre de Recherches de Climatologie, UMR 6282 Biogéosciences, CNRS / Université de Bourgogne Franche-Comté - France

Résumé : Ce travail a pour objectif de montrer les impacts éventuels sur le climat régional que pourrait induire l'immersion partielle de Chott Jérid situé au sud de la Tunisie. Des simulations ont été ainsi réalisées avec le modèle climatique régional Weather Research and Forecasting (WRF) dans le but de comparer le climat actuel du chott simulé sur la période 1991-2011 en conditions réelles de l'occupation du sol au climat simulé sur la même période mais en la présence fictive d'une vaste étendue d'eau artificielle (ou lac). Les résultats des comparaisons ont permis de constater que le lac aurait particulièrement une action modératrice sur les températures moyennes de l'air. Le flux de chaleur sensible augmenterait pendant l'hiver et diminuerait pendant l'été alors que les flux de chaleur latente et d'humidité augmenteraient durant tout le cycle annuel mais particulièrement en hiver (notamment en janvier). À l'échelle du domaine, les pluies annuelles moyennes augmenteraient de 14 % environ. Les cumuls saisonniers moyens augmenteraient en hiver d'environ 36% alors qu'ils diminueraient de -17 % en été. Les effets du lac semblent plus liés à des phénomènes locaux, notamment le niveau de stabilité convective de l'air au-dessus du lac, qu'à des processus de large échelle.

Mots-clés : lac artificiel, impacts climatiques régionaux, Chott Jérid, WRF.

Abstract : This work aims to show the possible impacts on the regional climate that could be caused by the partial immersion of Chott Jérid located in the south of Tunisia. Climate simulations have been carried out using the Weather Research and Forecasting (WRF) model to compare the present climate of the Chott area simulated over the period 1991-2011 under real conditions of land use to the climate simulated in the fictional presence of a vast artificial waterbody (or lake). Comparisons showed that the lake would have a particularly moderating effect on average air temperatures. The sensible heat flux would increase substantially during the winter and decrease during the summer, while latent heat and moisture fluxes would increase throughout the annual cycle, but particularly in winter (especially in January). At the whole domain scale, average annual rainfall would increase by about 14%. Average seasonal rainfall would increase by about 36% in winter, whereas it would decrease by -17% in the presence of the lake in summer. The effects of the lake seem to be linked to local physical phenomena, in particular the level of convective stability of the air above the lake.

Keywords : artificial lake, regional climate, Chott Jérid, WRF.

Introduction

Les surfaces continentales, bien que ne représentant que 30% de la surface terrestre, jouent un rôle majeur dans la variabilité du système climatique. En effet, ces surfaces modulent le cycle de l'eau sur terre (Douville, 2008) grâce aux échanges d'eau, d'énergie et de quantité de mouvement avec les autres composantes du système climatique (en particulier l'atmosphère). Ces échanges dépendent surtout des caractéristiques locales (e.g. occupation du sol et types de paysages : lacs, forêts, déserts, etc.) et physiques (e.g. rugosité, pentes, relief, composition des couches du sol, albédo, humidité du sol, etc.) de la surface continentale (Douville, 2008). Toute perturbation ou modification d'origine naturelle ou anthropique des propriétés des surfaces continentales est ainsi susceptible de modifier l'intensité de ces échanges. Les répercussions sur les bilans d'énergie et hydrique, et sur climat en général, sont ainsi évidentes. Plusieurs études basées sur des simulations climatiques régionales ou globales (e.g. Costa *et al.* 2010, Salih *et al.* 2013, Thierry *et al.*, 2015) ont en effet prouvé que les changements des états de la surface pouvaient influencer le climat de la terre à de multiples échelles de temps. Cette étude cherche alors, en ayant recours à des simulations climatiques régionales, à montrer les impacts probables de l'inondation éventuelle d'une vaste surface terrestre aride située au sud de la Tunisie (Chott El Jérid) sur le climat de la région.

1. Mode opératoire

Les simulations climatiques (Fathalli *et al.* 2016) ont été réalisées avec le modèle régional non hydrostatique ARW/WRF (versions 3.3 et 3.4) et consistent en deux ensembles de 10 membres s'étendant chacun sur la période 1991-2011. La première année (1991) est considérée comme la mise à l'équilibre ou « *spin-up* » du modèle et n'est donc pas analysée. Les conditions initiales et aux limites latérales (données dynamiques) du premier domaine sont fournies par les réanalyses européennes ERA-Interim alors que les données géographiques de surface (données statiques) pour les trois domaines de simulation (figure 1) sont fournies par le système d'observation « MODIS ». Le premier ensemble (ou ensemble de contrôle) a été réalisé en conditions actuelles du terrain. Tous les membres de cet ensemble partagent la même approche expérimentale (mêmes données de forçages dynamique et statique) exceptées les conditions initiales atmosphériques qui ont été modifiées en décalant de 6h la date d'initialisation du modèle. La même démarche a été reproduite pour les simulations en présence d'un plan d'eau artificiel (ensemble « *perturbé* »).

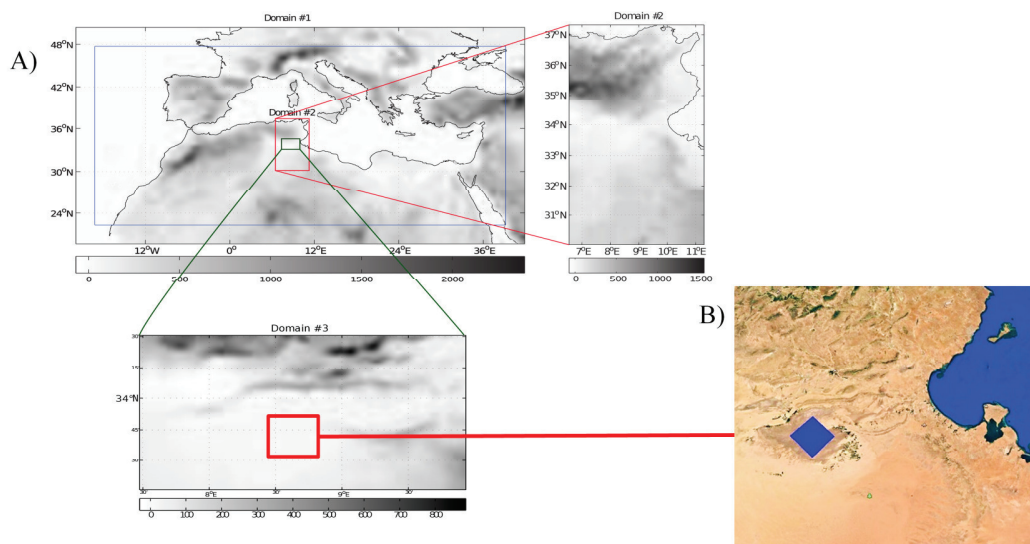


Figure 1. A. Les domaines de simulation, B : Emplacement du plan d'eau artificiel au niveau du Chott

Ces simulations « *perturbées* » ont été réalisées après modification de certaines propriétés de la surface continentale actuelle au niveau de Chott Jérid permettant de créer virtuellement (ou numériquement) ce plan d'eau artificiel (ou lac). Ces modifications ont concerné les données de surface suivantes (interpolées par le modèle WRF aux mailles de simulation) :

- Fraction d'occupation du sol « *Land Use Fraction* » ;
- Indice d'occupation dominante du sol « *Land Use Index* » ;
- Masque de terrain « *Land Mask* » : terre ou eau ;
- Altitudes du terrain ;
- Pentés du terrain.

Le lac a été représenté par un polygone (figure 1). A l'intérieur de ce dernier, le masque de terrain a été ramené à la valeur 0 (surface en eau) et l'indice d'occupation dominante du sol à la valeur 21 ce qui correspond à la catégorie « Lakes » dans MODIS. Les pentes du terrain ont été ramenées à la valeur zéro et les altitudes à leur valeur minimale.

2. Résultats

Les effets du lac sur le climat régional du Chott (troisième domaine de simulation) sont analysés aux pas de temps annuel et saisonnier et sont basés sur les différences observées entre les deux ensembles de simulations (ensemble de contrôle et ensemble perturbé).

2.1. Effets sur les températures moyennes de l'air en surface

Les différences de températures de l'air en surface calculées sur 20 ans (1992-2011) avec et sans le lac sont représentées en figure 2. A l'échelle de tout le domaine, le lac rafraîchirait légèrement les températures annuelles moyennes de l'air (environ $-0,1^{\circ}\text{C}$). Les températures moyennes hivernales augmenteraient d'environ $0,42^{\circ}\text{C}$, avec un maximum d'environ 4°C au-dessus immédiat du lac, alors que les températures estivales diminueraient d'environ $-0,54^{\circ}\text{C}$ avec un maximum de -7°C à l'ouest du plan d'eau. Généralement, les températures auraient tendance à diminuer selon un gradient allant du lac vers l'ouest du chott.

Les cycles annuels moyens des températures de surface (moyennées sur 20 ans) avant et après la mise en place du lac sont représentés en figure 3. Les effets du lac les plus marqués concerneraient l'emplacement de cette étendue d'eau sans s'étendre au reste du domaine. Après immersion du chott, les températures moyennes de l'air au-dessus du lac augmenteraient d'environ 4°C en janvier. Elles diminueraient d'environ -7°C en juillet et août.

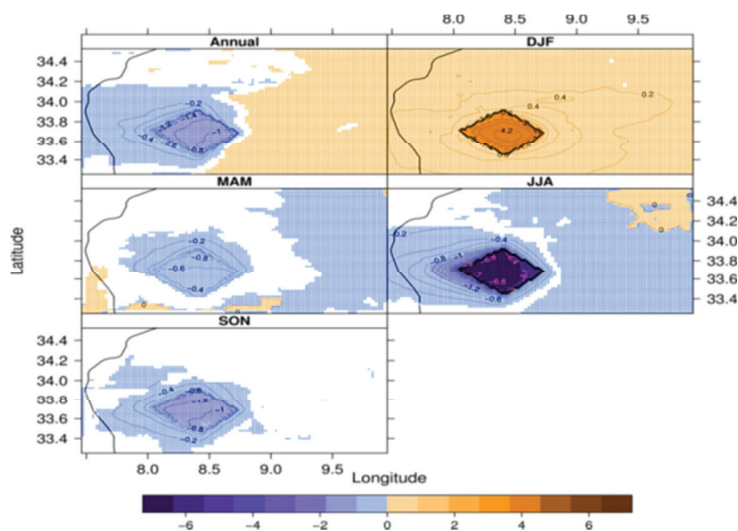


Figure 2. Cartes des différences des moyennes annuelles et saisonnières des températures de l'air à 2m de la surface en chaque point de grille du domaine

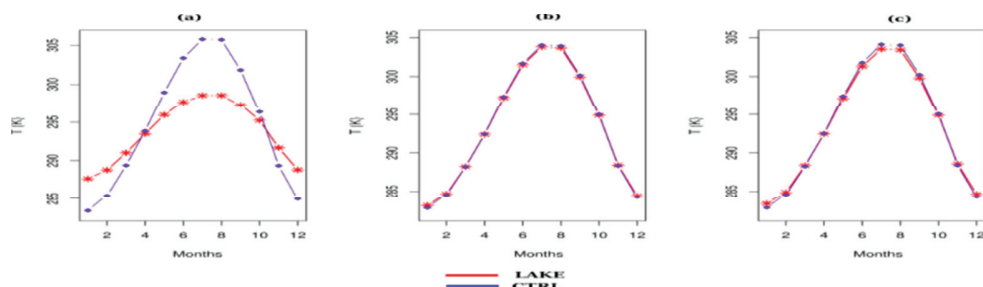


Figure 3. Cycles annuels moyens (1992-2011) des températures de l'air à 2 m de la surface au niveau des points de grille du lac (a), du reste du domaine (b) et de tous les points de grille du domaine (c).

2.2. Effets sur les flux de chaleur et d'humidité en surface

Les cycles annuels moyens des flux de chaleur sensible et latente sont respectivement tracés (figures 4 et 5). Une inversion du cycle annuel de la chaleur sensible, en présence du lac, pourrait être remarquée au niveau de l'emplacement exact de ce plan d'eau. Entre les deux séries d'expériences, le cycle annuel moyen du flux de chaleur sensible ne montre pratiquement pas de différences pour le reste du domaine.

En présence du plan d'eau artificiel, une augmentation substantielle des valeurs du flux de chaleur latente pourrait être obtenue durant tout le cycle annuel. Cette augmentation serait marquée en hiver, ce tout particulièrement au niveau des points de grille correspondant au lac. Les flux de chaleur latente varient en effet entre $\sim 412 \text{ W/m}^2$ en janvier et $\sim 40 \text{ W/m}^2$ en août (par rapport à ~ 4 et $\sim 0.3 \text{ W/m}^2$ en conditions actuelles du terrain pendant les mêmes mois).

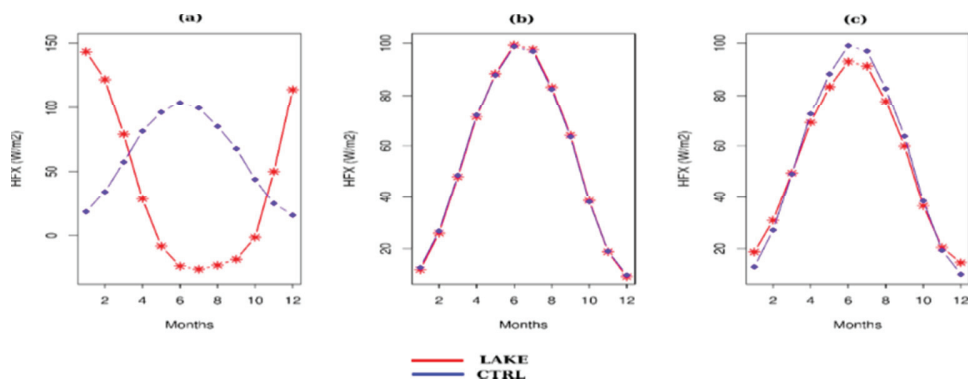


Figure 4. Cycles annuels moyens (1992-2011) des flux de chaleur sensible (W/m^2) en surface au niveau des points de grille du lac (a), du reste du domaine (b) et de tous les points de grille du domaine (c).

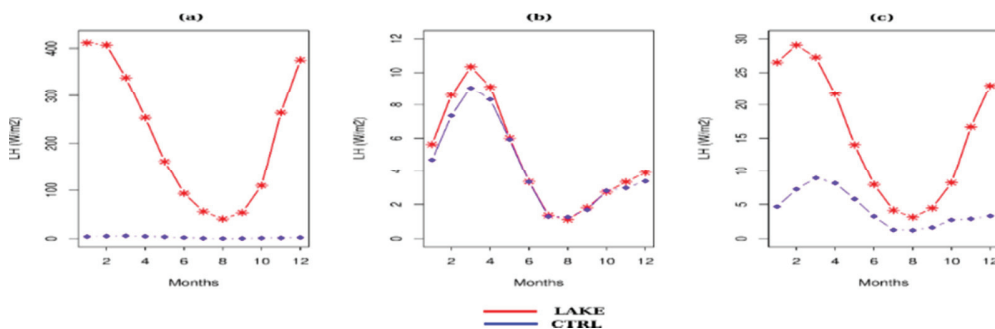


Figure 5. Cycles annuels moyens (1992-2011) des flux de chaleur latente (W/m^2) en surface au niveau des points de grille du lac (a), du reste du domaine (b) et de tous les points de grille du domaine (c).

Par ailleurs, les flux d'humidité ou de vapeur d'eau en surface (non représentés) seraient plus élevés en hiver en présence du lac ($0,9 \text{ mm/j}$ comme valeur moyenne de tout le domaine). Les augmentations maximales ($\simeq 16 \text{ mm/j}$) s'observeraient également au-dessus du plan d'eau artificiel.

2.3. Effets sur les quantités moyennes des pluies

Les différences moyennes des quantités de pluies sont représentées dans la figure 6. Ces différences sont statistiquement significatives en hiver au niveau de l'emplacement exact du lac où les pluies augmenteraient d'environ 100 mm (soit $\sim +400\%$).

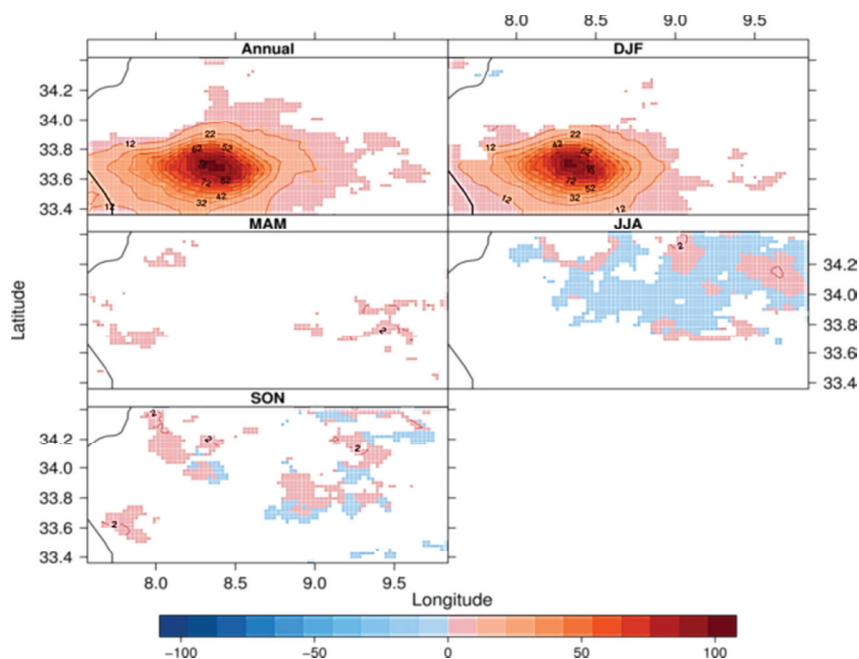


Figure 6. Cartes des différences moyennes et saisonnières des cumuls de pluies (mm)

A ses alentours la hausse des pluies serait plus limitée (+12 mm vers 80 km de part et d'autre du lac). En revanche, des réductions significatives de la pluviométrie, quoique faibles, s'observeraient à l'est du plan d'eau en été. Les cycles annuels moyens des pluies sont représentés en figure 7. En présence du lac, les pluies augmenteraient de manière remarquable en hiver. L'augmentation serait maximale (≈ 95 mm) en janvier, au niveau de l'emplacement de ce plan d'eau. Les quantités moyennes des pluies seraient, d'autre part, pratiquement inchangées pendant le reste du cycle annuel. Toutefois, les quantités moyennes des pluies, en présence du lac, auraient tendance à diminuer pendant l'été, particulièrement en août ($\approx -9\%$) et au début de l'automne (respectivement $\approx -2\%$ et -3% en septembre et octobre).

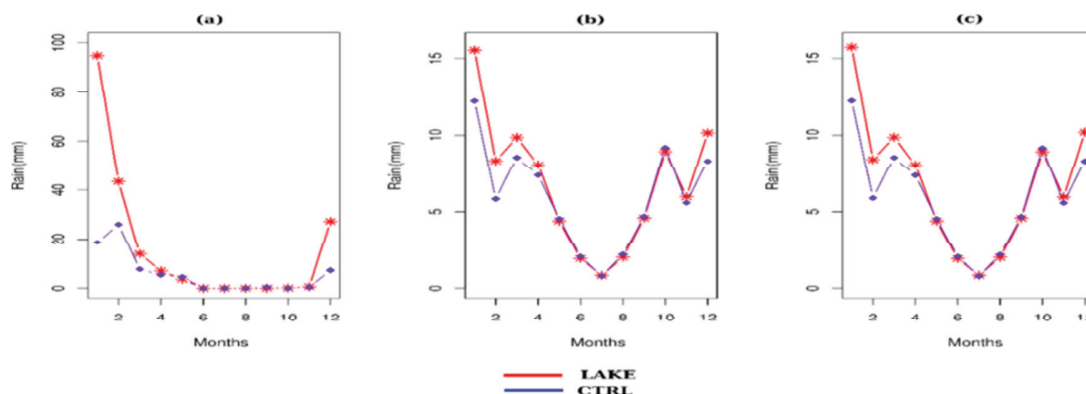


Figure 7. Cycles annuels moyens (1992-2011) des pluies au niveau des points de grille du lac (a), du reste du domaine (b) et de tous les points de grille du domaine (c).

Discussion et conclusion

Les lacs influencent les masses d'air sus-jacentes grâce aux différences de propriétés physiques entre ces plans d'eau et leur environnement (surfaces terrestres). Les lacs sont en effet caractérisés par leurs grandes capacités et inertie thermiques et sont considérés comme une

source permanente d'humidité et d'énergie statique humide pour l'atmosphère. Le contraste des températures eau - air induit en effet, en hiver, un flux positif de chaleur sensible équivalent à une libération de la chaleur sensible depuis le lac et vers l'atmosphère. Ceci aura comme conséquence de réchauffer les températures de l'air en surface. Cet effet est plus marqué pendant la nuit étant donné que le contraste des températures (eau - air) y est plus élevé. Le phénomène opposé pourrait être obtenu en été. Les flux de chaleur latente augmenteraient durant tout le cycle annuel. Les maxima seraient observés au niveau de l'emplacement du plan d'eau particulièrement en hiver. Ceci peut être expliqué par des taux d'évaporation plus élevés en hiver vu le contraste élevé de températures (températures du lac étant beaucoup plus supérieures à celles de l'air) et les faibles taux d'humidité de l'air sec, favorisant ainsi, en plus de l'action des vents, l'évaporation à partir du lac. Par ailleurs en présence du lac, les quantités moyennes des pluies augmenteraient nettement en hiver notamment sur le plan d'eau lui-même et diminueraient faiblement en été. Cette action sur les pluies pourrait être expliquée par les conditions de stabilité ou d'instabilité thermodynamique saisonnière que pourrait générer le lac. En effet, une instabilité convective pourrait être initiée en hiver quand les basses couches de l'atmosphère sont réchauffées et chargées en humidité suite à la libération d'énergie sensible et latente à partir du lac. L'air en surface devient ainsi suffisamment plus humide et plus chaud qu'en altitude et subit, par conséquent, une ascendance favorisant la formation de nuages et des pluies qui seraient particulièrement abondantes au-dessus du plan d'eau artificiel. En revanche, les températures de l'air seraient plus froides en surface et au-dessus du lac en été que les couches supérieures de l'atmosphère. Cette situation stable inhiberait ainsi les mouvements de convection et la formation des nuages en été. Nos résultats sont en accord avec ceux de certains auteurs qui ont étudié les effets des lacs sur le climat (Holman et al 2012, Notaro et al 2013). Ils nécessitent, toutefois, d'être approfondis en poussant les analyses sur les mécanismes de stabilité/instabilité de la couche limite atmosphérique en présence/absence du lac.

Remerciements : Les simulations climatiques ont été réalisées à partir des ressources du Centre de Calcul de l'Université de Bourgogne (CCUB)

Bibliographie

Costa, M.H., Pires G.F., 2010 : Effects of Amazon and Central Brazil deforestation scenarios on the duration of the dry season in the arc of deforestation. *Int J Climatol* 30: 1970–1979.

Douville, H., 2008 : Influence des surfaces continentales sur la variabilité du cycle hydrologique des échelles inter-annuelle à multi-décennale. Mémoire pour l'obtention du diplôme d'habilitation à diriger des recherches, 132p

Fathalli, B., Pohl, B., Castel, T., Safi, M.J., 2016 : Dynamical downscaling of temperature variability over Tunisia: evaluation a 21-year-long simulation performed with the WRF model. *J Climatol Weather Forecasting* 4:166. doi:10.4172/2332-2594.1000166

Holman, K.D., Gronewold, A.D., Notaro, M., Zarrin, A., 2012 : Improving historical precipitation estimates around the Lake Superior basin. *Geophys Res Lett.* doi:10.1029/2011GL050468.

Notaro, M., Holman, K., Zarrin, A., Fluck, E., Vavrus, S., Bennington, V., 2013: Influence of the Laurentian Great Lakes on regional climate. *J Climate* 26:789–804.

Salih, A.A.M., Körnch, H., Tjernström, M., 2013 : Climate impact of deforestation over South Sudan in a regional climate model. *Int J Climatol.* 33:2362–2375. doi:10.1002/joc.3586.

Thierry, W., Davin, E., Panitz, H.J, Demuzere, M., Lhermitte, S., van Lipzig, N., 2015 : The impact of the African Great Lakes on the regional climate. *J Clim* 28(10):4061–4085. doi:10.1175/JCLI-D-14-00565.1

ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POUR DIFFÉRENTS TYPES DE CULTURES AGRICOLES, PAR LE MODÈLE CROPWAT. ÉTUDES DE CAS EN ROUMANIE ET AU BRÉSIL

STAN F.I.^{1,2}, CARMELLO V.³, ZAHARIA L.¹, IOANA-TOROIMAC G.¹

¹Université de Bucarest, Faculté de Géographie, 1 Boulevard N. Bălcescu, 010041, Secteur 1, Bucarest, Roumanie [stanflorentinauliana@yahoo.com ; zaharialili@hotmail.com ; gabriela.toroimac@geo.unibuc.ro]

²Institut National d'Hydrologie et de Gestion des Eaux, 97 București – Ploiești, 013686, Secteur 1, Bucarest, Roumanie [stanflorentinauliana@yahoo.com]

³Université d'État de São Paulo, Presidente Prudente, Rua Roberto Simonsen, 305, Brésil [viniciuscarmello@gmail.com]

Résumé – Ce travail a pour objectif principal d'estimer l'évapotranspiration au niveau du sol couvert de différents types de cultures agricoles, en Roumanie et au Brésil, en appliquant le modèle CropWat. L'objectif secondaire du travail est d'estimer le besoin en eau pour l'irrigation de ces cultures. Les plantes choisies pour l'étude sont représentatives pour chaque pays : le maïs pour la Roumanie et le soja pour le Brésil. L'étude valorise les séries de données climatiques journalières mesurées à la station évaporimétrique Căldărușani en Roumanie pour la période végétative de culture du maïs (mai – septembre 1999) et à la station Cruz Alta, au sud du Brésil, pour la période végétative du soja (octobre 2001 – mars 2002). Les données de sortie sont représentées par l'évapotranspiration de la culture et les volumes en eau nécessaires pour irrigation. Les résultats permettent de mieux connaître la variabilité de l'évapotranspiration pour différents types de cultures agricoles et d'identifier les volumes d'eau nécessaires pour irrigation.

Mots clés : évapotranspiration, modèle CropWat, Roumanie, Brésil.

Abstract – *Estimation of evapotranspiration for different types of crops, using the CropWat model. Case studies in Romania and Brazil.* The main objective of this paper is to estimate evapotranspiration for soil covered by different types of crops in Romania in Brazil, by applying the CropWat model. The secondary objective of this paper is to estimate the water requirement for irrigation of these crops. The plants selected for the study are representative for each country: maize for Romania and soybeans for Brazil. This study uses the series of daily climatic data measured at Căldărușani evapometric station in Romania during the growing season of maize (May - September 1999) and also from Cruz Alta station, located in south of Brazil for the growth stages of soybean (October 2001 - March 2002). The output data are represented by the crop evapotranspiration and the volume of water requirements for crop irrigation. The results allow to better understand the variability of evapotranspiration for different types of crops and to identify the volumes of water needed for irrigation.

Keywords : evapotranspiration, CropWat model, Romania, Brazil.

Introduction

L'évapotranspiration est l'un des paramètres climatiques d'importance majeure pour les cultures agricoles, influençant l'humidité du sol et les besoins en eau des plantes. Sa connaissance est essentielle pour l'estimation de la réserve hydrique du sol et du nécessaire en eau des plantes agricoles, notamment en période de sécheresse atmosphérique et pédologique et en période de végétation. Par conséquent, de nombreuses études concernant l'évapotranspiration des cultures ont été développées surtout dans des régions exposées à la sécheresse (Păltineanu *et al.*, 1999 ; Xu et Chen, 2005 ; Burn et Hesch, 2007 ; Douglas *et al.*, 2009 ; Simonneaux *et al.*, 2009 ; Al-Najar, 2011 ; Bouraima *et al.*, 2015).

Au cours des dernières décennies, les chercheurs ont développé différents modèles pour estimer les volumes en eau nécessaires pour irrigation, dont le plus connu reste le modèle CropWat qui a été créé par le Département pour Sol et Eau de la FAO (Allen *et al.*, 1998). Ce modèle a été décrit dans les travaux de Doorenbos et Pruitt (1977), Allen *et al.* (1998) et Bouraima *et al.* (2015). En Roumanie le modèle a été appliqué par Stăncălie *et al.* (2010) et Stan *et al.* (2014) afin d'estimer l'évapotranspiration pour les cultures de maïs (durant la période 1995-2000 et pendant l'année 2012), pois (2012), pommier (2012) et prairie (2012). Tandis qu'au

Brésil, le modèle CropWat a été utilisé seulement par Sentelhas *et al.* (2008), pour déterminer l'évapotranspiration potentielle moyenne (1961-1990) à l'échelle du pays. Ce travail complète les informations des études précédentes portant sur des issues similaires et il a pour objectif principal d'estimer l'évapotranspiration au niveau du sol couvert de différents types de cultures agricoles – maïs et soja – en appliquant le modèle CropWat à partir des mesures climatologiques effectuées dans deux pays situés dans des régions climatiques différentes, mais avec un potentiel agricole important : le sud de la Roumanie et le sud du Brésil. L'objectif secondaire du travail est d'estimer le besoin en eau pour l'irrigation de ces cultures, en utilisant le dit modèle.

Le sud de la Roumanie se trouve dans le climat tempéré continental caractérisé par une température moyenne de 10,5°C/an, précipitations de 550 mm/an, durée d'ensoleillement de 2250 h/an, évapotranspiration qui dépasse 800 mm/an (à la station Căldărușani) et un été chaud et sec de juin à août (Stan *et al.*, 2015). Le sud du Brésil est caractérisé par un climat subtropical, avec une température moyenne de 18,5°C/an, précipitations entre 950 mm/an et 1050 mm/an, évapotranspiration d'environ 1200 mm/an (Sentelhas *et al.*, 2008) et un été très humide, du décembre au février.

Données et méthodologie

Cette étude valorise les séries de données climatiques journalières mesurées à la station évaporimétrique Căldărușani en Roumanie, pour la période végétative de la culture du maïs (mai – septembre 1999) et à la station Cruz Alta, au Brésil, pour la période végétative du soja (octobre 2001 – mars 2002). Les données ont été fournies par l'Institut National d'Hydrologie et de Gestion des Eaux en Roumanie, respectivement par l'Agence Nationale d'Eaux du Brésil. La station évaporimétrique Căldărușani est localisée au sud de la Roumanie (Figure 1), à 30 km de Bucarest (la capitale du pays), au bord du lac Căldărușani, en pleine zone tempérée. La station Cruz Alta est située au sud du Brésil (Figure 1), dans la région de l'État brésilien du Rio Grande, situé dans le climat subtropical, qui est représentative pour la production annuelle du soja. Les périodes choisies pour l'analyse en 1999 (pour maïs) et en 2000-2001 (pour soja) ont eu des caractéristiques climatiques relativement similaires. En Roumanie, du mai à septembre 1999, la température de l'air a été 21°C et les précipitations ont été d'environ 450 mm. Au Brésil, durant la période octobre 2001 – mars 2002, la température a été 22,5°C et les précipitations ont cumulé 550 mm.

La méthodologie repose sur l'application du modèle CropWat, qui utilise comme données d'entrée les valeurs journalières et mensuelles des **paramètres climatiques** (précipitations, température maximale et minimale de l'air, humidité relative, durée d'ensoleillement, vitesse du vent) et des **données concernant la végétation** (le coefficient standard de culture – Kc, provenant des fichiers du logiciel, la durée de chaque étape de développement des cultures en nombre des jours, la profondeur maximale de la racine et la hauteur des plantes). Le coefficient de culture varie en fonction des étapes de développement de la plante (Bouchet, 1964) ; la valeur maximale peut être atteinte en pleine période de végétation : 1,14 pour le soja en janvier et 1,12 pour le maïs en juillet et août (Allen *et al.*, 1998).

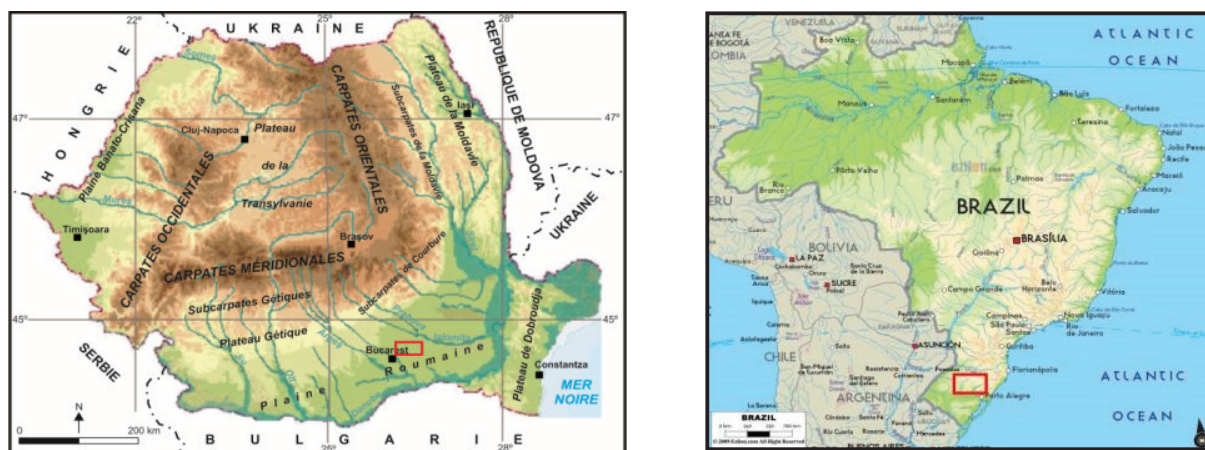


Figure 1. Localisation de la station évaporimétrique Căldărușani en Roumanie (à gauche) et de la station Cruz Alta au Brésil (à droite, source : <https://www.freelargeimages.com>).

