



# AIC TOULOUSE 2022

35<sup>ème</sup> colloque annuel  
de l'Association Internationale  
de Climatologie

**CENTRE INTERNATIONAL  
DE CONFÉRENCES**

**6-9 JUILLET 2022**  
Météo-France, Toulouse, FRANCE

**Le changement climatique, les risques et l'adaptation.**

## **ACTES DU COLLOQUE**

### **TOME 3**

**Éditeurs scientifiques**

Jean-Michel SOUBEYROUX - *Météo-France*

Dominique SERÇA - *Université Toulouse III Paul Sabatier*



## SESSION SANTÉ, AIR et ÉNERGIE

### **ENJEUX ET OBJECTIFS DU PROJET CASSANDRE (CANICULES, SANTÉ ET DENSITÉ DE RÉSEAUX MÉTÉOROLOGIQUES SUR LE TERRITOIRE GRENOBLOIS)**

*Sandra ROME, Xavier FOISSARD, Sylvain BIGOT, Anne-Cécile FOUVET, Émilie ROUSSET, Agnès QUESNE, Johanna LEPEULE, Dominique BICOUT, Nathalie DUBUS*

Page 7

### **PROFILS TEMPORELS ET NIVEAU GLOBAL DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE DES MÉNAGES DE LA VILLE DE ZINDER, NIGER.**

*Mahamadou ZAKARI, Abdou KAILOU DJIBO, Souleymane KEITA, Fabrice PAUL NGUEMA*

Page 14

### **THE COPERNICUS ATMOSPHERE MONITORING SERVICE (CAMS) EMISSIONS OF GREENHOUSE GASES AND AIR POLLUTANTS**

*Antonin SOULIE, Claire GRANIER, Hugo DENIER VAN DER GON, Jeoren J. P. KUENEN, Santiago ARELLANO, Sabine DARRAS, Thierno DOUMBIA, Bo GALLE, Michael GUAUSS, Marc GUEVARA, Jukka-Pekka JALKANEN, Sekou KEITA, Cathy LIOUSSE, Jana DOUBALOVA, David SIMPSON, Katerina SINDELAROVA*

Page 21

### **L'ÎLOT DE FRAÎCHEUR DU COTENTIN (NORMANDIE) : UN ELDORADO DE L'ADAPTATION AUX CANICULES ?**

*Matthieu DAVID, Olivier CANTAT, Éline GÉRARD*

Page 27

### **RESPIRATORY DISEASES - RELATIONS TO CLIMATE PARAMETERS**

*Euarda Rebelatto BRANDALISE, Pedro MURARA.*

Page 34

### **VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DES PM2. ET NO2, DANS LE XIIIÈME ARRONDISSEMENT DE PARIS**

*M. ABDMOULEH, S. DAHECH*

Page 40

### **TOPOCLIMAT DE LA RÉGION DE ZAHLE (LIBAN ORIENTAL)**

*Rabih ZEIN AL DINE, Salem DAHECH.*

Page 48

### **LA POLLUTION DE L'AIR AU PM10 DANS L'AGGLOMÉRATION DE CERGY-PONTOISE : LIENS ENTRE ÉPISODES DE POLLUTION ET TYPES DE TEMPS**

*Souad LAGMIRI et Salem DAHECH*

Page 53

### **ANTHROPOGENIC EMISSIONS, AEROSOL POLLUTION AND HEALTH IN WESTERN AFRICA**

*LIOUSSE, V. YOBOUE, S. KEITA, T. DOUMBIA, J.F. LEON, J. ADON, S. GNAMIEN, E. N'DATCHOH TOURE, BAEZA-SQUIBAN, I. ANNESI-MAESANO, S. BECERRA, M. BELLAND, A. AKPO, J. DJOSSOU, K. KOUAME, M. OUAFO, E. ASSAMOI, J. BAHINO, A. BONNASSIEUX, H. CACHIER, M. DIAS-ALVES, M. DOUMBIA, GALY-LACAU, E. GARDRAT, C. GRANIER, G. OSSOHO, L. ROBLOU, F. SOLMON and H. XU*

Page 58

**RECENT WEATHER AND AIR POLLUTION CHANGES IN BRAZIL**

*Francisco Jablinski CASTELHANO , Ana Clara Neme PEDROSO , Igor Cobelo FERREIRA, Weeberb J. REQUIA*

Page 65

**INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE COMPORTEMENT DU BÂTIMENT DANS SON ENVIRONNEMENT URBAIN : QUEL FICHER MÉTÉO FUTUR UTILISER ?**

*Sihem GUERNOUTI, Auline RODLER, Jeremy BERNARD, Marjorie MUSY, Benjamin MORILLE, Adrien GROS*

Page 71

**A GLOBAL ATLAS OF AIR QUALITY, BASED ON THE COPERNICUS ATMOSPHERE MONITORING SERVICE REANALYSIS**

*Thierno DOUMBIA, Claire GRANIER, Sabine DARRAS, Sekou KEITA, Cathy LIOUSSE, Antonin SOULIE, Rajesh KUMAR, Gabriele PFISTER*

Page 78

**THE ECCAD DATABASE: ACCESS TO A VARIETY OF INVENTORIES OF EMISSIONS FOR GREENHOUSE GASES AND AIR POLLUTANTS**

*Sabine DARRAS, Claire GRANIER, Cathy LIOUSSE, Thierno DOUMBIA, Sekou KEITA, Antonin SOULIÉ*

Page 84

**CITIZENS AS ADDITIONAL MOBILE SENSORS IN CASE OF NATURAL DISASTERS: A NEW EMERGENCY DECISION SUPPORT SYSTEM FOR ITALY AND CROATIA**

*Antonio CARDILLO, Valentina DI TALIA, Giacomo ANTONIONI*

Page 90

**CLIMATE AND COVID-19 IN THE STATE OF PARANÁ (BRAZIL)**

*Francisco MENDONÇA, Pedro Augusto Breda FONTÃO, Wilson Flavio Feltrim ROSEGHINI*

Page 97

**CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES AMBIANCES CONTRAIGNANTES CHAUDES LIÉES À L'HUMIDITÉ DE L'AIR EN TUNISIE**

*Mustapha RIAHI*

Page 104

**PERCEPTION DE LA FORTE CHALEUR DANS L'AGGLOMÉRATION DE KAIROUAN (TUNISIE)**

*Mohamed CHEBLI, Sami CHARFI, Salem DAHECH*

Page 110

**FICHIERS MÉTÉOROLOGIQUES DE VAGUES DE CHALEUR FUTURES POUR ÉVALUER LA RÉSILIENCE THERMIQUE DES BÂTIMENTS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE**

*Anaïs MACHARD, Emmanuel BOZONNET, Agnese SALVATI, Mamak POURABDOLLAHTOOKABONI, Abhishek GAUR*

Page 117

## SESSION AGROMÉTÉOROLOGIE

**MODÉLISATION DES IMPACTS CLIMATIQUES SUR LA CROISSANCE RADIALE DU PIN MARITIME (PINUS PINASTER) POUR ÉVALUER LA VULNÉRABILITÉ DES ARBRES À LA SÈCHERESSE PENDANT LE DÉPÉRISSEMENT DES FORÊTS DE BENI DERDJINE CHLEF (ALGÉRIE)**

*Malik KACI*

Page 123

**CHANGEMENT CLIMATIQUE ET ADAPATATION DES PAYSANS DE NAPIE (NORD DE LA COTE D'IVOIRE)**

*Sangboliewa Lanzeny OUATTARA*

Page 129

**PERCEPTION ET ADAPTATION PAYSANNES SELON LES VALEURS PLUVIOMÉTRIQUES EXTRÊMES DANS LES RÉGIONS FORESTIÈRES IVOIRIENNES DEPUIS 1961**

*Serge Olivier SOHOU*

Page 134

**IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS AGROCLIMATIQUES DU BASSIN IVOIRIEN DE LA COMOÉ**

*Djibril D. NOUFÉ, Amidou DAO, Émile G. SORO, Pauline K. DIBI, Dominique DUMAS, Télesphore Y. BROU, Sylvain BIGOT, Bamory KAMAGATE, Lanciné D. GONE, Bi Tié A. GOULA, Éric SERVAT, Gil MAHE*

Page 140

**VARIABILITÉ DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR À BISKRA (ALGÉRIE)**

*Mohammed FACI, Miloud OUBADI*

Page 148

**NOUVELLE INCERTITUDE LIÉE AUX OCCURRENCES DE SÉQUENCES AVEC OU SANS PLUIE : IMPACT SUR LES RENDEMENTS AGRICOLES DANS LA RÉGION SUD-EST DE LA COTE D'IVOIRE**

*Dominique DUMAS, Sylvain BIGOT, Télesphore Y. BROU, Jean-Emmanuel PATUREL, Kouakou Bernard DJE, Djibril D. NOUFE, Pauline DIBI, Dané BEUGRE, Arona DIEDHIOU, Christian CILAS*

Page 155

**RISQUES AGROCLIMATIQUES ET SAVOIRS ENDOGÈNES DES EXPLOITANTS AGRICOLES DE LA CUVETTE DE GUIDIMOUNI (CENTRE-SUD ZINDER AU NIGER)**

*Amadou ABDOU BAGNA*

Page 162

**CEREAL YIELD FORECASTING WITH SATELLITE DROUGHT-BASED INDICES, WEATHER DATA AND REGIONAL CLIMATE INDICES USING MACHINE LEARNING IN MOROCCO**

*El Houssaine BOURAS*

Page 169

**VARIABILITÉ DE LA PRODUCTION OLÉICOLE EN FONCTION DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES DANS LA DÉLÉGATION DE MENZEL CHAKER (SFAX, TUNISIE CENTRALE)**

*M. MZOUGHJI et, M. FEKI, S. DAHECH*

Page 175

**MODÉLISATION DU POTENTIEL DES VIGNOBLES LITTORAUX ET INSULAIRES DANS LE CADRE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE**

*Jeanne THIBAUT, Hervé QUENOL, Cyril TISSOT*

Page 182

**MESOCLIMATE IMPACT ON ALBARIÑO CV. (VITIS VINIFERA L.) BERRY COMPOSITION IN THE EMERGING ATLANTIC WINEGROWING REGION OF URUGUAY IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE**

*Mercedes FOURMENT, Ramiro TACHINI, Milka FERRER, Valérie BONNARDOT*

Page 190

**IMPACT DE LA SÈCHERESSE ET DE LA VAGUE DE CHALEUR ESTIVALE DE 2021 SUR L'OLIVERAIE PLUVIALE À SKHIRA (SFAX -TUNISIE CENTRALE)**

*Ismail CHIAB, Salem DAHECH, Najiba CHKIR, Riadh BOUAZIZ*

Page 197

**ESTIMATION DE LA VITESSE DE PROPAGATION DU FEU DANS LA FÔRÊT DOMANIALE DE TAKROUNA (NORD OUEST DE LA TUNISIE) PAR LE MODÈLE BEHAVE**

*Salem SEBEI & Youssef AMMARI*

Page 204

**APPORT D'UN NOUVEAU PROTOCOLE DE RÉGIONALISATION DYNAMIQUE DU CLIMAT POUR L'ESTIMATION DU BILAN HYDRIQUE DE DOUGLASAIES**

*Valentin BLANCHET, Philippe AMIOTTE-SUCHET, Nathalie BRÉDA, Vincent BADEAU, Thierry CASTEL*

Page 210

**ÉVALUATION SPATIO-TEMPORELLE DE L'EXPOSITION AU GEL EN RÉGIONS VITICOLES TRADITIONNELLE (PAYS DE LA LOIRE) ET ÉMERGENTE (BRETAGNE)**

*Théo PETITJEAN, Cyril TISSOT, Jeanne THIBAUT, Mathias ROUAN, Hervé QUENOL et Valérie BONNARDOT*

Page 217

**DÉTERMINATION OF WATER CONSUMPTION FOR WINTER WHEAT IN SOUTHERN ROMANIA. CASE STUDY: CARACAL PLAIN, AGRICULTURAL YEAR 2017-2018**

*Dana Maria (OPREA) CONSTANTIN, Florentina Iuliana (STAN) MINCU, Adrian Amadeus TIȘCOVSCHI, Elena GRIGORE, Victor Viorel VĂTĂMANU, Raul Gabriel ILEA*

Page 224

## ENJEUX ET OBJECTIFS DU PROJET CASSANDRE (CANICULES, SANTÉ ET DENSITÉ DE RÉSEAUX MÉTÉOROLOGIQUES SUR LE TERRITOIRE GRENOBLOIS)

**Sandra ROME<sup>1</sup>, XAVIER FOISSARD<sup>1</sup>, Sylvain BIGOT<sup>1</sup>, Anne-Cécile FOUVET<sup>2</sup> Emilie ROUSSET<sup>3</sup>,  
Agnès QUESNE<sup>3</sup>, Johanna LEPEULE<sup>4</sup>, Dominique BICOUT<sup>5</sup>, Nathalie DUBUS<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> Université Grenoble Alpes, Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE, UMR 5001 CNRS/IRD/UGA/G-INP, CS 40700 - 38058 Grenoble cedex 9, France, [sandra.rome@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:sandra.rome@univ-grenoble-alpes.fr))

<sup>2</sup> Ville de Grenoble (Projets Air-Climat, Direction alimentation, nature et cadre de vie), France

<sup>3</sup> Ville d'Echirolles (Direction de la Ville Durable), France

<sup>4</sup> IAB (Institute for Advanced Biosciences, INSERM-UGA, Grenoble), France

<sup>5</sup> TIMC (Translational Innovation in Medicine and Complexity, CNRS-UGA-Vetagro Sup-GINP), France

<sup>6</sup> Laboratoire ESPACE (CNRS-Aix-Marseille Université, Avignon Université et l'Université Côte d'Azur), France

**Résumé :** Le projet CASSANDRE (2022-2025) soutenu par l'ADEME vise à caractériser les extrêmes de chaleur (îlot de chaleur urbain, vagues de chaleur, canicules) aux échelles spatio-temporelles fines, et leurs impacts sanitaires associés, en particulier sur les populations vulnérables et/ou sensibles, à l'échelle du territoire grenoblois, en partenariat direct pour répondre aux besoins d'adaptation des collectivités de Grenoble et d'Echirolles. Ce projet interdisciplinaire s'appuie sur des chercheurs provenant de plusieurs unités de recherche spécialisées en sciences du climat, en épidémiologie, en sciences de la donnée et en géogouvernance. Les méthodes d'étude s'appuient notamment sur les 'Local Climate Zone' et la définition de l'ICU à l'échelle de l'agglomération grenobloise.