Comme sortie, le modèle CropWat calcule l'évapotranspiration de référence (ET_o) par la méthode de Penman – Monteith en utilisant les données climatiques d'entrée énumérées ci-dessus. Puis, l'évapotranspiration de la culture (ET_c) durant la saison de croissance est déterminée en tant que produit entre l'évapotranspiration de référence (ET_o) et le coefficient de culture (K_c) (Allen *et al.*, 1998). En tenant compte des toutes les caractéristiques de la végétation et du climat, le modèle donne comme sortie également l'estimation des besoins en eau de la culture choisie.

Pour vérifier les valeurs de l'évapotranspiration de la culture issues du modèle CropWat, elles ont été comparées avec les données mesurées directement avec les lysimètres à la station évaporimétrique Căldărușani en Roumanie (Figure 2) et aux valeurs publiées dans la littérature scientifique sur la Roumanie et le Brésil (Willmott *et al.*, 2001 ; Sentelhas *et al.*, 2008; Stan *et al.*, 2015 ; Cheval *et al.*, 2017).



Figure 2. Lysimètres à la station évaporimétrique Căldărușani, Roumanie.

2. Résultats

2.1. Évapotranspiration des cultures de soja et maïs

L'évapotranspiration de soja estimée à la station Cruz Alta a cumulé 631,6 mm (Tableau 1) durant les six mois d'activité végétale (octobre 2001 – mars 2002). Les valeurs mensuelles les plus élevées ont été enregistrées en décembre et janvier (plus de 160 mm), mois correspondant aux maximums de la durée d'ensoleillement (> 9 heures/jour) qui détermine une activité végétale intense. Dans la période analysée, les précipitations ont cumulé 550 mm et la température moyenne de l'air a varié entre 20,4°C et 24,6°C. Ces résultats sont considéré comme viables étant donné que l'évapotranspiration potentielle au sud du Brésil est estimée à 600 mm/an – 700 mm/an dans des études antérieures (Willmott *et al.*, 2001).

Tableau 1. Évapotranspiration (en mm) estimée par l'application du modèle CropWat, pour les périodes octobre 2001 – mars 2002 (pour soja) et mai – septembre 1999 (pour maïs).

Station	Type de végétation	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Total
Cruz Alta	Soja	184	113	19							42	92	181	632
Căldărușani	Maïs					13	56	140	121	19				349

En Roumanie, à la station évaporimétrique Căldărușani, l'évapotranspiration au niveau du sol couvert de maïs estimée par le modèle CropWat a été de 349 mm (Tableau 1) durant la période de végétation (mai – septembre 1999), avec un maximum en juin de 120 mm (Figure 3). Durant cette période, la température de l'air a varié entre 15°C et 28°C, les précipitations ont cumulé 465 mm, l'humidité relative a été de 72% et la durée d'ensoleillement est de 8,7 h/jour.

Pour vérifier les résultats obtenus avec le modèle CropWat, les valeurs estimées de l'évapotranspiration des cultures ont été comparées avec les données mesurées à l'aide des lysimètres à la station évaporimétrique Căldărușani (Figure 3). Il a résulté que le modèle donne des valeurs surestimées durant la période de maximum végétatif (40-60 mm/mois) quand les plantes atteignent la maturité et des valeurs sous-estimées pendant le période d'épanouissement et de flétrissement (moins de 20 mm/mois) (Figure 3).

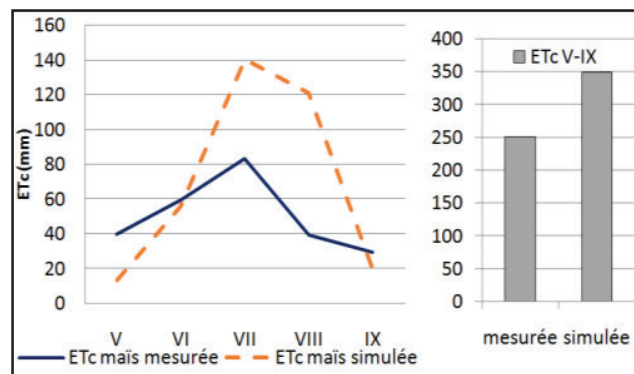


Figure 3. Variation mensuelle de l'évapotranspiration (ETc) mesurée et simulée par le modèle CropWat pour la culture de maïs à la station Căldărușani (Roumanie).

2.2. Le besoin en eau pour irrigation estimé par le modèle CropWat

Les besoins en eau pour irrigation varient de 322 mm pour le soja à 99 mm pour le maïs. Ils ont des valeurs élevées durant la période de croissance végétative et reproductive, quand l'évapotranspiration est maximale et les précipitations ne sont pas suffisantes pour que la plante atteigne la maturité d'être récoltable (Stan *et al.*, 2014). Le besoin en eau pour irrigation varie d'un mois à l'autre et d'une culture à l'autre (Figure 4) et il est tout à fait dépendant de la quantité de précipitations effectives et de l'évapotranspiration.

Pour le soja, les besoins maximum en eau pour irrigation correspondent à l'activité végétale la plus intense, plus de 60 mm/décade (Figure 4), cumulant 150 mm en décembre 2001. Pour la culture de maïs, les quantités d'eau nécessaires pour irrigation ont dépassé 20 mm/décade en juillet 1999 (Figure 4), avec un total de 70 mm/mois durant ce mois. Les résultats du modèle CropWat ont montré que les cultures de soja et maïs n'ont pas besoin d'irrigation en eau au début et à la fin du développement de la plante (Figure 4), car les précipitations effectives seraient suffisantes durant ces étapes. Étant donné qu'il y a des différences entre l'évapotranspiration estimée et mesurée, il est possible que les valeurs estimées d'irrigation par le modèle CropWat soient affectées de façon similaire par des erreurs.

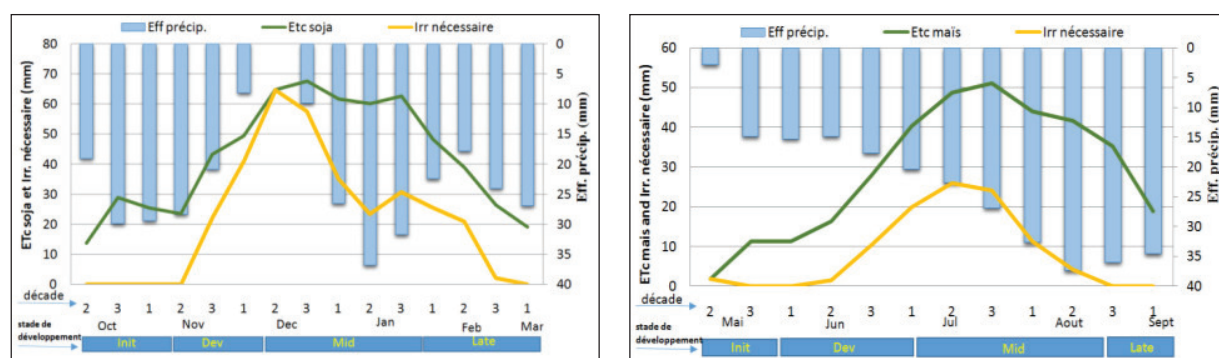


Figure 4. Distribution mensuelle des sorties simulées du modèle CropWat pour différentes cultures :

Etc – évapotranspiration de la culture ; Eff. précip – précipitations efficaces ; Irr. nécessaire – quantités d'eau nécessaires à l'irrigation de la culture ; Init – le stade de la germination et de la croissance ; Dev – la production d'épillets ; Mid – le développement d'épillets ; Late – le développement des grains.

Conclusion

Les résultats de ce travail ont permis de révéler la variabilité de l'évapotranspiration pour de types de cultures agricoles (soja et maïs) en Roumanie et au Brésil et d'identifier les périodes de l'année où ces cultures ont besoin d'irrigation, en utilisant le modèle CropWat. Ainsi, durant la période de végétation, l'évapotranspiration de soja (au Brésil) estimée avec le modèle a été de 632 mm, tandis que les valeurs simulées d'évapotranspiration de maïs (en Roumanie) ont été de 349 mm. Pour le développement optimal, ces plantes ont besoin d'irrigation afin d'atteindre la maturité pour être récoltables et avoir de bons rendements. Pour le soja, des irrigations sont nécessaires en décembre et janvier (au Brésil), allant jusqu'à 120 mm/mois quand l'évapotranspiration est maximale. En même temps, les cultures de maïs ont besoin d'irrigation en juillet (plus de 70 mm), lorsque l'évapotranspiration est élevée et les précipitations ne sont pas suffisantes pour le développement normal de la plante. Cependant, les résultats du modèle CropWat devraient être considérés avec prudence et améliorés, en raison des différences possibles entre les issues du modèle et les valeurs réelles (mesurées), notamment à l'échelle décadaire et mensuelle. Afin d'identifier les erreurs associées au modèle, dans le futur, nous envisageons de l'appliquer pour d'autres types de cultures (pomme de terre, colza) dans différentes régions climatiques et d'essayer de trouver de possibilités pour améliorer les résultats.

Bibliographie

- Allen R., Pereira L., Raes, D. Smith M., 1998 : *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements*, FAO Irrigation and drainage, 56, 301p.
- Al-Najar, H., 2011 : The Integration of FAO-CropWat Model and GIS Techniques for Estimating Irrigation Water Requirement and Its Application in the Gaza Strip, *Natural Resources*, 2, 146-154.
- Bouraima A.K., Zhang W H, Wei C F., 2015 : Irrigation water requirements of rice using Cropwat model in Northern Benin, *Int J Agric & Biol Eng*, 8(2), 58–64.
- Bouchet P., 1964 : Evapotranspiration réelle, évapotranspiration potentielle et production agricole, L'eau et le production végétale, *Publication INRA*, 151-232.
- Burn D.H., Hesch N.M., 2007: Trends in evaporation for the Canadian prairie, *Journal of Hydrology*, 336, 61- 73.
- Cheval S., Dumitrescu A., Bârsan M.V. 2017 : Variability of the aridity in the South-Eastern Europe over 1961-2050, *Catena*, 151, 74-86.
- Doorenbos J., Pruitt W.O., 1977 : *Guidelines for predicting crop water requirements*, FAO Irrigation and Drainage, 24, 156 p.

Douglas E., Jacobs J., Summer D., Ray R. : 2009, A comparison of models for estimating potential evapotranspiration for Florida land cover types, *Journal of Hydrology*, **373**, 366-376.

Păltineanu Cr., Panoras A. G., Mavroudis I. G., Louisakis A., 1999 : Estimating reference evapotranspiration and irrigation water requirements in the Gallikos river basin, Greece, *International Agrophysics*, **13**(1), 49-62.

Sentelhas P., Dos Santos D., Machado R., 2008 : Water deficit and water surplus maps for Brazil, based on FAO Penman-Monteith potential evapotranspiration, *Ambiente&Agua – An Interdisciplinary journal of Applied Science*, **3**(3), 28-42.

Simonneaux V., Le Page M., Helson D., Metral J., Thomas S., Duchemin B., Cherkaoui M., Kharrou H., Berjami B., Chehbouni A., 2009 : Estimation spatialisée de l'Evapotranspiration des cultures irriguées par télédétection. Application à la gestion de l'Irrigation dans la plaine du Haouz (Marrakech, Maroc), *Science et changements planétaires Sécheresse*, **20**(1), 123-130.

Stan F., Neculau G., Zaharia L., Ioana Toroimac G., 2014 : Variabilité de l'évapotranspiration pour différents types de végétation aux stations évaporimétriques expérimentales de Roumanie, *Actes du Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, **27**, 92-97.

Stan F., Zaharia L., Neculau G., Ioana Toroimac G., 2015 : Variabilité spatiale et temporelle de l'évaporation dans la Plaine Roumaine, *Actes du Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, **28**, 621-626.

Stăncălie G., Marica A., Toullos L., 2010 : Using earth observation data and CROPWAT model to estimate the actual crop evapotranspiration, *Physics and Chemistry of the Earth*, **35**, 25-30 p.

Xu, C-Y., Chen, D., 2005 : Comparison of seven models for estimation of evapotranspiration and groundwater recharge using lysimeter measurement data in Germany, *Hydrological Processes*, **19**, 3717-3734.

Willmott, C., Matsuura K., 2001: Terrestrial Water Budget Data Archive: Monthly Time Series (1950-1999), available: http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/README.wb_ts2.html.

VULNERABILITE DE LA PRODUCTION DU MAÏS AUX CRUES DANS L'ARRONDISSEMENT D'OUÈDEMÈ-ADJA (BENIN)

ATIYE E. ¹, MONTIN G. ¹, VISSIN E W. ², DOUGNON L. ¹ ET SOHOUNOU M. ¹

¹Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université d'Abomey-Calavi, 01 BP 526 Cotonou 01 ; E-mail : atiyeemile@yahoo.fr, gladstonemontin@yahoo.fr, dosg09@yahoo.fr, borismarcs@gmail.com

²Laboratoire Pierre PAGNEY : Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement, Université d'Abomey-Calavi 01 BP 526, Cotonou 01 ; E-mail : exlaure@gmail.com

Résumé : La présente recherche étudie la vulnérabilité de la production du maïs aux crues dans l'arrondissement d'Ouèdèmè-Adja. Les données utilisées sont tirées de la documentation et sont complétées par celles issues des enquêtes. Le modèle PEIR a permis d'analyser les résultats. L'analyse des résultats obtenus montre que les crues dues aux lâchés du barrage hydroélectrique de Nangbéto entraînent l'inondation des champs de maïs situés en aval du fleuve. De même, l'intensité et la fréquence des pluies en amont et en aval accélèrent le débordement des cours d'eau vers le lit majeur. Ces crues ont entraîné la destruction de plus de 379,1 ha de champ de maïs dans l'arrondissement d'Ouèdèmè-Adja en 2010. Face à cette situation les populations développent plusieurs stratégies d'adaptation.

Mots clés : Ouèdèmè-Adja, crues, inondation, vulnérabilité.

Abstract : *Vulnerability of maize production in floods in the Ouedeme-adja borough (Benin).* The present study aims the vulnerability of the production of the corn in the floods in the district of Ouèdèmè-Adja. The data used concern the document retrieval and complete by the direct observation and the semi-directive conversations. The model PEIR is used to analyze the results. The analysis of the obtained results shows that the floods of the river Mono owed to the left of the hydroelectric dam of Nangbéto entraining the floods of corns situated downstream to the river. Also the intensity and the frequency of rains upstream and downstream accelerate the exit of the streams of their bed. These floods have entrained the destruction of more than 379, 1 ha on average of field of corn in the district of Ouèdèmè-Adja in 2010. In front of this situation the populations develop several strategies of adaptation.

Keywords : Ouèdèmè-Adja, floods, flood, vulnerability.

Introduction

L'agriculture béninoise demeure essentiellement une agriculture de subsistance presque exclusivement pluviale (Tossa, 2007). Les seules terres capables de donner des produits de contre saison sont les terres inondables (FAO, 2005). L'analyse des risques d'inondations en aval du barrage hydroélectrique de Nangbéto sur le fleuve Mono au Bénin, a porté sur les variabilités annuelles des précipitations et débits de 1955 à 1999. Souvent, des milliers d'hectares de champs sont submergés tant au Togo qu'au Bénin (Ago, 2005). Les villages inondés n'arrivent pas à écouler leurs produits agricoles (Sèmondji, 2012). La vulnérabilité se manifeste par une détérioration des rendements et des pertes importantes de récoltes dans la mesure où les variations de rendements se calquent sur celles des précipitations annuelles ou saisonnières (Boko, 1988 ; Issa 1995 cité par Yabi, 2011). Les travaux de Boko(1988), Houndénou (1999), Ogouwalé (2001, 2004 et 2006) et Yabi (2011) ont montré que les céréales (maïs et sorgho) sont plus sensibles aux aléas climatiques. Or, ils constituent la base alimentaire des populations dans nombreuses régions du Bénin (Yabi, 2011). La production du maïs est liée à la dynamique hydrologique c'est-à-dire aux régimes des fleuves dans le bas-Bénin ; ce régime dépendant à son tour des précipitations (MEHU, 1998). De ces constats, il importe d'étudier la vulnérabilité de la production du maïs aux crues dans l'arrondissement de Ouèdèmè-Adja.

1. Site, données et méthodes

L'arrondissement de Ouèdèmè-Adja dans la Commune de Lokossa, département du Mono est situé dans le bassin du fleuve Mono entre 6° 40' et 6° 43' de latitude nord et entre 1° 36' et 1° 43' de longitude est (Fig.1). Il est limité au nord par la Commune de Dogbo, au sud par la Commune d'Athiémé, à l'est par les arrondissements de Lokossa et d'Agamè et à l'ouest par le fleuve Mono.

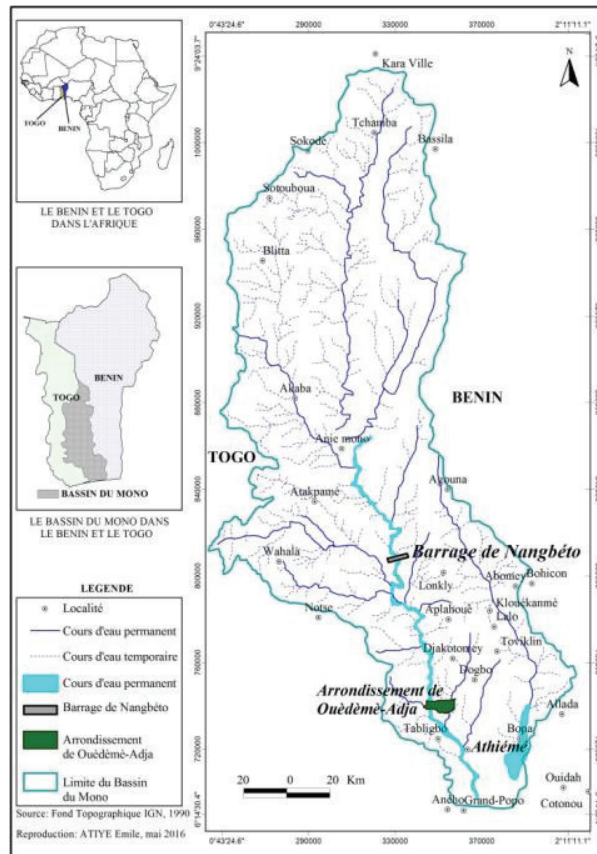


Figure 1. Situation de l'arrondissement de Ouèdèmè-Adja et du barrage de Nagbetodans le bassin du Mono

Les données et informations utilisées sont essentiellement issues de la documentation (données agricoles et données climatiques). Les données climatiques de 1971 à 2010 de l'Agence pour la Sécurité de la Navigation Aérienne en Afrique et à Madagascar (ASECNA) sont utilisées pour l'élaboration des diagrammes climatiques et les données agricoles de 1995 à 2010 du Centres Régionaux pour la Promotion Agricole(CeRPA) Mono-Couffo ont permis d'évaluer les impacts des crues sur le maïs dans l'arrondissement de Ouèdèmè-Adja.

La statistique descriptive a été utilisée pour la caractérisation pluviométrique et hydrologique. De même, l'équation de l'apport pluviométrique ($Pn = P - ETR$; avec : Pn , apports pluvieux, ou pluie efficace, en mm P , pluie totale annuelle en mm ETR , évapotranspiration réelle en mm) et celle du bilan climatique ($Bc = P - ETP$, avec : Bc , bilan climatique en mm ; P , pluie totale annuelle en mm ; ETP , évapotranspiration réelle en mm.) ont été utilisées pour caractériser le rythme des excédents ou des déficits en eau.

Par ailleurs des entretiens ont été effectués avec les populations vulnérables et les personnes ressources. Au total, 128 personnes ont été interrogées à travers 32 hameaux des 12 villages de

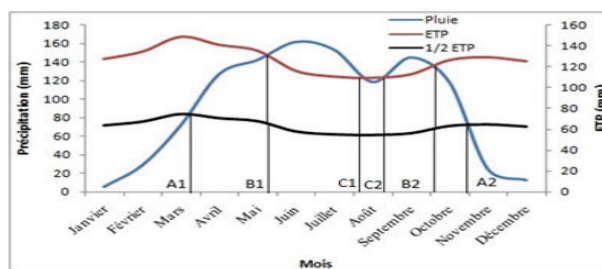
l'arrondissement dont 121 ménages, 4 autorités administratives et 3 agents de CeRPA. Ces informations ont été complétées par des observations directes sur le terrain avec le traitement des données et l'analyse des résultats.

2. Résultats et discussion

2.1. Caractéristiques climatique et hydrographique

L'arrondissement de Ouèdèmè-Adja est caractérisé par un climat de type subéquatorial marqué par une température qui varie peu entre 25 et 29 °C avec des maxima atteignant 40 °C en février-mars. L'insolation globale se situe entre 2100 et 2350 heures/an ; elle est maximale en novembre et mai et atteint un minimum en juillet-août. L'humidité relative est toujours élevée le matin où elle atteint 90 à 97 %. Par contre, les valeurs minimales sont enregistrées généralement à la mi-journée en janvier-février et ceci essentiellement sous l'effet de l'harmattan. Les vents sont assez modérés et favorisent les cultures. Dans les études antérieures menées sur le climat du sud du Bénin (Boko, 1988; CEDA, 1998 ; Dossou, 2009), l'arrondissement de Ouèdèmè-Adja est marqué par un climat de type subéquatorial composé de quatre saisons : une grande saison pluvieuse de mi-mars à mi-juillet, une petite saison sèche de mi-juillet à mi-septembre, une petite saison pluvieuse de mi-septembre à mi-novembre et une grande saison sèche de mi-novembre à mi-mars.

Figure 2. Précipitation et évapotranspiration mensuelles à Ouèdèmè-Adja (1971-2010)
Source des données : ASECNA, 2012



Du mois de janvier jusqu'au mois de mars d'une part, et du mois de novembre jusqu'au mois de décembre d'autre part, l'évapotranspiration potentielle est supérieure aux précipitations. Par contre, du mois d'avril jusqu'au mois d'octobre, les précipitations sont supérieures à l'évapotranspiration potentielle. Dans ce cas, il s'agit d'un excès hydrique qui favorise une catastrophe de crue. Le bilan hydrique de l'arrondissement de Ouèdèmè-Adja permet d'identifier spécifiquement les excès hydriques mais aussi les déficits hydriques. C'est au cours de ces déficits hydriques que les ménages agricoles apportent de l'eau aux cultures. Par contre, l'excès entraîne souvent une inondation qui occasionne la dégradation des champs de maïs et le ralentissement de sa production. La production du maïs est de plus en plus sujette à des inondations à cause d'une variation du régime du fleuve Mono.

2.2. Régime du fleuve Mono

Le régime du fleuve Mono est déterminé par le régime pluviométrique (Loko, 2006). De plus, depuis la construction du barrage hydroélectrique de Nangbéto en 1987, est intervenu un bouleversement du régime du fleuve Mono, avec un écoulement devenu permanent et un écrêtage relatif des débits de crue. Toutefois, le maximum de débit est toujours atteint en juillet à l'exutoire d'Athiéme créant les crues de septembre (figure 3).

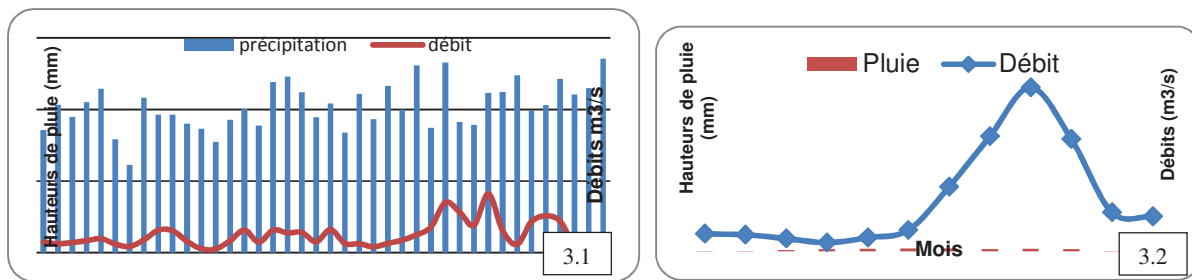


Figure 3. Variation interannuelle (3.1) et régime pluvio-hydrologique moyen mensuel à Ouèdèmè-Adja (3.2)
Source des données : ASECNA, 2012 et DG-Eau, 2013

La figure 3 illustre le phénomène de crue du fleuve Mono occasionné par les précipitations et le lâchage des eaux du barrage de Nangbéto. Ainsi, de 1971 à 2010, le débit du fleuve Mono augmente avec la pluie au mois de juillet. Ce phénomène de pluie étoffe l'écoulement du fleuve Mono et bouleverse son régime en engendrant plus tard en septembre des risques de crues sur les champs de maïs au cours de sa petite saison agricole.

2.3. Campagnes agricoles de fortes crues et fréquence des crues

Le phénomène de crues était décennal depuis l'installation du barrage. Mais il a connu une modification ces deux dernières décennies. Au cours de l'avant dernière décennie, elle s'observe tous les cinq ans. Depuis le début des années 2000, il est devenu annuel. Les années de fortes crues sont essentiellement 1991, 1995, 1999, 2002, 2003, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011 (Sèmondji, 2012 et Résultats de terrain, 2012). Par conséquent, les campagnes agricoles en période de fortes crues retenues sont 1998-1999, 2001-2002, 2002-2003, 2006-2007, 2007-2008, 2008-2009, 2009-2010. Ces crues issues du débordement des eaux du fleuve Mono, du lac Togba, du lac Doukon, de la rivière Agbidi, des forages et des pluies intenses durent au moins trois (03) mois avant d'entamer progressivement leurs étapes de régression. Ainsi, cela détruit la production du maïs avant de favoriser plus tard par le dépôt des alluvions les cultures maraîchères et de contre saison.

2.4. Fragilisation de la production du maïs

La population d'Ouèdèmè-Adja est généralement confrontée au problème de destruction des champs de maïs par les crues, à la baisse de la production et à l'inaccessibilité des champs.

2.4.1. Destruction des champs de maïs

L'inondation détruit les cultures à cause de la présence des champs en aval du fleuve Mono. La destruction des champs de maïs est liée à l'intensité et la fréquence des pluies ainsi qu'aux crues du fleuve Mono. Or, le maïs occupe la première place des céréales dans l'arrondissement d'Ouèdèmè-Adja.

Les excédents pluviométriques surviennent sans périodicité et se manifestent par de forts abats pluviométriques au cœur de la saison d'hivernage engendrant un excès pouvant atteindre 30 voire 40 % de la pluviométrie moyenne. Or, dans un contexte d'agriculture pluviale, un excédent de 20 % est suffisant pour causer des dégâts considérables. Ces anomalies entraînent des récoltes avariées (Yabi, 2011).

La planche 1 présente des champs de maïs et de récoltes inondés dans le secteur d'étude.

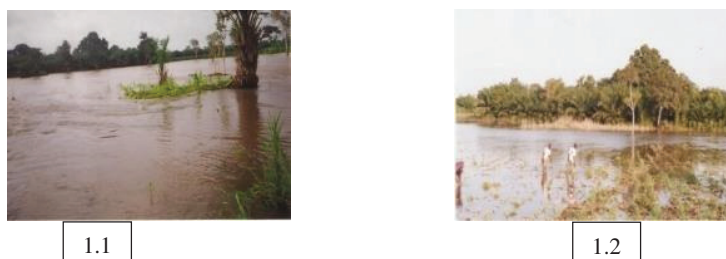


Planche 1. Inondation de champs de maïs et de récoltes (**Photo** : Montin, septembre 2010)

La photo 1.1 montre un niveau d'inondation élevé dans le champ de maïs où presque tous les plants de maïs ont disparus laissant un lopin à proximité d'un palmier à huile. La photo 1.2 présente un champ de maïs inondés par la crue du fleuve Mono au cours de la petite saison de semence appelée « Zo » en milieu Kotafon. La superficie de champs de maïs engloutie en 2010 est à plus de 379,1 ha en moyenne dans l'arrondissement de Ouèdèmè-Adja tandis que les récoltes emportées sont estimées à environ 3948,23 tonnes en cette même période (CADER Lokossa et Résultats d'enquête, 2012).

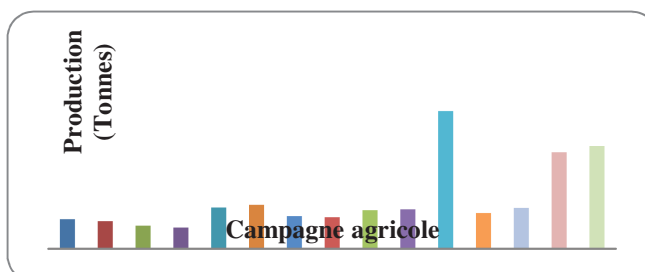
2.4.2. Impact de l'inondation sur la production du maïs

Le maïs est la culture céréalière la plus produite parce qu'il est un aliment de base qui intervient dans plusieurs transformations alimentaires de la population. La figure 4 montre les campagnes de production de maïs dans l'arrondissement d'Ouèdèmè-Adja. La production de maïs est faible de 1995 à 2010 sauf entre 2005-2006 année sans crue où une production de 4 070, 74 tonnes est enregistrée. Ce qui montre la vulnérabilité de la production du maïs due aux risques d'inondation. Les activités agricoles sont concentrées sur la grande saison des pluies qui commence à mi-avril pour finir au début du mois d'août.

La vulnérabilité de la production du maïs est due aux effets dévastateurs des inondations. Les campagnes agricoles en période de fortes crues retenues dans le cadre de cette étude (1998-1999, 2001-2002, 2002-2003, 2006-2007, 2007-2008, 2008-2009, 2009-2010) ont présenté une production moyenne de 10539,06 tonnes de maïs tandis que les années de non-crues (1995-1996, 1996-1997, 1997-1998, 1999-2000, 2000-2001, 2001-2002, 2003-2004, 2004-2005, 2005-2006) ont présenté une production moyenne de 12130,74 tonnes de maïs. La production du maïs a subi une baisse pendant les années de fortes crues comparativement aux années de non-crues. Ce qui explique la vulnérabilité du maïs aux crues.

Figure 4. Production annuelle de maïs dans l'arrondissement de Ouèdèmè-Adja (1995-2010).

Source des données : CeCPA Lokossa et Résultats d'enquête, 2012



2.5. Stratégies d'adaptation aux crues

Pour ralentir et mieux gérer la vulnérabilité des crues, certaines stratégies sont développées par les populations tandis que d'autres seront progressivement intégrées dans leurs pratiques.

2.5.1. Stratégies d'adaptation développée par les populations

L'adaptation des activités agricoles aux inondations se manifeste par deux activités que sont la récolte précoce des céréales et tubercules et l'utilisation de pirogues pour la récolte (Résultats d'enquête, 2012). Pour ce faire, l'augmentation des emblavures pendant les grandes saisons culturales appelées «Xoué» en milieu Kotafon et les contre saisons avec l'utilisation des points d'eau afin de prendre des dispositions avant l'arrivée des crues qui se pointent à l'horizon à partir des mois de juillet et Août.

La sensibilisation immédiate des voisins sur les comportements à avoir face aux effets néfastes des inondations ainsi que les précautions à prendre ; la migration temporaire des populations vers les plateaux non inondés ; la surélévation des greniers ; la réserve de vivres pour résister en période de soudure sont entre autres quelques stratégies d'adaptation utilisées par les populations pour faire face aux inondations dans l'arrondissement de Ouèdèmè-Adja.

2.5.2. Stratégies préventives et sociales

La prévision et l'annonce des crues, l'information et l'éducation des populations passent par des stratégies de communications pour informer les populations vulnérables : utilisation de la radio, de la télévision, des articles scientifiques, des revues et les crieurs publics de chaque village doivent relayer l'information d'alerte et de précautions à prendre. Ainsi, certains producteurs prennent conscience et font varier leur calendrier d'activités (tableau I).

Tableau I. Calendrier d'adaptation et de production en période de crue

Activités	Pêche	Production agricole
Périodes de crues		
De juillet à Novembre	Pêche dans la basse plaine inondable/fleuve	Culture de maïs liée la 2 ^{ème} saison des pluies sur le plateau

Source : Enquête de terrain, avril 2012.

Conclusion

Les crues sont récurrentes dans l'arrondissement de Ouèdèmè-Adja. Les années de fortes crues retenues pour cette étude ont présenté une production de 10539,06 tonnes de maïs tandis que les années de non-crues ont présenté une production de 12130,74 tonnes de maïs. Le maïs a subi une légère augmentation pendant les années de non-crues comparativement aux années de crues. Ainsi, généralement l'arrivée des crues ne favorise pas une régularité de la production du maïs dans l'arrondissement de Ouèdèmè-Adja. Pour ce faire, l'encadrement rigoureux des producteurs est une condition indispensable pour l'atteinte de leurs objectifs. Le développement de certaines filières agricoles telles que le riz, le palmier à huile et le maraîchage serait plus rentable. Ces systèmes culturaux et les cultures de contre saison sont favorables sur les sols hydromorphes et humides de Ouèdèmè-Adja.

Bibliographie

Ago E. E., 2005: *Analyse des risques d'inondation en aval du barrage de Nangbéto au Togo et au Bénin*. Mémoire inédit. Université de Liège, FSA, Gembloux- Belgique, 40 p.

- Boko M., 1988 : *Climats et communautés rurales du Bénin : rythmes climatiques et rythmes de développement*. Thèse de Doctorat d'Etat ès lettres, Université de Bourgogne, Vol. 1, 282 p.
- CEDA, 1998 : *Profil de la zone côtière du Bénin*, Cotonou, 91 p.
- Dossou, 2009 : *Exploitation des ressources biologiques alimentaires de la basse vallée de l'Ouémé et des plaines inondables de la Sô au Bénin*. Thèse de Doctorat Unique, UAC, 245 p.
- FAO, 2005 : *Système d'information de la FAO sur l'eau et l'agriculture*, FAO Bénin, 6 p.
- Houndénou C., 1999 : *Vulnérabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide : l'exemple du Bénin, diagnostic et modélisation*. Thèse de Doctorat de géographie. UMR 5080, CNRS « climatologie de l'Espace Tropical », Université de Bourgogne, Centre de Recherche de Climatologie, Dijon, 341 p.
- Issa M. S. (1995) : *Impacts potentiels d'un changement climatique dû au doublement du CO₂ atmosphérique sur l'agriculture en République du Bénin*. Mémoire de DESS. Université Senghor d'Alexandrie. 113 p.
- MEHU, 1998 : *Programme d'Aménagement des Zones Humides : Rapport de formulation*. Cotonou, 38 p.
- Ogouwalé E., 2001 : *Vulnérabilité/adaptation de l'agriculture aux changements climatiques dans le Département des collines*. Mémoire de maîtrise de Géographie, UNB/FLASH/DGAT, 119 p.
- Ogouwalé E., 2004 : *Changements climatiques et sécurité alimentaire dans le Bénin méridional*. Mémoire de DEA, UAC/EDP/FLASH, 119 p.
- Ogouwalé E., 2006 : *Changements climatiques dans le Bénin méridional et central : indicateurs, scénarios et prospectives de la sécurité alimentaire*. Thèse de Doctorat Unique, EDP/FLASH, UAC, 302 p.
- Sèmondji G. C., 2012 : *Vulnérabilité des écosystèmes au fonctionnement du barrage hydroélectrique de Nangbéto*. Mémoire de maîtrise en géographie DGAT/FLASH/UAC, 80 p.
- Tossa H. J., 2007 : *Impacts des crues de l'Ouémé sur les activités rurales dans la commune des Aguégus*. Mémoire de maîtrise, FLASH / UAC, 97 p.
- Yabi I., 2011 : *Contraintes climatiques et développement agricole au Bénin*. Article/Annales Vol 2, N°17, FLASH/UAC, 18 p.

STRATEGIES DE GESTION LOCALE DES RESSOURCES EN EAU DANS UN CONTEXTE DE PEJORATION AGROCLIMATIQUE DANS LA COMMUNE DE ZE

ADJAHOSSOU V. N.¹, ADJAHOSSOU B. S.², ALIA A. W. R.³, GBAGUIDI G. E. B.³, VISSIN W. E.¹, ADJAHOSSOU D. F.⁴

¹Laboratoire Pierre PAGNEY, Climat, Eau, Ecosystèmes et Développement (LACEEDE), 03 BP 1122 Jéricho, Cotonou, Université d'Abomey-Calavi (Bénin) [naesse.adjahossou@uac.bj ; exlaure@gamil.com]

²Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC), 01 BP 526 Cotonou, Université d'Abomey-Calavi (Bénin) [sedajas@yahoo.fr]

³Faculté des Lettres, Arts, et Sciences Humaines (FLASH), 01 BP 526 Cotonou, Université d'Abomey-Calavi (Bénin) [mcckawo@yahoo.fr; besdire2000@yahoo.fr]

⁴Faculté des Sciences Agronomiques de l'Université d'Abomey-Calavi (Bénin) [ceforid@yahoo.fr]

Résumé – Les ressources en eaux superficielles comme les cours et plans d'eau, pourraient être utilisées pour compenser le déficit hydrique dus aux perturbations climatiques mais les interdits socio-culturels constituent une entrave à cette alternative. Cette étude a été initiée dans la Commune de Zè pour analyser la gestion des risques climatiques par les paysans face à la double contrainte des perturbations climatiques et des pesanteurs sociologiques. L'observation directe, les enquêtes de terrains et la collecte de données pluviométriques ont permis de constituer une base de données afin d'identifier entre autres, les stratégies adoptées par les paysans. Il ressort de ce travail qu'environ 12 % des paysans utilisent divers moyens pour exploiter aussi bien les eaux de précipitations que les eaux souterraines et parfois, les cours et plans d'eau. Des producteurs (environ 19 %) font de l'association de cultures pour réduire l'évaporation de l'eau des premiers horizons du sol en créant un microclimat auto entretenu par les espèces végétales en présence. Bien que les ressources en eau soient sous exploitées par les paysans, il importe de bien étudier les stratégies développées afin de juger de leur efficacité.

Mots-clés : risques climatiques, ressources en eaux, stratégies d'adaptation, Commune de Zè.

Abstract : *Strategies of local management of water resources in the commune of Ze in agroclimatic pejoration context. Superficial waters resources as the rivers and dregs could be used to compensate the water deficit due to climatic perturbations but the sociocultural totem constitute a hindrance to this alternative. This survey has been initiated in the district of Zè to analyze the management of the climatic risks by the peasants facing the double forced of the climatic disruptions and the sociological interdict. The direct observation, the investigations in the real lands and the collection of pluviometric data permitted to constitute a data base in order to identify, the strategies adopted by the peasants. It is evident from this work that about 12% of the peasants use various means to exploit the waters of precipitation as well the underground waters and sometimes, the superficial waters. Some producers (about 19%) make the association of cultures to reduce the evaporation of the water from the first horizons of soil, creating a microclimate auto maintained by the plant species in presence. Although resources in water are under exploited by the peasants, it is important to study the strategies developed in order to examine their efficiency.*

Keywords : climatic risks , water resources, adaptation strategies, Zè district.

Introduction

L'eau est une ressource indispensable à toute activité humaine. L'irrigation, principale consommatrice d'eau du secteur agricole, a pour vocation principale de favoriser une activité agricole stable en l'affranchissant, au moins partiellement, des aléas climatiques (Katerji, 2002). Le Bas-Bénin, bien que disposant de deux saisons pluvieuses par an et drainé par des cours et plans d'eau qui lui offrent d'importantes potentialités hydrographiques, n'a pas su avoir la maîtrise de l'eau pour une agriculture plus prospère afin de garantir la sécurité alimentaire à sa population. Cette réalité qui est aussi celle de la Commune de Zè où les pesanteurs socioculturelles constituent un handicap pour une gestion efficiente des ressources en eau. A ce contexte, s'ajoute les effets indésirables des variations climatiques marquées par l'irrégularité des pluies et leur péjoration.

1. Cadre d'étude

Le secteur de la présente étude est situé au sud de la République du Bénin et plus précisément dans le département de l'Atlantique. Il est compris entre 6°32' et 6°87' de latitude Nord et entre 2°13' et 2°26' de longitude Est. Avec une superficie de 653km², Zè est la commune la plus vaste du département dont elle occupe 19,88% du territoire (Afrique conseil, 2006). Elle est limitée :

- au Nord par les communes de Zogbodomey et de Toffo,
- au Sud par les communes d'Abomey-calavi et de Tori-bossito,
- à l'Est par les communes d'Adjohoun et de Bonou,
- à l'Ouest par la commune d'Allada.

La commune de Zè compte 73 villages répartis en 11 arrondissements que sont : Adjan, Koundokpoé, Dawé, Djigbè, Dodji-Bata, Hêkanmè, Sèdjè-Dénou, Houègoudo, Tangbo-Djêvié, Yokpo et Zè (figure 1).

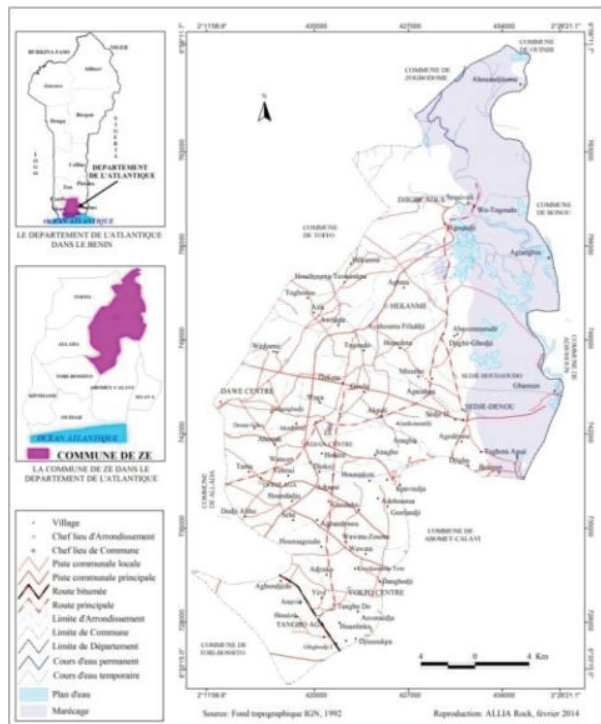


Figure 1. Situation géographique de la Commune de Zè

1.1. Le relief

Le relief de la commune de Zè est un élément du vaste plateau d'Alladaqui s'incline légèrement vers la côte et surplombe au Nord la dépression de la Lama. Le dénivelé est d'environ 160 m entre les dépressions et le point le plus élevé (MEPN, 2010). Les pentes sur l'ensemble de la commune sont généralement moins de 5 % mais des versants avec un fort dénivelé sont également observables. Deux bassins versants couvrent la Commune. Il s'agit du bassin du plateau de l'Ouémé, qui couvre 580,4 km² du territoire et est drainé vers une rivière dénommée Sô. Ensuite, la portion Sud (92,9 km²) est drainée vers l'Atlantique par l'intermédiaire de la frange lagunaire sur la côte.

1.2. Le climat

Le climat de la commune de Zè est de type béninien marqué par des hauteurs pluviométriques plus ou moins modestes avec une moyenne de 1200 mm, une amplitude thermique annuelle relativement faible (inférieure à 5°C) et par la succession de quatre saisons distinctes : une grande saison des pluies, une petite saison sèche, une petite saison des pluies et une grande saison sèche.

Les fréquences des pluies et les hauteurs d'eau connaissent de plus en plus de perturbations ces dernières années (Alia, 2014).

1.3. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique n'est pas dense (voir figure 2). La zone Nord de la Commune est arrosée par les affluents du fleuve Ouémé principalement la rivière Sô. On retrouve aussi quelques mares telles que : "Leitiou", "Towazé" et "Ninwoué" dans l'arrondissement de Djigbé et "Godro" dans l'arrondissement de SèdjèHouègoudo.

Ces différents plans d'eau sont utilisés surtout pour la pêche et le maraîchage et leur accès est libre.

2. Données et méthode

L'observation directe, les enquêtes de terrain et la collecte de données pluviométriques ont permis d'obtenir les informations exploitées.

2.1. Les données pluviométriques

La commune de Zène disposant pas de station pluviométrique, les données exploitées sont celles d'Allada, une commune voisine.

Ces valeurs ont été extraites de la base de données de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) à Cotonou et concernent la pluviométrie et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Les moyennes pluviométriques mensuelles ont été déterminées et ont permis de tracer le graphique qui présente l'évolution saisonnière de la pluviométrie entre 1965 et 2010.

Le bilan climatique a été établi et s'exprime par la formule suivante : $Bc = P - ETP$; avec : Bc : bilan climatique en mm ; P : pluie moyenne mensuelle en mm et ETP : évapotranspiration réelle en mm.

2.2. Les données socioculturelles et techniques

Elles ont été collectées après des entretiens structurés auprès d'un échantillon de 150 producteurs exerçant et vivant dans la Commune. Le choix des personnes enquêtées repose sur deux critères essentiels à savoir :

- résider et exercer une activité de production agricole dans la Commune

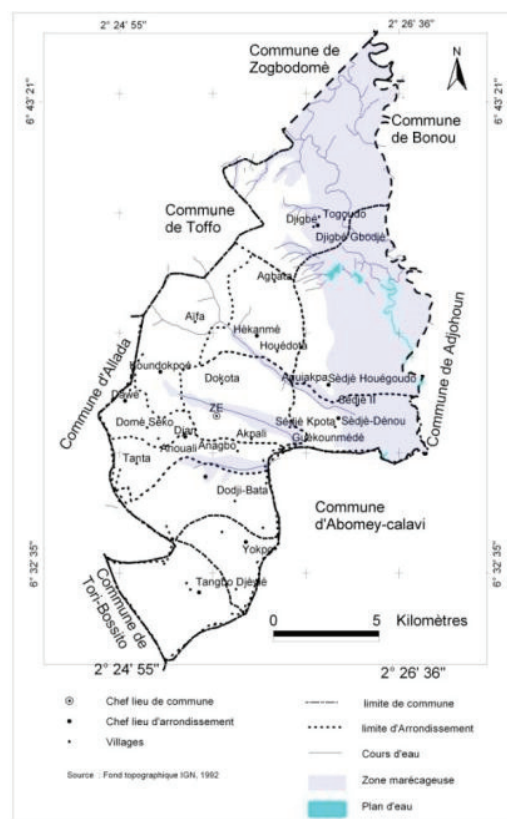


Figure 2. Réseau hydrographique de la commune de Zène

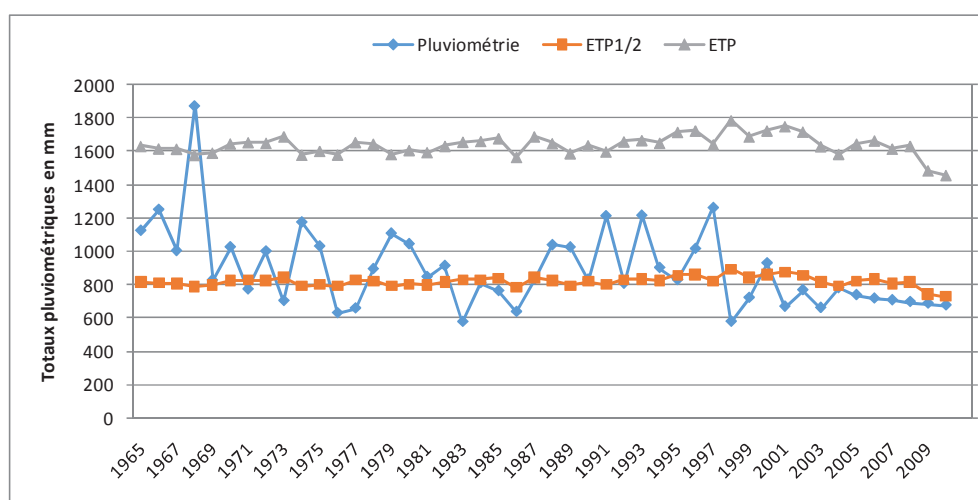
- être exploitants agricoles depuis au moins 10 ans.

Les informations collectées sont relatives aux croyances, les interdits et les pratiques faites dans le milieu pour faire face à la gestion des ressources en eau. Le traitement des données collectées a conduit aux résultats suivants.

3. Résultats et discussions

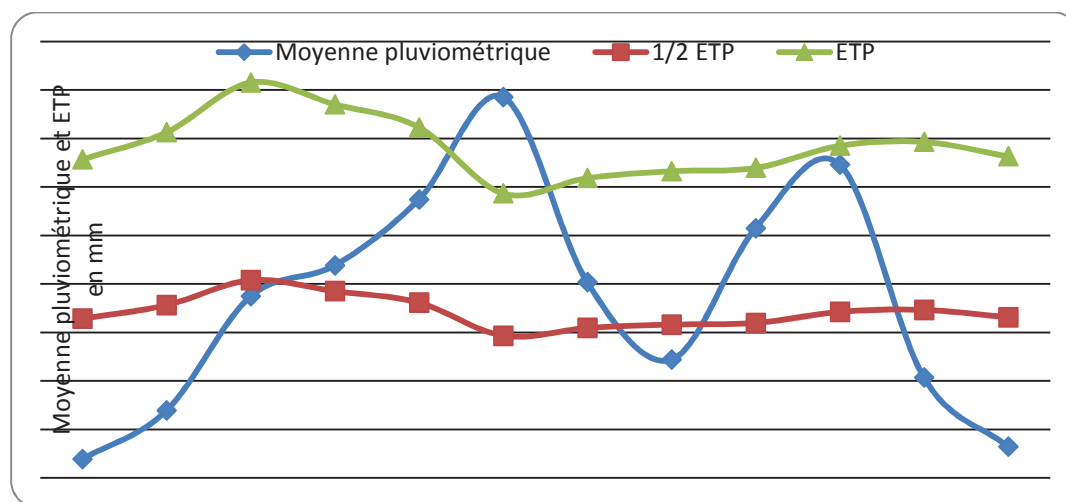
3.1. Evolution saisonnière de la pluviométrie de la Commune de Zè

Les tendances pluviométriques en cours dans la Commune de Zè sont perçues à travers des phénomènes météorologiques extrêmes. Les précipitations déterminent les saisons et les campagnes agricoles dans la Commune. La figure 2 présente l'évolution interannuelle des totaux pluviométriques de 1965 à 2010 dans la Commune d'Allada.



Source : ASECNA, 2010

Figure 3. Variation inter annuelle du bilan climatique de 1965 à 2010



Source : ASECNA, 2010

Figure 4. Variation mensuelle du bilan climatique entre 1965 et 2010

L'analyse de la figure 3 révèle d'importantes fluctuations des précipitations avec un pic en 1968 de l'ordre de 1877 mm et une légère tendance à la baisse. Il faut noter qu'en 1998, soit 30 ans après, il y a un déficit pluviométrique de 1300 mm.

A part les quelques années sèches (1971, 1973, 1976, 1977, 1983, 1985, 1986, 1987, 1992 et 1995), le bilan climatique sur la période d'étude montre en général des années excédentaires jusqu'en 1997. A partir de cette année jusqu'en 2010 (exception faite de l'année 2000) il n'y a que des périodes sèches, cette sécheresse qui s'accroît est plus que préoccupante et nécessite la prise de nouvelles mesures dont l'irrigation pour compenser le déficit hydrique observé.

La figure 4 présente deux périodes humides que sont de mars à juillet et de septembre à octobre. Cette période correspond généralement à la durée du cycle biologique des plantes annuelles. Mais les cultures pérennes ont besoin d'un apport d'eau complémentaire pour compenser le déficit hydrique.

3.2. Disponibilité de l'eau et influences socioculturelles sur son exploitation paysanne

Le réseau hydrographique est relativement peu développé. Du Sud au centre, existe des marigots et des bas-fonds. Les régions arrosées sont entre autres, Havikpa, Houégnon; Tozounmè; Agbato ; Togboet Dovinou. La zone Nord est également irriguée mais par les affluents du fleuve Ouémé tel que la Sô.

Plusieurs cours d'eau temporaires traversent la commune. Au Nord-Est, la zone est marécageuse avec des plans d'eau et des marais par endroit (figure 2).

Mais, la gestion de ces ressources pour l'agriculture est confrontée à des contraintes d'ordre socioculturel. Les pratiques religieuses constituent des obstacles pour l'exploitation des ressources en eau à des fins agricoles. Il est par exemple interdit dans certaines régions marécageuses comme Sèdjè-Dénou et Hêkanmey, tout accès aux sources d'eaux superficielles les jours du marché qui tiennent tous les trois jours.

Du Sud au centre de la Commune, du fait du mixage des populations autochtones et allochtones, ces contraintes sont moins importantes. Des allochtones ayant acquis des terres dans le milieu et qui n'ont pas les mêmes croyances religieuses exploitent partiellement les ressources en eau pour irriguer leur exploitation afin de pallier les déficits hydriques. Ces exploitants représentent environ 12 % de la population des producteurs interrogés.

3.3. Gestion locale des risques agro-climatiques

Les stratégies développées par les producteurs sont principalement le décalage des dates de semis, l'association de cultures et parfois, la micro irrigation. Du fait que l'agriculture soit largement tributaire des précipitations (Adjahossou *et al.*, 2014), les producteurs attendent les premières pluies pour faire le semis ou la plantation. Avec le retard dans l'installation des précipitations, les dates de semis et de plantations sont aussi déplacées.

Certains paysans dont les pratiques socioculturelles le permettent, irriguent à partir des plans et cours d'eau pour compenser le déficit hydrique observé. Ils mettent aussi en place un système de collecte des eaux de précipitations à travers les citernes qui sont utilisées par la suite pour arroser les cultures. Mais les superficies exploitées irriguées sont de petites tailles et sont généralement inférieures à 2 ha. Les cultures bénéficiaires sont généralement les cultures maraîchères. Selon Vila-Valenti (1961), l'apport d'eaux d'irrigation au champ cultivé a été, comme dans tous les pays à longue saison sèche, la formule par excellence pour pallier les conditions climatiques hostiles. Rousset et Arrus, (2006) vont dans le même sens en affirmant que l'irrigation est une solution envisageable pour réduire les effets des changements climatiques. Par ailleurs, 19 % des producteurs font de l'association de cultures pour réduire l'évaporation de l'eau des premiers horizons du sol en créant un microclimat auto entretenu par les espèces végétales en présence. Steiner (1985) ; Adjahossou (2012) et Adjahossou *et al.*, (2013) ont montré que l'association des cultures améliore la productivité

par unité de surface des exploitations. Les associations ananas-manioc, maïs-arachide, maïs-manioc et maïs-ananas sont les plus fréquentes dans la Commune (Adjahossou, 2005).

Conclusion

Les variations climatiques influencent les activités de production agricole dans la commune de Zè qui demeurent encore dépendantes des précipitations. Ceci ne garantit pas toujours la sécurité alimentaire dans la dite Commune. Face à cette situation, les paysans, dans la recherche des moyens efficaces pour juguler ou réduire les impacts négatifs de la péjoration climatique, se trouvent confronter aux influences des pesanteurs socioculturelles qui entravent l'exploitation optimale des ressources en eau disponibles. Ils sont alors, pour la plupart, contraints d'adapter le calendrier agricole au rythme saisonnier réglementé par les niveaux de précipitations. Bien que les ressources en eau soient sous exploitées par les paysans, il importe de bien étudier les stratégies développées afin de juger de leur efficacité.

Bibliographie

- Adjahossou B.S., 2005 : *Biodiversité végétale, facteur de productivité et de durabilité de l'agriculture : Cas du département de l'Atlantique au Bénin*. Thèse de Doctorat Unique. Option : Gestion des Ressources Naturelles, Aménagement du territoire et politique Environnementale. Université d'Abomey-Calavi, 232 p.
- Adjahossou V.N., 2012 : *Intensification des systèmes de cultures traditionnels et préservation de l'environnement en Afrique de l'Ouest : le cas du Bénin*. Thèse de Doctorat unique Option : Environnement Santé Développement, Université d'Abomey-Calavi, 279 p.
- Adjahossou V. N., Adjahossou B. S, Dovoanou F., Adjahossou D. F. et BokoM., 2013 : Evaluation de l'intensité territoriale de deux systèmes de cultures associées modérément fertilisées au Sud-Bénin. *In International journal of biological and chemical sciences*7(6): 2233-2247.
- Adjahossou V. N., Adjahossou B. S., Vissin W. E. Adjahossou D. F., 2014 : Stratégies d'adaptation des paysans du plateau d'Allada (Bénin) aux changements climatiques. In *XXVII^e Colloque de l'Association Internationale de Climatologie : Climat système & interactions, Actes du Colloque*1, 255-259.
- Alia R.W, 2014 : *Mobilisation et gestion des ressources en eau à des fins agricoles dans la commune de Zè*. Mémoire de maîtrise de Géographie, UAC/FLASH/DGAT, 77p.
- Afrique conseil, 2006 : *Monographie de la Commune de Zè*.
- Katerji N., Bruckler L., Debaeke P., 2002 : L'eau, l'agriculture et l'environnement analyse introductive à une réflexion sur la contribution de la recherche agronomique. *Courrier de l'environnement de l'INRA*46, 39-50.
- MEPN, 2010 : Schéma Directeur d'Aménagement Communal (SDAC). Commune de Zè. Projet d'Appui à la Gestion des Forêts Communales (PAGEFCOM), 93p.
- Rousset N. et Arrus R., 2006 : *L'agriculture du Maghreb au défi du changement climatique : Quelles stratégies d'adaptation face à la raréfaction des ressources hydriques ?* Communication à WATMED 3,3e conférence internationale sur les *Ressources en Eau dans le Bassin Méditerranéen*, Tripoli (Liban), 8p.
- Steiner, K.G., 1985 : *Cultures associées dans les petites exploitations agricoles tropicales en particulier en Afrique de l'Ouest*. Eschborn : GTZ, 347 p.
- Vila-Valenti J., 1961 : L'irrigation par nappes fluviales dans le Sud-Est de l'Espagne. *Méditerranée*, 2e année, N°2. 19-35.

LES INONDATIONS REMARQUABLES DANS LE NORD-OUEST DE L'ALGÉRIE (1912-2010)

MEDJERAB A.¹, MENACER Y.², KHEMISSI S.³

Faculté des Sciences de la Terre, de Géographie et de l'Aménagement du Territoire, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, BP.32, El Alia, Bab Ezzouar, 16111, Alger

E-mail : a.medjerab@gmail.com¹; yasmine-menacer3@hotmail.com²; khemissisarah@hotmail.com³

Télécopieur : +213.21.24.79.50. Fax : +213.21.24.79.04

Résumé : Le Nord-ouest de l'Algérie connaît épisodiquement des phénomènes d'inondations qui se manifestent de façon catastrophique. Ces événements à risques portent préjudice à l'Homme, à son milieu et à ses activités. Bien connaître ce type d'événements est un pas vers la bonne gestion du risque. Notre objectif ici est de jeter la lumière sur ce type d'aléas dans une région fortement exposée à ses effets qui peuvent tourner à la catastrophe. L'étude spatiale des pluies mensuelles par l'ACP sans rotation de 102 stations pour la période de 1912 à 2010 a mis en évidence plusieurs années très pluvieuses. Afin de déceler les années qui ont enregistré des inondations catastrophiques, nous avons pris en compte les années qui présentent une forte contribution sur l'axe1 uniquement (+70%), la cartographie automatique des pluies est réalisée par la méthode de krigeage simple. Une étude de cas sera réservée à l'événement remarquable du 26 et 27 novembre 1927.

Mots-clés : Inondations remarquables, ACP, cartographie automatique, Nord-ouest de l'Algérie.

Abstract : Remarkable floods in the North-West of Algeria (1912-2010)

The north-west of Algeria is experiencing episodic flooding phenomena that manifest themselves in a catastrophic way these risky events are harmful to humans, their environment and their activities. Knowing this type of event is a step towards good risk management. Our objective here is to shed light on this type of hazards in a region highly exposed to its effects that can turn to catastrophe. The spatial study of the monthly rainfall by the ACP without rotation of 102 stations for the period from 1912 to 2010 highlighted several very rainy years. In order to detect the years of catastrophic flooding, we have taken into account the years that have a strong contribution on axis 1 only (+ 70%), the automatic rainfall mapping is carried out using the simple kriging method. A case study will be devoted to the remarkable event of 26 and 27 November 1927.

Keywords : Remarkable floods, ACP, automatic mapping, Northwest Algeria.

Introduction

La connaissance des inondations passées est une information nécessaire pour l'aménagement du territoire, la réalisation d'ouvrage de protection, le développement de la conscience et de la culture du risque auprès des populations. L'objectif de ce travail est la mise en place d'une banque de données historique sur les inondations enregistrées dans le nord-ouest de l'Algérie de 1912-2010, afin d'identifier les territoires à risques et évaluer les impacts potentiels sur l'homme et l'environnement.

Ce travail pourra aider les acteurs de la prévention des risques à avoir une meilleure connaissance des aléas et des enjeux. Ils seront en mesure de mieux anticiper des événements similaires, mettant ainsi en application la stratégie nationale de gestion des risques d'inondation en concertation avec les parties prenantes.

Les résultats que nous présentons ici sont le fruit d'une recherche effectuée dans le cadre d'un master en climatologie et risques (Menacer.Y et khemissi S.2016) sous la direction du Pr. Medjerab.

1. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude s'étend sur une superficie de 63.785 km², située dans le Nord-Ouest algérien, entre 34° 15' et 35°30' de latitude nord et entre 2° ouest et 4° de longitude est. Elle est limitée au nord par la Méditerranée, à l'ouest par la frontière Algéro-Marocaine, au sud par les hautes plaines et à l'est par le prolongement du Massif de l'Ouarsenis (Figure1).

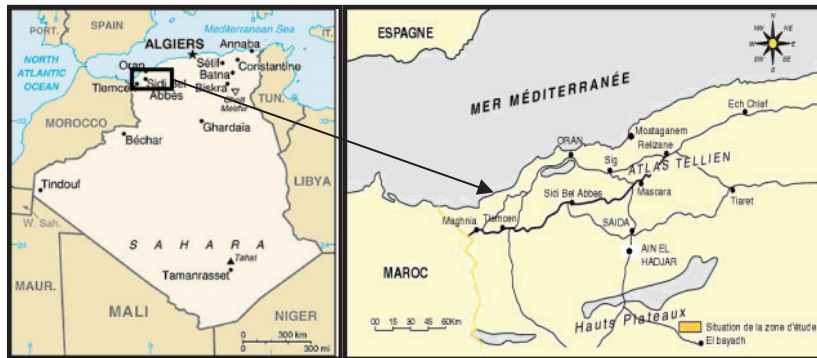


Figure 1. Carte de situation de la zone d'étude.

A l'intérieur, elle est dominée par des chaînes de montagnes : monts de Tlemcen (1465 m), Djebel El-Ahmar et du Fillaoucène (1136 m), Dj. Tessala (1061 m), Kef Sidi-Ammar (1061 m) dans la Massif de l'Ouarsenis (Figure 2).

Le climat est caractérisé par une continentalité assez marquée à cause de la latitude et de la disposition est-ouest des reliefs qui limitent le passage vers l'intérieur de la zone d'étude, des perturbations de l'Atlantique et de la Méditerranée porteuses de pluie. De ce fait, les nuances arides et semi arides du climat y sont largement représentées (Figure 3). Cependant, notre région n'est pas à l'abri des précipitations diluviennes provoquant des inondations à effets parfois catastrophiques.

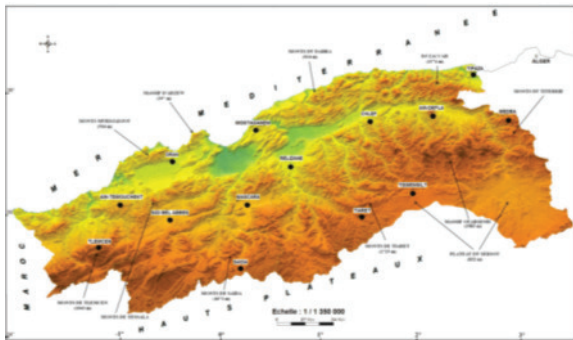


Figure 2. Les zones naturelles de la région d'étude (mosaïque SRTM 90m) (Medjerab.2005).

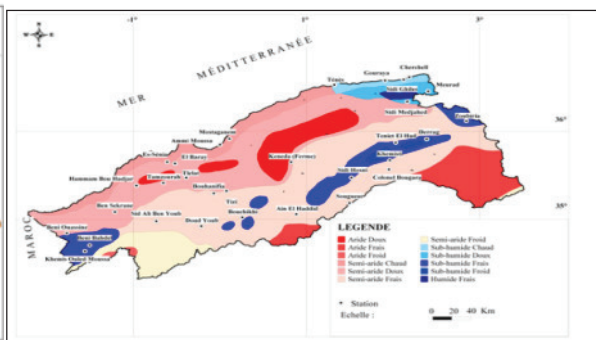


Figure 3. Carte bioclimatique de la zone d'étude. Source : BNEDER.2004

Connaître la fréquence et l'ampleur de ces événements est nécessaire pour la gestion du risque. Plusieurs études ont porté sur les événements pluviométriques extrêmes dans cette région de l'Algérie (entre autres, Médjerab A., 2005, 2007). Dans cette étude, en partant des données pluviométriques, nous focalisons sur les inondations remarquables par leur ampleur et leurs conséquences, qui ont eu lieu pendant une période de presque un siècle (1912-2010). Une étude de cas sera réservée à l'événement particulièrement violent de novembre 1927.