**Mots-Clés :** Canicule, extrêmes météo-climatiques, santé, approches pluridisciplinaires.

**Abstract: Issues and objectives of the CASSANDRE project (heat waves, health and density of meteorological networks in the Grenoble area).** The CASSANDRE project (2022-2025) supported by ADEME aims to characterize heat extremes (urban heat island, heat waves) on fine spatio-temporal scales, and their associated health impacts, in particular on vulnerable and/or sensitive populations, in the Grenoble area, in direct partnership to meet the adaptation needs of the cities of Grenoble and Echirolles. This interdisciplinary project relies on researchers from several research units specialized in climate sciences, epidemiology, data sciences and geo-governance. The study methods draw on the 'Local Climate Zone' and the definition of the UHI at the scale of the Grenoble agglomeration.

**Keywords:** Heatwave, weather and climate extremes, health, multidisciplinary approaches.

### Introduction et contexte

Financé par l'ADEME (programmation 2022-2025), le projet de recherche-action CASSANDRE (CANicules, SANTé et Densité de REseaux météorologiques sur le territoire grenoblois) est proposé après six années d'échanges, d'actions exploratoires et de projets co-construits entre les chercheurs et les collectivités de Grenoble et d'Echirolles (Isère, France), autour des questions et services climatiques en lien avec la prospective urbaine. Plusieurs des résultats ont été présentés lors de la Biennale des villes en transition tenue à Grenoble en 2017 (Bigot *et al.*, 2017a ; Rome *et al.*, 2017a). Ces divers travaux et mobilisations participatives ont conduit à la rédaction du Plan municipal canicule (présenté en conseil municipal fin 2019), d'un livret analysant les évolutions climatiques, les enjeux et les stratégies locales (Ville de Grenoble, 2018) ou sur des publications scientifiques plus académiques (Bigot *et al.*, 2017b ; Rome *et al.*, 2017b ; Rome *et al.*, 2020). Parallèlement, plusieurs travaux épidémiologiques sur l'impact des températures excessives sur certaines populations cibles étaient menées dans l'agglomération et à des échelles supérieures (Kloog *et al.*, 2016 ; Lepeule, 2018 ; Hough *et al.*, 2020). Une réalisation forte qui a notamment émergé dès 2019 pour Grenoble, puis 2020 pour Echirolles (3<sup>ème</sup> ville de l'Isère par sa démographie), a été la création et l'installation d'un réseau de mesures micro-météorologiques intra-

urbain. En effet, un point historique et scientifique bloquant s'expliquait par l'absence d'un réseau météorologique dense et structuré permettant d'analyser, représenter et éventuellement modéliser la cartographie thermique urbaine et par quartiers (autre celle provenant classiquement de la cartographie indirecte par télédétection, qui n'est pas une mesure totalement représentative de la température subie). CASSANDRE s'intéresse à l'étude micro- et bioclimatique d'un site urbain complexe par sa forte densité démographique et son contexte topo-climatique. Il veut apporter de nouvelles données météorologiques et épidémiologiques, ainsi que des outils méthodologiques adaptés, pour analyser les impacts des fortes températures estivales (celles de fond, en lien avec le réchauffement climatique actuel ou futur, ou celles périodiques, liées aux vagues de chaleurs ou épisodes caniculaires). L'étude de la sensibilité et de la vulnérabilité thermo-physiologique, imposée par les extrêmes météorologiques sur les habitants – surtout certaines populations vulnérables- mais aussi sur les rythmes d'activités socio-économiques (administratives, culturelles, scolaires, sportives, salariées) reste une étape essentielle pour permettre aux collectivités de développer des outils d'adaptation ciblés (Benmarhnia *et al.*, 2017 ; Benmarhnia et Beaudeau, 2018). Les données, diagnostics et outils opérationnels disponibles à ce jour sont toujours très génériques, souvent fondés sur des approches par inter-comparaisons urbaines ne tenant pas compte des conditions et réalités intra-communales, notamment pour l'exemple complexe grenoblois.

Cet article présente la structuration du projet CASSANDRE et aborde les objectifs puis le réseau de mesures météorologiques utilisées, ainsi que la méthodologie engagée ; il esquisse la cartographie provisoire de l'îlot de chaleur urbain (ICU) et des micro-îlots de chaleur urbain (MICU) en lien avec les *Local Climate Zone* (LCZ) redéfinies à l'échelle locale ainsi que les résultats escomptés sur les extrêmes de chaleur.

## **1. Objectifs du projet CASSANDRE**

Selon les six enjeux majeurs de la feuille de route française sur les ODD (Objectifs du Développement Durable) adoptée en 2019, le projet CASSANDRE relève de celui visant l'action pour la santé et le bien-être de tous, ainsi que celui favorisant la participation citoyenne pour atteindre des objectifs de développement durable, en concrétisant la transformation des pratiques à travers le renforcement de l'expérimentation et de l'innovation territoriale. CASSANDRE vise à contribuer de manière significative à la réflexion à l'échelle locale, tout en prenant part aux échanges thématiques et méthodologiques de niveau national, sur les nombreux enjeux et objectifs dépendant des déterminants de la santé et impacts des épisodes de chaleur extrême sur les socio-écosystèmes urbains (figure 1). Le premier objectif environnemental reste l'amélioration du bien-être humain en ville et la justice environnementale à destination des populations les plus vulnérables.

Plus précisément, le premier objectif scientifique consiste à améliorer l'état des connaissances météorologiques des extrêmes de chaleur (fréquence, occurrence, intensité, extensions spatiales et temporelles, variabilité jour-nuit). Il s'agit notamment de caractériser les ICU et MICU en tenant compte de l'intensification des canicules et des vagues de chaleur. Le second objectif de CASSANDRE se situe à l'interface de l'épidémiologie environnementale et sociale. Il consiste à déterminer localement l'usage, la qualité et la représentativité des nombreux indicateurs bioclimatiques et sanitaires disponibles. Le troisième objectif, porté par les collectivités, vise d'une part, à compléter l'interprétation de la chaîne d'alerte canicule, pour en avoir une lecture infra-communale tenant compte des contrastes socio-démographiques et, d'autre part, à apporter des éléments d'aide à la décision, de formation et de communication pour définir des actions de protection des populations (public sensible, agents et usagers des collectivités, habitants), dans une perspective d'adaptation, de services climatiques et de diagnostics sanitaires.

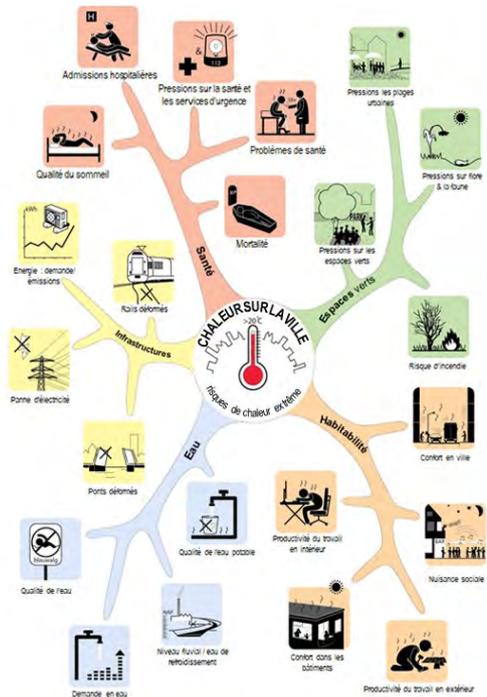


figure 1. Carte mentale des principaux impacts des épisodes de chaleur extrême sur les environnements urbains (traduit d'après Klok et Kluck, 2018).

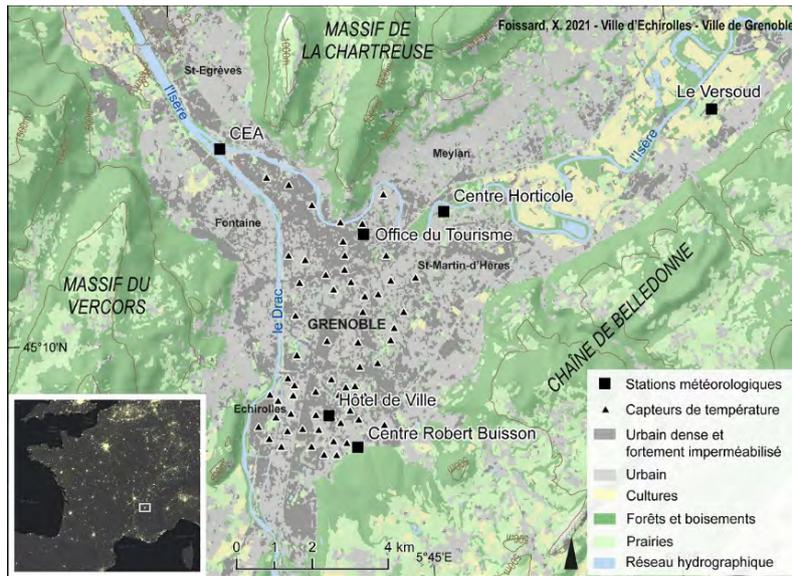
## 2. Données et méthodes

Le cadre analytique pourra s'appuyer sur tous les retours d'expérience provenant des différentes programmations françaises et européennes fédérant les travaux autour des vagues de chaleur, des impacts des aléas thermiques et des services climatiques ou écosystémiques à développer. Surtout orientés sur des approches multisectorielles ou sur des modélisations numériques couplées multicritères à l'échelle de très grandes métropoles et capitales, les enseignements et outils déclinés demeurent utiles pour une approche nationale et régionale, *e.g.* Climate-fit.City (<http://climate-fit.city/>), RESCCUE (<https://toolkit.resccue.eu/>) ou encore Urbisphere (<http://urbisphere.eu/>). Les analyses météorologiques selon une approche multi-scalaire s'appuient surtout sur un nouveau réseau de capteurs météorologiques intra-urbain déployé dès 2019 par les deux collectivités d'Echirolles et de Grenoble, grâce au soutien météorologique et technique d'un chercheur de l'équipe CASSANDRE. A ce réseau original s'ajoutent toutes les données climatiques disponibles provenant d'autres sources complémentaires plus habituelles (réseau Météo France, stations issues de réseaux coopératifs et associatifs).

### 2.1. Un dense réseau de capteurs thermiques

L'étude s'appuie sur un réseau associant stations météorologiques et capteurs thermiques installés sur du mobilier urbain (figure 2) et comprend :

- **6 stations météorologiques** : 2 stations Météo France (Grenoble-CEA-Radôme sur la Presqu'île et Le Versoud, à 12 km au N-E de l'agglomération), 4 stations appartenant aux villes d'Echirolles et de Grenoble (respectivement au Centre Robert Buisson et sur le toit de l'Hôtel de Ville d'Echirolles, ainsi qu'au Centre Horticole en milieu péri-urbain et sur le toit de l'Office de Tourisme de Grenoble en milieu urbain).
- **62 capteurs thermiques** (type Tinytag Talk 2) répartis dans les communes d'Echirolles et de Grenoble, représentant un réseau très dense (respectivement 4,1 et 1,6 capteurs par km<sup>2</sup>).



**figure 2.** Réseau d'observation météorologique urbain (6 stations météorologiques + 62 capteurs thermiques) installé au cœur de l'agglomération grenobloise depuis 2019.

Sources : Foissard (in APR CASSANDRE, 2021), IGN BD ALTI (2018), DDT de l'Isère (2015), Météo-France, CEA, Ville d'Echirolles, ville de Grenoble.

Cette forte densité de capteurs thermiques fait de l'aire urbaine grenobloise à ce jour une zone extrêmement bien instrumentée, dans le même ordre d'idée que d'autres réseaux urbains spécifiques par exemple développés à Rennes, Dijon ou Toulouse. Ce réseau pourra être complété par les données de la station OSUB-B appartenant à l'IGE, représentative du milieu urbain grenoblois en période estivale (Rome *et al.*, 2020). Les données déjà mobilisables concernent les températures horaires relevées pour les trois derniers étés 2019, 2020 et 2021, afin d'en étudier les caractéristiques et la variabilité météorologique.