2. Données et méthodes

Deux types de données sont utilisés dans cette étude.

- Les données pluviométriques qui sont fournies par les services de l'Office National de la Météorologie (ONM). La période retenue est celle de 98 ans (année hydrologique). La figure 4 donne la localisation des stations pluviométriques. Nous avons vérifié l'homogénéité des séries par la méthode des doubles masses et nous n'avons retenu que celles ayant donné des résultats satisfaisants. Les séries présentant des mois lacunaires n'ont été comblées que si le nombre des mois manquants ne dépasse pas 3 et si ceux-ci ne sont pas habituellement les plus pluvieux. Après analyse et critique des données pluviométriques annuelles, 102 stations ont

été retenues compte tenu de leur répartition spatiale qui est la mieux représentative de la zone d'étude (Figure 4).

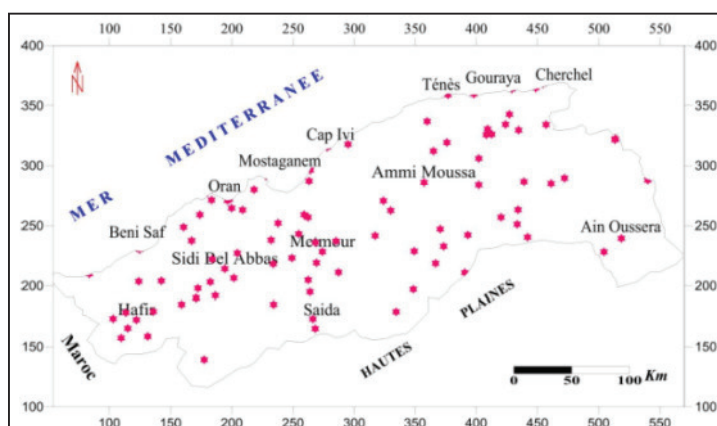


Figure 4. Localisation des stations utilisées dans cette étude.

- Les données relatives aux crues et à leurs conséquences sur l'homme et son milieu ; ces données sont tirées de différentes sources : la presse nationale, les travaux universitaires, les rapports de la Protection Civile et autres informations recueillies sur internet.

Afin de déceler les années, qui ont enregistré des inondations remarquables, nous avons appliqué la méthode de l'Analyse en Composantes Principales sans rotation sur les pluies annuelles de 102 stations. Les années s'organisent autour d'une opposition fondée sur le volume des pluies. On trouve à une extrémité de l'axe les années pluvieuses qui présentent une forte contribution sur l'axe ; dans notre cas nous avons pris seulement les années présentant une forte contribution sur l'axe.1 (+0,70%). Nous avons utilisé cette méthode d'approche parce qu'elle offre un résumé et une vue complète des relations existant entre les variables quantitatives d'une population d'étude, résultats qui n'auraient pas pu être obtenus par d'autres méthodes. La cartographie automatique des pluies est réalisée par la méthode de krigeage simple.

3. Résultats

3.1. Les événements remarquables

L'analyse des pluies annuelles par l'ACP a montré la récurrence des années très pluvieuses.

Tableau.1. Exemples de totaux pluviométriques exceptionnels dans le N-O algérien

Stations	Années	Pluies (mm)	Moyenne (1940-2003)	Ecart (%)
Mascara	1927	1543	533	+189
Souggeur	1917	950	375	+153
Tiaret	2008	873	527	+65.5
Ben Chicao	1948	1000	579	+72.7
Sidi Medjahed	1951	1095	819	+33.6

Le tableau 2 présente la liste des inondations remarquables ayant jalonné notre période d'étude (classées en fonction de leur violence).

L'analyse du tableau 2 montre que la région d'étude a été périodiquement touchée par des inondations suite aux débordements des grands cours d'eau. Ce phénomène se manifeste de plus en plus fréquemment et subitement, dans les grandes villes et les agglomérations urbaines notamment.

Tableau 2. Les inondations remarquables dans le nord-ouest de l'Algérie (1912-2010)

Date de l'évènement	Zones inondées	Caractéristiques et impacts
27 Novembre 1927	-Le Cheliff et sa région -Mostaganem-Mascara	-Plus de 300 morts, -Rupture du barrage Fergougue, dégâts matériels très importants -Crue de 2.300 m ³ /seconde avec pointe de plus de 5.000 m ³ /seconde -Une brèche dans l'ouvrage de 155 m.
25 Février 1917	Sidi Bel Abbas, Mascara, Relizaine	-Crues violentes hauteur 5 mètres -30 décès - Dégâts matériels importants
20 Octobre 1993	Oued- Rhiou, Cheliff, Mostaganem	-22 décès, plusieurs disparus, des dizaines de familles sinistrées
20 Décembre 1930	Oued Cheliff, Ain- Defla, Relizaine	-30 décès, plusieurs maisons détruites
01 Janvier 1951	Tlemcen, Tipaza, Tissemsilt, Médéa	-Plus de 20 décès, et d'importants dégâts matériels
21 Octobre 1969	Tlemcen, Chlef, Tipaza	-Plus de 10 morts et d'importants dégâts
25 au 31 Mars 1974	Sidi Medjahed, Mefrouche, Tlemcen, Médéa, Sabra	-Pluies : 208 mm à Sebra, 323 mm à Mefrouche barrage, 239 mm à Médéa et 247 mm à Tlemcen -Crues : 60m ³ /s aux barrages : Beni-Bahde et 70m ³ /s à Mefrouche - Plus de 40 décès et d'importants dégâts matériels
21 au 22 Décembre 1979	Mostaganem, Mascara, Oran	-Pluie : 79,3 mm en 24 - 20 décès et des dizaines de blessés et d'importants dégâts matériels
25 Octobre 2000	Sidi Bel Abbas, Mascara	-24 décès et des dégâts matériels
24 Octobre 1994	Oued Rhiou, Mascara, Sidi Bel Abbas	-60 décès, et des dizaines de blessés -Les pluies ont durées 10 jours.
23 et 24 Avril 2007	Oued Mekkara, Mascara, Moulay Slissen	-Pluies diluviennes - Crue (débit) : 800m ³ /s - Hauteur d'eau : 9 mètres - 6 morts et dégâts matériel conséquents

Sources : www.shf-lhb.or et Medjerab.2005, 2007

Au total, 11 événements remarquables ont marqué notre période d'étude. Ils ont eu lieu surtout pendant la saison froide. Sur les 11 événements, 3 ont été enregistrés au cours de la première moitié du 20^{ème} siècle (1917, 1927, 1930) et 8 au cours de sa deuxième moitié (événements de 1951, 1969, 1974, 1979, 1993, 1994, 2000 et 2007). Avons-nous ici encore une fois un indice perceptible de l'effet des changements climatiques se traduisant par une fréquence accrue des événements extrêmes ?

Certes les dégâts liés aux inondations ne sont pas fonctions uniquement de la quantité de la pluie. D'autres facteurs interviennent, tels que l'occupation du sol, la qualité des infrastructures, le coefficient de sécurité des barrages. Dans notre série d'événements (tableau 2) l'événement de novembre 1927 reste le plus violent à tous les niveaux.

3.2. L'événement remarquable du 26 et 27 novembre 1927

La carte des pluies de l'année 1927-28 (Figure 5) montre l'importance des totaux pluviométriques de cette année mais avec une répartition contrastée. Les plaines ont reçu des quantités de pluies moins élevées par rapport aux régions montagneuses. Les abatements d'eau atteignent des valeurs maximales dans la partie est: Mascara (1543 mm), Fergoug (1150 mm), Aouf (1085 mm) et Ain Fekan (1047 mm). Ils sont légèrement inférieurs dans la plaine de la Mekerra : Sidi Bel Abbas (590 mm) et au Sud: Ras El Ma (377 mm). Les hauteurs d'eau tombées dans la nuit du 25 au 26 (période de 13 h) sont pour Oued Fergoug 114 mm, Mascara 132 mm, Ain Fekane 113 mm, Sidi Ali 67 mm, et à Oued Taria 45 mm (www.shf-

Ihb.or), une intensité exceptionnelle donc. A Mascara par exemple la hauteur d'eau tombée en 3 jours est près de la moitié de la tranche annuelle moyenne et la hauteur d'eau tombée dans la seule nuit du 25-26, représente pour plusieurs stations près de 1/3 de la moyenne annuelle (Kappes.1998).

L'analyse de la carte du cumul pluviométrique mensuel (Figure 6) montre aussi, que les abats d'eau les plus importants ont touché la partie est : Mascara (220 mm), Fergoug (210 mm). De ce fait, on comprend aisément le bouleversement du régime mensuel provoqué par les pluies du mois de novembre. La saison hivernale de l'année 1927-28 était très pluvieuse. Elle s'est installée très tôt. L'excès pluviométrique enregistré au cours de cette année est dû essentiellement aux précipitations de la saison de l'hiver et plus particulièrement à celles des mois de novembre et décembre

Les pluies diluviennes du 26 et 27 novembre 1927 ont provoquées la rupture du barrage de l'Oued Fergoug, qui comportait un déversoir de 125 mètres de long, et un mur de 316 m. Après la rupture du barrage, une vague immense déferla sur l'agglomération de « Perrégaux » actuellement Mohammedia. Elle entraîna tout sur son passage. Le pont du chemin de fer fut emporté, et les locomotives du dépôt furent balayées et charriées jusqu'au milieu du village. L'atelier des chemins de fer fut détruite (photo.1 et tab.2). Dans la plaine, les routes furent submergées, les vergers arrachés et les récoltes anéanties. Tous les ponts ont été endommagés. Les eaux boueuses qui atteignaient deux mètres de hauteur envahirent la plaine. En ville l'eau s'était retirée, mais la boue et la vase avaient recouvert les rues. Toutes les caves étaient inondées et les rez-de-chaussée recouverts de boue (Kappes.1998)

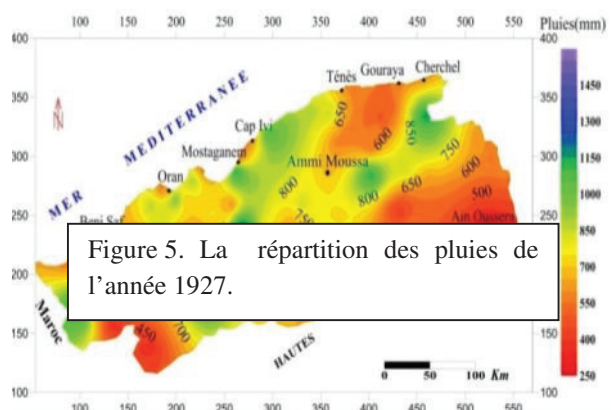


Figure 5. La répartition des pluies de l'année 1927.

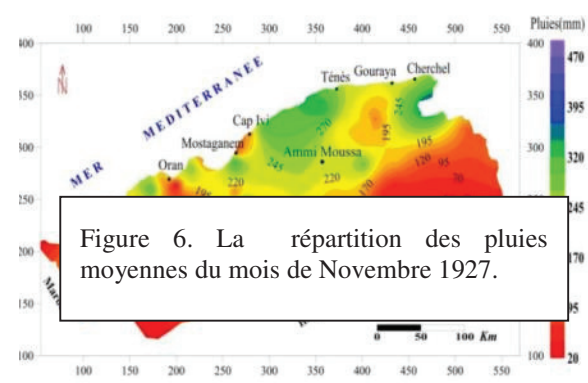


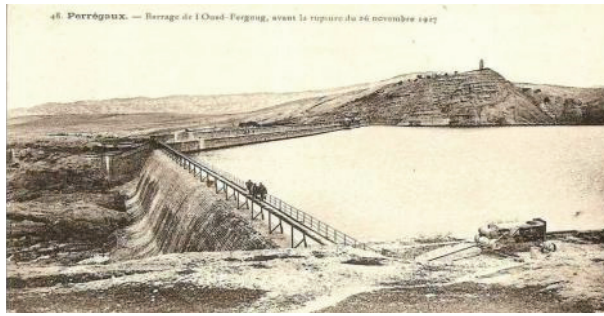
Figure 6. La répartition des pluies moyennes du mois de Novembre 1927.



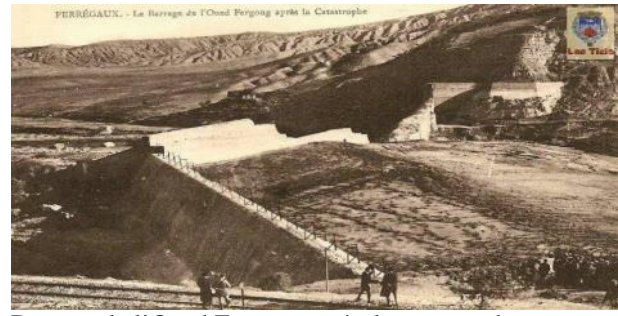
Voie ferrée pendant les inondations



Une locomotive de 50 tonnes renversée par les eaux



Le barrage de l'Oued Fergoug avant la rupture



Barrage de l'Oued Fergoug après la catastrophe

Photos 1. Dégâts des inondations de 1927 (Source http://alger-roi.fr/Alger//perregaux/textes/3_barrage_afin_79.pdf)

Conclusion

Malgré un climat marqué par l'aridité, le nord-ouest algérien est périodiquement affecté par des pluies intenses générant des inondations à conséquences souvent catastrophiques. En moyenne la région enregistre un événement extrême presque tous les 10 ans (11 événements en 98 ans). Cependant sur ce plan, nous avons pu noter une dissymétrie entre la première et la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. Avant 1950, la fréquence observée est d'un événement en moyenne tous les 15 ans. Après cette date, on a enregistré en moyenne un événement tous les 8 ans. Avons-nous ici donc un indice perceptible des effets du changement climatique dans cette région ? Les résultats de cette étude doivent inciter les différentes parties prenantes à bien réfléchir sur une stratégie de gestion des risques liés à ces phénomènes extrêmes dont la fréquence ne semble pas s'amenuiser. Une attention particulière est à accorder à la saison hivernale, puisque tous les événements extrêmes que nous avons recensés au cours de notre période d'étude, ont eu lieu entre les mois de novembre et janvier.

Bibliographie

Bureau National d'Etudes pour le Développement Rural 2004 : *Carte bioclimatique de l'Algérie*.

Kappes A., 1998 : L'inondation de Perrégaux, Témoignage de André Kappes, *L'Algérien* N° 83

Medjerab A. 2005: *Étude pluviométrique de l'Algérie Nord-Occidentale, approchestatistique et cartographie automatique*. Thèse de Doctorat d'État. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene. FSTGAT.1200 p.

MedjerabA.2007 : Les extrêmes pluviométriques dans le Nord-ouest de l'Algérie. *Actes du XX^{ème} Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*,.381-386

Menacer Y. & Khemissi S. 2016 : *Étude des aléas et risques climatiques liées aux fortes pluies (inondations catastrophiques) : cas de Nord-Ouest Algérien*. Mémoire de Master. FSTGAT (USTHB).70 p.

Rapport de la commission technique chargée de déterminer les causes de la rupture du barrage de l'Oued Fergoug (26 Novembre.1927).

www.shf-Ihb.org.

EFFICACITE DES MESURES D'ADAPTATIONS PRISES PAR LES AGRICULTEURS FACE AUX EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE DEPARTEMENT DE LITTORAL AU BENIN

HORTENSIA V. ACACHA-ACAKPO¹, SIRIAC A. SEBOKA²

¹Ecole Nationale d'Economie Appliquée et de Management (ENEAM/UAC), Tèl : +229 97 62 63 68. E-mail : horcacha@yahoo.fr

²Institut de Mathématique et de Science Physique (IMSP/UAC), Tèl : +229 67 86 84 20. E-mail : sebsiriap@gmail.com

Résumé : Il est évident que le changement climatique affecte le bien être des agriculteurs et accroît leur vulnérabilité dans le futur si aucune mesure n'est prise en compte par ces derniers. A cet effet, diverses mesures d'adaptations, comme la diversification des cultures, la modification des dates de semis et de récoltes, l'utilisation de variété de semences et d'engrais, l'irrigation, utilisation des tracteurs etc. sont pratiqués par les agriculteurs. Toutefois, ces différentes mesures n'ont pas les mêmes effets en termes de réduction des effets négatifs du changement climatique sur l'agriculture. Ainsi, notre travail a pour objectif d'évaluer empiriquement l'efficacité de ces mesures ou stratégies d'adaptation sur la performance des exploitations agricoles au Bénin. En utilisant la technique d'estimation des MCO, l'estimation de l'efficacité technique de production des agriculteurs révèle que l'utilisation des semences améliorées et des engrais réduisent l'impact négatif du changement climatique. En outre, l'irrigation des terres et le nombre de sarclage restent des facteurs influents par le coefficient élevé, mais non significatif pour apprécier leurs efficacités.

Mots-clés : Efficacité, agriculteurs, changement climatiques, littoral.

Abstract : Effectiveness of adaptation measures taken by farmers in the field of effects of climate change in the Coastal Department in Benin. It is evident that climate change affects the well being of farmers and increases their vulnerability in the future if no action is taken into account by them. In fact, Various adaptation measures, such as crop diversification, changes in the dates of semi and crops, use of seed and fertilizer varieties, irrigation, use of tractors etc. are carried out by Farmers. However, these different measures have not yet had the same effect in reducing the negative effects of climate change on agriculture. Thus, this paper aims at evaluating empirically assess the effectiveness of these measures or strategies of adaptations on the performance of farms in Benin. Using the estimation technique of MCO, estimating the technical efficiency of farmers' production reveals that the use of improved seeds and fertilizers also reduces the negative impact of climate change. In addition, land irrigation and the number of weeding remain influential factors for which we do not have the necessary statistics to assess their efficiencies.

Keywords : Efficiency, farmers, climate change, coastal.

Introduction

Les changements climatiques constituent aujourd'hui une menace potentiellement majeure pour l'environnement et le développement durable. Selon le rapport n°4 du Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), ils se manifestent à travers diverses tendances telles que la hausse des températures, la montée du niveau des océans, la variabilité accrue de la pluviométrie et des caractéristiques des saisons agricoles, la recrudescence de phénomènes extrêmes comme les sécheresses et les inondations, etc. En effet, les observations au niveau mondial montrent une tendance généralisée à la hausse (de 0,6°C ou -0,2°C) de la température moyenne de surface qui est linéaire et presque deux fois celle de la période allant de 1906 à 2005 par rapport à celle de 1956 à 2005 soit 0,13°C par décennie (CRA, 2010). De plus, le rapport n°7 de l'institution Veolia (2011) sur l'environnement révèle que la production céréalière mondiale baisserait de 5% pour une hausse de +2°C.

Le diagnostic fait sur les effets du changement climatique dans le rapport d'investissement du Bénin (2008) montre que les Zones agro-écologiques du centre et du nord du pays sont vulnérables aux trois risques climatiques majeurs que sont la sécheresse, les pluies tardives et violentes et les inondations. Les vents violents et la chaleur excessive risquent de prendre une grande importance dans certaines localités avec une forte exposition des ressources (bassins versants, l'agriculture vivrière et les ressources en eau) et des groupes sociaux que représente les petits exploitants agricoles, les maraîchers et exploitants agricoles émergents et les

pêcheurs Au sud ces risques climatiques régionaux sont par ordre décroissant d'importance, les inondations, les pluies violentes et tardives et la sécheresse (rapport d'investissement du Bénin, 2008). Les ressources les plus exposées sont l'agriculture vivrière, les terres et la biodiversité et les ressources en eau. Les groupes sociaux les plus exposés sont les petits exploitants agricoles les pêcheurs et les éleveurs (rapport d'investissement du Bénin, 2008).

Face à une telle situation, plusieurs stratégies sont adoptées par les agriculteurs pour contrer les difficultés. Il urge donc d'analyser l'efficacité de ces stratégies afin d'en déduire les plus efficaces.

1. Méthodologie de l'étude

L'analyse présentée concerne l'efficacité des mesures d'adaptation prises par les agriculteurs notamment les maraîchers face aux changements climatiques dans le département du Littoral au Bénin. L'analyse a été effectuée après une collecte de données.

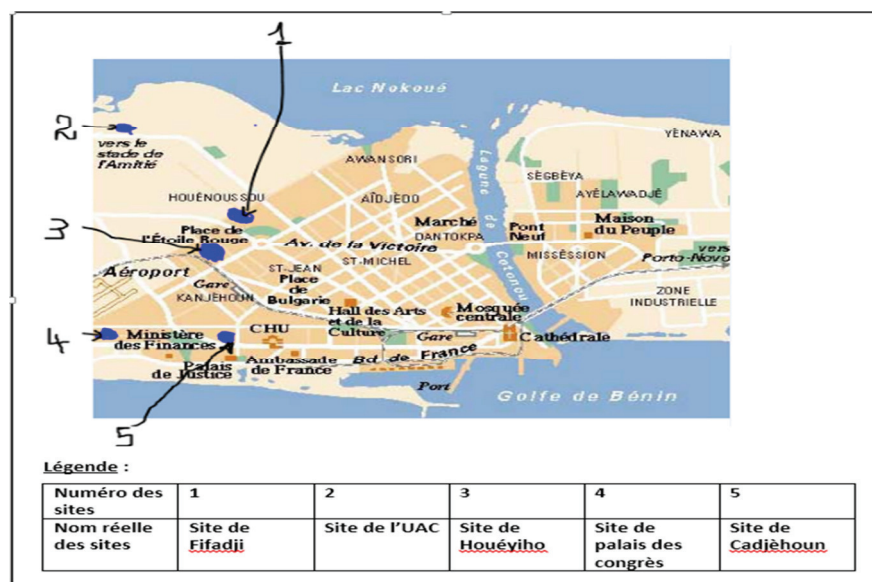
1.1. Echantillonnage

Dans le département du Littoral au Bénin, la culture maraîchère est la plus pratiquée dans le secteur de l'agriculture et reste une activité assez vulnérable aux changements climatiques (MAEP, 2011). La population de cette étude est constituée de tous les maraîchers du département. Le taux de sondage est fixé à 10 %. Les différentes données sur l'échantillon sont présentées dans le tableau I.

Tableau I. Données de l'échantillon

Sites	Site de Houéyiho	Site de Palais des congrès	Site de FIFADJI	Site de Cadjèhoun	Site de l'UAC	Autres Site	Total
Population mère	200	60	20	50	3	40	373
Echantillon	20	6	2	5	1	4	38

Les différents sites sont représentés sur le graphique ci-dessous :



⇒ **Enquête**

Elle a consisté à la collecte des données nécessaires pour l'analyse. Il s'agit des données sur les différentes mesures d'adaptations prises par les maraîchers face aux changements

climatiques. Cette enquête a été effectuée grâce à une fiche d'enquête dont le corps est présenté dans le tableau II.

Tableau II. Modèle de la fiche d'enquête

Cultures	Superficie / planches	semences améliorées	Engrais NPK	Engrais Urée	Engrais organique	Nombre de sarclage	Nombre d'arrosage	Revenu
Tomate								
Piment								
Légumes feuilles								

Les données issues de l'enquête ont été d'abord présentées dans des tableaux à l'aide du logiciel Excel et ensuite importées dans le logiciel Eviews7 pour les régressions.

1.2. Modélisation

La modélisation se résume en deux phases à savoir la phase du choix du modèle et des variables et celle de l'estimation du modèle.

1.2.1. Forme du modèle et choix des variables

Pour la vérification de notre hypothèse nous partons du modèle de Cobb Douglas qui se présente comme suit : $Y = AK^\alpha L^\beta$,

Avec Y la production totale ou le niveau de revenu, K le capital investi et L la quantité de travail utilisée. En appliquant la fonction logarithme à ce modèle, sa forme économétrique nous donne sa forme linéaire qui suit : $y = c + \alpha \ln Li + \beta \ln Ki + \mu_i$

Ou encore : $y = c + \alpha li + \beta ki + \mu_i$

Avec μ_i le terme d'erreur. A partir de ce modèle nous retenons pour notre étude ce qui suit : Y (revenu), K (une combinaison de : engrais, semences améliorées) et L (nombre de sarclage et/ou d'arrosage).

1.2.2. Modèle d'estimation et tests de vérification

Après sélection des variables du modèle d'étude, l'expression du modèle de l'étude (dérivé du modèle de Cobb-Douglas) s'écrit comme suit :

REVENU = C(1) + C(2)*ENGRAIS_NPK + C(3)*ENGRAIS_UREE + C(4)*ENGRAIS_ORGANIQUE + C(5)*NOMBRE_DE_SARCLAGE + μ_i avec μ_i le terme d'erreur.

Sachant que la fertilité des sols peut avoir un effet discriminant sur le niveau des recettes, donc sur le revenu, nous avons introduit dans le modèle deux variables indicatrices (DM) qui permettent de segmenter les terres cultivées en trois groupes et de déterminer si le critère de segmentation est réellement discriminant. Les valeurs prises par la variable Dummy sont :

$$DM_1 = \begin{cases} 1 & \text{s'il y a plus de fertilité par rapport à la moyenne} \\ 0 & \text{si non} \end{cases} \quad \text{et}$$

$$DM_2 = \begin{cases} 1 & \text{s'il y a moins de fertilité par rapport à la moyenne} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

Le graphique des résidus nous a permis de déterminer ces valeurs. Les couples en dessus du corridor sont associés à DM_1 et ceux en dessous de celui-ci sont associés à DM_2 . Ainsi, le modèle d'estimation ci-dessus devient :

$$REVENU = C(1) + C(2)*ENGRAIS_NPK + C(3)*ENGRAIS_UREE + C(4)*ENGRAIS_ORGANIQUE + C(5)*NOMBRE_DE_SARCLAGE + C(5)*D1 + C(6)*D2 + \mu_i$$

avec μ_i le terme d'erreur.

Connaissant, les valeurs des variables expliquées et des variables explicatives du modèle, nous allons estimer les valeurs des coefficients par régression linéaire simple et juger de leur significativité statistique par la méthode des Moindres Carrés Ordinaire (MCO). Le seuil de significativité utilisé est 5 % et un coefficient sera dit significatif lorsque la probabilité qui lui est associée est inférieure à 0,05. Les estimations sont réalisées en coupe instantanée sur des observations de 2016. L'estimation par la méthode des MCO repose sur de fondamentales hypothèses. Pour cela, les tests de validation seront effectués avant d'interpréter les coefficients estimés. C'est ainsi que les tests suivants seront effectués :

- ✓ Test de normalité des résidus : C'est sur ce test que repose la validité des autres tests, par conséquent les erreurs doivent suivre une loi normale pour la validité de ces derniers.
- ✓ Test d'hétéroscédasticité des résidus ;
- ✓ Test d'autocorrélation afin de nous mettre au parfum qu'aucun biais ne s'est glissé dans l'estimation des paramètres.

Les estimations sont faites sous Eviews 7.

2. Résultats et discussion

Les résultats sont présentés ci-dessous.

2.1. Analyse des stratégies d'adoption efficaces pour le piment

L'utilisation des engrais NPK, Urée, et engrais organique est relativement efficace face aux changements climatiques pour la culture de piment dans le Littoral au Bénin. Les résultats sont présentés dans les tableaux III et IV.

Tableau III. Résumé des résultats de l'estimation : cas de Piment

Variable	Coefficient	t-Statistic	Prob.
Constante	1623.258	0.043106	0.9659
ENGRAIS_NPK	3926.324	3.202702	0.0033
ENGRAIS_UREE	6179.001	2.450954	0.0205
ENGRAIS_ORGANIQUE	4013.529	2.296449	0.0291
NOMBRE_DE_SARCLAGE	1881.758	0.330636	0.7433
DM1	163243.5	9.709467	0.0000
DM2	-98988.05	-6.183171	0.0000
R-Squared (R^2)	0.907109		
Pro associé à F	0.000000		

Tableau IV. Tests résiduels sur le modèle de Piment

Test	Probabilité	Décision
Normalité de Jarque-Bera	0,565339	Normalité
Autocorrélation de Breusch-Godfrey	0,4942	Non autocorrélés
Hétéroscédasticité de White	0,1080	Homoscédastiques

Les résultats ainsi obtenus à partir de l'analyse des tableaux III et IV nous permettent d'apprécier la qualité de la régression et la significativité des variables expliquées. En effet le coefficient de détermination $R^2 = 0.907109$ indique que la qualité de la régression du modèle

est satisfaisante. L'efficacité des mesures d'adaptation pour la culture de piment face aux changements climatiques est expliquée à plus de 90 % par les variables explicatives.

Le modèle est globalement significatif (Pro associé à F = 0,0000). L'engrais NPK, engrais Urée, engrais organique sont significatifs au seuil de 5 %. On remarque aussi que les variables indicatrices sont aussi significatives au seuil de 5 %. Seul le nombre de sarclage n'est pas significatif au seuil de 5 %. Une augmentation de 1 % de la quantité d'engrais NPK, Urée, engrais Organique entraîne respectivement une augmentation de 39,26, 61,79 et 40,13 du revenu.

2.2. Analyse des stratégies d'adoption efficaces pour la tomate

De l'analyse des tableaux V et VI, l'utilisation des engrais NPK, et organique est relativement efficace face aux changements climatiques pour la culture de tomate dans le Littoral au Bénin.

Tableau V. Résumé des résultats de l'estimation : cas de Tomate

Variable	Coefficient	t-Statistic	Prob.	R-Squared (R ²)	Pro associé à F
Constante	27076.14	0.635181	0.5298	0.794555	0.000000
ENGRAIS_NPK	6742.687	2.070373	0.0466		
ENGRAIS_ORGANIQUE	8266.683	3.794063	0.0006		
NOMBRE_DE_SARCLAGE	-121.9476	-0.019269	0.9847		
DM1	179674.1	5.748856	0.0000		

Tableau VI. Tests résiduels sur le modèle de Tomate

Test	Probabilité	Décision
Normalité de Jarque-Bera	0,504029	Normalité
Autocorrélation de Breusch-Godfrey	0,5615	Non autocorrélés
Hétéroscédasticité de White	0,2959	Homoscédastiques

L'analyse des tableaux V et VI montre le coefficient de détermination R² = 0.794555 indique que la qualité de la régression du modèle est satisfaisante. L'efficacité des mesures d'adaptation pour la culture de tomate face aux changements climatiques est expliquée à plus de 79 % par les variables explicatives.

Le modèle est globalement significatif (Pro associé à F = 0,0000). L'engrais NPK, engrais organique sont significatifs au seuil de 5%. On remarque aussi que la variable indicatrice est aussi significative au seuil de 5%. Seul le nombre de sarclage n'est pas significatif au seuil de 5%. Une augmentation de 1% de l'engrais NPK, engrais organique entraîne respectivement une augmentation de 67,42 et 82,66 du revenu.

2.3. Analyse des stratégies d'adoption efficaces pour les légumes

L'utilisation des engrais urée, organique et semence améliorée est relativement efficace face aux changements climatiques pour la culture des légumes feuille dans le Littoral au Bénin. Les résultats sont présentés dans les tableaux VII et VIII.

Tableau VII. Résumé des résultats de l'estimation : cas de légumes feuille (chou, shillo, grande morelle, lecture)

Variabiles	Coefficient	t-Statistic	Prob.
Constante	-17467.49	-0.669992	0.5074
ENGRAIS_ORGANIQUE	29346.12	14.19506	0.0000
SEMENCES_AMELIOREES	2687.541	2.749119	0.0095
ENGRAIS_UREE	32884.16	23.91246	0.0000
NOMBRE_D_ARROSAGE_PA_JOU	3722.608	0.678818	0.5018
R-Squared (R ²)	0.992905		
Pro associé à F	0.000000		

Tableau VIII. Tests résiduels sur le modèle de légume feuille

Test	Probabilité	Décision
Normalité de Jarque-Bera	0,504029	Normalité
Autocorrélation de Breusch-Godfrey	0,5615	Non autocorrélés
Hétéroscédasticité de White	0,2959	Homoscédastiques

L'analyse des tableaux VII et VIII montre le coefficient de détermination $R^2 = 0.992905$ indique que la qualité de la régression du modèle est satisfaisante. L'efficacité des mesures d'adaptation pour la culture de tomate face aux changements climatiques est expliquée à plus de 90 % par les variables explicatives.

Le modèle est globalement significatif (Pro associé à $F = 0,0000$). L'engrais Urée, engrais organique et semences améliorées sont significatifs au seuil de 5%. Seul le nombre d'arrosage n'est pas significatif au seuil de 5 %. Une augmentation de 1% de l'engrais organique, de la semence améliorée et de l'engrais urée entraîne respectivement une augmentation de 29,34, 26,87 et 32,88 du revenu.

Conclusion

Au terme de cette étude, il ressort que, l'utilisation des engrais NPK, Urée, organique, l'irrigation, et les semences améliorées sont des mesures qui influent positivement le revenu malgré les changements climatiques. Ces mesures prises par les maraîchers sont donc efficaces face aux changements climatiques dans le département du Littoral au Bénin.

Par ailleurs, Seguin (2010) notifie que l'ajustement de la fertilisation et l'irrigation est une mesure d'adaptation face aux changements climatiques. Aussi, l'utilisation du compost, de la gadoue ou de fientes pour l'amendement des plantes de cultures maraîchères aide au relèvement de la fertilité des sols (Virginie, 1999). Pour d'autres auteurs, il faut opter pour les variétés appropriés, modifier les modes de culture, adapter les calendriers des semis et les méthodes de labour (RAC, 2005). Ces réflexions corroborent nos résultats sur les maraîchers du littoral du Bénin.