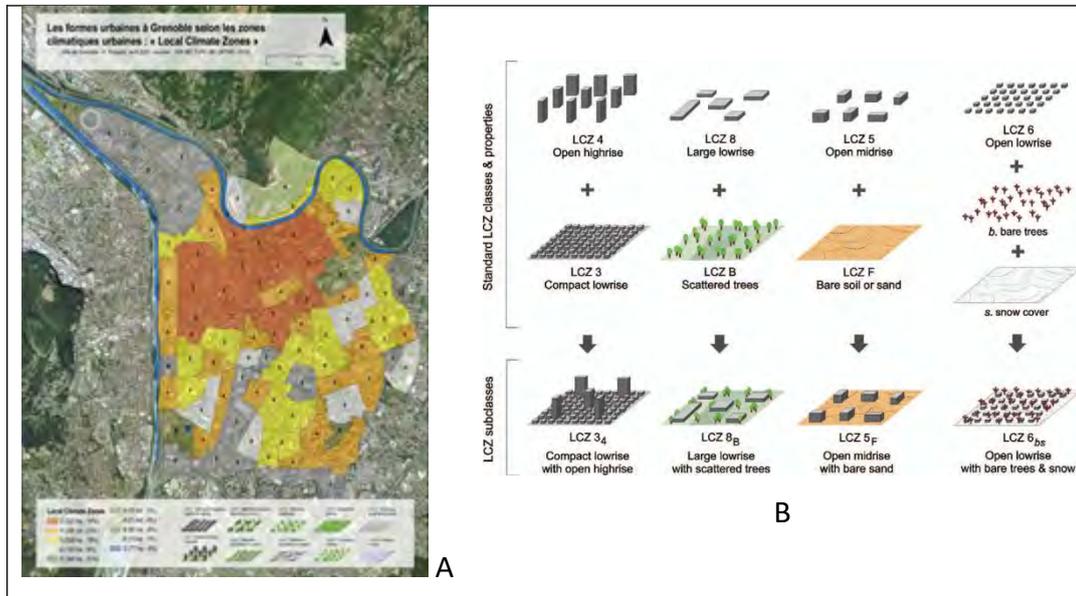
## 2.2. Méthodes de diagnostic des extrêmes thermiques

Une des tâches de CASSANDRE consiste à fournir aux collectivités partenaires, un diagnostic et une modélisation biostatistique des impacts des extrêmes thermiques sur la santé et ce, en climats présent et futur (horizon 2030-2050). Les expertises menées sur le climat grenoblois pour les étés 2019 et 2020 ont montré la variabilité spatio-temporelle de l'ICU à l'échelle de ces deux communes (Foissard, 2020), comme l'intensité de l'ICU et son occurrence pour ces deux étés, surtout lors de vagues de chaleur. Des cartographies préliminaires ont montré la forme spatiale de l'ICU à l'échelle des quartiers (figure 3a). Cependant, le contexte topographique en vallée encaissée engendre une forte variabilité spatiale de l'ICU, agissant surtout sur son extension. Cette variabilité a été constatée à un pas de temps journalier à horaire. A ce jour, les modèles physiques développés pour l'ICU demeurent moins performants pour les villes avec un contexte topographique complexe (montagnes) comme le souligne l'étude menée par l'équipe de recherche autrichienne par l'évaluation du modèle MUKLIMO\_3 (Hollósi *et al.*, 2021). Ces observations préliminaires soulignent le besoin de définir l'ICU selon deux aspects : temporel (fréquence et intensité) et spatial (structure et extension). Comprendre cette variabilité est nécessaire pour l'analyse conjointe d'autres thématiques, telle que la santé. Aussi, grâce au réseau de mesures très dense développé localement, deux approches sont utilisées pour détecter les extrêmes de chaleur urbains et en améliorer la quantification et la morphologie :

1/ l'approche via les **zones climatiques locales** (ou LCZ pour « *Local Climate Zone* ») proposés par Stewart et Oke (2012 ; figure 3b), ainsi que diverses typologies associées (Oliveira *et al.*, 2020), comme celles reposant actuellement sur les outils directement disponibles tel l'outil '*LCZ Generator*' (fonctionnant à partir de la base de données *World Urban Database and Access Portal Tools*). Ces éléments permettent de participer à l'effort d'amélioration et de normalisation sur le plan national de cette méthodologie et des outils associés.

2/ L'approche par la prise en compte des **types de temps** complète l'analyse du degré d'instabilité spatio-temporelle de l'ICU à l'échelle des deux communes. Les phénomènes de brises de vallées peuvent ainsi être observés à partir des nouvelles stations météorologiques urbaines implantées. Une analyse à

l'échelle d'une saison jusqu'à une nuit spécifique contribuera à définir les différentes structures. La connaissance acquise par l'étude des types de temps et des brises constitue un préalable pour la définition de stratégies d'intervention pour les collectivités. La préconisation apportée est de prendre en considération l'orientation des bâtiments pour limiter les obstacles à ces brises. La présence d'un "ICU mobile" pose la question de la relation entre l'occupation du sol et l'impact immédiat sur la température à l'échelle locale. Ce phénomène souligne la nécessité d'évaluer les échelles climatiques concernées et les brises associées.



**figure 3.** L'approche par Local Climate Zones (LCZ). A gauche : Cartographie des formes urbaines selon les LCZ réalisée dans le cadre de l'étude préliminaire de l'ICU à Grenoble (Foissard, 2020). A droite : Sous-classes LCZ pour représenter les combinaisons de types de "bâti" et de "couverture terrestre" (Stewart & Oke, 2012).

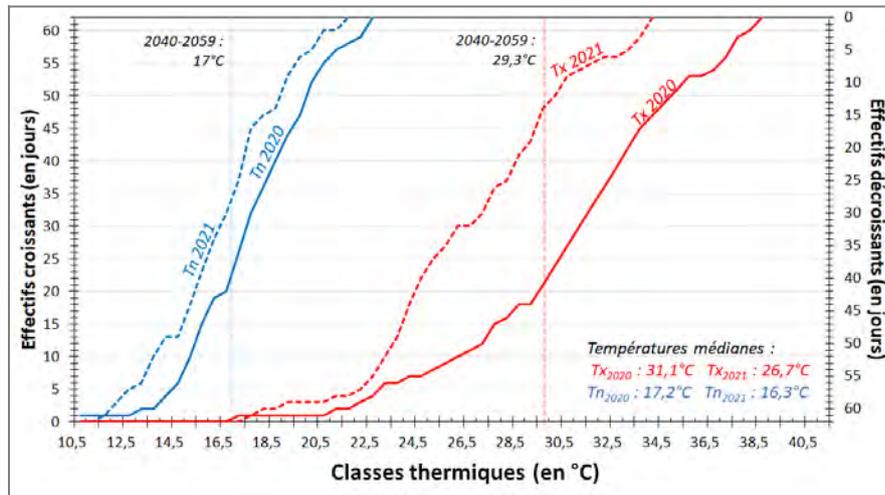
Une fois ces éléments calés et compris à partir de l'observation, le volet prospectif portant sur l'intensité et l'occurrence attendue des vagues de chaleur et de l'ICU sur l'aire grenobloise s'appuie sur l'analyse de données provenant de la modélisation numérique du climat. Ce volet est très attendu par les collectivités pour dépasser les éléments génériques, souvent mal adaptés et/ou à des échelles inappropriées, qui sont encore utilisés localement. En effet, il faut chercher à obtenir de meilleures estimations de la charge sanitaire future (et le caractère thermo-dépendant) pour les villes, les résultats actuels étant souvent trop grossiers à cette échelle. Les méthodologies statistiques sur les extrêmes cherchent surtout à souligner le potentiel disruptif des vagues de chaleur futures (dans ce que l'on appelle aussi désormais l'effet lié aux "points de bascule") et leurs impacts socio-démographiques à l'échelle infra-communale.

### 3. Résultats escomptés : quantification et morphologie spatio-temporelle des extrêmes chauds lors des ICU

Le projet CASSANDRE correspond à une demande explicite provenant des orientations stratégiques nationales, pour étudier le climat et la santé. De plus, le dernier rapport annuel du Haut Conseil pour le Climat (HCC, 2021) note qu'il est indispensable de se doter d'outils robustes et fiables pour identifier et mesurer les impacts du changement climatique et permettre le développement de services climatiques coordonnés. Cela doit passer par l'acquisition, l'application et l'opérationnalisation des données et connaissances en matière de climat. Le rapport note que la plateforme européenne Climate-ADAPT (<https://climate-adapt.eea.europa.eu/>) doit être renforcée et élargie avec, en particulier, la création d'un observatoire de la santé, et pour des échelles spatiales plus fines.

L'étude des extrêmes thermiques futurs et de la vulnérabilité socio-spatiale qu'ils imposeront aux échelles urbaines est alors un attendu majeur des collectivités, dans le cadre particulièrement d'un

urbanisme tactique et programmatique, et donc un objectif important de CASSANDRE. Par exemple, en menant une première analyse fréquentielle générale à partir des températures quotidiennes moyennes mesurées à la station de Grenoble-CEA-Radôme (figure 4) en juillet et août 2020 (été caniculaire ; Rome *et al.*, 2020) et 2021 (été considéré « normal »), on observe déjà des seuils thermiques moyens atteints très élevés.



**Figure 4.** Nombre de jours cumulés croissants (ordonnée de gauche) ou décroissants (ordonnée de droite) selon des classes de températures de 0,5°C (abscisse) calculés à partir des températures minimales (Tn) et maximales (Tx) de la station Grenoble-CEA-Radôme en juillet-août (N = 62) des années 2020 et 2021 (les données sont obtenues via la Publiothèque de Météo France) ; les traits pointillés verticaux correspondent aux valeurs des températures médianes moyennes 2040-2059 en juillet-août en Région Auvergne-Rhône-Alpes selon le scénario SSP5-8.5 (calculées d'après les données CMIP6 fournies par le *Climate Change Knowledge Portal*).

Alors que les températures journalières minimales médianes moyennes projetées en juillet-août à l'échelle de la Région AURA à l'horizon 2040-59 pour le scénario pessimiste SSP5-8.5 sont de 17°C, on voit que ce seuil est déjà dépassé en été 2020 à l'échelle de l'agglomération grenobloise. Cela indique donc d'ores et déjà *a priori* une très forte sensibilité lors d'extrêmes thermiques nocturnes, en lien avec l'ICU. La valeur médiane observée localement pour les Tx en 2020 (31,1°C) se situe également au-dessus de celle modélisée pour le futur à l'échelle régionale (29,3°C), indiquant bien que les pics et vagues de chaleur intenses déjà enregistrés ces dernières années ont des conséquences majeures, sans devoir attendre les prochaines décennies.

## Conclusion

Le projet CASSANDRE permettra de qualifier les différents quartiers et d'établir non seulement la relation entre l'ICU et les formes urbaines associées, mais également de caractériser le cadre de vie associé aux données liées à la santé des populations étudiées. Ce socle commun établi par les LCZ contribuera à établir des analyses spatiales croisées entre les thématiques climat et santé avec des indicateurs apportant des éléments d'aide à la décision au regard de l'aménagement.

**Remerciement :** Ce travail est réalisé dans le cadre du projet CASSANDRE (CANicules, SANTé et Densité de REseaux météorologiques sur le territoire grenoblois) financé par l'APR PACT<sup>2</sup>e (Planifier et Aménager, face au Changement climatique, la Transition des Territoires) de l'ADEME.

## Bibliographie

- Benmarhnia T., Beaudeau P., 2018. Les villes et la canicule : se préparer au futur et prévenir les effets sanitaires des îlots de chaleur urbain. *Bull. Epidemiol. Hebd.*, **16-17**, 354-57.
- Benmarhnia T., Kihal-Talantikite W., Ragetti M., Deguen S., 2017. Small-area spatiotemporal analysis of heatwave impacts on elderly mortality in Paris: A cluster analysis approach. *Science of the Total Environment*, **592**, 288-294.

- Bigot S., Bertrand M., Rome S., Duché S., 2017a. La prédisposition aux îlots de chaleur urbains (ICU) à Grenoble : cartographie par télédétection et intérêt des mesures in situ. Poster présenté à la Biennale de Grenoble - Villes en transition, 9-12 mars 2017.
- Bigot S., Duché S., Madelin M., Rome S., 2017b. Etude du climat urbain: pour une mise à disposition de nouveaux services climatiques. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, **68**, 13-36.
- Foissard X., 2020. *Etude préliminaire de l'îlot de chaleur urbain à Grenoble - Cartographie des indicateurs de formes urbaines en relation avec le climat urbain*, Ville de Grenoble, France.
- HCC, 2021. *Renforcer l'atténuation, engager l'adaptation*. Rapport annuel du Haut Conseil pour le Climat, 184 p.
- Hollósi B., Žuvela-Aloise M., Oswald S. et al., 2021. Applying urban climate model in prediction mode-evaluation of MUKLIMO\_3 model performance for Austrian cities based on the summer period of 2019. *Theor. Appl. Climatol.*, **144**, 1181-1204.
- Hough I., Just A. C., Zhou B., Dorman M., Lepeule J., Kloog I., 2020. A multi-resolution air temperature model for France from MODIS and Landsat thermal data. *Environ Res.*, **183**, 109244.
- Klok E. J., Kluck J., 2018. Reasons to adapt to urban heat (in the Netherlands). *Urban Climate*, **23**, 342-351.
- Kloog I., Nordio F., Lepeule J., Padoan A., Lee M., Auffray A., Schwartz J., 2016. Modelling spatio-temporally resolved air temperature across the complex geo-climate area of France using satellite-derived land surface temperature data. *Int. J. Climatology*, **37** (1), 296-304.
- Lepeule J., 2018. Exposition de la femme enceinte à la température ambiante et issues de grossesse. *Anses, Bulletin de veille scientifique* n° **33**, Santé-Environnement-Travail, 5 p.
- Oliveira A., Lopes A., Niza S., 2020. Local Climate Zones classification method from Copernicus Land Monitoring Service datasets: an ArcGIS-based Toolbox. *MethodsX*, **7**, 101150, 10 p.
- Rome S., Bertrand M., Duché S., Bigot S., 2017a. La perception des îlots de chaleur à Grenoble : enquête sur la sensibilisation des habitants aux extrêmes thermiques. Poster présenté à la Biennale de Grenoble - Villes en transition, 9-12 mars 2017.
- Rome S., Bigot S., Foissard X., Madelin M., Duché S., Fouvet A.-C., 2020. Les deux épisodes caniculaires de l'été 2019 à Grenoble : constat et perspective pour une gestion des extrêmes thermiques futurs. *Climatologie*, **17**, 12, 16 p.
- Rome S., Bigot S., Le Roy B., Duché S., Madelin M., 2017b. Les services climatiques pour faciliter l'étude des événements extrêmes et l'adaptation à l'échelle locale : cas d'étude en Auvergne-Rhône-Alpes. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **31**, 219-224.
- Stewart I. D., Oke T. R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **93**, 1879-1900. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