Bibliographie

- Assogba V., 1999 : Agriculture urbaine et péri-urbaine à Cotonou. *Bulletin de la revue agronomique*, 23-26
- Bernard S., 2010 : Impact du changement climatique sur l'agriculture et les forêts. *Rayonnement du CNRS*, n° 54 juin 2010, p 43
- Nelson G., 2009 : Changement climatique et agriculture. International food policy, *Research institute*, p 30.
- BENIN, 2008 : *Rapport National d'Investissement. Conférence de haut niveau sur : l'eau pour l'agriculture et l'énergie en Afrique : les défis du changement climatique*. Syrte, Jamahiriya Arabe Libyenne, 15-17 décembre, p 4.
- CRA, 2010 : *Le sahel face aux changements climatiques : un enjeu pour un développement durable*, bulletin mensuel, numéro spécial du comité Inter-état de lutte contre la sécheresse dans le sahel, p 43.
- FAO, 2007: *Climate Change and Food Security*. A Framework for action. Rome, p 24.
- GIEC, 2007 : *Groupe Intergouvernemental sur l'évolution du Climat quatrième rapport*, p 114.
- Institut Veolia 2011 : *Rapport n°7 sur l'environnement*, p 52.
- MAEP, 2011 : *Rapport sur les statistiques agricoles*, p 67.
- RAC F., 2005 : *Agriculture et effet de serre et changement climatique en France*, p 4.

BRISE DE MER ET POLLUTION DE L'AIR À ANNABA EN ÉTÉ (ALGÉRIE ORIENTALE)

SAIHIA A.¹, DAHECH S.²

¹Abdallah Saihia, Université de Annaba, saihia_a@yahoo.fr

²Salem Dahech, université de Sfax, Laboratoire SYFACTE, salem.dahech@gmail.com

Résumé : Les brises (terre, mer, montagne et vallées) expliquent la répartition spatio-temporelle des polluants atmosphériques à Annaba en été. Ces vents thermiques, comme cela a été montré dans d'autres villes littorales en Méditerranée, sont favorables à l'accumulation des particules en suspension (Ps) et du dioxyde de soufre (SO₂). Les valeurs enregistrées par les quatre stations SAMASAFIA durant les mois de juillet, août et septembre pendant les années 2012, 2013 et 2014, montrent des pics nocturnes engendrés par le système en boucle de la brise. En conséquence, des dépassements alarmants ont été enregistrés par rapport aux normes recommandées par l'OMS.

Mots-clés : pollution atmosphérique, Annaba, brise littorale.

Abstract : Summer sea breeze and air pollution in Annaba (Eastern Algeria). Breezes (land, sea, mountains and valleys) explain the spatial and temporal distribution of air pollutants at Annaba in summer. These thermal winds, as has been shown in other littoral cities in the Mediterranean, are favorable for the accumulation of suspended particles (Ps) and sulfur dioxide (SO₂). The values recorded by the four SAMASAFIA stations during the months of July, August and September during the years 2012, 2013 and 2014, show night peaks generated by the loop system of the breeze. As a result, many records exceed the standards recommended by WHO.

Keywords : Atmospheric pollution, Annaba, sea breeze.

Introduction

Dans un contexte de croissance urbaine et économique, le changement de la composition chimique de l'air est inéluctable et devient de plus en plus inquiétant notamment dans les régions où les situations météorologiques favorables aux fortes concentrations de la pollution atmosphérique sont fréquentes comme en Méditerranée. En effet, durant la saison chaude, en Algérie tel que le cas à Annaba, les situations de calme sont fréquentes. Cette agglomération industrialisée, sur le littoral oriental, compte environ 400 000 habitants, (www.populationdata.net).

Dans l'agglomération de Annaba, notamment dans sa partie orientale, la population souffre d'une exposition chronique accrue aux particules en suspension (Ps) et au dioxyde de soufre (SO₂) provenant de l'industrie sidérurgique (ISPAT-ARCELOR-MITAL) et chimique (FERTIAL la société des fertilisants d'Algérie). Ces émissions, encore mal caractérisées pour une grande part, s'ajoutent à celles issues du trafic routier et pourraient avoir des effets sanitaires non négligeables. Parallèlement, la densité urbaine à proximité des sources d'émission ne cesse d'augmenter, ce qui rend la population, souvent sensible, plus exposée au risque de pollution de l'air. Par ailleurs, le manque d'information concernant la qualité de l'air et l'inefficacité du droit de l'environnement et de son application réglementaire sont des facteurs aggravant, également, la vulnérabilité de cette population.

Dans cet article nous nous intéressons aux concentrations des Ps et du SO₂, deux polluants forts présents dans l'atmosphère de l'agglomération d'Annaba. Nous mettons l'accent sur l'impact de la brise de mer, omniprésente en été, sur la concentration de ces deux polluants.

1. Zone d'étude, données et méthodes

L'agglomération d'Annaba (commune d'Annaba et d'Elbouni), au nord-est de l'Algérie (fig.1), compte aujourd'hui environ 400000 habitants contre 250000 en 1970. L'espace urbain est passé de 8km² en 1970 à plus de 30km², uniquement autour du noyau colonial. Actuellement l'urbanisation s'étale linéairement sur 7km dans le sens de la RN 16.

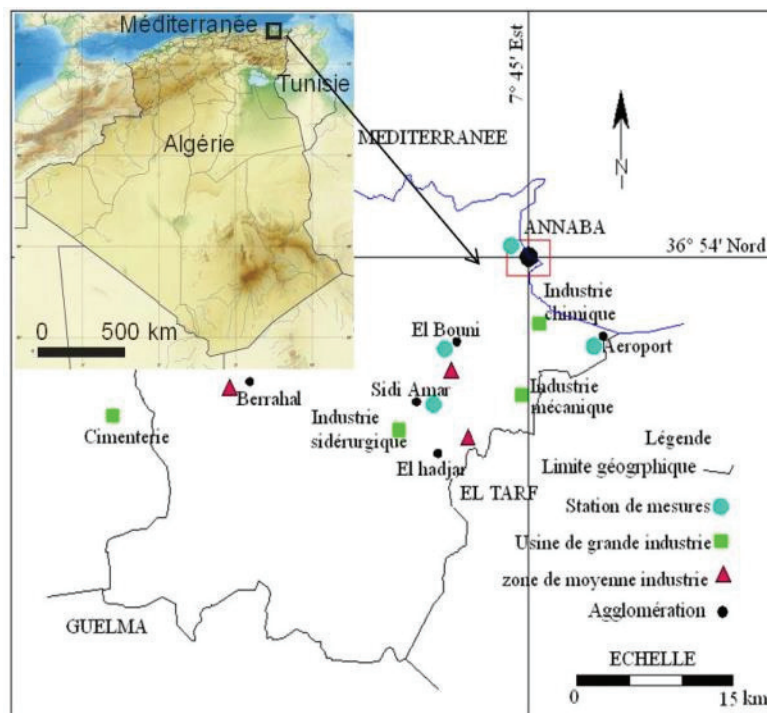


Figure 1. Localisation de la zone d'étude, des stations de mesures de la qualité de l'air et de l'aéroport d'Annaba

L'agglomération d'Annaba et sa région ont connu une forte industrialisation depuis les années 1970 dans différents secteurs. Ainsi, nous y trouvons un important site sidérurgique de 7.5km², un complexe chimique d'engrais phosphatés, azote et ammoniacque de 1.8km², un complexe d'industrie mécanique de 1km², une cimenterie de 0.7km² et de 3 zones industrielles de petites et moyennes industries de différentes spécialités (Pont Bouchet 1.25km², Meboudja 0.55 km²; Berrahal 0.7km²). En outre, le port abrite trois centrales thermiques. Ces industries sont localisées essentiellement à l'est et au sud-est de la wilaya d'Annaba (fig.1) et sont à l'origine de la dégradation de la qualité de l'air (Alioua, 2008 ; Maizi, 2011 ; Fadel, 2011). A la pollution atmosphérique issue des zones industrielles s'ajoutent les émissions du trafic routier. Le comptage des véhicules circulant au centre-ville d'Annaba, en 2016, durant les heures de pointe, révèle des chiffres avoisinant 3000 véhicules/heure, au niveau des carrefours. A noter que les voitures importées en Algérie ne répondent pas aux normes environnementales exigées par l'union européenne (Kerbachi R, 2013).

Annaba est dotée d'un climat méditerranéen dominée par les situations anticycloniques durant une grande partie de l'année. Deux saisons se distinguent : l'été chaud et sec et l'hiver doux et relativement humide (fig. 2). La topographie locale et la proximité de la Méditerranée ont également un impact sur le climat de cette ville. En effet, l'agglomération d'Annaba, occupant une plaine qui s'ouvre au nord sur la Méditerranée, est longée à l'ouest par la montagne Edoughhaute d'environ 1000m et dont l'axe est orienté nord/ sud. Par temps calme, très fréquent en été, des phénomènes aérologiques locaux et à méso-échelle pourraient se déclencher à l'instar des brises thermiques et des inversions thermiques. Ces phénomènes sont favorables aux fortes concentrations des polluants (Simpson, 1997 ; Carrega, 1995 ; Dahech, 2014).

Les données horaires utilisées dans ce travail sont de deux types : les données météorologiques et celles relatives à la qualité de l'air. Dans un premier temps, pour caractériser la brise de mer, nous utilisons les directions et vitesses horaires du vent

enregistrées à l'aérodrome d'Annaba situé à 2 km du rivage. La période retenue s'étend de 1973 à 2016 et comporte les mois de la saison chaude (de juin à septembre) durant laquelle les conditions propices au déclenchement des vents thermiques sont fréquentes. Ces données, téléchargées depuis le site la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), serviront à établir des roses de vent et des anémogrammes montrant l'alternance des brises de mer et de terre.

Dans un deuxième temps, nous utilisons les enregistrements horaires du SO₂ et des Ps, en µg/m³, disponibles pour les mois de juillet, août et septembre durant les années 2012, 2013 et 2014 dans quatre stations du réseau de surveillance de la qualité de l'air « SAMASAFIA ». Le dioxyde de soufre est analysé par fluorescence UV. Les particules sont détectées par un capteur de 1400 TEOM. Les stations retenues sont présentées dans le tableau suivant et localisées dans la fig.1. Il est à noter que les lacunes sont inférieures à 1% aussi bien pour les données météorologiques de l'aéroport que pour celles de la pollution atmosphérique issues des 4 stations.

Tableau 1. Stations de surveillance de la qualité de l'air à Annaba

Station	Coordonnées			Type de station	Distance à la ZI	Distance au centre-ville
	Latitude	Longitude	Altitude (m)			
Aéroport	36°49'32'' N	07°48'06'' E	43	rurale	9 km au NE	12 km au SE
Elbouni	36°51'25'' N	07°44'25'' E	53	urbaine	4 km au NE	5 km au S
Sidi Amar	36°48'47'' N	07°43'14'' E	19	De proximité industrielle	1 km au NO	10 km au SSW
Centre-ville	36°54'16'' N	07°45'29'' E	14	De proximité au trafic	10 km au NE	0 km

Le cycle quotidien moyen et la moyenne journalière des deux polluants sont calculés pour les quatre stations. Les valeurs obtenues sont comparées aux seuils recommandés par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

2. Caractéristiques de la brise littorale à Annaba durant la saison chaude

Les roses de vent enregistrées à 15h et 3h à l'aéroport d'Annaba durant la saison chaude (juin à septembre) donnent une idée sur la fréquence du phénomène des brises littorales. En effet, durant environ 90% des situations, à 15h, un vent modéré souffle de la mer soit du quadrant NE (fig. 2). La nuit, le vent de faible vitesse soufflant du SW correspond à une brise de terre éventuellement renforcée par une brise démontagne. Les situations de calme (vent inférieur à 1 m/s) représentent 10% à 3h alors qu'elles sont rares à 15h.

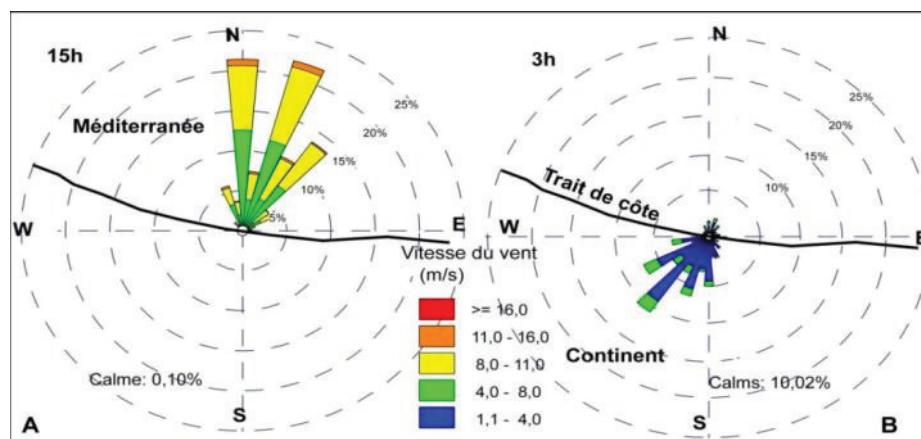


Figure 2. Roses de vent enregistrées à 15h (A) et 3h (B) à l'aérodrome d'Annaba durant la saison chaude (juin à septembre) (données NOAA 1970-2016)

La brise de mer se déclenche vers 9h à l'aérodrome, situé à 2 km de la mer. Son arrivée est attestée par une impulsion de la vitesse du vent et une déviation brusque de sa direction. Au début de l'après-midi la brise souffle du NNE et atteint sa vitesse maximale qui avoisine 8m/s. Elle se couche vers 22h soit environ deux heures après le coucher du soleil. Cette brise de mer est succédée par une légère brise d'une vitesse d'environ 2.5m/s venant du SW. Elle correspond à une brise de terre et/ou à une brise de montagne soufflant jusqu'à 8h (fig. 3).

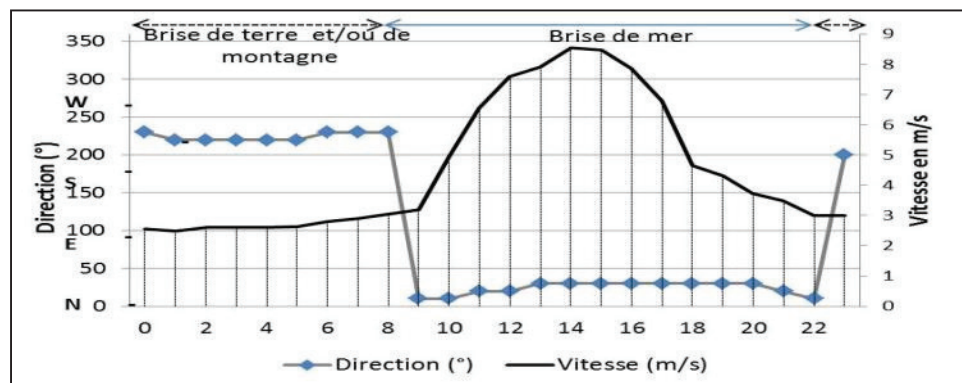


Figure 3. Anémogramme montrant la direction dominante du vent (la variable statistique mode) et sa vitesse moyenne à l'échelle horaire à Annaba durant la saison chaude (juin à septembre) (données NOAA 1970-2016)

3. Concentrations en SO₂ et en Ps à Annaba et impact des brises littorales durant la saison chaude

La quasi-totalité des moyennes journalières (sur 24h) des concentrations en SO₂ dépassent la norme recommandée par l'OMS fixée à 20µg/m³ depuis 2005 (OMS, 2016). Toutefois, des valeurs relativement élevées sont enregistrées par la station du centre-ville où se conjuguent les émissions des sources fixes et mobiles. Les cycles quotidiens moyens des concentrations en SO₂ et en Ps montrent que les pics des premiers sont enregistrés la nuit alors que ceux des poussières sont relevés au milieu de la journée. La station de l'aéroport (fig.4C) enregistre les concentrations les moins élevées puisqu'elle est la plus éloignée des sources d'émission. Dans cette station, il est bien clair que les concentrations en SO₂ sont plus élevées la nuit, durant la saison chaude, quand la station devient sous le vent venant de la zone industrielle El Hadjar.

En phase diurne, la brise de mer assainit l'atmosphère en chassant les polluants car sa vitesse est élevée et la couche limite est épaisse. Cependant, la nuit l'inversion thermique (Dahech, 2014) et la faible vitesse de la brise de terre et de la brise de montagne est en faveur de l'accumulation des polluants gazeux comme le SO₂. La fréquence élevée des vents thermiques durant la saison chaude avec alternance brise de mer/brise de terre crée une circulation fermée contrariant la dispersion des polluants. Ces derniers sont d'autant plus concentrés que le régime de la brise dure plus de jours. En effet, les polluants repoussés par la brise de terre vers la mer reviennent sur la ville et s'ajoutent à ceux créés pendant la journée. Les polluants âgés seront maintenus en altitude et les nouveaux polluants occupent la basse couche (Janoueix-Yacono, 1995). Conséquemment, les observations horaires les plus élevées, telles que celles supérieures au centile 95 sont plus fréquentes la nuit. La figure 5 montre que la brise de terre ramène les polluants de la zone industrielle El Hadjar vers l'aéroport la nuit durant laquelle les concentrations maximales en SO₂ sont enregistrées (fig. 5). Cette zone industrielle abrite le complexe FERTIAL dont la production moyenne annuelle s'élève à 1604000 tonnes de différents produits chimiques (ammoniac, acide nitrique, engrais phosphatés, ammonitrate de calcium; source: complexe FERTIAL) et le complexe ISPAT (ARCELOR- MITAL) qui produit en moyenne annuelle, 650 000 tonnes d'acier.

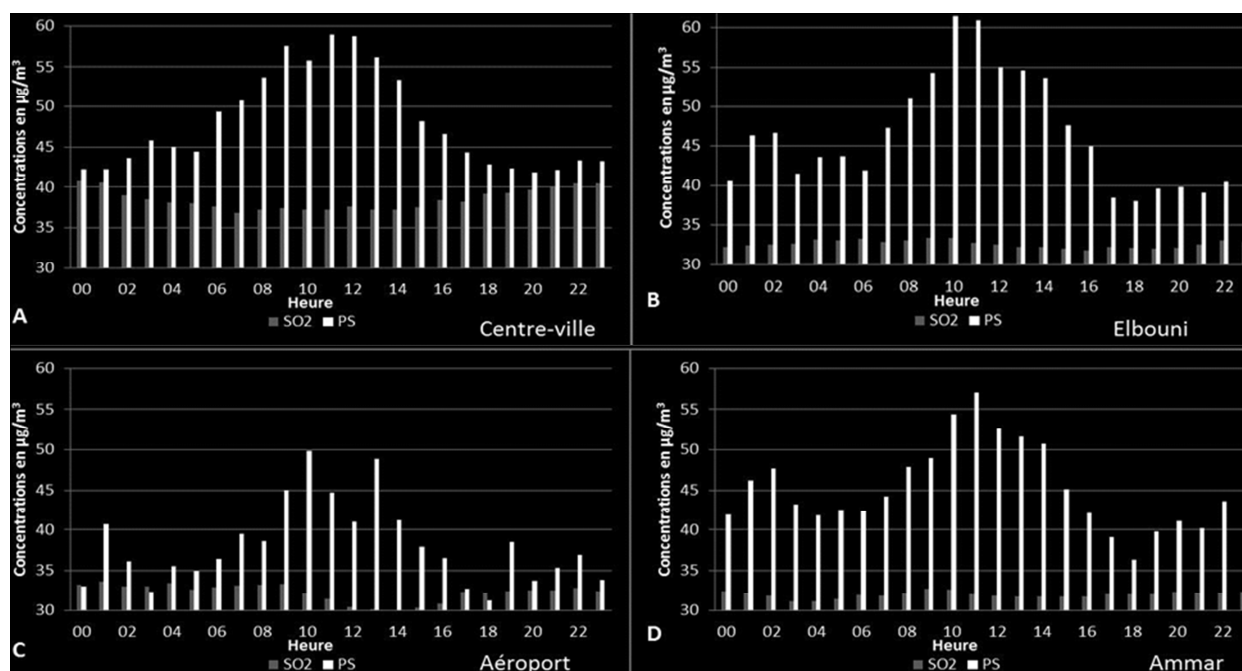
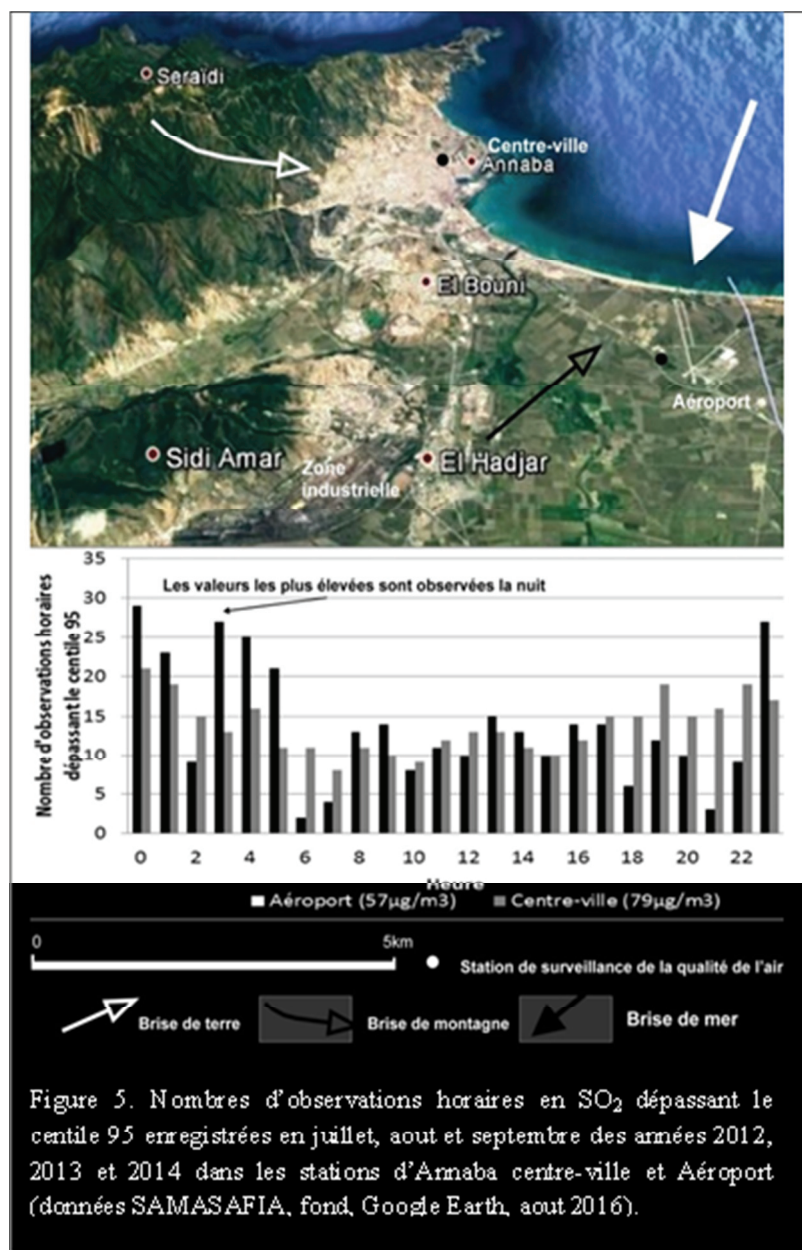


Figure 4. Moyennes horaires des concentrations en en SO₂ et en Ps enregistrées en juillet, aout et septembre des années 2012, 2013 et 2014 dans les quatre stations d'Annaba (données SAMASAFIA).

Toutefois, en milieu de journée, à l'aéroport, la brise de mer peut être accompagnée de valeurs élevées conséquemment au système en boucle de ce vent thermique. Donc, une partie des polluants ramenée vers la mer par la brise de terre et rabattue de nouveau vers le continent par la brise de mer. Le même système explique la hausse des concentrations maximales en SO₂ en phase nocturne au centre-ville. En effet, la brise de montagne réachemine les polluants balayés par la brise de mer ou la brise de vallée en phase diurne. Leurs concentrations s'élèvent la nuit à cause de la faible dispersion verticale suite aux inversions thermiques comme prouvé dans d'autres régions autour de la Méditerranée (Dahech *et al.*, 2006 ; Carrega *et al.*, 2010 ; El-Melki, 2010).

Conclusion

Les concentrations en SO₂ et Ps enregistrées sur la période estivale des trois années 2012, 2013 et 2014 par les stations SAMASAFI ont révélé la fréquence des valeurs supérieures aux valeurs guides de l'OMS. L'ampleur de cette pollution résulte de la mauvaise combustion des carburants d'un parc automobile dépourvu souvent de pots catalytiques. Cette pollution résulte aussi des grands sites industriels très proches des centres urbains. Les conditions météorologiques ont joué un rôle de premier plan dans la distribution de ces polluants. Il a été démontré que les situations de brises, dominantes en été, sont responsables de la variation spatiotemporelle des deux polluants étudiés. Des concentrations élevées sont observées la nuit aussi bien dans le centre-ville qu'en périphérie à cause de la brise de terre et/ ou de montagne qui achemine les polluants vers les stations de mesures dans des conditions atmosphériques stables. Les améliorations de la qualité de l'air représentent une priorité importante pour la population. Elle passe essentiellement par une compréhension de l'impact de l'aérogologie du site sur la répartition spatiotemporelle des polluants atmosphériques. Ce fait permettrait aux autorités de prendre des mesures et aviser la population en cas de dépassement des seuils prescrits par la réglementation. Une étude publiée par Kerbach (2013) a estimé le coût des dommages causés par la pollution atmosphérique en Algérie à 600 millions de dollars chaque année.



Bibliographie

Alioua A., Maizi N., Maizi L., Tahar A., 2008 : Characterization of pollution by the NO₂ using twinning of a biological and physicochemical technique in the area of Annaba (Algeria). *Pollution Atmosphérique*, n° 200, 325-332.

Carrega P, Martin N Et Yohia C., 2010: Ozone et flux d'air dans l'arrière-pays niçois : mesures et modélisation à fine échelle spatiale durant un épisode estival (le 10 août 2006). *Pollution atmosphérique* n° 207, 297-313.

Carrega P., 1995 : *Approches de la structure thermique et hygrométrique d'une brise de mer par mesures aéroportées*. Climat pollution atmosphérique santé, Hommage à Gisèle Escourrou, groupement de recherche climat et santé, Dijon, 165-175.

Dahech S., 2014 : Brise de mer et dégradation de la qualité de l'air dans les villes industrielles : cas de Tunis, Sfax et Gabes. *In Contribution à l'étude des aléas et risques climatiques en Tunisie*, 26 p.

El-Melki T., 2010 : Brises du littoral et variation des concentrations polluées dans le grand Tunis : cas des banlieues de la Manouba et d'El Ghazela. *23ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Rennes, 203-208.

Janoueix-Yacono D., 1995 : *Rapport entre la brise de mer ou de lac, la structure de la couche limite planétaire et pollution atmosphérique sur les plaines littorales urbanisées*. In. Climat pollution atmosphérique santé, Hommage à Gisèle Escourrou, groupement de recherche climat et santé, Dijon, 177-201.

Kerbachi R. CEDER. Comment maîtriser la pollution atmosphérique en Algérie. Portail Algérien des Energies Renouvelables, 2013.

Kerbachi R., Boughedaoui M., Kerchich Y. et Joumard R., 2000 : Evaluation de la pollution de l'air par les PM₁₀ à Alger. International Symposium Transport and Air Pollution, Avignon, France, 2000, 90-102.

Kerbachi R., Boughedaoui M., Koutai N. et Lakki T., 1998 : La pollution par les oxydes d'azote et l'ozone dans la ville d'Alger. *Pollution Atmosphérique*, 158, 89-101.

Maizi N., Alioua A. et Tahar A., 2012 : Jumelage des bio-indicateurs et d'un réseau de surveillance de la qualité de l'air pour la détection de la pollution par le SO₂ dans la région de Annaba (Algérie) *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 16(2), 149-158 .

Simpson JE., 1994: *Sea breeze, and local winds*. Cambridge Univ. Press: Cambridge. 234 p.

Webographie : <http://gis.ncdc.noaa.gov>

<http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/fr/>; www.populationdata.net

L'INDICE DE CHALEUR POUR EVALUER LA PENIBILITÉ DU CLIMAT DES VILLES LITTORALES DES ZONES ARIDES : LE CAS DE DJIBOUTI

AYEH M-N.¹, SOUGUEH L-A.²

¹ Université de Djibouti, Bd Clemenceau, moustapha_nour_ayeh@univ.edu.dj

² Agence nationale de la météorologie, route de l'aéroport, libansou@gmail.com

Résumé – Pour voir comment les températures affectent les populations d'une ville aride, il nous a fallu évaluer la température « ressentie » en utilisant l'**indice de chaleur** établi par Robert G. Steadman de 1979, indice résultant de la combinaison de l'humidité relative et de la température. Pour faire nos calculs, nous avons utilisé les données de l'agence nationale de la météorologie de Djibouti. Sur la période étudiée (2006-2014), nous avons pu obtenir les valeurs quotidiennes pour l'humidité relative relevée à 6 h et 15 h, et pour les températures (les maximales et les minimales) à la station de Djibouti-aérodrome. Les résultats pointent l'extrême pénibilité du climat de Djibouti-ville. La récurrence de valeurs supérieures à 40, seuil pour caractériser une situation de danger pour l'être humain, est remarquable à midi (pour le maximum de température) puisque l'on observe sur plus de 53 % des jours de l'année pour la période étudiée. Cette valeur est dépassée aussi à 6 h matin sur 122 journées.

Mots-Clés : température, indice de chaleur, désert côtier.

Abstract - To see how temperatures affect the populations of an arid city, we had to evaluate the temperature "felt" using the heat index established by Robert G. Steadman of 1979, an index resulting from the combination of relative humidity and temperature. To make our calculations, we used the data of the national agency of the meteorology of Djibouti. Over the period studied (2006-2014), we were able to obtain the daily values for the relative humidity measured at 6:00 and 15:00, and for the temperatures (maximum and minimum) at the Djibouti-aerodrome station. The results point out the extreme difficulty of the Djibouti-city climate. The recurrence of values greater than 40, the threshold for characterizing a situation of danger to humans, is remarkable at noon (for the maximum temperature) since over 53% of the days of the year are observed for the period studied. This value is also exceeded at 6 am on 122 days

Keywords : temperature, heat index, coastal desert.

Introduction

Les bulletins météorologiques donnent systématiquement les températures de l'air relevées sous abri, pour éviter l'influence de l'environnement qui pourrait fausser les résultats. Les individus sont loin d'être mis sous les mêmes conditions qu'un thermomètre. Leurs ressenties dépendent non seulement de la chaleur ambiante mais aussi du vent et de l'humidité, et même du rapport de chacun à son milieu. Cette température dite ressentie en tant que sensation est de toute évidence difficile à quantifier. Elle est néanmoins essentielle à estimer particulièrement dans les zones connaissant des températures extrêmes (comme les déserts chauds ou les zones polaires).

En effet, dans les zones froides, le vent accentue la sensation de froid, c'est le refroidissement éolien (Siple-Passel, 1945). Dans les zones chaudes une forte humidité aggrave les effets de la chaleur. Dans un air sec, la sueur du corps s'évapore vite entraînant une sensation de fraîcheur. Ce processus naturel de régulation thermique est perturbé par une forte humidité. Dès lors, s'intéresser uniquement à une période caniculaire (trois jours consécutifs de forte chaleur sans baisse notable de la température le soir) semble un peu réducteur, surtout pour une station comme Djibouti qui est conforme à cette définition la moitié de l'année. Pour enrichir cette information et pointer la pénibilité du climat, l'estimation de la température ressentie est un bon indicateur. Plusieurs formules permettent de calculer la température ressentie: celle de l'humidex et celle de l'indice de chaleur, Température au thermomètre-globe mouillé. Les Canadiens ont mis au point (J. M.

Masterton⁴³ et F. A. Richardson, 1979) l'indice *humidex* qui corrèle le point de rosée et température, comme outil d'estimation de la température ressentie. Les Américains utilisent l'indice de chaleur qui remplace le point de rosée par l'humidité relative à la suite des travaux de Robert Steadman en 1979.

La météorologie nationale djiboutienne ne s'intéresse qu'à la température de l'air (relevée à la station de Djibouti aérodrome). Pourtant, étant située sur un désert côtier, la forte humidité pose problème, particulièrement sur les températures ressenties. Sur une simulation utilisant la température humide, pour les villes du Golfe (Jeremy S. Pal et Elfatih A.B. Eltahir, MIT, 2015), la température ressentie dépasse largement les seuils de danger extrême, rendant la région inhabitable à l'horizon 2100. Aucune simulation conjuguant température et humidité n'est faite sur le cas Djibouti, qui même si elle n'est pas aux mêmes latitudes des villes du golfe persique, présente des situations climatiques et géographiques similaires. La question qui se pose, est de toute évidence de déterminer le niveau de pénibilité atteint par cette station.

1. Données et méthode

1.1. Les données

Pour faire les calculs, nous avons eu accès aux données de l'agence nationale de la météorologie de Djibouti (ANM). Elles concernent les relevés d'humidité relative et de température.

Et pour chaque jour, l'humidité est relevée tous les trois heures (soit 8 valeurs par jour), ce qui nous donne une trentaine de milliers de valeurs. Nous avons pu avoir 90% des données d'humidité sur les dix ans concernés. Car certaines années (2013/2014) présentent quelques lacunes pour des rares mois dans les relevés statistiques. Nous pouvons donc comparer rigoureusement 8 années (voire 9 années, si l'on tient compte uniquement des périodes estivales), et avoir une indication de tendances pour deux autres.

L'ANM publie trois sortes de température, (à savoir la température moyenne, la température maximale et la minimale). En théorie, sur la période 2006-2015, 10956 valeurs sont disponibles.

La seule difficulté reste la corrélation de deux valeurs, températures et humidité, puisque nous ne pouvons savoir le moment exact où la température est la plus basse ou la plus élevée avec l'humidité de ce moment-là. Pour surmonter cette difficulté, nous allons corréler les températures minimales et l'humidité relative à 6 heures (en considérant que c'est le moment le plus frais de la journée) pour voir l'indice le plus faible possible et son évolution. D'un autre côté, les températures maximales et l'humidité à 15 heures (même si les températures les plus élevées sont enregistrées de 13h à 15h), sont utilisées pour estimer l'indice maximale. Nous construisons donc l'indice de chaleur au moment le plus frais de la journée et au moment le plus chaud.

1.2. Méthode : L'indice de chaleur

Pour étudier la pénibilité de la chaleur à Djibouti, il nous faut utiliser un indice permettant de calculer la température ressentie. Nous allons nous appuyer sur l'indice de chaleur (HI). Cet indice est le pendant américain de l'humidex canadien. A première vue, la formule paraît

⁴³Masterson, J. et Richardson F. A (1945), *Humidex, A Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity*, Downsview, Ontario, Environnement Canada, 1979, 45 p.

compliquée (Tableau 9). Néanmoins, elle ne nécessite que deux paramètres (la température et l'humidité relative), qui sont régulièrement relevées à la station météo locale. Les données de base étant disponibles sous forme numérique, nous avons automatisée facilement les calculs de l'indice de chaleur avec un tableur (type Excel). Ces deux caractéristiques (la disponibilité de deux paramètres indispensables, que l'on dira primaires, sans être obligé de recourir à des paramètres dérivés, et l'automatisation immédiate) expliquent le choix de l'indice de chaleur dans une toute première analyse de la pénibilité de la chaleur djiboutienne.

Tableau 9. équation de l'indice de chaleur

$H_i = c_1 + c_2T + c_3R + c_4TR + c_5T^2 + c_6R^2 + c_7T^2R + c_8TR^2 + c_9T^2R^2$ <p>ou T = la température en Fahrenheit</p> <p>R = l'humidité relative</p>		
c ₁	-42.379	c ₅ = -6.83783. 10 ⁻³
c ₂	2.04901523	c ₆ = -5.481717.10 ⁻²
c ₃	10.14333127	c ₇ = 1.22874.10 ⁻³
c ₄	-0.22475541	c ₈ = -1.99.10 ⁻⁶

https://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_de_chaleur

En tant qu'indice, ce n'est pas à proprement parler une température et ne peut en toute logique comporter une unité. Par simplification, son assimilation à une température (puisque'il se veut comme indicateur du ressenti des humains face à la chaleur), est souvent courante. Ainsi improprement, il arrive d'exprimer cet indice en degré.

1.2.1. Interprétation de l'indice de chaleur

L'interprétation des résultats est assez simple. L'inconfort débute dès que l'indice dépasse les 27 et devient extrême lorsque l'indice dépasse les 32. Au-delà de 40, les personnes sont en situation de danger. Nous pouvons donc déterminer le nombre de jours (pour chaque année et chaque mois) où les habitants de la ville se trouvent en situation de danger physique. Nous allons donc analyser la récurrence des valeurs supérieures à 40 et 50.

2. L'espace géographique concerné

Djibouti est située à 11°35' de latitudeN, soit à mi-chemin entre le tropique du cancer (23°27) et l'équateur (0°). Son climat devrait être donc un climat de type tropical avec alternance d'une saison humide centrée sur l'été (grâce à l'arrivée du CIT⁴⁴) et d'une saison sèche avec descente à ces latitudes des anticyclones subtropicaux qui bloquent les ascendances de l'air.

⁴⁴CIT : convergence intertropicale

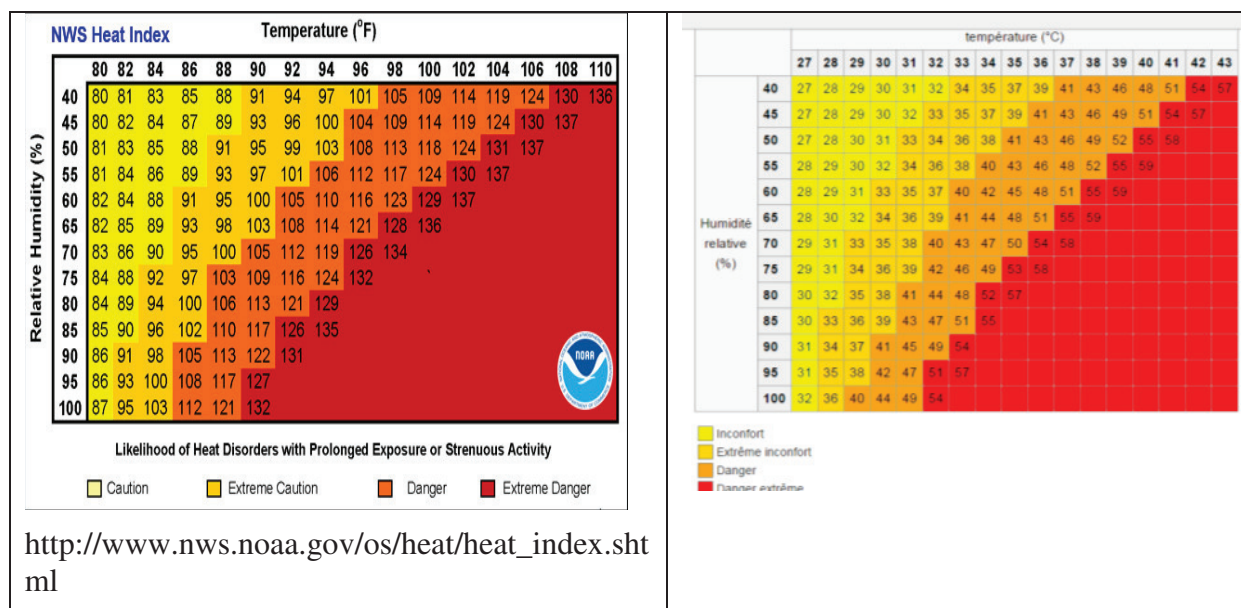


Figure 13. détermination et interprétation de l'indice de chaleur (NOAA)

Pourtant, nous notons avec l'analyse du diagramme ombro-thermique de la station Djibouti (Figure 14), que l'aridité de Djibouti est permanente. La station connaît donc une anomalie climatique. Cette anomalie s'explique par la position de celle-ci par rapport au relief tourmenté de la région et à la direction des flux. En effet, la mousson d'été venant du sud-ouest, est d'abord confrontée au volumineux massif éthiopien, une fois franchis, les masses d'air sont sèches et connaissent une forte subsidence par effet de foehn. Ce qui les éloigne encore plus du point de rosée. Les masses d'air atteignant Djibouti en été ne peuvent plus donner des précipitations. L'aridité de la saison fraîche (due à l'arrivée des anticyclones subtropicaux) se poursuit donc en été du fait que la station se trouve dans une situation d'abri par rapport à la mousson d'été d'Afrique de l'Est.

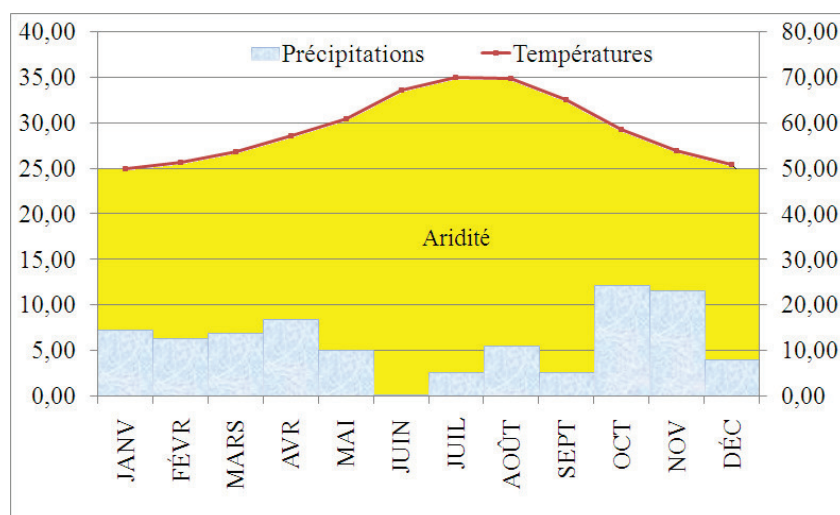


Figure 14. Diagramme ombrothermique de Djibouti ville 2015

3. Résultats et interprétations

3.1. Des températures toujours élevées

En tant que station d'une zone aride, les températures (sous-abri) se caractérisent déjà par des valeurs élevées. Par exemple, la température moyenne de la station était de 30,7 en 2006,

et 30,4 en 2015 et la température maximale moyenne de 34,3°C à la même année. Sur l'ensemble de la période (2006-2015), nous avons obtenu un indice de chaleur moyen de 36,4. Le HI moyen est systématiquement plus élevé que la température maximale (Figure 15).

Sur les quarante dernières années ces moyennes ont eu tendance à augmenter. En effet, depuis les années 80, cette moyenne annuelle est systématiquement supérieure à 30 °C, valeur quasi exceptionnelle auparavant. Cette tendance à la hausse s'observe aussi pour les autres moyennes tant maximales que minimales.

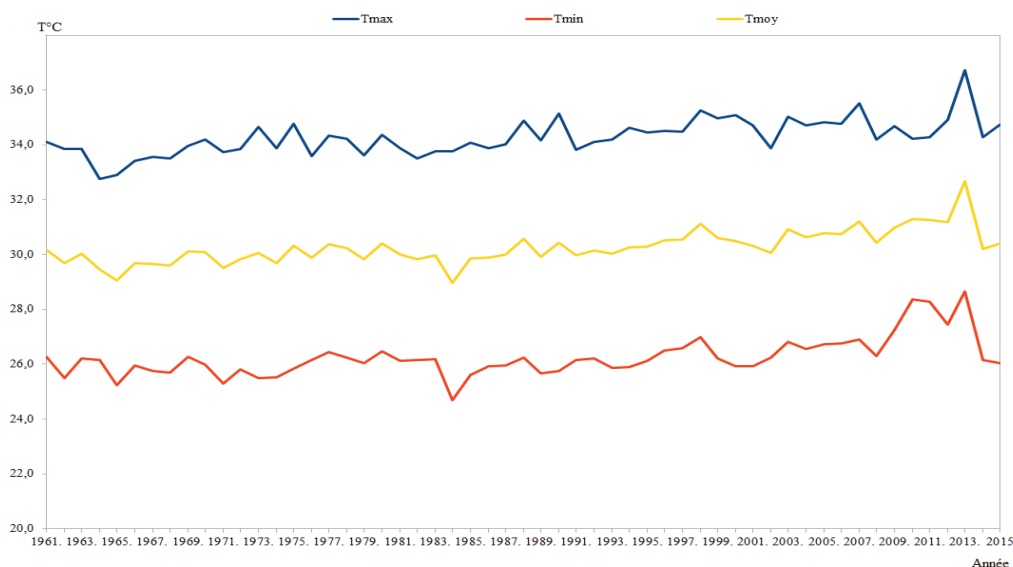


Figure 15. évolution des températures à Djibouti 1961-2015

3.2. Indice de chaleur et température réelle

Deux informations peuvent être tirées et analysées. La première est d'étudier l'écart entre la température ressentie et la température réelle (même si ce calcul est impropre). Et la seconde information est d'analyser les seuils de danger définis par les auteurs. Nous nous sommes intéressés d'abord aux différences existant entre la température réelle et la température ressentie et l'indice de chaleur. Pour toutes années, l'indice de chaleur est supérieur à la température réelle, est positif montrant la forte humidité que connaît la ville. Si l'on fait la moyenne de cette différence pour chaque année, nous remarquons qu'elle a tendance à croître. La moyenne de cette différence sur les dix ans étudiés reste toujours positive, qu'elle soit calculée à 6 h ou à 15 h (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Cette différence est systématiquement positive à 15 h (effet sauna cumulatif) et à 6h pour l'essentiel de l'année.

Tableau 10. moyenne de la différence entre HI et T° de 2006 à 2011

	2006'	2007'	2008'	2009	2010'	2011	2012'	2013*	2014*	2015
à 6h	1,57	1,75	2,32	2,35	3,52	3,08	2,6	3,85	1,9	2,46
à 15 h	7,76	6,75	7,77	7,80	8,31	7,29	9,19	9,14	7,95	8,99

* valeurs manquantes

Si nous passons de l'échelle annuelle à l'échelle mensuelle, les écarts (entre l'indice de chaleur et la température) les plus importants ne se situent pas pourtant durant les mois considérés comme les plus chauds (Figure 16). La chaleur a pour effet de faire baisser l'humidité relative, en outre les vents d'ouest très secs (effet de foehn) contribuent, à partir de

juillet, à cet affaiblissement de l'humidité relative. Toutes les années ont le même profil que l'année 2006 utilisée comme exemple.

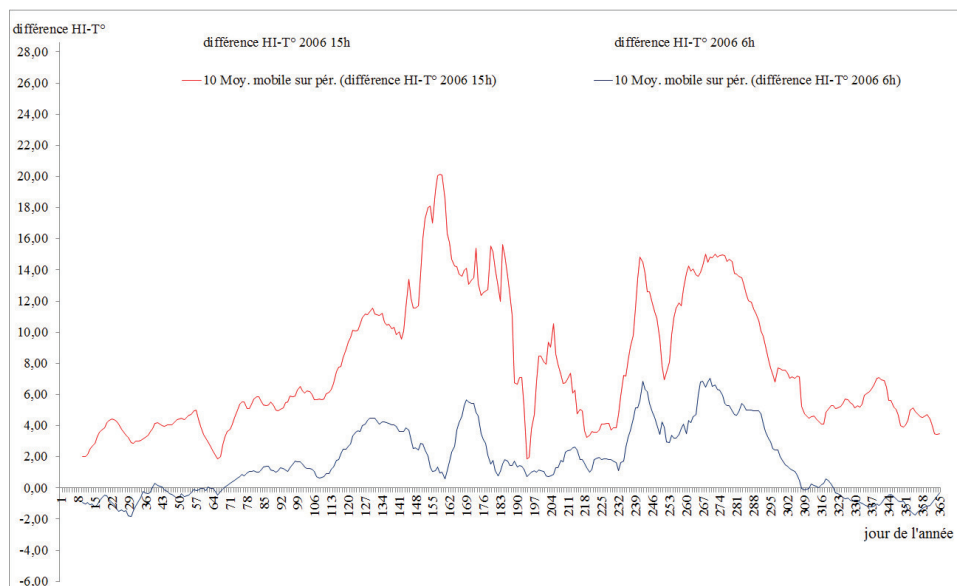


Figure 16. différence entre température ressentie et température réelle sur les 365 jours de l'année

3.3. Evolution de l'indice de chaleur durant la période étudiée

Trois pistes sont à explorer : la situation de danger pour 6 h, la situation de danger pour 15 h et les valeurs absolues enregistrées pendant la période concernée.

L'indice de chaleur à 6 h est fondamentale. Il indique si les effets de la chaleur de la matinée se sont estompés durant la nuit permettant ainsi aux corps de récupérer. Le nombre de jours où le HI est supérieur à 40, montrant une forte persistance de la chaleur durant la nuit s'accroît de 2006-2015. Au début de la période, un nombre marginal de jours (1,6 % des jours de l'année), est concerné par ces valeurs, 40 et plus. Mais ce nombre a lui aussi tendance à augmenter au point d'intéresser plus de 5% des jours, sauf pour l'année 2015 (qui enregistre pourtant, la valeur la plus élevée de la décennie) à la fin de notre période d'étude. Cette dérive à la hausse du HI s'accompagne aussi de l'augmentation des valeurs indiquant l'extrême danger (HI>50). Au cours des six premières années, aucune journée ne présente une valeur supérieure à 50 à 6h du matin. Pour les quatre autres années, 7 journées ont dépassé ce seuil.

A 15 h, c'est presque la norme que l'indice de chaleur dépasse les 40, puisque 53,4% des jours sont affectés. 86,9% de ces jours se retrouvent entre mai et septembre, mois où tous les jours sans exceptions enregistrent des indices mettant en danger les populations. En poussant l'analyse plus loin, nous remarquons que 18,6% des journées présentent un HI supérieur à 50. Ces journées se concentrent toujours sur 5 mois (de mai à septembre). Les mois de juin et de septembre sont considérés les plus pénibles avec respectivement 60% et 58 % des jours touchés par la chaleur extrême.

Les maximums absolus atteints par l'indice de chaleur nous apportent une autre information. Là aussi, des valeurs exceptionnelles s'observent. Nous avons systématiquement des indices au-dessus de 80 pour les maximales, sans dégager une tendance à la baisse ou à la hausse sur la période d'étude. Par contre, les minimales absolues de l'indice glissent au contraire vers le haut. Autour de 40 avant 2010, elle passe à 50, puis à plus de 60 (Figure 17).

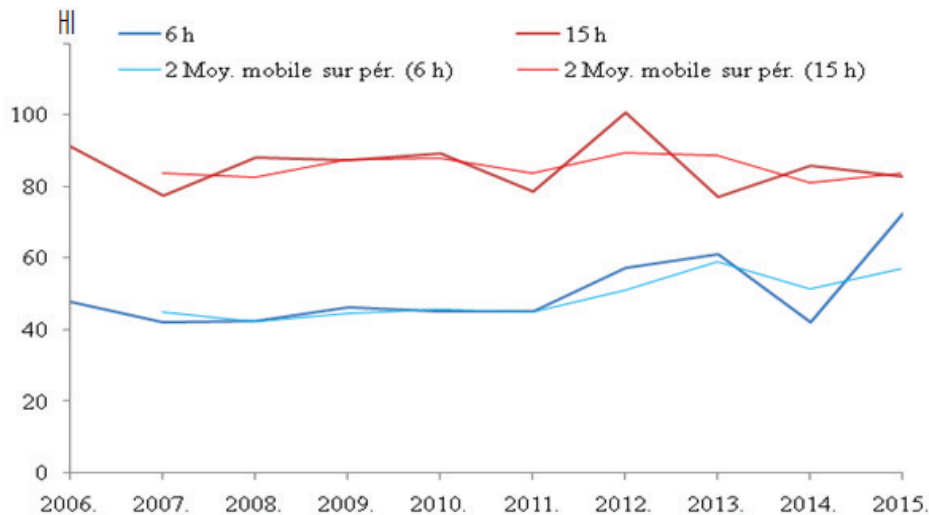


Figure 17. maximums absolus du HI à 6h et à 15h de 2006-2015

Conclusion

Nous savions que les températures sous-abri de la ville de Djibouti montrent déjà des valeurs caniculaires surtout de mai à septembre et que le processus de réchauffement tirait vers le haut ces températures. Cette situation nous a interrogés sur les dangers que peuvent représenter ces températures. Pour cela, le calcul de l'indice de chaleur pointe l'extrême dangerosité de la chaleur dans la ville. Le seuil de 50 (à partir duquel les personnes humaines sont en danger) est dépassé plus de 26 fois au cours des 10 dernières années. Les valeurs de l'indice tendent aussi à s'accroître surtout celle enregistrée à 6h confirmant l'effet de serre important induit par l'humidité durant la nuit. Il manque à confirmer sur le long terme, au moins 30 ans les tendances que nous avons relevées dans cette courte étude.

Ces données sont préoccupantes, d'autant plus que contrairement aux villes du golfe, une petite minorité (1/4 de la population) à accès à la climatisation. Une analyse à Chicago, a montré que un HI de 48 (température maximale 40°C) en juillet 95 s'est traduit par une augmentation de la mortalité. Cette valeur de 48 est régulièrement dépassée à la station de Djibouti. Le climat est donc bien délétère dans cette ville une bonne partie de l'année à ce stade, deux questions se présentent. La première interrogation concerne les tendances à long terme de l'indice de chaleur (au moins sur 30 ans). Avec le réchauffement climatique, quelle est l'augmentation de l'indice sur le long terme ? Deuxièmement, comme nous l'avons démontré, la station de Djibouti enregistre des indices mettant en danger les populations (HI>40), pourra-t-on donc déterminer le nombre de décès engendré par de telles valeurs saisonnièrement et même mensuellement ?

Bibliographie

Lamarre D. et Pagney P, 1999 : *Climats et sociétés*. Editions A. Colin, 272 p.

Steadman, Robert G, 1979 : The Assessment of Sultriness. Part I: A Temperature-Humidity Index Based on Human Physiology and Clothing Science. *Journal of Applied Meteorology*, **18**, 861-873.

Banque mondiale, 2011 : *Evaluation des Dommages, Pertes et Besoins Suite à la Sécheresse*, GFDRR, Djibouti 126 p.

G. Brooke Anderson, Michelle L. Bell, and Roger D. Peng, 2013 : Methods to Calculate the Heat Index as an Exposure Metric in Environmental Health Research, *Environmental Health Perspectives*, Vol 121, **10**, 1111-1119.

Pal Jeremy S. et Elfatih A. B. Eltahir, 2015 : Future temperature in southwest Asia projected to exceed a threshold for human adaptability, *Nature Climate Change*, **6**, 197–200

Marcella, M. P., Eltahir, E. A. B, 2011 : Modeling the summertime climate of Southwest Asia: The role of land surface processes in shaping the climate of semiarid regions. *J. Clim*, **25**, 704–719

Masterson, J. et Richardson F. A., 1945 : *Humidex, A Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity*, Downsview, Ontario, Environnement Canada, 1979, 45 p.

Sherwooda Steven et HuberbMatthew, 2014 : An adaptability limit to climate change due to heat stress, *Pnas*, vol. 107 no. **21**, 9552–9555

Siple P.A. and Passel C.F, 1945 : Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures. *Proc Amer Philosoph Soc*, **89**, 177-199

Whitman Steven, 1997 : Mortality in Chicago Attributed to the July1995 Heat Wave, *American Journal for public heath*, Vol 97, **9**, 1115-1118

Webographie

http://www.nws.noaa.gov/os/heat/heat_index.shtml

https://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_de_chaleur

RACCOURCISSEMENT DE LA LONGUEUR DE LA SAISON AGRICOLE ET STRATEGIES D'ADAPTATION DES PRODUCTEURS AGRICOLES DANS LA MAGGIA (BIRNI N' KONNI/CENTRE-SUD DU NIGER)

ABDOU BAGNA A.^{1,2}, ISSIAKA H.², MOUNKAILA H.², MANI R.³, YAMBA B.¹

¹Département de Géographie, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger, BP 418, Email : amadoubagna@gmail.com ; byamba@refer.ne

²Département de Géographie, Ecole Normale Supérieure, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger, Email : haouaissiaka@yahoo.fr ; zada@refer.ne

³Département de Production Animale, Université de Tahoua, Niger., Email : biralou@yahoo.fr

ésumé : Le climat actuel du centre-sud du Niger est caractérisé par un raccourcissement de la saison agricole et une hausse des températures. Cette variabilité climatique a des effets notables sur le développement et la pratique des activités agricoles. Ce travail a pour objectif d'analyser l'impact du dérèglement climatique actuel sur la longueur de la saison agricole dans le secteur géographique de la Maggia et d'inventorier les stratégies de résilience développées par les agriculteurs dans ce contexte de crise climatique. La démarche méthodologique combine la recherche documentaire ainsi que le traitement et l'analyse statistique des données pluviométriques de 1950 à 2012 et des informations issues d'investigations sur le terrain à l'aide des logiciels XLstat et Sphinx V5. Cette analyse montre que par rapport à la période 1951-1970, la période 1971-2012 est caractérisée par un raccourcissement de la saison agricole. Face à cette perturbation sur la saison agricole, les agriculteurs optent pour diverses solutions d'adaptation. Ainsi, afin de compenser les déficits céréaliers nés des campagnes agricoles pluviales et lutter contre l'insécurité alimentaire, ils ont recours aux cultures irriguées sur des parcelles aménagées le long de la vallée.

Mots-clés : Maggia, longueur de saison agricole, raccourcissement, stratégie d'adaptation, changement climatique.

Abstract : The current climate of south-central Niger is characterized by a shortening of the agricultural season and a rise in temperatures. This climate variability has significant effects on the development and practice of agricultural activities. The aim of this work is to analyze the impact of the current climatic disturbance on the length of the agricultural season in the Maggia geographical area and to inventory the resilience strategies developed by farmers in this context of climate crisis. The methodological approach combines documentary research as well as statistical processing and analysis of rainfall data from 1950 to 2012 and information from field investigations using XLstat and Sphinx V5 softwares. This analysis shows that compared with the period 1951-1970, the period 1971-2012 is characterized by a shortening of the agricultural season. Due to this disruption in the agricultural season, farmers are opting for a variety of adaptation options. In order to compensate for cereal deficits arising from rainfed agricultural campaigns and to combat food insecurity, they use irrigated crops on plots along the valley.

Keywords : Maggia, length of agricultural season, shortening, adaptation strategy, climate change.

Introduction

Le secteur agricole est le plus affecté par les tendances et la variabilité climatiques dans les pays en développement de l'Afrique de l'Ouest. Dans ces régions où l'agriculture vivrière pluviale occupe une place prépondérante dans les économies nationales, les populations, majoritairement rurales, exploitent des systèmes de production (agriculture, élevage) dont les performances sont étroitement soumises au climat (Bazzaz et Sombroek, 1996).

Sujet d'actualité, ce dérèglement climatique a fait l'objet de nombreuses investigations au Niger (Sivakumar, 1988 et 1992 ; Le Barbé et Lebel, 1997 ; Ozer et al., 2005 ; Ali et Lebel, 2009 ; Sarr et Traoré, 2010).

Des études et travaux (Traoré et al., 2000 ; Nicholson, 2005 ; Somé, 2006 ; Nyong et al., 2007) ont montré que les véritables débuts du phénomène remontent au début des années 1970 comme dans la plupart des pays sahéliens. Il se manifeste par un déficit pluviométrique, une forte variabilité spatio-temporelle des précipitations et des pauses pluviométriques de plus en plus marquées. Cette variabilité accrue des pluies tend à rendre de plus en plus difficile la planification agricole.

L'espace agropastoral de la Maggia à Birni N'Konni est un exemple de zone touchée par le changement climatique. Il est important d'améliorer et de mettre à jour la veille agroclimatique de cet espace avec des applications agrométéorologiques qui tiennent compte non seulement des paramètres clés de la saison des pluies, des perceptions paysannes, mais aussi du niveau de significativité statistique des changements observés et de leurs impacts sur l'agriculture.

L'objectif de cette étude est de caractériser la longueur de la saison des pluies et les risques climatiques agroclimatiques associés à son évolution à partir des données de pluies observées dans la Maggia.

1. Localisation de la zone d'étude

Le département de Birni N'Konni est situé au centre-sud du Niger en pleine vallée de la Maggia avec les coordonnées géographiques suivantes : 13°46'30'' et 13°57'00'' de latitude Nord, et 4°58'30'' et 5°19'30'' de longitude Est (figure 1). Il compte une population évaluée à plus de 149.414 habitants (RGP/H, 2012). Les sites d'investigation (collecte des données de terrain) pour cette étude sont les villages de Cerrassa Mangou et Goune, situés tous les deux dans une région très propice aux activités agricoles.

Sur le plan climatique, la commune urbaine de Konni s'inscrit dans la zone sud-sahélienne où le régime pluviométrique est globalement unimodal avec une seule saison des pluies de 2 à 3 mois de juillet à septembre et une moyenne de pluies comprise entre 400 et 500 mm par an (Agrhymet, 2013).

Les activités agricoles occupent plus de 90% de la population. Les principales cultures vivrières sont le mil, le sorgho, le maïs, l'arachide, le niébé, etc., auxquelles s'ajoutent celles dites irriguées et de rente (oignon, patate douce, manioc, tomate, courge, etc.) (PDC Konni, 2015).

2. Données et méthodes d'analyse

2.1. Les données utilisées

Les données utilisées pour l'analyse climatique sont d'une part les hauteurs journalières de pluie de 1951 à 2012 de la station synoptique de Birni N'Konni recueillies auprès de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) et du Centre Régional Agrhymet (CRA) de Niamey, et d'autre part les informations sur les perceptions et les stratégies d'adaptation à la variabilité et au changement climatiques recueillies au cours d'une enquête de terrain menée auprès d'un échantillon homogène de 98 producteurs agricoles. La taille de l'échantillon a été déterminée à partir de la formule de Le Maux (2008) :

$$n = \frac{t^2 \times p(1-p)}{e^2} \quad (\text{Eq. 1})$$

où n représente la taille d'échantillon requise, $t = 1,96$ la valeur de la variable aléatoire normale pour un risque α égal à 0,05, p la proportion estimative de la population présentant la caractéristique étudiée (75%), et e la marge d'erreur traditionnellement fixée à 0,05.

2.2. Méthodes et outils

Pour l'estimation des indicateurs agroclimatiques (date de démarrage : D_d , date de fin : D_f et longueur de la saison agricole : LSA), plusieurs approches statistiques sont utilisées dont le test de Pettitt (1979) pour la détection des ruptures et celui de Kendall (1975) pour la

significativité des tendances. Pour l'identification des années normales et celles dites déficitaires, les anomalies de pluie standardisées sont calculées selon la formule suivante (Lamb, 1982) :

$$I = \frac{X_i - \bar{X}}{\delta} \quad (\text{Eq. 2})$$

Où I représente l'indice d'anomalie de Lamb, X_i la pluviométrie de l'année i , \bar{X} la moyenne de la série et δ l'écart-type de la série.

Les dates de démarrage (Dd) sont déterminées en considérant la date à partir du 1^{er} mai où un cumul pluviométrique de 20 mm est obtenu en un ou trois jours consécutifs, sans qu'il soit suivi d'une séquence sèche de plus de 20 jours dans les trente jours qui suivent. Ce critère est une légère modification de celui de Sivakumar (1988).

Les dates de fin de saison (Df) sont calculées à l'aide du critère de Stern et *al.* (2006) qui définit Df comme la date après le 1^{er} septembre à laquelle la consommation en eau des plantes et la demande climatique épuisent la réserve hydrique du sol jusqu'en dessous du seuil de 0,05 mm, en utilisant des évapotranspirations journalières de 5 mm. Enfin, la longueur de la saison agricole (LSA) est la différence entre la date de fin et celle de démarrage de la saison des pluies.

Instat+ a servi au traitement des données climatiques à savoir les paramètres clés de la saison agricole (date de démarrage, date de fin et longueur de la saison agricole), et Sphinx V5 à la collecte et l'analyse des données d'enquête de terrain.

3. Présentation des résultats

3.1. Une longueur de la saison agricole de plus en plus courte

L'analyse des anomalies de pluie standardisées (Lamb, 1982 ; Eq. 2) révèle deux phases bien distinctes de la longueur de la saison agricole : une phase dite normale, de 1951-1970, et une phase dite déficitaire, de 1971 à 2012 (figure 2).

Les résultats du test de Pettitt (1979) montrent qu'à la veille de la grande sécheresse des années 1970 (Ali et Lebel, 2009), on assiste à une diminution drastique de la longueur de la saison agricole qui passe de 81 jours à 63 jours en moyenne soit une diminution de 18 jours (figure 3). L'application du test de Kendall (1975) avec P-value = 0,002 indique que cette tendance à la baisse est significative au seuil de 0,05. Par ailleurs, on observe une grande variabilité interannuelle avec des valeurs très en deçà de la moyenne comme en 1973 et 1983.

La diminution de longueur de la saison agricole mise en exergue ici à travers l'analyse des données observées, et confirmée par les perceptions paysannes dans la partie du centre-sud du Niger, est en accord avec les résultats des travaux de Gbetibouo (2009). Cette instabilité constitue un milieu agricole sahélien une contrainte majeure pour les paysans, notamment pour ce qui est du bouclage du cycle des cultures, et par conséquent du bon déroulement de la campagne agricole (Odekunle, 2004).