## PROFILS TEMPORELS ET NIVEAU GLOBAL DE LA POLLUTION ATMOSPHÉRIQUE DES MÉNAGES DE LA VILLE DE ZINDER, NIGER.

Mahamadou ZAKARI<sup>1</sup>, Abdou KAILOU DJIBO<sup>2</sup>, Souleymane KEITA<sup>3</sup>, Fabrice Paul NGUEMA<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Département Hygiène-Sécurité-Environnement, IUT, Université de Zinder, Laboratoire Ville et Développement Territorial Durable au Sahel (VIDET-Sahel), BP : 656 Zinder, Niger. Email : [mounir\\_zakari@yahoo.fr](mailto:mounir_zakari@yahoo.fr)

<sup>2</sup>Département Aménagement du Territoire et Urbanisme, IUT, Université de Zinder, Laboratoire Ville et Développement Territorial Durable au Sahel (VIDET-Sahel), BP : 656 Zinder. Email : [kailou20012001@yahoo.fr](mailto:kailou20012001@yahoo.fr)

<sup>3</sup>Département Génie Civil, Ecole Nationale d'Ingénieurs (ENI) Abderhamane Baba Touré, 410 Av. Van Vollenhoven, Bamako, Mali. Email : [soulkei\\_ml@yahoo.fr](mailto:soulkei_ml@yahoo.fr)

<sup>4</sup>Faculty of Agronomy and Agricultural Science, School Of Wood, Water and Natural Resources, University of Dschang, P. O. Box 786, Ebolowa, Cameroon. Email : [paul.nguema@univ-dschang.org](mailto:paul.nguema@univ-dschang.org)

**Résumé :** Au Niger, malgré une urbanisation relativement tardive par rapport aux autres pays d'Afrique, la pollution atmosphérique est un défi. Cette étude vise donc à élucider la problématique de la pollution atmosphérique à travers la détermination de profils temporels et du niveau global de la pollution de l'air ambiant des ménages de la ville de Zinder. Ainsi, certains polluants gazeux (HCOH, COVT) et particulaires (PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>) ont fait l'objet de surveillance durant 12 mois à l'aide d'un moniteur multifonctionnel. Les résultats mettent en exergue l'importance de la pollution particulaire qui dépasse les valeurs guides de l'OMS. En outre, 1,2 jours par semaine présentent un niveau global de pollution allant de 30% à 80%, ce qui signifie une qualité de l'air ambiant de pauvre à dangereuse.

**Mots-clés :** Pollution de l'air, profils temporels, Zinder, Niger.

**Abstract:** In Niger, despite relatively late urbanization compared to other African countries, air pollution is a challenge. This study aims to elucidate the problem of air pollution through the determination of temporal profiles and the overall level of ambient air pollution in households in the city of Zinder. Thus, some gaseous (HCOH, TVOC) and particulate pollutants (PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>) were monitored for 12 months using a multifunctional monitor. The results highlight the importance of particulate pollution, which exceeds the WHO guideline values. In addition, 1.2 days per week have an overall level of pollution ranging from 30% to 80%, which means ambient air quality from poor to dangerous.

**Keywords :** Air Pollution, Temporal Profiles, Zinder, Republic of Niger.

### Introduction

Le Conseil de l'Europe (CEC, 1991) a défini la pollution atmosphérique dès 1967 comme résultant de « la présence d'une substance étrangère dans l'air ou une variation importante dans les proportions de ses composants susceptible, compte tenu des connaissances scientifiques du moment, de provoquer un effet nocif, de créer une nuisance ou un gêne ». C'est donc un sujet complexe.

La pollution atmosphérique a des origines naturelles (émissions par la végétation, érosion du sol, volcans, océans, etc.) mais aussi anthropiques à travers les activités résidentielles, les activités industrielles et agricoles, le chauffage, la production énergétique, le transport, les feux de savane etc.. Les polluants issus des activités humaines forment un cocktail de gaz et d'aérosols. On y trouve les oxydes d'azote (NO<sub>x</sub>), le dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>), les composés organiques volatils (COVs), les

particules de diamètre inférieur à 10  $\mu\text{m}$ , celles inférieures à 2,5  $\mu\text{m}$  et celles inférieures à 1  $\mu\text{m}$  (respectivement appelées  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2,5}$ , et  $\text{PM}_1$ ), les métaux lourds, les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les pesticides et beaucoup d'autres composés à l'état de gaz ou d'aérosols (INERIS, 2017). Conséquemment, c'est un sujet polymorphe (Charvolin et al., 2015). Des études ont mis en exergue, très malheureusement les caractères toxicologiques (Quénel et al., 2003) et écotoxicologiques (Avognon-Houéto, 1997 ; Moudachirou, 2005) de la plupart de ces polluants.

Dans les pays du nord l'adoption du « Clean Air Act » dans les années 50, la signature de la Convention de Genève sur la pollution atmosphérique transfrontière à longue distance en 1979 et la création de l'Agence Européenne de l'Environnement en 1990 ont permis d'élucider les contours de la problématique de la pollution atmosphérique. Par contre, dans les pays d'Afrique subsaharienne, l'avancée est timide malgré qu'elle soit classée comme étant la partie du monde la plus polluée après l'Asie du Sud pour ses teneurs en particules fines selon le troisième rapport annuel du Health Effects Institute (HEI) et de l'Institute for Health Metrics and Evaluation (IHME). En effet, à l'exception du Sénégal qui dispose d'une Structure de Gestion de la Qualité de l'Air depuis 2007 calquée au modèle DPSIR (Drivers, Pressure, State, Impact, Responses), dans les autres pays de l'Afrique de l'Ouest notamment, il manque de mécanisme intégré permettant d'appréhender les problèmes de la pollution de l'air. Heureusement, ces dernières années, grâce aux programmes AMMA, POLCA, DACCIWA, ChairPol, PASMU, des villes comme Bamako, Cotonou, Abidjan, Korhogo et Yaoundé font l'objet des études mettant en interaction émissions, pollution atmosphérique et effets sur la santé (Adon et al., 2020).

A l'instar des autres pays du Sahel, au Niger également, l'urbanisation se manifeste par les phénomènes de l'étalement des villes existantes et par l'émergence de nouveaux centres urbains. La ville de Zinder qui est concernée par cette étude connaît une croissance urbaine de 4,7% entre 2001 et 2012, ce qui constitue un facteur de mutation socio-économiques et environnementale de taille (Adamou, 2020, Zakari et al., 2020).

## **1. Matériels et Méthodes**

### **1.1. Matériels**

Les mesures ont été effectuées avec le moniteur de la qualité de l'air du model IGERESS WP3960S qui est une marque appartenant à VSON TECHNOLOGY. Il a la taille d'un smartphone. Il mesure simultanément sept paramètres à savoir : les Formaldéhydes, les Composés Organiques Volatils Totaux, les  $\text{PM}_1$ , les  $\text{PM}_{2,5}$ , les  $\text{PM}_{10}$ , l'humidité relative et la température. Il renseigne également sur le niveau global de la pollution calculé à partir des différents paramètres mesurés qui va de 0% à 100%.

### **1.2. Méthodes**

Les mesures se sont déroulées de janvier à décembre 2020 sur 12 sites (soit 12 cours de ménages) répartis dans les 5 arrondissements de la ville. Chaque site a fait l'objet d'une surveillance durant un mois en raison de 3 mesures journalières : 5h-8h ; 12h-16h et 22h-2h. L'éloignement des sites des grands carrefours routiers pour minimiser l'interférence de la pollution liée au trafic était le principal critère de choix des sites. Le traitement des données a été fait avec le logiciel Openair description of package tools for the analysis of air pollution data version :2.8-6 (Carslaw and Ropkins, 2012) développé dans le but de traiter les données atmosphériques.

## 2. Résultats

### 2.1. Profils temporels de la Pollution particulaire

Les résultats des profils horaire, journalier et mensuel sont présentés dans les figures 1, 2, 3 respectivement pour les PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub>. On constate une variation similaire de ces 3 paramètres. Le profil horaire moyen présente des valeurs maximales à 6h du matin et des valeurs minimales vers 22h pour les PM<sub>10</sub> avec respectivement 65 µg/m<sup>3</sup> et 45 µg/m<sup>3</sup>. Le profil hebdomadaire fait ressortir des valeurs maximales le jeudi et minimales le samedi avec des concentrations moyennes respectivement de 90 µg/m<sup>3</sup> et 40 µg/m<sup>3</sup>. Sur le profil mensuel, les pics sont surtout observés durant les mois de décembre, janvier et février et les valeurs minimales en juillet.

De manière générale, nous avons remarqué que les PM<sub>1</sub>, PM<sub>2,5</sub> et PM<sub>10</sub> sont fortement et positivement corrélées. Ainsi, la corrélation entre PM<sub>1</sub> et PM<sub>10</sub>, PM<sub>1</sub> et PM<sub>2,5</sub>, et PM<sub>10</sub> et PM<sub>2,5</sub> est de l'ordre de 0,99.

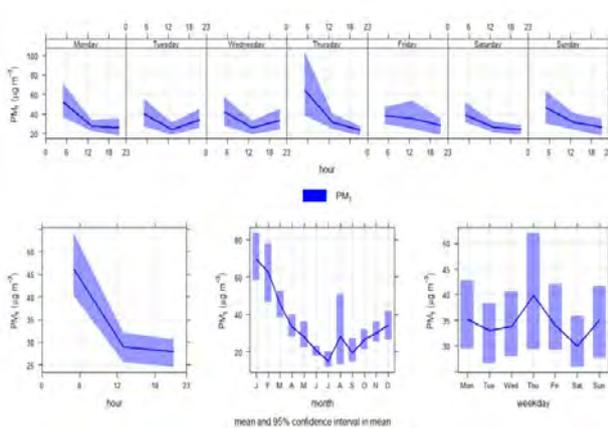


figure 1. Profils temporels des PM1

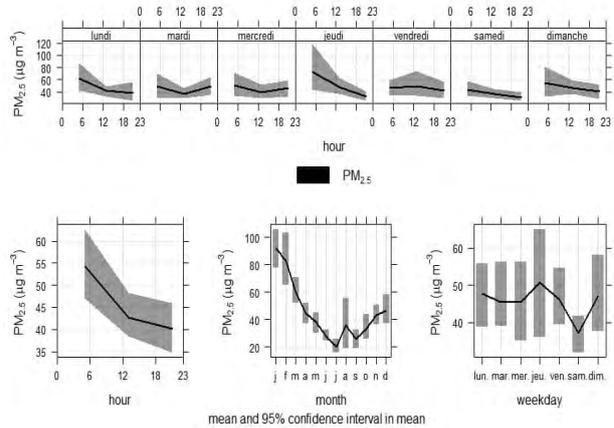


figure 2. Profils temporels des PM2,5

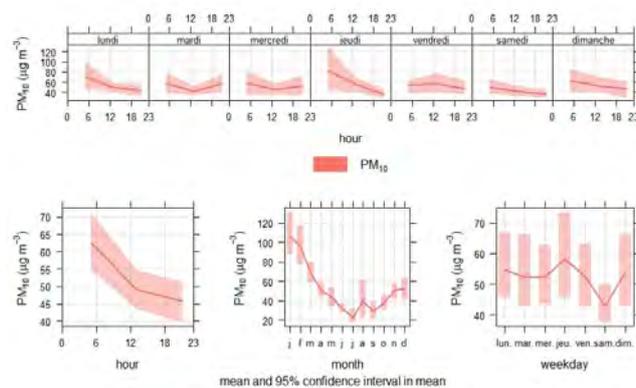


figure 3. Profils temporels des PM10

## 2.2. Profils temporels des composés organiques volatils et du formaldéhyde

Les figures 4 et 5 montrent les profils des COVT et de HCOH. Le profil horaire montre une variation de la pollution en COVT et HCOH sous forme de V. Il est ainsi observé une augmentation entre 12 et 20h avec un pic de  $0,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à 20h pour les COVT. Le profil journalier montre des variations non significatives entre  $0,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  et  $0,17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les COVT durant les jours de la semaine. Le profil mensuel montre que la concentration des COVT et HCOH est plus importante en avril, mai et juin avec des valeurs maximales en mai ( $0,35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Les faibles valeurs sont observées en décembre avec des valeurs moyennes autour de  $0,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

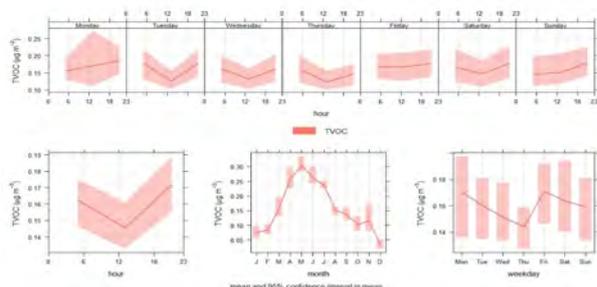


Figure 4. Profils temporels des COVT

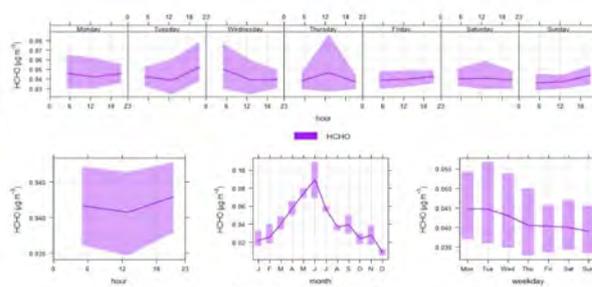


Figure 5. Profils temporels du HCHO

## 2.3. Conditions climatiques et pollutions particulaires et gazeuses

La figure 6 superpose les conditions climatiques notamment l'humidité relative (RH) et la température (figure 6a) et la pollution particulaire (figure 6b).

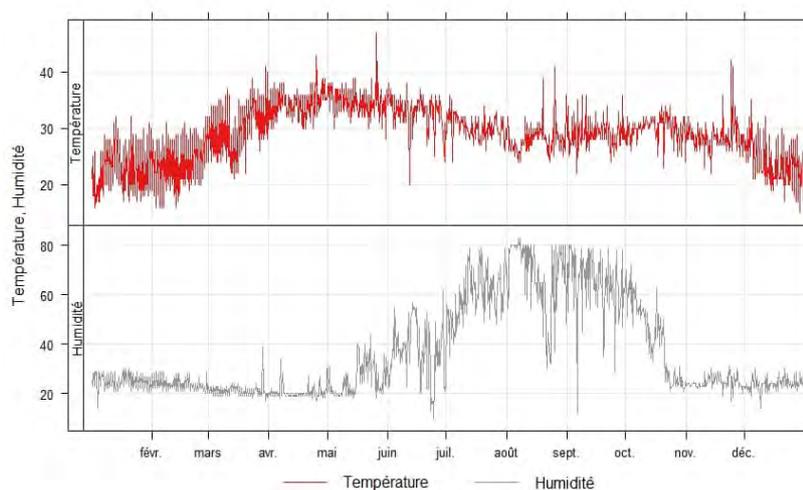
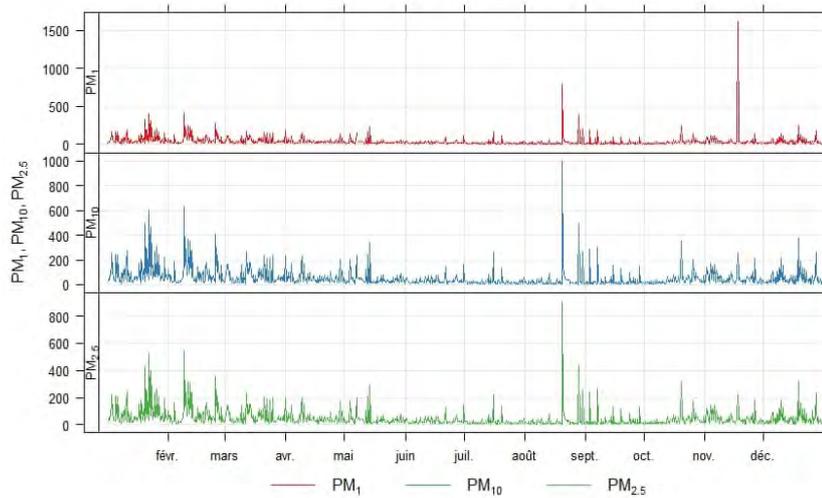


figure 6a. Variation de la température et de l'humidité relative



**figure 6.** Conditions climatiques et pollutions particulières

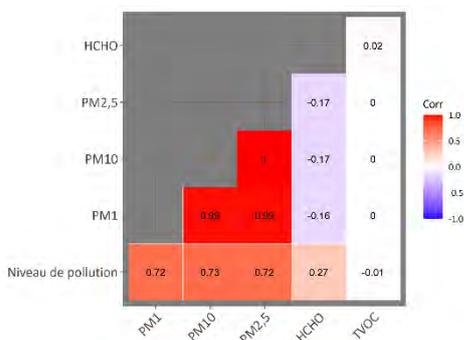
Il ressort de la figure 6a que la température et l’humidité relative ont des variations souvent opposées. Trois parties se distinguent correspondant aux saisons de Zinder : la saison froide (Harmattan) de novembre à février, la saison chaude de mars à mai et la saison des pluies à partir de juin.

On constate au niveau de la pollution particulaire quelques crêtes allant de novembre jusqu’en mars et durant le mois de septembre. Pour les autres mois, la variation est quasi linéaire à part quelques faibles pics sporadiques. Les valeurs moyennes annuelles tournent autour de  $52,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{10}$  et  $45,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour les  $\text{PM}_{2,5}$ , qui dépassent largement les Valeurs Guides de l’OMS pour les polluants classiques de la qualité de l’air extérieur fixées respectivement à 20 et  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  par an (OMS, 2015).

Pour la pollution des COVT et HCOH (Figures 4 et 5), les pics sont observés globalement durant les mois les plus chauds (mars, avril, mai). Cependant, sur une bonne partie de l’année, les valeurs enregistrées sont quasi nulles.

**2.4. Niveau Global de Pollution (NGP)**

Le NPG qui varie de 0% à 100% est affiché directement sur l’écran du moniteur. La figure 7 montre une relation assez forte entre le NPG et les variables  $\text{PM}_1$ ,  $\text{PM}_{2,5}$  et  $\text{PM}_{10}$ . Par contre, les HCOH et COVT ne sont pas corrélés avec le NPG.



**figure 7.** Corrélation entre NGP et les polluants

**figure 8.** Moyenne mensuelle du NGP

Il ressort de la lecture de la figure 8 qui présente les moyennes mensuelles du NGP, que le NGP présente des niveaux les plus élevés durant les mois de janvier et février (valeurs > 30%) et les plus bas en août et septembre (valeurs de l'ordre de 11%). Le traitement des données journalières montre que 17,5% des valeurs du NGP sont supérieures à 30%, ce qui signifie que globalement dans une semaine, 1,22 jours présentent une qualité allant de pauvre à dangereuse.

### 3. Analyse et Discussions

Les résultats de cette étude montrent qu'à Zinder, la pollution particulaire est plus préoccupante que celle des COVT et du formaldéhyde. Les valeurs moyennes journalières et annuelles dépassent largement les valeurs guides de l'OMS, ce qui présage des risques sanitaires. En effet, les études épidémiologiques ont prouvé que les particules sont associées à plusieurs pathologies comme l'asthme et la broncho-pneumopathie chronique obstructive (Boublil et al., 2013 ; Michael et al., 2013). Quant aux études biologiques, elles ont montré l'impact inflammatoire de l'aérosol urbain en Afrique (Val et al., 2013).

Les résultats des profils temporels de la pollution par les particules grossières (PM<sub>10</sub>) ont montré que 16,4% des concentrations journalières dépassent la limite définie par l'Agence de protection environnementale américaine selon les travaux de Ozer (2005) à Niamey au Niger, ce qui corrobore nos résultats. Nos résultats sont aussi en accord avec les mesures effectuées par d'autres études à Dakar, à Cotonou, et à Abidjan (Adon et al., 2020).

La caractérisation de la pollution par les COVs est complexe du fait que ces composés sont formés par une multitude de composantes. Dans le cas de cette étude, la pollution des COVT et de HCOH est insignifiante avec 350 jours de l'année qui enregistrent une concentration inférieure à 0,1 µg/m<sup>3</sup>.

Enfin, cette étude a permis de caractériser la présence d'une pollution particulaire très importante durant l'harmattan à Zinder. Ce résultat confirme beaucoup d'autres travaux comme celui de Goudie (1996) et plus récemment celui d'Adon et al. (2020) qui ont montré l'importance des poussières minérales dans les villes d'Afrique subsaharienne notamment au Sahara qui est considéré comme étant l'épicentre de la pollution particulaire de la Terre.

### Conclusion

Cette étude donne un aperçu de la pollution de l'air ambiant dans les ménages de Zinder. Le choix des sites exclut l'influence directe de la pollution anthropique urbaine liée au trafic routier notamment car la ville ne dispose pas d'industrie. La pollution particulaire est la plus significative et est présente pratiquement toute l'année, avec des variations temporelles.

L'étude a aussi mis en exergue le poids de la synergie des polluants à travers les statistiques sur le NGP. La pollution atmosphérique est donc une réalité à Zinder comme dans les autres villes du Niger qui est un pays au cœur du Sahara, où la poussière est quasi « chronique ». Il est donc urgent de créer un cadre réglementaire et de contrôle de la qualité de l'air au Niger.

### Références

Adamou A., 2020 : Morphologie urbaine à Zinder : densités urbaines et mise en valeur des espaces résidentiels, *Revue congolaise de Communication, Lettres, Arts et Sciences Sociales (CLASS), les Villes Africaines, LES EDITIONS HEMAR, N°9*.

Adon AJ, C. Liousse, E. T. Doumbia, A. Baeza-Squiban, H. Cachier, J.F. Léon, V. Yoboué, A. B. Akpo, C. Galy-Lacaux, B. Guinot, C. Zouiten, H. Xu, E. Gardrat, and S. Keita, 2020: Physico-chemical characterization of urban aerosols from specific combustion sources in West Africa at Abidjan in Côte d'Ivoire and Cotonou in Benin in the frame of the DACCIWA program, *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 5327–5354.

Avognon-Houéto L., 1997 : Journée de réflexion sur la pollution atmosphérique au Bénin. *Rapport de travaux-Cotonou, MEHU*, 40 p.

Boublil L., Assemat E., Borot M.-C., Boland S., Martinon L., Sciare J., Baeza-Squiban A., 2013: Development of a repeated exposure protocol of human bronchial epithelium in vitro to study the long-term effects of atmospheric particles, *Toxicol. In Vitro*, **27**, 533–542.

Carslaw D. and Ropkins K., 2012: Openair, An R package for air quality data analysis, *Environ., Modelling and Software*, **27**--28:52-61.

CEC, 1991: Handbook for Urban Air Improvement, Commission of the European Communities. *Environmental Resources Ltd, London*, 340p.

Charvolin F., Frioux S., Kamoun L., Mélard F., et Roussel I., 2015 : Un air familial ? Sociohistoire des pollutions atmosphériques, *Presse des mines, Sciences sociales*, Paris.

Goudie AS., 1996: Climate: Past and present. In: *Adams WM, Goudie AS, Orme ARD, eds. The physical geography of Africa. New York : Oxford University Press*, 34-59.

INERIS, 2017 : Pollution atmosphérique : mesurer, prévoir et agir, *INERIS mag*, n°41.

Michael S., Montag M., Dott W., 2013: Proinflammatory effects and oxidative stress in lung macrophages and epithelial cells induced by ambient particulate matter, *Environ. Pollut.* **183**, 19–29.

Moudachirou M., 2005 : Étude de la pollution atmosphérique de la ville de Cotonou. *Rapport final*.

OMS, 2015 : Directives de la qualité de l'air de l'organisation mondiale de la santé - janvier 2015, *Bruxelles environnement-ibge, collection fiches documentées, thématique air*.

Ozer P., 2005 : Estimation de la pollution particulaire naturelle de l'air en 2003 à Niamey (Niger) à partir de données de visibilité horizontale Environnement, *Risques & Santé*, Volume **4**, Numéro 1, 43-9.

Quénel P., Dab W., Festy B., Viau C. et Zmirou D., 2003 : Qualité de l'air ambiant, In *Environnement et santé publique- Fondement et pratiques*, pp 291- 315.

Val S., Liousse C., Doumbia E. H. T., Galy-Lacaux, C., Cachier H., Marchand N., Badel A., Gardrat E., Sylvestre A. and Baeza-Squiban A., 2013: Physico-chemical characterization of African urban aerosols (Bamako in Mali and Dakar in Senegal) and their toxic effects in human bronchial epithelial cells: description of a worrying situation, *Part. Fibre Toxicol.*, **10**(1), 10.

Zakari M.M., Nguema R. P., Adamou A., Esly E. and Zakari A., 2020: Air Pollution linked to Road Traffic: Assessment of Carbon Monoxide (CO) Emissions in Zinder City, Niger Republic. *European International Journal of Science and Technology*, 9(**10**), 111-120.

## THE COPERNICUS ATMOSPHERE MONITORING SERVICE (CAM5) EMISSIONS OF GREENHOUSE GASES AND AIR POLLUTANTS

**Antonin SOULIE<sup>1</sup>, Claire GRANIER<sup>1,2</sup>, Hugo DENIER VAN DER GON<sup>3</sup>, Jeoren J. P. KUENEN<sup>3</sup>, Santiago Arellano<sup>4</sup>, Sabine DARRAS<sup>5</sup>, Thierno DOUMBIA<sup>1</sup>, Bo GALLE<sup>4</sup>, Michael GUAUSS<sup>6</sup>, Marc GUEVARA<sup>7</sup>, Jukka-Pekka JALKANEN<sup>8</sup>, Sekou KEITA<sup>1</sup>, Cathy LIOUSSE<sup>1</sup>, Jana DOUBALOVA<sup>9</sup>, David SIMPSON<sup>6</sup>, Katerina SINDELAROVA<sup>9</sup>**

<sup>1</sup>Laboratoire d'Aérodynamique, Université de Toulouse, CNRS/UPS, Toulouse, France

<sup>2</sup>NOAA Chemical Sciences Laboratory–CIRES/University of Colorado, Boulder, CO, USA

<sup>3</sup>TNO, dept. Climate, Air and Sustainability, Utrecht, The Netherlands

<sup>4</sup>Department of Space, Earth and Environment, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden

<sup>5</sup>Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse, France

<sup>6</sup>Norwegian Meteorological Institute, P.O. 43 Blindern, 0313 Oslo, Norway

<sup>7</sup>Barcelona Supercomputing Center, 08034 Barcelona, Spain

<sup>8</sup>Finnish Meteorological Institute, P.O. Box 503, 00101 Helsinki, Finland;

<sup>9</sup>Charles University in Prague, Prague, Czech Republic

**Abstract:** We describe several inventories of emissions of air pollutants and greenhouse gases developed in order to drive the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAM5) atmospheric models, which provide global and regional air quality forecasts and reanalyses. A global inventory of anthropogenic emissions of air pollutants (including 25 speciated VOCs) and greenhouse gases, as well as a regional inventory of European emissions, have been developed. Global and regional temporal profiles of emissions, based on weather patterns, are also available. The CAM5 emissions inventories also include ship emissions based on automatic ships identification systems and adjustment factors to account for COVID-19 lockdowns. Emissions of various compounds from natural sources, i.e. volcanoes, vegetation and soils have also been developed.

**Keywords:** CAM5, Air pollutants, GHG, Emissions

**Résumé :** Nous décrivons ici plusieurs inventaires d'émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre développés comme données d'entrée pour les modèles atmosphériques du Service Atmosphérique de Copernicus (Copernicus Atmosphere Monitoring Service: CAM5), qui fournit des prédictions et réanalyses de la qualité de l'air à des échelles globales et régionales. Un inventaire global d'émissions anthropiques de polluants atmosphériques (comprenant 25 VOCs individuels) et de gaz à effet de serre, ainsi qu'un inventaire régional d'émissions européennes, ont été développés. Des profils temporels d'émissions, basés sur les conditions météorologiques sont également disponibles. Les inventaires d'émissions de CAM5 incluent aussi des émissions dues aux bateaux, sur la base du système automatique d'identification de bateaux et des facteurs d'ajustement pour prendre en compte les effets des confinements liés au COVID-19. Des émissions de plusieurs composés issues de sources naturelles, i.e. les volcans, la végétation et les sols ont aussi été développées.