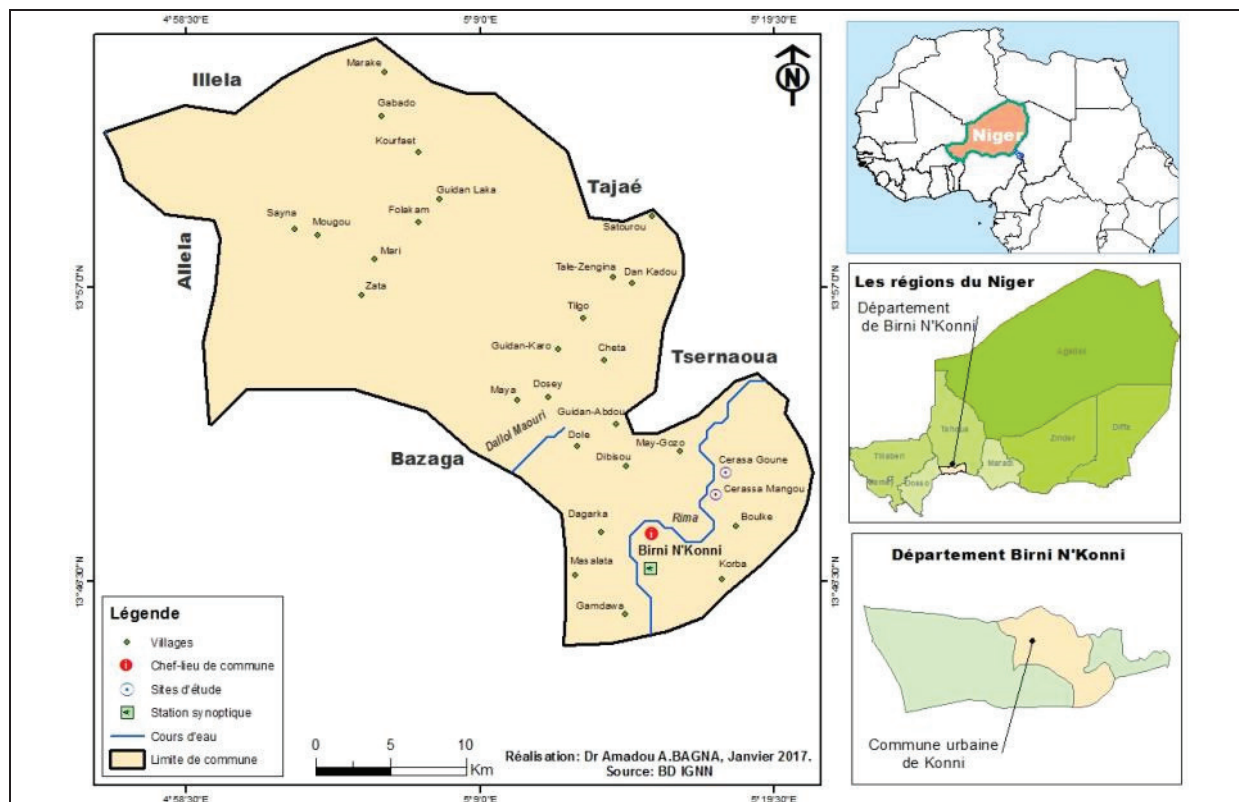


Figure 1. Situation géographique du secteur de l'étude et localisation des sites étudiés

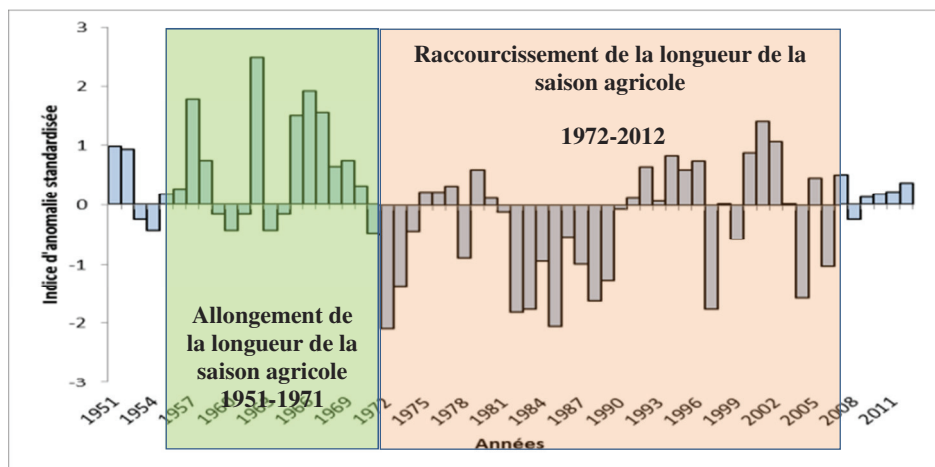


Figure 2. Anomalies de pluie standardisées(Lamb, 1982) à Birni N'Konni

3.2. Des stratégies d'adaptation innovantes

Pour faire face au raccourcissement de la saison agricole, les producteurs se voient contraints d'utiliser des variétés précoces locales telles que « *Ba Angouré* » pour le mil, et « *Dan Madougou* » et « *Barta Tadjé* » pour le niébé, respectivement à 12% et 24% (figure 4), et de développer dans les bas-fonds, les cultures de décrues de patate douce et de tomate (Photos 1 et 2). Cette pratique d'adaptation par l'utilisation des variétés culturales plus adaptées au contexte climatique actuel de plus en plus erratique est une stratégie qui prend davantage de place dans la plupart des agrosystèmes sahéliens (Yabi *et al.*, 2010).

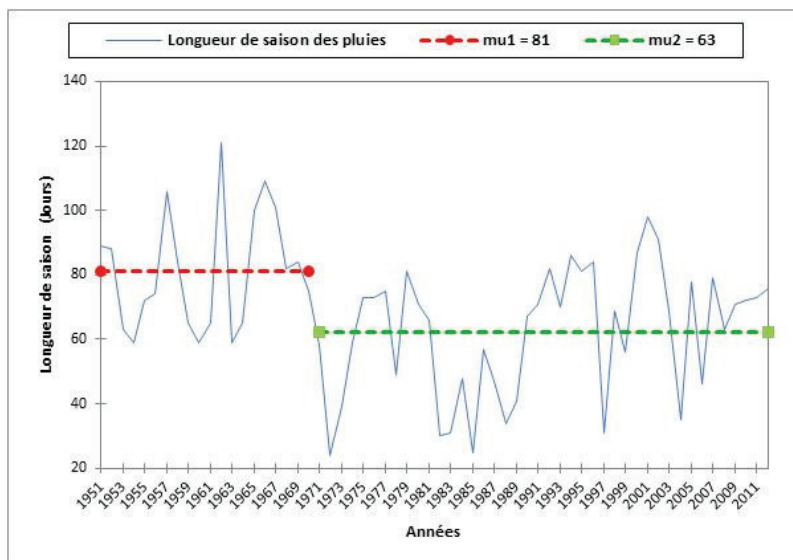


Figure 3. Evolution de la longueur de saison des pluies à Birni N’Konni

NB : "mu1" = Moyenne 1951-1970 ; "mu2" = Moyenne 1971-2012

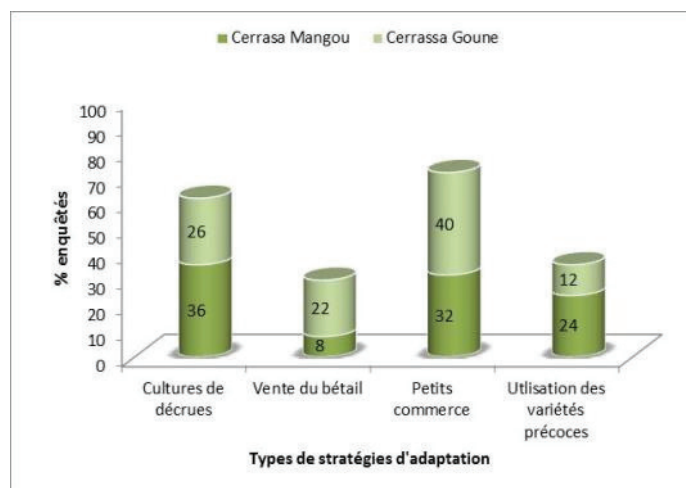


Figure 4. Principales stratégies de gestion des risques climatiques



Photo 1. Cultures de patate à Cerrasa Mangou
Clichés : A. BAGNA A., 2016



Photo 2. Parcelle de tomate à Cerrasa Mangou

Conclusion

L'étude des paramètres clés de la saison agricole est une question primordiale en climatologie notamment « sahéenne » où les productions agricoles pluviales sont liées directement à la pluviométrie dans une région marquée par une longue saison sèche. Le

dérèglement de la longueur de la saison agricole, la plus importante des composantes pluviométriques, impacte le développement phénologique des cultures, donc la base des activités socio-économiques du monde rural. Il rend aléatoire la qualité agronomique de la saison des pluies, d'une année à l'autre.

Dans cette étude, il a été mis en évidence, à partir des données de pluies observées en station, la non-stationnarité des séries climatiques et la caractérisation des grandes tendances agrométéorologiques de la zone d'étude.

Les conclusions confirment la difficulté de la planification agricole en milieu paysan au Sahel, d'où les stratégies d'adaptation développées à cet effet.

Anticiper les fluctuations climatiques est d'une grande utilité pour l'agriculture sahélienne. D'un côté les aléas climatiques peuvent être responsables de déficits de production mais de l'autre la maîtrise et l'anticipation de la variabilité climatique peuvent être un premier pas vers une augmentation de la production et la concrétisation de la sécurité alimentaire.

Bibliographie

- Agrhymet, 2013 : Bulletin spécial sur la mise à jour des prévisions des caractéristiques agro-hydro-climatiques de la campagne d'hivernage 2013 en Afrique de l'Ouest, au Tchad et au Cameroun. Bulletin Spécial (No 03). Niamey : Centre régional Agrhymet.
- Ali A., Lebel T., 2009 : Recent trends in the Central and Western Sahel rainfall regime (1990-2007). *Journal of Hydrology*, **375** (1-2), 52-64.
- Gbetibouo, G.A., 2009 : *Understanding farmer's perceptions and Adaptations to Climate Change and variability. The case of the Limpopo Basin, South Africa*. IFPRI Discussion Paper 00849. 41 p.
- Kendall M. G., 1975 : Rank correlation measures, Charles Griffin, London: 202.
- Lamb P. J., 1982 : On the persistence of sub-saharian drought, *Nature*, 46-47 p.
- Le Maux B., 2008 : *Statistiques, logiciel et enquête, le choix de l'échantillon : produire et préparer les variables*. 21 p.
- Le Barbé L., Lebel T., 1997 : Rainfall climatology of the Hapex-Sahel region during the years 1950-1990. *J. Hydrol.* 188/189, 43-73.
- Nicholson S.E., 2005 : On the question of the recovery of the rains in the West African Sahel. *Journal of Arid Environment*, **63**, 615-641.
- Nyong, A., Adesina, F., OsmanElasha., B., 2007. The value of indigenous knowledge in climate change mitigation and adaptation strategies in the African sahel. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12, 787- 797. doi:10.1007/s11027-007-9099-0.
- Odekunle T.O., 2004 : Rainfall and the length of the growing season in Nigeria. *Int. J. Climatol.* Vol. **24**, 467-479.
- Ozer P. Bodart, C., Tychon B., 2005 : Analyse climatique de la région de Gouré, Niger oriental : récentes modifications et impacts environnementaux. Cybergeo: *Revue européenne de Géographie*, **308**, 1-24.
- PDC, 2015 : Plan de Développement Communal de Konni 2015-2019, 186 p.
- Pettitt A. N., 1979 : A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl. Statist.* **28**(2), 126-135.
- Sarr B., et Traoré S., 2010 : Impacts des changements climatiques sur quelques secteurs clés : Impacts sur l'agriculture. *Bulletin mensuel, numéro spécial : le Sahel face aux changements climatiques (Enjeux pour un développement durable)*, Centre Régional Agrhymet, CILSS, Niamey, 21-24.
- Sivakumar, M.V.K., 1988 : Predicting rainy season potential from the onset of rains in Southern Sahelian and Sudanian climatic zones of West Africa. *Agricultural and Forest Meteorology*, **42**, 295-305.
- Sivakumar M.V.K., Guèye M., 1992 : *Analyse de la longueur de la saison culturale en fonction de la date de début des pluies au Sénégal*. Compte rendu des travaux n°2, 41.
- Somé L., 2006 : *Stratégies d'adaptation à la variabilité et aux changements climatiques dans le domaine de l'agriculture et de la sécurité alimentaire en Afrique de l'Ouest : le cas du Burkina Faso*. INERA, Ouagadougou, 46.
- Stern R., Rijks D., Dale I., Knock, J., 2006 : *Instat Climatic Guide*. Reading (UK): University of Reading.
- Traoré SB., Reyniers FN., Vaksmann M., Kouressy M., Yattara K., Yoroté A., 2000 : Adaptation à la sécheresse des écotypes locaux de sorgho du Mali. *Sécheresse*, **11**, 227-237.
- Yabi I., Afouda F., Zakari S., Boko M., 2012 : Quelques caractéristiques de la seconde saison agricole dans le département des collines (Bénin). *XXVI^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 530-535.

PERCEPTIONS DES PERTURBATIONS METEO-CLIMATIQUES ET MESURES D'ADAPTATION PAYSANNES DANS L'ARRONDISSEMENT DE KPANROU (COMMUNE D'ABOMEY-CALAVI AU BENIN)

RUFIN O. LAKIYO¹, GUY C. WOKOU², YVES A. TOHOZIN², ERNEST OGBON² ET IBOURAIMA YABI^{*2}

¹Département de Sociologie-Anthropologie, Université de Parakou, République du Bénin

²Département de Géographie et Aménagement du Territoire, Université d'Abomey-Calavi, République du Bénin

* auteur correspondant : yafid2@yahoo.fr

Résumé : Le présent travail s'intéresse à la compréhension qu'ont les producteurs des perturbations météo-climatiques, de ses effets perceptibles et les mesures adaptatives qu'elles développent à Kpanrou, un arrondissement périurbain de la Commune d'Abomey-Calavi. Des informations socio-météo-climatiques collectées aux moyens d'une enquête par questionnaire sur un échantillon de 120 chefs d'exploitations agricoles ont été utilisées. Le traitement des données et informations collectées a été fait par le calcul de la fréquence relative et la valeur du Facteur de Consensus Informateur, sans oublier les illustrations graphiques. Les mutations météo-climatiques perçues par les exploitants agricoles concernent l'irrégularité des pluies (85 %), la hausse des températures (85 %), le démarrage tardif des pluies (80 %), le raccourcissement des saisons (80 %), l'arrêt précoce des pluies (75 %) et la tendance à la baisse des pluies (70 %) et l'excès momentané des pluies (65 %). Les conséquences se traduisent selon eux par la baisse de la production et du rendement agricole, et le bouleversement du calendrier agricole. Les mesures d'adaptation sont de types endogènes (semis multiples, cérémonies culturelles, mise en valeur des bas-fonds) et exogènes (adoption de nouvelles variétés culturales, utilisation de fertilisants chimiques).

Mots clés : Kpanrou (Abomey-Calavi), risques météo-climatiques, perceptions paysannes, approches endogènes.

Abstract : This work focuses on the producers' understanding of weather-climate disturbances, their perceptible effects and the adaptive measures they develop in Kpanrou, a suburban borough of the district of Abomey-Calavi. Socio-climatic information collected through a questionnaire survey of a sample of 120 heads of agricultural households was used. The processing of the collected data and information was done by calculating the relative frequency and value of the Informant Consensus Factor, without forgetting the graphic illustrations. The climate changes perceived by farmers concern irregular rainfall (85%), rising temperatures (85%), late start, rains (80%), shortening seasons (80%), (75%), the downward trend of rainfall (70%) and the temporary excess of rainfall (65%). The consequences are reflected in the decline in agricultural output and output, the disruption of the agricultural calendar. Adaptation measures are endogenous (multiple seedlings, cult ceremonies, lowland development) and exogenous (adoption of new crop varieties, use of chemical fertilizers).

Key words : Kpanrou (Abomey-Calavi), weather-climate risks, peasant perceptions, endogenous approaches

Introduction

De nos jours, les anomalies climatiques et leurs conséquences sont au centre des préoccupations aussi bien des acteurs scientifiques que des décideurs politiques à tous les niveaux (Niang, 2009 ; Ali, 2010 ; Vodounou et Onibon Doudogan, 2016). En Afrique subsaharienne, l'agriculture qui occupe une place prépondérante dans l'économie des pays et dans la vie des populations notamment en milieu rural est demeurée essentiellement pluviale (AVSF, 2012). Elle est donc très vulnérable aux effets des anomalies climatiques d'autant plus que les capacités d'adaptations sont très limitées (GIEC, 2014). Le Bénin ne fait pas exception à cette réalité peu reluisante dans la mesure où plusieurs travaux ont conclu que le pays est caractérisé par une perturbation climatique qui se manifeste entre autres par la péjoration pluviométrique, la réduction de la durée des saisons agricoles, la forte occurrence des séquences sèches au cœur des saisons, l'augmentation des températures minimales notamment (Boko, 1988 ; Afouda, 1990 ; Ogouwalé, 2006 ; MEPN, 2008 ; Boko *et al.*, 2012). Cette perturbation affecte négativement les activités rurales, surtout agricoles (Yabi *et al.* 2011). Kpanrou est l'un des arrondissements ruraux de la commune d'Abomey-Calavi au nord-ouest de Cotonou (figure 1) où la production agricole occupe l'essentiel de la population active. La présente recherche s'intéresse aux perceptions qu'ont les exploitants agricoles sur les perturbations climatiques pendant les 30 dernières années et aux mesures paysannes

d'adaptation mises en œuvre dans cet arrondissement où les terres agricoles se raréfient au profit des espaces bâtis.

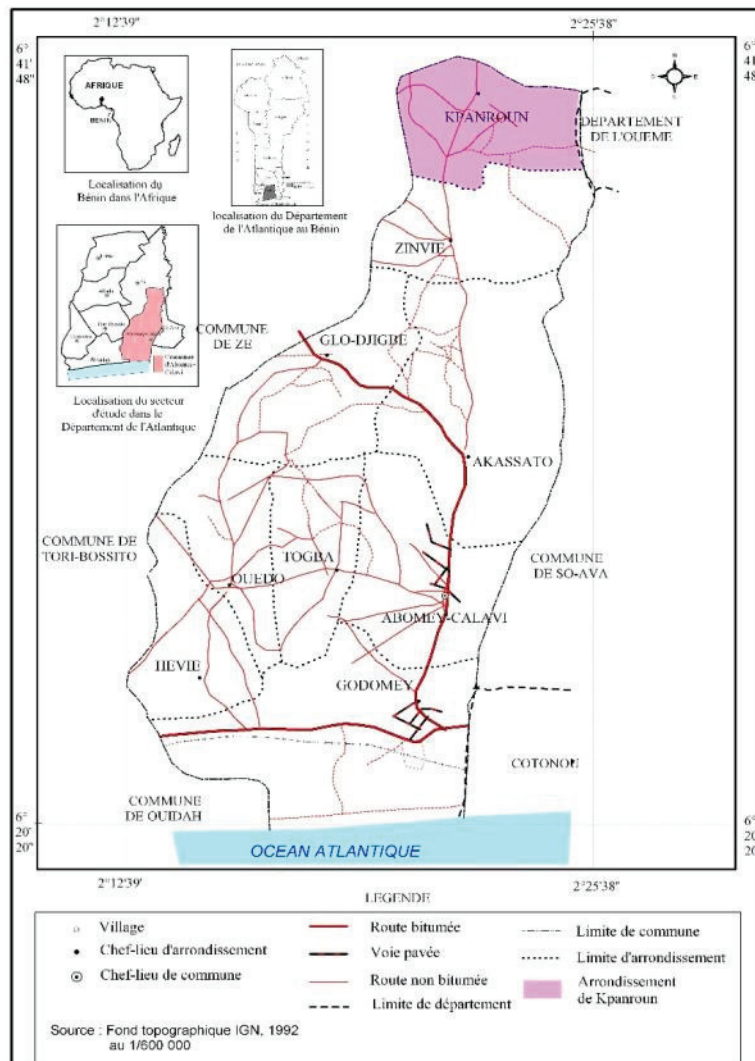


Figure 1. Situation géographique de l'arrondissement de Kpanroun (Abomey-Calavi, au sud du Bénin)

Le climat y est de type subéquatorial avec deux saisons de pluies d'inégales durées et deux saisons sèches (Boko, 1988 ; Houdenou, 1999). La première saison de pluies (la plus longue) s'étend de mi-mars à mi-juillet soit environ 15 décades avec une pluviosité d'environ 850 mm. La seconde saison pluvieuse (la plus courte) dure de septembre à mi-novembre, soit environ 6 à 7 décades avec une pluviosité qui oscille autour de 300 mm (figure 2).

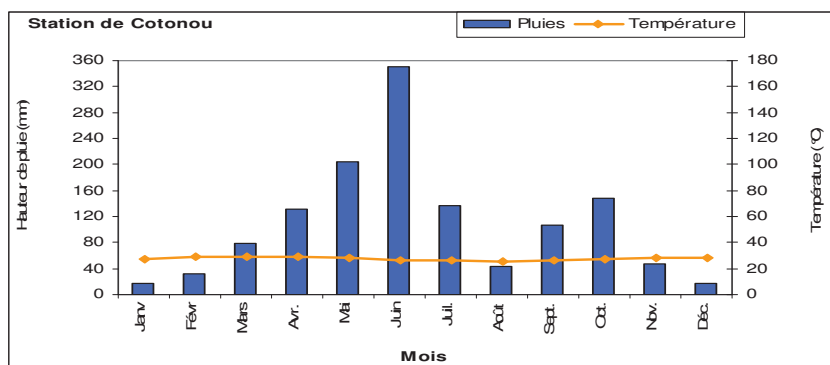


Figure 2. Diagramme ombrothermique du milieu (1941-2010).

Ce contexte pluviométrique permet aux producteurs de pratiquer 2 campagnes agricoles par an, la première correspondant à la grande saison pluvieuse étant la plus longue et la plus sûre. L'agriculture est type familial avec des parcelles de tailles modestes (comprises entre 0,2 à 3 ha en moyenne) et un outillage rudimentaire. Le maïs, l'ananas, le manioc, le niébé et l'arachide constituent les principales cultures. Ces cultures sont à la fois vivrières et rentières. En effet, une partie est autoconsommée par les paysans alors qu'une autre partie est destinée à la vente.

2. Approche méthodologique

Les données utilisées ont été collectées par une enquête organisée auprès des exploitants agricoles du milieu d'étude pendant la période allant d'octobre à novembre 2015. A cet effet, un échantillon de 120 chefs d'exploitations agricoles a été choisi de façon équitable dans les 8 villages (Anagbo, Avagbè, Wagnizoun, Djigbo, Avogniko, Kpanroun Centre, Kpaviedja, Zoungbo) que compte l'arrondissement. La taille totale a été déterminée en utilisant la formule de Schwartz (1995). Le choix de personnes a été établi avec l'aide d'un agent de l'encadrement rural (technicien supérieur en production végétal) en tenant compte de l'importance et la diversité des productions. Par ailleurs le genre a été pris en compte dans le choix des chefs d'exploitations agricoles. Ainsi, l'échantillon choisi est composé de la manière suivante : 80 hommes dont 40 jeunes (âgés de 45 ans au plus) et 40 femmes dont 20 jeunes. Les entretiens individuels et en groupes réalisés à l'aide d'un questionnaire et d'un guide, ont été les principales techniques de collecte utilisées. Les points abordés concernent essentiellement, les mutations climatiques ressenties, la période de référence desdites mutations, leurs effets sur les activités agricoles et les mesures adaptatives mises en œuvre ou souhaitées.

Les données ethno-climatologiques ont été traitées par le calcul des fréquences relatives et la construction des graphes. Afin de tester l'homogénéité des perceptions et mesures d'adaptations, le Facteur de Consensus Informateur (FCI) est utilisé (Vodounou et Onibon Doubogan, 2016). Il est calculé comme suit (équation 1):

$$FCI = (Nur - Nt)/(Nur - 1) \quad [éq. 1]$$

Avec : *Nur* : nombre de citations ou le nombre d'exploitants ayant fait allusion à une catégorie de perceptions (épisodes, origines, effets et mesures d'adaptation); *Nt* : nombre de variantes dans chaque catégorie.

La valeur du FCI varie entre 0 et 1 et indique une homogénéité élevée lorsqu'il tend vers 1.

Le FCI est utilisé dans le traitement des données qualitatives notamment ethno-environnementales. Il sert à apprécier le niveau d'homogénéité ou d'hétérogénéité des réponses.

3.1. Episodes météo-climatiques nuisibles perçus par les producteurs

Selon les producteurs agricoles répondants, le climat est de plus en plus marqué par l'occurrence de plusieurs épisodes nuisibles (figure 3). Les épisodes nuisibles concernent les aléas météo-climatiques qui ont un ou plusieurs effets négatifs sur les activités agricoles selon les exploitants répondants. La figure 3 montre que les pluies irrégulières, la hausse des températures, le démarrage tardif, le raccourcissement et l'arrêt précoce des saisons de pluies sont les épisodes les plus cités (au moins 75 % des personnes interrogées) par les exploitants agricoles de l'arrondissement de Kpanrou. Par ailleurs, l'excès momentané des pluies a été évoqué par 65 % des paysans. Les perceptions paysannes quant aux périodes de référence des épisodes météo-climatiques divergent selon les mutations (tableau I).

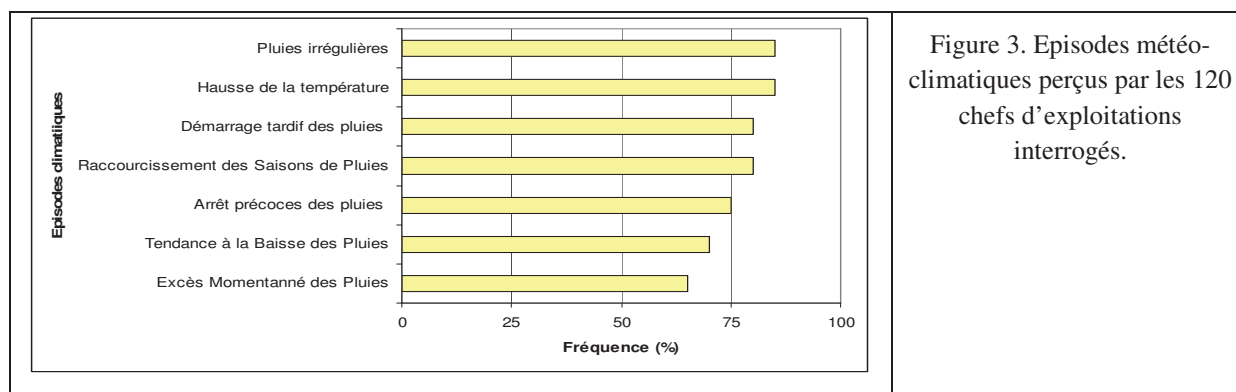


Figure 3. Episodes météorologiques perçus par les 120 chefs d'exploitations interrogés.

Tableau I. Périodes de références des mutations météo-climatiques perçues.

Aléas climatiques	Fréquence (%)				Totaux
	10 dernières années	20 dernières années	30 dernières années	40 dernières années et plus	
PI	15	20	55	10	100
HT	20	15	45	20	100
DTP	25	15	15	55	100
RSP	25	20	10	55	100
APP	20	15	15	50	100
TBP	20	15	60	5	100
EMP	75	20	5	5	100

Légende : PI = pluies irrégulières ; HT = hausse de température ; DTP = Démarrage tardif des pluies ; RSP = Raccourcissement de la durée des saisons des pluies ; APP = arrêt précoce des pluies ; TBP = tendance à la baisse des pluies ; EMP = Excès momentané des pluies

Les paysans interrogés ont fait référence aux événements historiques (années ou périodes de naissance ou de décès des connaissances), politiques (règne de tel ou tel président ou autre autorité administrative) et sociaux (graves crises alimentaires, inondations) pour situer les périodes. En général, l'irrégularité et la baisse des totaux pluviométriques remontent aux 30 dernières années d'après la majorité des paysans (55 et 60 %) et se poursuivent jusqu'aujourd'hui. Quant au démarrage tardif des précipitations, l'arrêt précoce de la saison et le raccourcissement de la durée des saisons agricoles leur forte occurrence se situe aux 40 dernières années d'après la majorité des exploitants agricoles. Par ailleurs, 75 % des paysans ayant perçu les excès momentanés de pluies ont situé la forte fréquence de cet épisode aux 10 dernières années (décennie 2000) certainement en se référant aux récentes inondations très désastreuses pour les cultures.

3.2. Effets de mutations agricoles selon les perceptions paysannes et mesures d'adaptation

Selon les producteurs de l'arrondissement de Kpanrou, les perturbations météo-climatiques affectent négativement la production agricole de différentes manières (figure 4). Il ressort de la figure 4 que le fort taux d'échec de semis, la baisse des rendements et de la production constituent les effets les plus perçus par les exploitants agricoles répondants (respectivement 85, 80 et 80 % des personnes ayant participé à l'enquête).

D'après ces derniers, l'échec des semis est plus lié à l'irrégularité des pluies qui manifeste par des faux départs et surtout des « pauses » pluviométriques ou des séquences sèches en début de saisons agricoles. La baisse des rendements et des productions résulte selon les investigations de plusieurs autres effets comme l'échec des semis, l'assèchement et/ou la pourriture des cultures sans oublier les maladies qui affectent les cultures au cours de leurs différentes phases de développement. La destruction des cultures consécutive aux inondations

a été également évoquée par les producteurs pour expliquer la baisse des rendements et de production agricole dans le milieu. De même, l'assèchement précoce des plantes a été évoqué par 60 % des exploitants. Selon eux, ce désastre résulte surtout des arrêts précoces des pluies ou de longues séquences sèches au cœur de la saison agricole. L'assèchement précoce des plantes induit également la baisse des productions selon les enquêtes.

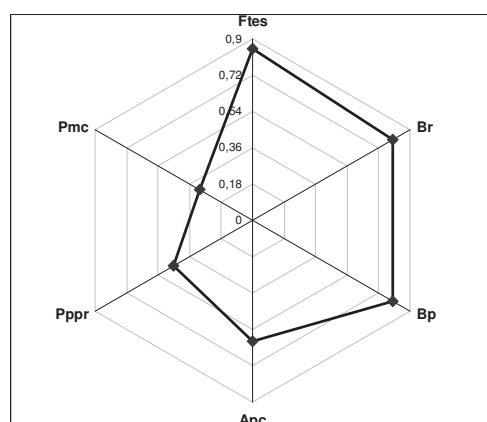


Figure 4. Effets des mutations climatiques selon les exploitants agricoles.

Légende : Ftes = Forts taux d'échecs de semis ;
 Br = baisse des rendements ; Bp = baisse des productions ; Apc = Assèchement précoce des cultures ; Pppr = Pourritures des plantes et récoltes ;
 Pmc = Prolifération des maladies de cultures.

Afin de limiter les effets des perturbations météo-climatiques, les producteurs mettent en œuvre plusieurs mesures adaptatives à caractères rationnel et culturel. Ces mesures qui sont de nature préventive ou curative résultent des connaissances empiriques ou des conseils des agents d'encadrement.

- S'agissant des mesures à caractère culturel, elles sont fondées sur les croyances endogènes et consistent à organiser des cérémonies à l'endroit des divinités tutélaires ou des ancêtres pour implorer leur clémence et bénédiction (45 % des répondants). Selon les investigations de terrain, la nature, et le moment des offrandes sont révélés par le prêtre du Fâ qui est capable de consulter les dieux et les ancêtres. A ces cérémonies s'ajoute la sollicitation des «faiseurs de pluie» (autochtones ou allochtones) qui détiennent des pouvoirs occultes pour faire pleuvoir.
- Les mesures endogènes à caractère rationnel concernent les semis répétés ou échelonnés (95 % des répondants) qui consiste à semer la même espèce à des dates différentes sur le même espace cultural. Il y a également l'association culturale qui est faite dans l'espoir qu'au moins une culture aura la chance de donner de rendement acceptable (80 % des répondants), étant donné que les différentes cultures n'ont pas le même cycle cultural. De même, 55 % des producteurs ont recours aux cultures de bas-fonds ou de plaines inondables avec des aménagements très sommaires pour limiter les effets des irrégularités pluviométriques.
- Les mesures suggérées par les services d'encadrement concernent principalement l'adoption des variétés culturales améliorées et à cycle court de même que l'utilisation des engrais chimiques. L'adoption de nouvelles variétés culturales préconisées sont celles qui résistent mieux à la sécheresse et s'adaptent mieux à la brièveté de la saison agricole. Mais, le taux d'adoption de ces mesures est encore faible (40 %) pour plusieurs raisons (accessibilité financière, barrières culturelles, etc.). Par ailleurs, l'utilisation d'engrais chimiques vise à accélérer la croissance et la maturité des plantes et à obtenir le maximum de graines ou de fruits. Mais l'accessibilité financière et la disponibilité des engrais sont autant de difficultés qui limitent également l'adoption de cette mesure selon les exploitants agricoles.

3.3. Niveau d'homogénéité des perceptions et mesures adaptatives

Le niveau d'homogénéité des réponses est apprécié par le calcul de la valeur du Facteur de Consensus Informateur (figure 5). La figure 5 montre qu'en période de référence, les autres indicateurs du FCI sont supérieurs à 0,5, ce qui traduit une bonne homogénéité des réponses.

La valeur la plus élevée du FCI est obtenue quant aux perceptions relatives aux épisodes climatiques (85 %), ce qui montre que l'ensemble des exploitants agricoles répondants ont une perception relativement harmonieuse des perturbations climatiques dans le milieu.