**Mots-clefs :** CAM5, Polluants atmosphériques, Gaz à effet de serre, Émissions

### Introduction

Copernicus, the European Union's Earth observation program (copernicus.eu) includes several services, including the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAM5, atmosphere.copernicus.eu), CAM5 provides regional and global forecasts and reanalysis of the distribution of the major air pollutants and greenhouse gases. Several inventories of emissions were developed to be used as input for these simulations/reanalyses. This paper summarizes the methodology of the development of those inventories, a few results and information on the access to the datasets.

## Global anthropogenic emissions: CAMS-GLOB-ANT

CAMS-GLOB-ANT is a global inventory of anthropogenic emissions of the main atmospheric pollutants and greenhouse gases: NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, black carbon (BC), organic carbon (OC), NH<sub>3</sub>, non-methane volatile organic compounds (NMVOCs) with 25 speciated individual VOCs, CO<sub>2</sub> (excluding/including short cycle), CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O. CAMS-GLOB-ANT provides emissions on a monthly basis at a 0.1x0.1 degree resolution for the 2000-2022 period. 19 sectors of emissions are taken in account.

### General methodology

CAMS-GLOB-ANT is based on a combination of two emissions inventories: EDGARv5 and CEDS.

The EDGAR (Emission Database for Global Atmospheric Research: [data.jrc.ec.europa.eu/collection/edgar](http://data.jrc.ec.europa.eu/collection/edgar)) inventories provides yearly gridded data for the major atmospheric pollutants and greenhouse gases. We have used version 5 of the EDGAR emissions which are available up to 2015 and version EDGARv4.3.2 for individual VOCs emissions, which are provided up to 2012.

We have also used the CEDS (Community Emissions Data System: [www.globalchange.umd.edu/ceds](http://www.globalchange.umd.edu/ceds)) emissions, which were developed in support of the simulations performed for the 6<sup>th</sup> IPCC assessment ([www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/](http://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/)). We have used the version described in McDuffie et al. (2020) and the country data available in the corresponding repository ([zenodo.org/record/3754964#YhSpr98o8\\_U](https://zenodo.org/record/3754964#YhSpr98o8_U)), which provides total emissions per country and sector up to 2019.

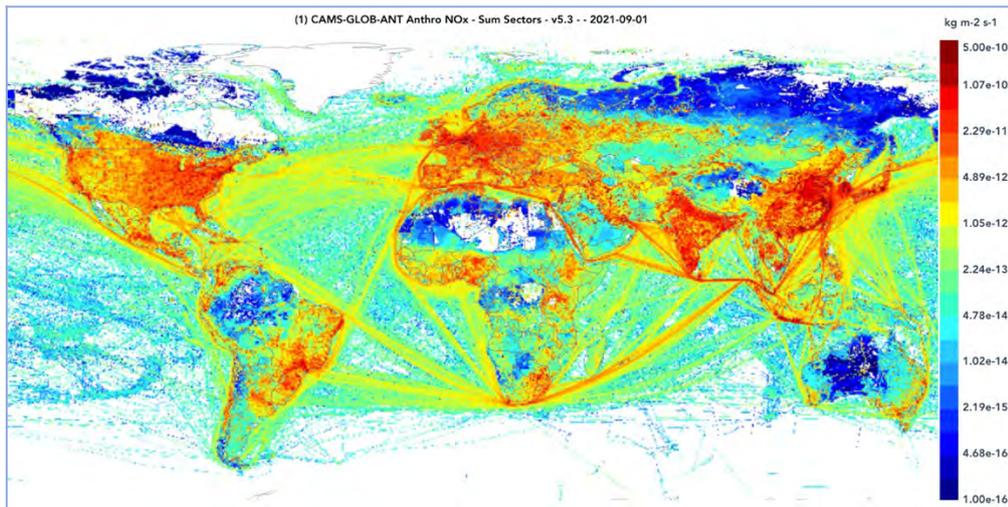
To develop the current version of the CAMS-GLOB-ANT inventory, the EDGARv5 gridded data were extrapolated from 2015 to 2022 by multiplying the emissions for each year starting in 2015 by a factor calculated from the CEDS country data, using the following formula:  $e_{t+1} = q \cdot e_t$ , where  $e_t$  is the

emissions on year  $t$  and  $q$  the growth factor:  $q = \frac{c_{2019}}{\text{mean}(c_{2014-2019})} \frac{c_{2019}}{\text{mean}(c_{2014-2019})}$  with  $c_t$  being the CEDS emissions at year  $t$ . This growth factor  $q$  is calculated for each country and sectors. The emissions are then gridded on the EDGARv5/CAMS grid (0.1x0.1 degree) and used to extrapolate the emissions up to 2022.

EDGARv5, CEDS and CAMS sectors do not match exactly, so a sector conversion is made before calculating the growth factors for EDGARv5/CEDS sectors correspondence and another conversion is made with the extrapolated data to match CAMS sectors. In some cases, the sectors available in EDGAR and CAMS data are not available in the CEDS data, so the growth factors are calculated using the last years (2013-2015) of EDGAR's emissions.

For now, the CAMS-GLOB-ANT emission do not take into account the changes in emissions related to the COVID-19 lockdowns in 2020. A separate dataset providing adjustment factors for the lockdowns has been developed, it is called: CONFORM (COvid-19 adjustmeNt Factors fOR eMissions) and is described in Dombia et al. (2021)

An example of the NO<sub>x</sub> emissions in July 2021 from version 5.3 of the CAMS-GLOB-ANT inventory is shown in Figure 1.



**figure 1:** NO<sub>x</sub> emissions (in kg/m<sup>2</sup>/s) in July 2021 as given by version 5.3 of CAMS-GLOB-ANT

### Individual VOCs

No individual VOCs emissions are present in CEDS or EDGAR inventories. We have used a previous version of EDGAR (EDGARv4.3.2), which provides the emissions of individual VOCs up to 2021. To extrapolate the emissions of each individual VOCs up to 2022, we have applied the growth factor of the total NMVOCs species.

### Temporal variation, ship and aircraft emissions

Aircraft emissions are provided by CAMS-GLOB-AIR. These emissions are based on the CEDS aircraft emission data as described in Hoesly et al. (2018). For the years up to 2014, the emissions are the same as in CEDS. After 2014, we extrapolate in time using the trends calculated for the period 2012-2014. For the speciation of VOCs, the emissions are based on the weights defined by EDGAR for landing and take off (for the first two levels of the atmosphere corresponding to 0.305 km and 0.915 km), and for exhaust (corresponding to the rest of the levels up to 14.945 km). The emission for each individual VOC is calculated by multiplying these weights by the emissions for total VOCs.

The monthly time-step of CAMS-GLOB-ANT was implemented using temporal profiles given by the CAMS-GLOB-TEMPO dataset as described in Section 3. Ships emissions are described in Section 4.

### European anthropogenic emissions: CAMS-REG

The CAMS-REG anthropogenic emissions (Kuenen et al., 2022) are inventories providing air pollutants and greenhouse gases regional emissions for the European domain. The emissions are given for the 2000-2017 period with a 0.05x0.1 grid resolution. The emissions are based on 2017 national emissions reporting combined with other sources. The main air pollutants are included: NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, NMVOCs, NH<sub>3</sub>, CO, PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub>, and also CH<sub>4</sub>. To stay as close as possible to the emissions as officially reported and used in policy assessment, the inventory uses the officially reported emission data by European countries to the UN Framework Convention on Climate Change, the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution and the EU National Emission Ceilings Directive as the basis where possible. Emissions are collected at the high sectoral level, distinguishing around 250 different sector–fuel combinations, whereafter a consistent spatial distribution is applied for Europe. Along with the resulting annual emission maps, profiles for splitting particulate matter (PM) and NMVOCs into individual components are provided, as well as information on the height profile by sector and temporal disaggregation down to the hourly level to support modelling activities.

### Temporal profiles: CAMS-GLOB-TEMPO

CAMS-GLOB-TEMPO (Guevara et al., 2021) provides gridded monthly, daily, weekly and hourly weight factors for atmospheric chemistry modelling for the 2000-2017 period. CAMS-GLOB-TEMPO includes temporal profiles for the main air pollutants ( $\text{NO}_x$ ;  $\text{SO}_x$ ; NMVOCs;  $\text{NH}_3$ ;  $\text{CO}$ ;  $\text{PM}_{10}$ ; and  $\text{PM}_{2.5}$ ) and the greenhouse gases ( $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$ ) for each of the following anthropogenic source categories: energy industry (power plants), residential combustion, manufacturing industry, transport (road traffic and air traffic in airports) and agricultural activities (fertilizer use and livestock), ships emissions from CAMS-GLOB-SHIP (see below). The temporal factors take in account weather variations impacts on emissions (from residential heating for example) and human activities, electricity production, traffic counts variations.

#### **Ship emissions: CAMS-GLOB-SHIP**

CAMS-GLOB-SHIP provides daily emissions from ships, at the global and regional (Europe) scale. The emissions are computed with the Ship Traffic Emissions Assessment Model (STEAM3, Johansson et al., 2017), which combines real-time ship activity data from the Automatic Identification System (AIS) and vessel technical data. The emissions are available with a daily timestep on  $0.1 \times 0.1$  or  $0.005 \times 0.01$  (Europe) degree resolution grids for the 2000-2020 period. It should be noted that the coverage of inland shipping data may be poor, because the use and coverage of AIS in inland waterways is incomplete. For deep sea shipping AIS is mandatory, but for inland shipping it is voluntary.

#### **Natural emissions: CAMS-GLOB-OCE, CAMS-GLOB-SOIL, CAMS-GLOB-BIO, CAMS-GLOB-VOLC and CAMS-GLOB-TERM**

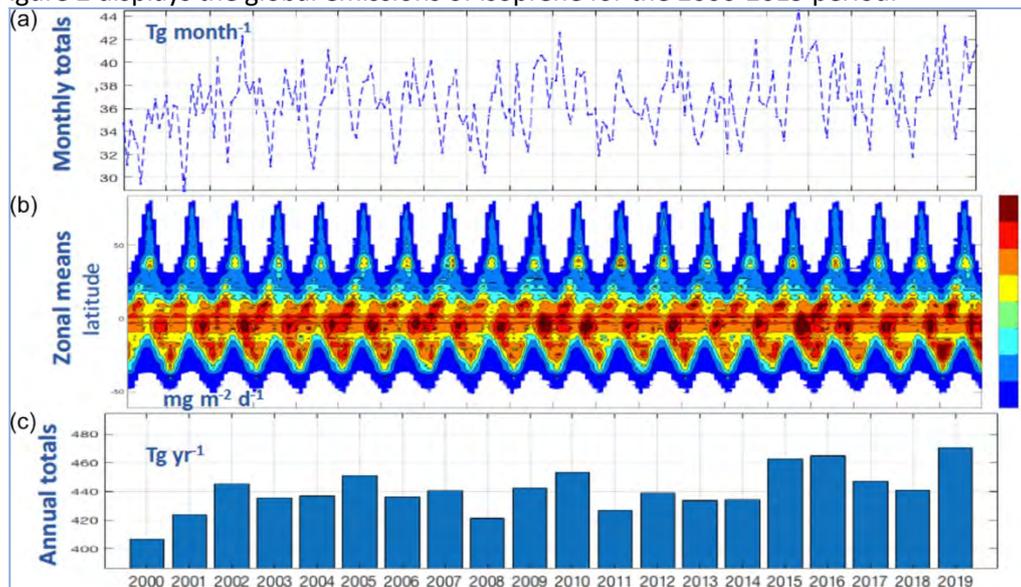
Within CAMS, natural emissions inventories have also been developed, which provide the emissions of several compounds emitted by the oceans, soils, vegetation and volcanoes.

CAMS-GLOB-OCE provides natural emissions of dimethyl sulfide (DMS), halogens carbonyl sulfide (OCS) and carbonyl disulfide ( $\text{CS}_2$ ) from oceans. The methodology and the emissions of OCS and  $\text{CS}_2$  are described in Lennartz et al. (2021). The CAMS dataset includes the emissions of OCS, DMS and Halogens (bromoform ( $\text{CHBr}_3$ ), methyl iodide ( $\text{CH}_3\text{I}$ ), dibromomethane ( $\text{CH}_2\text{Br}_2$ )). The emissions are provided with a spatial resolution of  $0.5 \times 0.5$  or  $1 \times 1$  degree and cover the 2000 to 2020 period.

CAMS-GLOB-SOIL (Simpson and Darras, 2021) is an inventory of  $\text{NO}$  emissions from soils, comprising gridded monthly data and the corresponding 3-hourly weight factors, suitable for atmospheric chemistry modelling. Data are provided globally at  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  degree horizontal resolution, and with over the period 2000–2018. Emissions are provided as total values and also with separate data for soil  $\text{NO}$  emissions from background biome values, and those induced by fertilizers/manure, pulsing effects, and atmospheric deposition, so that users can include, exclude or modify each component if wanted.

CAMS-GLOB-BIO (Sindelarova et al., 2022) provides high-resolution global emission inventories of the main biogenic volatile organic compounds (BVOCs) species including isoprene, monoterpenes, sesquiterpenes, methanol, acetone and ethene. Emissions on a monthly and daily basis were calculated by the Model of Emission of Gases and Aerosols from Nature (MEGANv2.1) driven by meteorological reanalyses of the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) for the period of 2000–2019 using ERA5 (both  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  horizontal spatial resolution) meteorology. Furthermore, European isoprene emission potential data were updated using high-resolution land cover maps and detailed information of tree species composition and emission factors from the EMEP MSC-W model system.