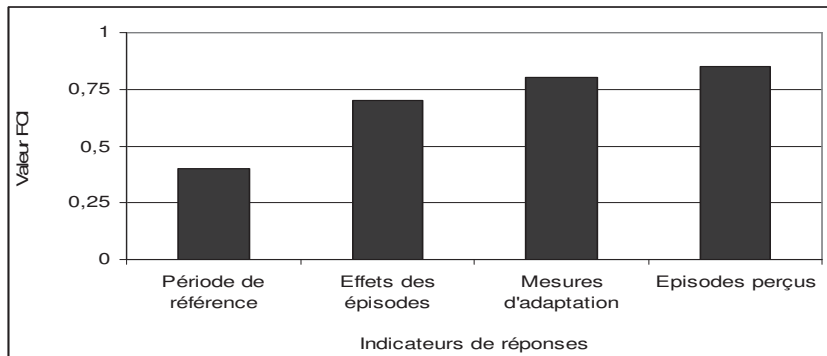


Figure 5. Valeur des FCI par catégorie d'indicateurs.

En revanche la faible valeur du FCI relatif à la période de référence des aléas perçus indique une importance variance de réponses. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que les paysans ne disposent d'archives écrites et les repères utilisés sont très variables.

Conclusion

La présente recherche a permis de savoir que les paysans de l'arrondissement Kpanrou perçoivent plusieurs aléas climatiques nuisibles à leurs activités. Il y a une bonne homogénéité sur les perceptions relatives aux manifestations et effets des perturbations climatiques y compris les mesures d'adaptation. Ces résultats d'ordre socio-climatique peuvent constituer une bonne base d'informations pour l'élaboration et la mise en œuvre d'une stratégie participative d'adaptation aux changements climatiques dans ce milieu.

Bibliographie

- Afouda F., 1990 : *L'eau et les cultures dans Bénin central et septentrional : Etude de la variabilité des bilans de l'eau dans leurs relations avec le milieu rural de la savane africaine*. Thèse de doctorat nouveau régime. Paris IV-Sorbonne. 428 p.
- AVSF., 2012 : *Caractérisation des stratégies d'adaptation au changement climatique en agriculture paysanne*. Etude de capitalisation réalisée sur les terrains de coopération d'AVSF, Lyon, France, 50 p.
- Boko M., 1988 : *Climat et communautés rurales du Bénin : Rythmes climatiques et rythme de développement*. Thèse d'Etat ès lettres, Dijon, France. 607 p.
- Boko M., Kosmowski F. et Vissin E., 2012 : *Les enjeux du changement climatique au Bénin*. Konrad-Adenauer-Stiftung. Cotonou, Bénin, 72 p.
- GIEC, 2014 : *Changements climatiques 2014, Incidences, adaptation et vulnérabilité*. Contribution du Groupe de travail II au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève (Suisse).
- Houndenou C., 1999 : *Variabilité climatique et maïsiculture en milieu tropical humide : l'exemple du Bénin, Diagnostic et modélisation*. Thèse de doctorat en Climatologie, Université de Bourgogne, Dijon, France. 390 p.
- MEPN., 2008 : *Rapport du Programme d'Action Nationale d'Adaptation aux Changements Climatiques*. Cotonou, Bénin, 81 p.
- Niang, I., 2009 : Le changement climatique et ses impacts : les prévisions au niveau mondial. In : IEPF (eds.). *Adaptation au changement climatique, Liaison Énergie-Francophonie*, 85 : 13-19.
- Ogouwalé E., 2006 : *Changements climatiques dans le Bénin méridional et central : Indicateurs, Scénarios et Prospective de la Sécurité Alimentaire*. Thèse de doctorat Unique. Option dynamique des Systèmes Climatiques, UAC, Ecole Doctorale Pluridisciplinaire de la FLASH, Abomey-Calavi, 302 p.
- Schwartz, D., 1995 : *Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes*. 4^e édition, Editions médicales, Flammarion, Paris, 314 p.
- Vodounou J-B K. et Onibon Doubogan Y., 2016 : Agriculture paysanne et stratégies d'adaptation au changement climatique au Nord-Bénin. *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne]. Mis en ligne le 15 novembre 2016, consulté le 15 février 2017. URL : <http://cybergeo.revues.org/27836>.
- Yabi I., Ogouwalé E., Afouda F., Boko M., 2011 : Contraintes climatiques et développement agricole au Bénin. *Annales de la Faculté des Lettres, Arts et Sciences Humaine (FLASH) de l'Université d'Abomey-Calavi, Bénin*, n°17, vol.2, 13-30.

Table des matières

INTRODUCTION

DAHECH S. 7

CONFÉRENCES INVITÉES

LE CLIMAT URBAIN DE NICE, DANS UN CONTEXTE MEDITERRANEEN

CARREGA P., MARTIN N..... 13

LE CLIMAT URBAIN: DE L'OBSERVATION DES PROCESSUS À L'ADAPTATION DES VILLES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

MASSON V..... 27

INTENSITÉ ET DÉLIMITATION DE L'ÎLOT DE CHALEUR NOCTURNE DE SURFACE SUR L'AGGLOMÉRATION PARISIENNE

THÈME : CLIMAT URBAIN

MADÉLIN M., BIGOT S., DUCHÉ S. ROME S.....39

IMPACTS DES ÉVÉNEMENTS CLIMATIQUES EXTRÊMES SUR LA MÉTROPOLE DE CASABLANCA (CAS DES INONDATIONS DU 29/11/2010)

SALOUI A. , CHAHHOU F-Z..... 47

IMPACT DES EMISSIONS EN NO_x ET CO DUES AU TRAFIC ET LA VARIABILITE DU VENT SUR LA QUALITE DE L'AIR A DAKAR

SARR D., SY A., DIOP B., DIAKHABY A. 53

BRISÉS LITTORALES ET CONCENTRATIONS POLLUÉES EN NO_x, EN CO ET EN O₃ DANS LA BANLIEUE D'EL MOUROUJ (TUNIS) DURANT LE MOIS D'AOUT 2016

HACHICHA N., EL MELKI T..... 59

LES AMBIANCES CLIMATIQUES HIVERNALES AU NORD DE LA TUNISIE : TYPOLOGIE, CARACTÉRISTIQUES ET VARIABILITÉ

RIAHI M..... 67

IDENTIFICATION ET CARTOGRAPHIE DES TOITURES VALORISABLES POUR DES INSTALLATIONS SOLAIRES A L'ECHELLE DE LA VILLE D'AIX-EN-PROVENCE

BOURCHAK S., BRIDIER S. 73

VARIABILITÉ ET TENDANCES DES TEMPERATURES DANS LES VILLES DE L'ETAT DE SÃO PAULO / BRÉSIL

FANTE K. P., DUBREUIL V., SANT'ANNA NETO J. L..... 79

SYSTEMES DE BRISÉS THERMIQUES ET DISTRIBUTION DE LA POLLUTION ATMOSPHERIQUE A BEYROUTH

SAKR S., BRIDIER S. 85

A PRODUCTION DE LA VILLE : ENTRE PRESSION FONCIERE ENJEUX ECONOMIQUES ET PRESERVATION DE L'ENVIRONNEMENT	
TRIFA JAMOSSI H.	91
POLLUTION ATMOSPHERIQUE PARTICULAIRE ET SANTÉ À SOUSSE	
LAHMAR L. , HENIA L.	97
CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE CONTEXTE URBAIN CONTEMPORAIN	
AIT ABDELKADER M. H.	103
STRATÉGIES DES VILLES FACE AU CHANGEMENT CLIMATIQUE_ILOTS DE CHALEUR URBAINS	
JUVANON DU VACHAT R.	109
CONTRIBUTION DE LA VEGETATION URBAINE A LA REGULATION DU CLIMAT : CAS DES JARDINS PUBLICS DE LA COMMUNE DU PLATEAU (ABIDJAN- CÔTE D'IVOIRE)	
KOUADIO YJ-C, TIEBRE M-S, OULAÏTAR ME VROH BTA, GONE BI ZB, N'GUESSAN KE.....	115
RISQUES CLIMATO-PATHOLOGIQUES DES MALADIES HYDRIQUES À SFAX (TUNISIE) : PERCÉPTION DE LA VULNÉRABILITÉ PAR LA POPULATION ET MODALITÉS DE GOUVERNANCE	
JARRAYA M.	121
LES DECHARGES SAUVAGES DANS L'AGGLOMERATION DE SFAX : IMPACTS SANITAIRES SUR LES ENFANTS	
EUCHI H., DAHECH S.....	127
LE CLIMAT URBAIN ET LA SANTÉ: LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET LA DENGUE DANS LES VILLES BRÉSILIENNES	
MENDONÇA F., STEINMETZ G.	133
LES VARIATIONS CLIMATIQUES ET LES INONDATIONS URBAINES CAS DE LA VILLE DE BISKRA (ALGERIE)	
AZIOUNE R. , TATAR H. , NOUACEUR Z.	139
LES AMBIANCES DU QUARTIER D'EL MENZAH : IMPACTS DE LA MORPHOLOGIE URBAINE ET DE LA VÉGÉTATION SUR LE VÉCU DES HABITANTS	
GHARBI S., BELAKEHAL A.....	147
MONITORING DE L'ILOT DE CHALEUR URBAIN DE CLUJ-NAPOCA, ROUMANIE	
HOLOBĂCĂI H.	155
VARIABILITÉ ET TENDANCES PLUVIOMÉTRIQUES DANS TROIS VILLES DU MONDE TROPICAL: LES CAS DE SANTOS (BRÉSIL), MAPUTO (MOZAMBIQUE) ET BRISBANE (AUSTRALIE)	
LINDBERG NASCIMENTO J; DOUTRELOUP S.; MUSSULMADE SAIDE J. ; DUBREUIL V.; LIMA SANT'ANNA NETO J. ⁵	161

ÉVALUATION DES EFFETS THERMIQUES DES LEVIERS D'ACTION VISANT À RÉDUIRE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN : L'EXEMPLE DE DIJON	
RICHARD Y., POHL B., PERGAUD J., ZITO S., REGA M., THÉVENIN T., EMERY J., VAIRET T., DUDEK J., THÉVENIN D., CODET HACHE O., DODET M-F.	167
ACCOMPAGNER L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE DE LA VILLE : L'EXPERIENCE MENEÉ AVEC TOULOUSE METROPOLE	
SOUBEYROUX J.-M., MASSON V., EDOUART V., CABANES O ⁴ , POUJOL, G.....	173
LA POLLUTION AUTOMOBILE DANS LES CARREFOURS AUX HEURES DE POINTE À N'DJAMENA	
TATOLOUM A.....	179
BIOCLIMATS HUMAINS ET HORAIRES DANS LES ECOLES DU DEPARTEMENT DES COLLINES AU BENIN: EST-IL PERTINENT DE MAINTENIR LES HORAIRES DANS LES ETABLISSEMENTS SCOLAIRES ?	
HOUSSOU C. S.;VISSIN E. W. ; MEDEOU F. K.; BOKO N. P. M.....	185
EFFET DE L'ORIENTATION DES OUVERTURES SUR LE CONFORT THERMIQUE DANS LES SALLES DE CLASSE .CAS CLIMAT CHAUD ET ARIDE (BISKRA, ALGÉRIE)	
AFREN R., BENABBAS M., DJAGHROURI DJ.	191
LE ROLE DE LA VÉGÉTATION DANS LA CREATION D'UN MICROCLIMAT URBAIN. CAS DE LA VILLE DE BISKRA	
DJAGHROURI DJ., BENABBAS M., AFREN R.....	203

THÈME : VARIABILITÉ ET ALÉAS CLIMATIQUES

FREQUENCE ET DIVERSITE DES TYPES DE CLIMATS ANNUELS AU BRÉSIL POUR LA PERIODE 1961 - 2015	
DUBREUIL V., FANTE K.P., PLANCHON O., SANT'ANNA NETO J.L.	211
CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES FACTEURS DES TEMPÊTES DE SABLES DU 21 JUILLET ET DU 14 AOÛT 2013 DANS LA RÉGION DE GAFSA AU SUD-OUEST TUNISIEN : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	
AL ATRACH M-M. , EL MELKI T.	217
ANALYSE DE LA SÉCHERESSE HYDROLOGIQUE EN MILIEU CONTINENTAL TEMPÉRÉ ET EN MILIEU MÉDITERRANÉEN EN ITALIE, PENDANT LA PÉRIODE 1981-2010	
PULINA M.A., ACQUAOTTA F., FALZOI S., FRATIANNI S.'	223
LE RÉCHAUFFEMENT DANS LES ALPES DU SUD (1959-2015)	
DOUGUÉDROIT A.....	229

EVOLUTION DES TEMPÉRATURES AU PROCHE-ORIENT. RELATION AVEC LES PARAMÈTRES D'ALTITUDE (TEMPÉRATURES ET HAUTEURS DU GÉOPOTENTIEL 500 HPA)	
TRABOULSI M. , HAJ HASSAN Z., MHANNA H.....	235
INVESTIGATION DANS LES EFFETS POTENTIELS DU RECHAUFFEMENT CLIMATIQUE SUR LES PROPRIETES DE LA TROPOSPHERE OUEST-MEDITERRANEENNE A L'ECHELLE ANNUELLE A PARTIR DES RADIOSONDAGES ET DES REANALYSES	
EL MELKI T.	241
EXTREMES HYDROLOGIQUES ET INONDATIONS DANS LA COMMUNE D'ATHIEME AU BENIN : DIAGNOSTICS ET GESTION	
BESSAN M. V., VISSIN E. W., OGOUWALE E., AGBOSSOU E. K., OZER P.	247
ETUDE DES VARIATIONS CLIMATIQUES A LA REGION NORD-OUEST DU MAROC, DEBITS DE PROJET "BASSIN D'OUED BEHT"	
SEBBAR A., HSAINE M., FOUGRACH H., HAMA S., AJEDDOU M., BADRI W.	253
ANALYSE DES ZONES A RISQUES D'INONDATION DANS LE BASSIN VERSANT DU FLEUVE OUEME A BETEROU AU BENIN (AFRIQUE DE L'OUEST)	
KOUDAMILORO O. ' , VISSIN E. W. , DIPAMA J. M.....	259
ESTIMATION DES CHUTES DE NEIGE A PARTIR DES TEMPÉRATURES ET DES PRÉCIPITATIONS MOYENNES MESURÉES EN SUISSE	
FALLOT J.-M.....	265
VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE DE LA CÔTE MÉDITERRANÉENNE MAROCAINE ET MODES DE LA CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE À GRANDE ECHELLE	
HANCHANE M.....	273
EXTREMES CLIMATIQUES DANS LE DOMAINE SOUDANIEN AU BENIN : ETUDE COMPAREE DES PERCEPTIONS POPULAIRES ET DES DONNEES CLIMATOLOGIQUES DE L'ASCENA	
DJOHY G. L., TOTIN VODOUNON S. H. ; KINZO N. E., SINWONGOU M. A., AVAHOUIN C. N. N., AKPLOGAN K. N., DOUMAHOON D. S. E.....	281
VARIABILITÉ ET TENDANCES DES EXTRÊMES THERMIQUES DANS L'ÉTAT DU PARANÁ, BRÉSIL (1970-2015)	
ELY D. F., FORTIN G.....	287
APPORTS DES DONNÉES MÉTÉOROLOGIQUES RADARS ET AU SOL A L'ÉTUDE DES ÉVÉNEMENTS PLUVIOMÉTRIQUES EXTRÊMES DU PIEMONT (ITALIE)	
GUENZI D. , BARONETTI A. , KERMADI S. , ACQUAOTTA F. , CREMONINI R. , BORASO R. ⁴ , SPANNA F. ⁵ , FRATIANNI S.	293

SUIVI D'UNE CELLULE ORAGEUSE AYANT PROVOQUE D'IMPORTANTS DEGATS FORESTIERS DANS LE DOMAINE UNIVERSITAIRE DU SART TILMAN, LIEGE, BELGIQUE	
ERPICUM M., DOUTRELOUP S., NOURI, M., BELLEFLAMME A. ET SURCIN J.	299
ESTIMATION DE LA DIFFÉRENCE DE TEMPÉRATURE ENTRE LA FORÊT ET LES SITES OUVERTS DANS LE JURA	
JOLY D.	305
L'ÉROSION DES PLUIES ET L'ÉROSION HYDRIQUE SUR LES VERSANTS DE PLATEAU EN ROUMANIE	
GRECU F., CARABLAISA S., VIȘAN M., TEODOR M.	311
ÉVOLUTION DE L'ENNEIGEMENT MOYEN DANS LES ALPES AU COURS DU 20 ^E SIÈCLE À L'AIDE DU MODÈLE ATMOSPHÉRIQUE RÉGIONAL MAR	
BELLEFLAMME A., WYARD C., DOUTRELOUP S., FETTWEIS X., ERPICUM M.	319
LES PLUIES EXTRÊMES À RISQUE D'INONDATIONS DANS LA VILLE DE KAIROUAN	
NASRALLAH W., BEN BOUBAKER H., VINET F.	325
SAISONNALITÉ CLIMATO-THERMIQUE EN TUNISIE : APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE APPLIQUÉE À QUELQUES STATIONS	
BEN BOUBAKER H., CHEHAIB S., NMIRI A.	333
RECORDS THERMIQUES ET PLUVIOMÉTRIQUES DANS LE SUD-OUEST DE LA ROUMANIE PENDANT LES DEUX DERNIÈRES DÉCENNIES	
CONSTANTIN (OPREA) D. M., MARINICĂ A. F., MARINICĂ I., VĂTĂMANU V. V. ⁴	339
PLUIES EXTRÊMES ET RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN VERSANT DE L'OUED EL BEY (CAP-BON, TUNISIE)	
MAKHOLOUFI D., HADDED R., EL MELKI T.	345
LE CLIMAT ET L' <i>Aedes Aegypti</i> DANS LE SUD DU BRÉSIL	
OLIVEIRA MARCIA M. F. , MENDONÇA F., LARA MARIA A. M., BOBATO P., BANDEIRA, V. F.	351
CLIMATOLOGIE DES TEMPÊTES SUR LES ZONES CÔTIÈRES ALGÉRIENNES : APPROCHE PAR INTEGRATION D'ÉCHELLES SPATIO-TEMPORELLES	
NACEF L. , BACHARI N.E.I. , MENNAD M.	357
VARIABILITÉ ET ÉVOLUTION DÉCENNALES DES TEMPÉRATURES ET SALINITÉS DE SURFACE EN MÉDITERRANÉE	
BACHARI N.E.I. , NACEF L., BOUDA A., LAZREG D.	363
ÉTUDE DE LA SÈCHÈRESSE AU NORD DE LA TUNISIE	
FEKI M.	369

ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES ZONES CÔTIÈRES À L'ÉLEVATION DU NIVEAU DE LA MER À PARTIR DES PARAMÈTRES PHYSIQUES ET SOCIO-ÉCONOMIQUES: CAS DE LA CÔTE DU GOLFE DE BEJAÏA, ALGÉRIE

THÈME : GÉOMATIQUE ET MODÉLISATION

BOUTIBA M., DJOUDER F.....	377
RECONSTRUCTION DE L'ÉVOLUTION DU RAYONNEMENT SOLAIRE REÇU EN SURFACE EN EUROPE OCCIDENTALE SUR LA PÉRIODE 1900-2014 À L'AIDE DU MODÈLE ATMOSPHÉRIQUE RÉGIONAL MAR	
WYARD C., BELLEFLAMME A., DOUTRELOUP S., ERPICUM M., FETTWEIS X.	383
ÉVALUATION DE LA CAPACITÉ DU MODÈLE ATMOSPHÉRIQUE RÉGIONAL (MAR) À SIMULER LA SAISON DES PLUIES EN AFRIQUE INTERTROPICALE	
DOUTRELOUP S. , WYARD C. , BELLEFLAMME A. , FRANCOIS L. , FETTWEIS X. , ERPICUM M.	389
MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE KENNEBECASIS, NOUVEAU-BRUNSWICK, CANADA	
FORTIN G., THÉRIAULT F., LONG M.-A.	397
APPLICATION DES TESTS DES RACINES UNITAIRES ET MODELISATION ARMA SUR LES SERIES DES PLUIES TORRENTIELLES EN TUNISIE	
DALLEL J.....	403
ADAPTATION DE LA FORMULE DE GINADOTTI AUX CONDITIONS ALGÉRIENNES À L'AIDE DES ALGORITHMES GÉNÉTIQUES	
OULAD NAOUÏ N., CHERIF EL-A., DJEHICHE A.R.	409
ANALYSE SPATIALE ET TEMPORELLE DE LA PERTINENCE D'UN INDICE DE SECHERESSE EN RELATION AVEC LE RISQUE INCENDIES EN TUNISIE	
BELHAJ KHEDHER CH., EL MELKI T. , MOUILLOT F.	415
TELEDETECTION ET SIG EN APPUI A LA CARACTERISATION DU CLIMAT EN MAURITANIE: CAS DU PARC NATIONAL DU DIAWLING (PND) ET SA ZONE PERIPHERIQUE	
O.ABIDINE.M. M., EL ABOUDI. A., INEJIH. C. A., O. SOULE. A.	423
RELATIONS ENTRE LE CLIMAT ET LA RÉPARTITION DE LA VÉGÉTATION DANS LES AURÈS (CAS DU MONT CHÉLIA) : APPORT DES SYSTÈMES D'INFORMATION GÉOGRAPHIQUE (SIG) DANS LEUR MISE EN ÉVIDENCE	
BEZZIH H., MALKI H., AISSI A.	429

BASES DE DONNÉES URBAINES POUR LA MODÉLISATION CLIMATIQUE DES VILLES :
CARTOGRAPHIE EN ZONES CLIMATIQUES LOCALES D'UN PANEL DE VILLES DE LA ZONE MENA
MHEDHBI O. , HIDALGO J. , MASSON V. , HAOUES-JOUVE S 437

THÈME : CLIMAT ET RESSOURCE EN EAU

MOBILISATION DES RESSOURCES EN EAU DE SURFACE A DES FINS AGRICOLES DANS LE
BASSIN VERSANT DU ZOU A L'EXUTOIRE DE DOME
ETENE C. G. 445

TUDE DES INDICES DE DÉBITS JOURNALIERS EXTRÊMES A L'INONDATION DANS LE BASSIN
VERSANT DE L'OUÉMÉ À L'EXUTOIRE DE BONOU
KODJA D. J.'; MAHE G. ; VISSIN E. W.' ; AMOUSSOU E. ; PATUREL J.-E. ; HOUNDENOU C. ;
BOKO M.' 451

IMPACT DU "NOUVEAU CLIMAT" RECHAUFFE SUR LES EXTRÊMES PLUVIOMETRIQUES AU
MAGHREB
KARROUK M.S., 457

VARIABILITE CLIMATIQUE ET DYNAMIQUE HYDRO-ECOLOGIQUE DANS LE BASSIN-VERSANT
DU FLEUVE OUEME AU BENIN
AMOUSSOU E., TOTIN V. S. H. , VISSIN E. W., DIEDHIOU A., HOUNDENOU C., MAHE G. & BOKO
M. 457

THÈME : TOPOCLIMATOLOGIE ET AGROCLIMATOLOGIE

IDENTIFICATION DES DATES DE DEBUT DE SAISON DE PLUIE POUR UNE UTILISATION
AGROMETEOROLOGIQUE, CAS DES HAUTS PLATEAUX ALGERIENS.
BENAICHATA L., MEDERBAL K., HOUARI M. 473

IMPACTS SUR LE CLIMAT RÉGIONAL INDUITS PAR L'IMMERSION D'UNE ZONE ARIDE : CAS DE
CHOTT JÉRID (SUD DE LA TUNISIE)
FATHALLI B., CASTEL T., POHL B., SAFI M J. 479

ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION POUR DIFFÉRENTS TYPES DE CULTURES
AGRICOLES, PAR LE MODÈLE CROPWAT. ÉTUDES DE CAS EN ROUMANIE ET AU BRÉSIL
STAN F.I.', CARMELLO V., ZAHARIA L., IOANA-TOROIMAC G. 485

VULNERABILITE DE LA PRODUCTION DU MAÏS AUX CRUES DANS L'ARRONDISSEMENT
D'OUEDEME-ADJA (BENIN)
ATIYE E. , MONTIN G., VISSIN E W. , DOUGNON L. ET SOHOUNOU M. 491

STRATEGIES DE GESTION LOCALE DES RESSOURCES EN EAU DANS UN CONTEXTE DE PEJORATION AGROCLIMATIQUE DANS LA COMMUNE DE ZE	
ADJAHOSSOU V. N., ADJAHOSSOU B. S., ALIA A. W. R., GBAGUIDI G. E. B., VISSIN W. E., ADJAHOSSOU D. F. ⁴	499
LES INONDATIONS REMARQUABLES DANS LE NORD-OUEST DE L'ALGÉRIE (1912-2010)	
MEDJERAB A., MENACER Y., KHEMISSI S.	505
EFFICACITE DES MESURES D'ADAPTATIONS PRISES PAR LES AGRICULTEURS FACE AUX EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LE DEPARTEMENT DE LITTORAL AU BENIN	
HORTENSIA V. ACACHA-ACAKPO, SIRIAC A. SEBOKA.....	511
BRISE DE MER ET POLLUTION DE L'AIR À ANNABA EN ÉTÉ (ALGÉRIE ORIENTALE)	
SAIHIA A., DAHECH S.	517
L'INDICE DE CHALEUR POUR EVALUER LA PENIBILITÉ DU CLIMAT DES VILLES LITTORALES DES ZONES ARIDES : LE CAS DE DJIBOUTI	
AYEH M-N., SOUGUEH L-A.	523
RACCOURCISSEMENT DE LA LONGUEUR DE LA SAISON AGRICOLE ET STRATEGIES D'ADAPTATION DES PRODUCTEURS AGRICOLES DANS LA MAGGIA (BIRNI N'KONNI/CENTRE-SUD DU NIGER)	
ABDOU BAGNA A., ISSIAKA H., MOUNKAILA H., MANI R., YAMBA B.....	531
PERCEPTIONS DES PERTURBATIONS METEO-CLIMATIQUES ET MESURES D'ADAPTATION PAYSANNES DANS L'ARRONDISSEMENT DE KPANROU (COMMUNE D'ABOMEY-CALAVI AU BENIN)	
RUFIN O. L.AKIYO, GUY C. WOKOU, YVES A. TOHOZIN, ERNEST OGBON ET IBOURAÏMA YABI	537

Liste des auteurs

ABDOU BAGNA,**531**
ABIDINE,**423**
ACACHA-ACAKPO,511
ACQUAOTTA, 223, 293
ADJAHOSSOU D, 499
ADJAHOSSOU V,**499**
ADJAHOSSOU B,499
AFREN,**191**,203
AGBOSSOU,247
AISSI,429
AIT ABDELKADER, **103**
AJEDDOU,253
AKIYO, 537
AKPLOGAN,281
AL ATRACH,**217**
ALIA, 499
AMOUSSOU, **463**, 451
AREA,259
ATIYE,**491**
AVAHOUIN,281
AYEH,**523**
AZIOUNE,**139**
BACHARI,**363**,375
BADRI,253
BANDEIRA, 351
BARONETTI,293
BELAKEHAL,147
BELHAJ KHEDHER,**415**
BELLEFLAMME, ,**319**, 299,
383
BEN BOUBAKER,**333**,325
BENABBAS,203, 191
BENAICHATA,**473**
BESSAN,**247**
BEZZIH,**429**
BIGOTS, 39
BOBATO, 351
BOKO , 185, 451, 463
BORASO,293
BOUDA, 363
BOURCHAK, **73**
BOUTIBA,377
BRIDIER, 73, 85
CABANES, 173
CARABLAISA,311
CARMELLO, 485
CARREGA , **13**
CASTEL, 479
CHAHHOU, 47
CHEHAIB,333
CHERIF,409
CODET HACHE, 167
CONSTANTIN,339
CREMONINI,293
DAHECH , 7,127,517
DALLEL,**403**
DIAKHABY, 53
DIEDHIOU, , 463
DIOP, 53
DIPAMA,259
DJAGHROURI,**203**,191
DJEHICHE,409
DJOHY,**281**
DJOUDER ,377
DODET, 167
DOUGNON, 491
DOUGUÉDROIT,**229**
DOUMAHOUN,281
DOUTRELOUP, **161**,
319,299, 383
DUBREUIL,**211**, 161, 79
DUCHÉ, 39
DUDEK, 167
EDOUART, 173
EL ABOUDI, 423
EL MELKI,**241**,
59,217,345,415
ELY,**287**
EMERY, 167
ERPICUM,**299**, 319, 383
ETENE,**445**
EUCHI,**127**
FALLOT,**265**
FALZOI,223
FANTE, **79**,211
FATHALLI,**479**
FÉKI, 369

Liste des auteurs

FETTWEIS, 319, 383
FORTIN,**397**,287
FOUGRACH,253
FRANCOIS, 383
FRATIANNI,223,293
GBAGUIDI, 499
GHARBI,**147**
GONE BI ZB,115
GRECU,**311**
GUENZI,**293**
GUY, 537
HACHICHA, **59**
HADDED,345
HAJ HASSAN,235
HAMA,253
HANCHANE,**273**
HAOUES-JOUVE,437
HENIA, 97
HIDALGO,437
HOLOBĂCĂI,**155**
HORTENSIA,**511**
HOUARI, 473
HOUNDENOU, 451,463
HOUSSOU,**185**
HSAINE,253
INEJIH, 423
IOANA-TOROIMAC, 485
ISSIAKA, 531
JARRAYA, **121**
JOLY,**305**
JUVANON DU VACHAT,
109
KARROUK,**457**
KERMADI,293
KHEMISSI,505
KINZO,281
KODJA,**451**
KOUADIO, **115**
KOU DAMILORO,**259**
LAHMAR, **97**
LARA MARIA, 351
LAZREG, 363
LIMA SANT'ANNA NETO,
161
LINDBERG
NASCIMENTO,**161**
LONG,397
MADELIN, **39**
MAHE , 451, 463
MAKHOULFI,**345**
MALKI,429
MANI, 531
MARINICĂ A.F, 339
MARINICĂ I, 339
MARTIN, 13
MASSON, **27**, 173,437
MEDEOU, 185
MEDERBAL , 473
MEDJERAB,**505**
MENACER,505
MENDONÇA,**133**, 351
MENNAD,375
MHANNA,235
MHEDHBI,**437**
MONTIN, 491
MOUILLOT,415
MOUNKAILA, 531
MUSSULMADE SAIDE, 161
N'GUESSAN KE, 115
NACEF,**357**, 363
NASRALLAH,**325**
NMIRI,333
NOUACEUR,139
NOURI,299
OGBON,537
OGOUWALE,247
OLIVEIRA MARCIA,**351**
OULAD NAOUI,**409**
OULAÏTAR ME VROH BTA,
115
OZER,247
PATUREL, 451
PERGAUD,167
PLANCHON,211
POHL,167, 479
POUJOL, 173
PULINA,**223**
REGA, 167

Liste des auteurs

RIAHI, **67**
RICHARD, **167**
ROMES, 39
RUFIN, **537**
SAFI, 479
SAIHIA, **517**
SAKR, **85**
SALOU, **47**
SANT'ANNA NETO, 79,211
SARR, **53**
SEBBAR, **253**
SEBOKA, 511
SINWONGOU, 281
SIRIAC, 511
SOHOUNOU, 491
SOUBEYROUX, **173**
SOUGUEH, 523
SOULE, 423
SPANNA, 293
STAN, **485**
STEINMETZ, 133
SURCIN, 299
SY, 53
TATAR, 139
TATOLOUM, **179**
TEODOR, 311
THÉRIAULT, 397
THÉVENIN, 167
TIEBRE, 115
TOHOZIN, 537
TOTIN VODOUNON, 281
TOTIN, 463
TRABOULSI, **235**
TRIFA JAMOUCSI, **91**
VAIRET, 167
VĂTĂMANU, 339
VINET, 325
VIȘAN, 311
VISSIN, 185, 247, 259,
451, 463, 491, 499
WOKOU, 537
WYARD, **383**, 319
YABI, 537
YAMBA, 531
YVES, 537
ZAHARIA, 485
ZITO, 167

Cet ouvrage rassemble, par thème, les résumés élargis des communications orales et des posters présentés au XXX^{ème} colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC), qui s'est tenu à Sfax (Tunisie), du 3 au 6 juillet 2017.

Les articles portant sur le thème principal du colloque, en l'occurrence le climat de la ville, sont majoritaires. Ce thème de recherche est abordé dans des espaces géographiques du Nord comme du Sud, particulièrement à grande échelle. Les outils d'investigation ont été déployés par les auteurs allant de la mesure directe, à la télédétection et à la modélisation. D'autres communications abordent, plutôt, la variabilité du climat, la question des événements météorologiques paroxysmiques ainsi que la vulnérabilité des sociétés et des milieux physiques face à ces aléas dans un contexte de changement climatique. Par ailleurs, l'un des thèmes détaillés dans ce colloque, évoque la question du climat et des ressources en eau ; il touche parfois l'agroclimatologie et/ou la variabilité et la tendance des précipitations dans le cadre des changements environnementaux contemporains.