Figure 2 displays the global emissions of isoprene for the 2000-2019 period.



**figure 2** : Global monthly totals (a), zonal means (b) and global annual totals (c) of the isoprene emissions

for the period of 2000–2019 in the CAMS-GLOB-BIOv3.1 inventory (from Sindelarova et al., 2022)

CAMS-GLOB-VOLC (Arellano et al., 2021) provides the emissions of SO<sub>2</sub> from constant degassing volcanoes, based on the compilation of results of homogenized post-analysis of measurements of SO<sub>2</sub> flux and plume parameters obtained during the period March 2005 to January 2017 of 32 volcanoes from the NOVAC (Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change: novac-community.org) network.

CAMS-GLOB-TERM provides emissions of methane from termites. The emissions of CH<sub>4</sub> from termite nests were estimated based on the methodology by Sanderson (1996). 11 ecosystems from the Olson vegetation database (Olson et al., 1989) were identified as termite habitats. Each of these ecosystems was assigned termite biomass per m<sup>2</sup> and CH<sub>4</sub> emission flux per g of termite and hour. Long-term monthly means of precipitation were used to introduce seasonality based on the observations. More details can be found in Granier et al. (2019).

### Conclusion and availability of the emissions data

The Copernicus Atmosphere Monitoring Service provides, in addition of models/reanalysis data, various open-access emissions-datasets that can be really useful for a lot of research activities and for modeling. The data are consistent and were carefully checked and evaluated.

The emissions are publicly available on the ECCAD (Emissions of atmospheric Compounds and Compilation of Ancillary Data: ecad.aeris-data.fr). The ECCAD database will be described in details in the conference in the paper by Darras et al.

### Bibliography

Arellano, S., Galle, B., Apaza, F., Avarid, G., Barrington, C., Bobrowski, N., Bucarey, C., Burbano, V., Burton, M., Chacón,

Z., Chigna, G., Clarito, C. J., Conde, V., Costa, F., De Moor, M., Delgado-Granados, H., Di Muro, A., Fernandez, D., Garzón, G., Gunawan, H., Haerani, N., Hansteen, T. H., Hidalgo, S., Inguaggiato, S., Johansson, M., Kern, C., Kihlman, M., Kowalski, P., Masias, P., Montalvo, F., Möller, J., Platt, U., Rivera, C., Saballos, A., Salerno, G., Taisne, B., Vásconez, F., Velásquez,

G., Vita, F., and Yalire, M., 2021: Synoptic analysis of a decade of daily measurements of SO<sub>2</sub> emission in the troposphere from volcanoes of the global ground-based Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change, *Earth Syst. Sci. Data*, **13**, 1167–1188, <https://doi.org/10.5194/essd-13-1167-2021>

- Doumbia, T., Granier, C., Elguindi, N., Bouarar, I., Darras, S., Brasseur, G., Gaubert, B., Liu, Y., Shi, X., Stavrou, T., Tilmes, S., Lacey, F., Deroubaix, A., and Wang, T., 2021: Changes in global air pollutant emissions during the COVID-19 pandemic: a dataset for atmospheric modeling, *Earth Syst. Sci. Data*, **13**, 4191–4206, <https://doi.org/10.5194/essd-13-4191-2021>
- Granier, C., S. Darras, H. Denier van der Gon, J. Doubalova, N. Elguindi, B. Galle, M. Gauss, M. Guevara, J.-P. Jalkanen,
- J. Kuenen, C. Liousse, B. Quack, D. Simpson, K. Sindelarova, 2019: The Copernicus Atmosphere Monitoring Service global and regional emissions (April 2019 version), Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) report, doi:10.24380/d0bn-kx16.
- Guevara, M., Jorba, O., Tena, C., Denier van der Gon, H., Kuenen, J., Elguindi, N., Darras, S., Granier, C., and Pérez García-Pando, C., 2021: Copernicus Atmosphere Monitoring Service TEMPORal profiles (CAMS-TEMPO): global and European emission temporal profile maps for atmospheric chemistry modelling, *Earth Syst. Sci. Data*, **13**, 367–404, <https://doi.org/10.5194/essd-13-367-2021>.
- Johansson, L. J.-P. Jalkanen, J. Kukkonen, 2017: Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution, *Atmos. Env.*, **167**, 403–415, doi:10.1016/j.atmosenv.2017.08.042.
- Kuenen, J., Dellaert, S., Visschedijk, A., Jalkanen, J.-P., Super, I., and Denier van der Gon, H. 2022: CAMS-REG-v4: a state-of-the-art high-resolution European emission inventory for air quality modelling, *Earth Syst. Sci. Data*, **14**, 491–515, <https://doi.org/10.5194/essd-14-491-2022>.
- Lennartz, S. T., Gauss, M., von Hobe, M., and Marandino, C. A., 2021: Monthly resolved modelled oceanic emissions of carbonyl sulphide and carbon disulphide for the period 2000–2019, *Earth Syst. Sci. Data*, **13**, 2095–2110, <https://doi.org/10.5194/essd-13-2095-2021>.
- McDuffie, E. E., Smith, S. J., O'Rourke, P., Tibrewal, K., Venkataraman, C., Marais, E. A., Zheng, B., Crippa, M., Brauer, M., and Martin, R. V., 2020: A global anthropogenic emission inventory of atmospheric pollutants from sector- and fuel-specific sources (1970–2017): an application of the Community Emissions Data System (CEDS), *Earth Syst. Sci. Data*, **12**, 3413–3442, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3413-2020>.
- Olson, J. S., Stanley, L., Colby, J., Ohrensall, M., Olson, 1989: World Ecosystems (WE1.4), NOAA/NGDC/WDC-A, Nat. Geophys. Data Cent., Boulder, Colorado.
- Sanderson, M. G., 1996: Biomass of termites and their emission of methane and carbon dioxide: A global database. *Global Biochemical Cycles*, **10**, 4, Pages 543–557.
- Simpson, D. and Darras, S., 2021: Global soil NO emissions for Atmospheric Chemical Transport Modelling: CAMS-GLOB-SOIL v2.2, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/essd-2021-221>.
- Sindelarova, K., Markova, J., Simpson, D., Huszar, P., Karlicky, J., Darras, S., and Granier, C., 2022: High-resolution biogenic global emission inventory for the time period 2000–2019 for air quality modelling, *Earth Syst. Sci. Data*, **14**, 251–270, <https://doi.org/10.5194/essd-14-251-2022>.

## L'ÎLOT DE FRAÎCHEUR DU COTENTIN (NORMANDIE) : UN ELDORADO DE L'ADAPTATION AUX CANICULES ?

Matthieu DAVID<sup>1</sup>, Olivier CANTAT<sup>1</sup>, Éline GÉRARD<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UMR 6266 IDEES Caen, Université de Caen Normandie, Caen, France (matthieu.david@unicaen.fr  
olivier.cantat@unicaen.fr)

<sup>2</sup>Centre de Recherche sur les Droits Fondamentaux et les Évolutions du Droit, Université de Caen Normandie, Caen, France

**Résumé :** Face à la multiplication des canicules, la question de l'adaptation se fait de plus en plus pressante pour les populations exposées. La mobilité vers des zones réputées plus fraîches peut être choisie par les individus, réduisant de fait leur exposition à cet aléa. Le tourisme, de par ses composantes spatiale et temporelle, est sans doute l'une des formes que peut prendre cette adaptation. Le Cotentin enregistre déjà les premiers signaux faibles par un recours des estivants à la quête de fraîcheur tactique.

**Mots-clés :** îlot de fraîcheur, refuge climatique, adaptation, tourisme, Normandie.

### Introduction

La mobilité, parce qu'elle engendre une diminution de l'exposition aux aléas lorsque la destination est correctement choisie, fait partie des moyens d'adaptation à notre disposition. Elle s'ajoute aux techniques tendant à réduire la vulnérabilité au sein des espaces soumis aux aléas. Lorsque l'on pense aux canicules, la recherche de zones plus fraîches - ou a minima moins chaudes - est donc une solution appropriée. Des îlots de fraîcheur absolus (en dessous des seuils d'alertes) ou relatifs (réduisant l'intensité de la chaleur) peuvent ainsi être un choix de destination pertinent. Les côtes de la Manche, Bretagne et Normandie en tête, offrent ce type de potentiel climatique (David *et al.* 2020).

Bien que ces zones proposent un moyen d'adaptation logique, cela ne veut pas dire pour autant que la société y a recours lors des très fortes chaleurs. Les populations exposées aux canicules peuvent par méconnaissance, par choix ou par contrainte ne pas se déplacer. Les résultats de l'enquête exploratoire présentés ici traitent d'un îlot de fraîcheur *a priori* susceptible d'être un lieu d'accueil en cas de canicule : le Cotentin, péninsule située au nord-ouest de la France.

### L'hypothèse du tourisme comme prélude de la mobilité d'adaptation aux canicules

#### La canicule, un aléa aux caractéristiques spatio-temporelles particulières

Pour isoler la ou les mobilités pouvant servir de solution d'adaptation dans le cas d'une canicule, il est nécessaire de se pencher sur les particularités spatio-temporelles propres à cet aléa.

Une canicule est un phénomène relativement prévisible, à la fois spatialement et temporellement. Au contraire d'un orage par exemple, sa survenue ne surprend pas, mais ce n'est pas pour autant que cela en fait un événement facile à saisir. Tandis que d'autres aléas météorologiques voient leurs « pics » arriver très tôt pour descendre plus ou moins rapidement, ici c'est l'inverse qui se produit. Une canicule n'entraîne pas une rupture météorologique mais plutôt une exagération de conditions très chaudes qui durent, augmentant au fur et à mesure le risque induit pour la population. Cette singularité temporelle en fait un aléa à part. D'autant plus à part que les changements climatiques sont amenés à le faire évoluer, rendant inopérante notre mémoire du risque en raison de l'obsolescence de nos repères météo-climatiques, que cela soit en termes d'intensité ou d'extension spatio-temporelle.

À cette obsolescence s'ajoute la difficile communication autour des canicules, pourtant nécessaire pour « mettre à jour » notre mémoire du risque. Leur « invisibilité » spatiale est un autre trait la rendant particulièrement complexe à envisager et à appréhender, à la fois sur le moment (après son annonce, voire au début de l'épisode) mais également pour notre mémoire. Comment faire pour représenter une

canicule ? À quoi ressemble un espace soumis à une canicule ? Comment faire pour s'en souvenir ? Ces questions pourtant simples dans le cas d'autres aléas comme une tempête ou des inondations deviennent de véritables casse-têtes lorsqu'il s'agit de figurer des données thermiques immatérielles. La représentation physique et mentale de l'aléa joue pourtant dans l'appréciation du risque par la population. Les photographies, si suggestives dans le cas des impacts d'une tempête ou d'inondations, ne suggèrent que piètrement des sensations thermiques extrêmes et durables. Bien sûr les cartes de températures peuvent donner des indications mais avant de les avoir vécues, il est quasiment impossible de se représenter les effets qu'elles ont sur notre corps. Le caractère « impalpable » rend sans doute l'appréciation d'une possibilité d'adaptation par la mobilité plus complexe : comment sans indice visuel identifier à l'œil nu un espace plus frais ? D'autant que les zones englobées par une canicule sont assez vastes et qu'il est rare de pouvoir échapper à l'une d'elle en parcourant quelques kilomètres. Dans ce cas, les cartes météorologiques permettent d'identifier des zones fraîches dont les températures nous sont plus favorables.

### Les mobilités temporaires comme moyen d'adaptation

En l'état actuel du climat, les épisodes de très forte chaleur, bien que plus récurrents ne sont pas *a priori* une justification suffisante pour décider d'une mobilité conduisant une population à s'établir durablement au sein d'un îlot de fraîcheur. À la fois parce que l'aléa n'est pas forcément bien envisagé mais surtout parce qu'une telle mobilité nécessite un investissement personnel important : compatibilité avec l'activité professionnelle, recherche d'un logement, établissement d'un nouveau réseau de sociabilité, etc. Une mobilité plus courte, pouvant répondre ponctuellement à ce besoin serait sans doute plus à même d'enregistrer les prémices de cette forme d'adaptation. Cette idée correspond par ailleurs au premier des scénarios théoriques de mobilité envisagé par Walter Kälin face aux *Sudden-onset disasters* (auquel une canicule appartient) (McAdam, 2012), schématisé ci-dessous dans la figure 1 (d'après Gérard, 2021). Dans ce scénario, le retour dans l'espace quitté est possible (ici l'aléa étant représenté en plan par une submersion marine). L'hypothèse d'une mobilité pérenne correspond au second scénario des *Slow-onset environmental degradation*. Ce dernier pourrait à terme être également applicable lorsque les canicules, en devenant habituelles, connaîtraient une bascule dans nos esprits, passant d'un événement météorologique extrême à un événement avec lequel on devra composer de manière récurrente, une variable climatique en somme.

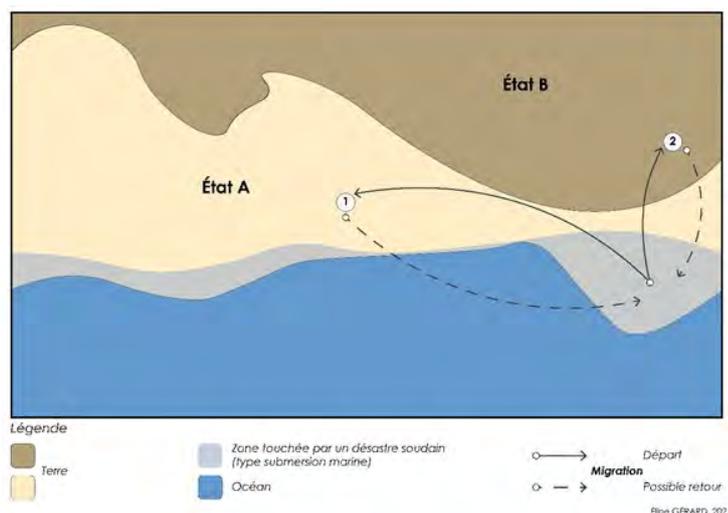


figure 1. Scénario n°1 de Walter Kälin : *Sudden-onset disasters*

### Le tourisme, un précurseur de l'adaptation par la mobilité temporaire ?

Les caractéristiques spatio-temporelles du tourisme, semblables à celles des mobilités décrites par le scénario n°1 des migrations environnementales, en font la forme d'adaptation retenue comme indicateur. Il est susceptible d'être le premier à enregistrer cette tactique, voire cette stratégie,

d'adaptation. En effet, le tourisme est une migration temporaire choisie, et par ailleurs flexible d'un point de vue spatial, en ce sens qu'elle n'oblige pas le touriste à retourner dans une destination précédemment visitée autrement que par choix. Il est à noter que la flexibilité, qui fait la force du tourisme dans une optique d'adaptation, en fait également un objet d'étude complexe, soumis à des soubresauts et des variations rapides imputables à diverses causes dont la pandémie de COVID-19 est une bonne illustration : elle limite directement (fermeture des frontières) et indirectement (décision personnelle) les déplacements internationaux et nationaux. Les résultats présentés ici ne doivent pas être pris pour le compte-rendu d'une situation cristallisée mais plutôt considérés comme une photographie à un instant T d'une situation qui peut évoluer très rapidement, d'une année sur l'autre.

Malgré cette relative flexibilité par rapport à d'autres formes de mobilités, elle n'est pas sans freins. L'aspect financier, temporel (liberté de choisir ses jours de congés, voire de pouvoir les prendre au dernier moment) et même simplement l'incapacité à se déplacer peuvent empêcher certaines personnes d'avoir recours à cette forme d'adaptation. Ce n'est donc pas la panacée pour qui a besoin de s'adapter aux canicules, mais il est tout de même nécessaire de l'étudier car elle n'est pas sans implication sur le territoire et la population d'accueil. Le marketing territorial de certaines destinations faisant d'ailleurs depuis quelques années plus ou moins explicitement de la fraîcheur un atout touristique, soit un véritable changement de paradigme. Les implications directes (généralement positives comme la hausse du tourisme avec ses retombées économiques locales) et indirectes (généralement négatives autour des conflits pour l'espace que le tourisme peut engendrer) sont par ailleurs régulièrement mises en avant par les médias (Le Parisien, 24 août 2020).

Le Cotentin a été choisi comme terrain d'étude pour trois raisons. La première est climatique : il fallait un îlot de fraîcheur « absolu », or la presqu'île du Cotentin offre cette particularité thermique de manière quasi homogène, que ça soit spatialement ou temporellement, et est par ailleurs reconnue (voire moquée) pour cela. La deuxième tient à la faiblesse relative de la fréquentation touristique dans le Nord du département de la Manche par rapport à d'autres départements identifiés comme frais (tel que le Finistère). Cela rend les variations qu'elle peut connaître plus visibles. Troisièmement, enfin, la position géographique du Cotentin (fig.2), une péninsule excentrée des principaux flux, l'éloigne des déplacements de transit. Comme l'illustrent certains touristes : « *On ne vient pas par hasard dans le Cotentin* », ce qui est utile à notre étude car cela implique que le choix de la destination est conscient, réfléchi et n'est pas le fruit du hasard.

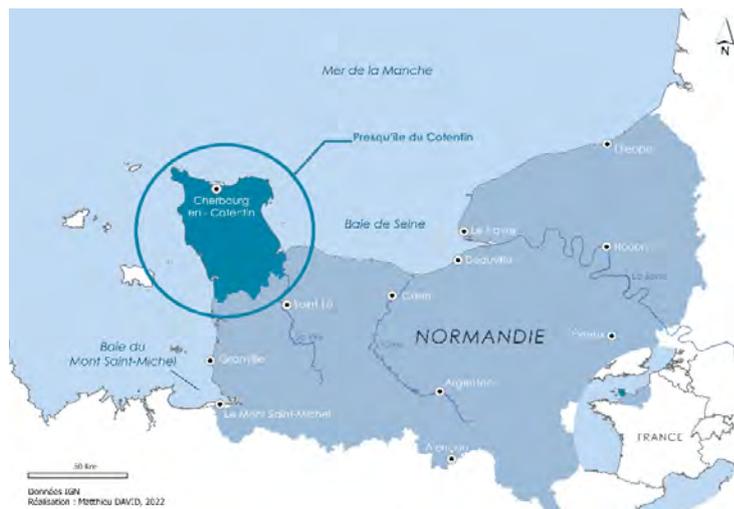
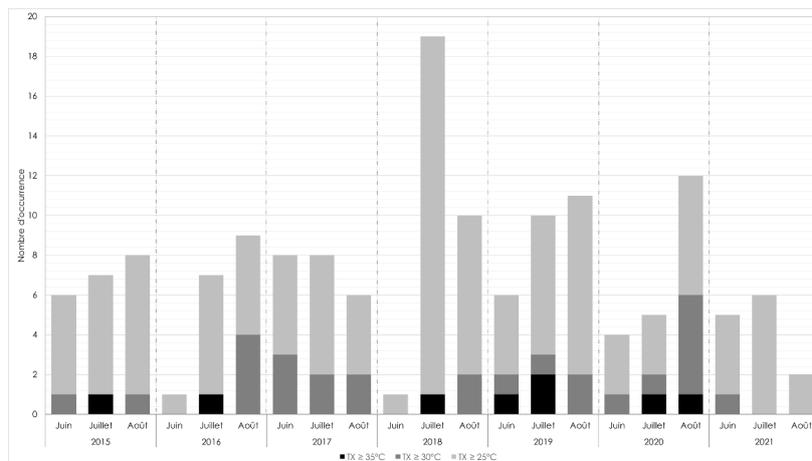


figure 2. Situation géographique de la presqu'île du Cotentin

Les données sur le tourisme sont généralement trop imprécises pour passer de la simple hypothèse, fondée sur l'observation d'une corrélation (comme c'était le cas dans l'*Insee Flash Normandie* de Novembre 2018, attribuant à la fraîcheur de la Normandie sa bonne saison touristique estivale), à la mise en lumière d'un véritable lien de causalité. Les données disponibles ont un maillage spatio-temporel trop large (échelle départementale et pas de temps mensuel) pour être mis en face de vagues

de chaleur ou de canicule de quelques jours (hors épisode exceptionnel, type 2003). Un pan entier du tourisme est par ailleurs occulté : l'excursionnisme. Il diffère du tourisme dans sa définition traditionnelle par l'aspect temporel. Les excursionnistes ne passant pas de nuit hors de leur domicile, en conséquence ils sont difficilement identifiables et quantifiables. Cela va sans dire que les traitements purement quantitatifs que ces données permettent ne fournissent pas de compréhension plus fine des motivations, notamment climatiques, des touristes dans le choix du Cotentin.

Le passage par un stade d'enquête exploratoire a donc été nécessaire afin de collecter le matériel utile pour répondre à notre question : **face aux canicules, un refuge climatique, au sein de l'îlot de fraîcheur de la presqu'île du Cotentin, est-il en train d'émerger ?** Cette enquête a été menée lors des étés 2020 et 2021 auprès de 336 touristes ou groupes de touristes lors de leur visite au Nez de Jobourg (Pointe Nord-Ouest du Cotentin), avec pour objectif de saisir la diversité des motivations climatiques les animant lorsqu'ils ont fait le choix de venir dans le Cotentin. Les entretiens les ont également parfois conduit à engager ou à préciser une analyse réflexive sur leurs habitudes et préférences climatiques estivales consécutives de l'expérience vécue lors de leur séjour, ou plus largement des derniers étés. Cependant à la suite de plusieurs années où les fortes chaleurs étaient devenues relativement courantes et presque attendues, les étés 2020 (mis à part Août) et surtout 2021 ont été moins concernés par ces phénomènes (Bulletins climatique mensuel de Météo-France et fig.3). Il ne faut pas non plus oublier que le contexte pandémique et les différentes restrictions qui l'ont accompagné a fortement contraint les choix de destinations, tout en poussant au développement de tactiques qui avaient pour but de limiter l'exposition au virus du COVID-19 en choisissant des destinations traditionnellement associées à une faible densité de population, comme la Manche par exemple.



**figure 3.** Nombre de jours de chaleur (TX ≥ 25°C), de fortes chaleurs (TX ≥ 30°C) et très fortes chaleurs (TX ≥ 35°C) pour les mois de Juin, Juillet et Août à Caen de 2015 à 2021 – Données Météo-France.

### Relations entre tourisme dans le Cotentin et contexte météo-climatique

336 entretiens (190 en 2020 et 146 en 2021) ont permis d'avoir un aperçu de la diversité des considérations météo-climatiques des touristes visitant le Cotentin. Ils ont permis de dégager une typologie composée de 6 grandes familles tentant de synthétiser les principaux traits des objectifs météorologiques auxquels les touristes aspiraient en choisissant de venir dans le Cotentin.

### La dimension temporelle comme facteur discriminant

Un des premiers constats est la distinction météo/climat réalisée plus ou moins consciemment par les touristes eux-mêmes, du fait de l'aspect temporel de la réservation effectuée à des échéances très variables (Scott et Lemieux, 2010). Elle peut anticiper de manière très importante le séjour (plusieurs mois, voire un an) ou bien être effectuée à la dernière minute (quelques jours, voire le jour même). Ces différences temporelles n'offrent pas aux touristes en devenir les mêmes choix de sources d'informations sur l'état de l'atmosphère.

L'anticipation à très long terme du séjour limite la connaissance du temps à une approche climatologique. Les touristes peuvent avoir accès à des informations climatologiques très détaillées sur leur destination mais il est plus probable qu'ils mobilisent un ensemble « d'impressions » climatiques qu'ils ont accumulé au cours de leur vie *via* différents médias (bulletins météo, discussions, stéréotypes véhiculés dans la presse, la littérature (Maupassant), la peinture (Eugène Boudin), les photographies, etc.) construisant ainsi une représentation mentale personnelle du climat normand auquel ils seront exposés.

Les seconds peuvent facilement avoir recours aux bulletins météorologiques plus précis à la fois spatialement et temporellement. La météo chez eux et/ou dans le Cotentin peut ainsi jouer dans leur prise de décision. Ils peuvent par exemple être à la recherche d'une configuration météorologique particulière, qui lorsqu'elle est annoncée, provoquera un départ. Cela leur offre également la possibilité de réagir directement à une contrainte météorologique imminente.

### La mise en lumière d'un spectre de relations à la météo et au climat

La typologie (fig. 4) tirée des entretiens est composée d'un spectre de relations à la météo allant de la répulsion pour la fraîcheur à sa quête.

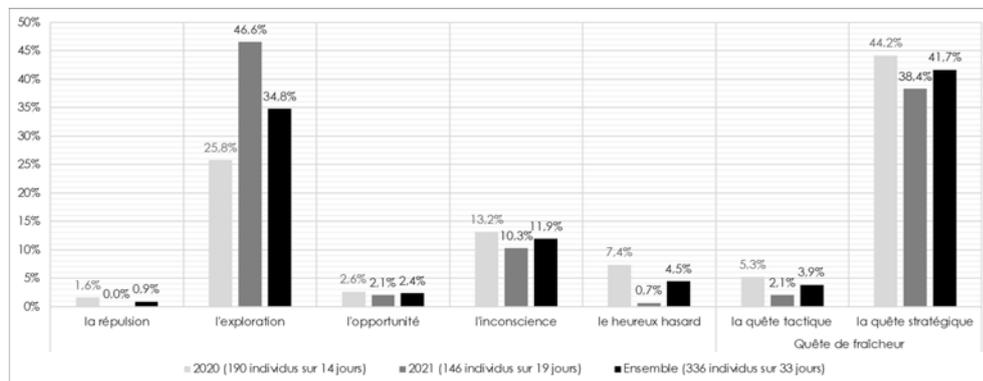


figure 4. Répartition des touristes interrogés lors des périodes estivales 2020 et 2021

La *répulsion* tout d'abord est très rare (0,9%). Elle ne concernait qu'un groupe de touristes dont une partie habite le Cotentin à l'année. Ce sentiment n'est néanmoins pas à négliger pour plusieurs raisons : à titre individuel, le lieu de vie de certaines personnes de ce groupe, en fond de vallée, est peut-être une partie de l'explication de ce sentiment. C'est également une information importante car si ce sentiment, à des degrés divers, est plus largement partagé par la population du Cotentin, on pourrait assister à une incompréhension de la part de la population locale face à l'importance que la fraîcheur revêt pour les touristes venant sur leurs terres depuis des zones touchées par des canicules (à l'image des contestations que le report du brevet 2019 face à la canicule de Juin avait provoqué chez les parents d'élèves des départements du Nord-Ouest de la France).

L'*exploration* est le second grand type que l'on retrouve beaucoup plus fréquemment (34,8%). Il rassemble l'ensemble des touristes n'étant que très peu sensibles à la météo ou au climat. D'autres considérations comme le patrimoine, l'histoire ou les paysages (dans lesquels le climat joue bien un rôle de « construction » et de perception) les guident. Ils n'ont pas d'habitudes particulières, pas de destinations vers lesquelles ils tendent à aller de manière récurrente. Ils expérimentent au cours des années une diversité de situations météorologiques et climatiques.

L'*opportunité*, qui regroupe elle aussi une part assez faible des enquêtés (2,4%) (car principalement observable lors des épisodes de fortes chaleurs, rare en 2020 et 2021), est plus surprenante. Certains touristes, préférant un temps chaud pour leurs vacances, « profitent » d'une vague de chaleur pour étendre leur aire potentielle de visite. Des zones qui précédemment étaient trop fraîches (ou réputées comme telles) deviennent enfin assez chaudes pour envisager un séjour.

Le *heureux hasard* (4,5%) est le résultat d'un retour réflexif opéré par les touristes eux-mêmes lorsqu'une fois sur leur lieu de vacances, ils prennent conscience par eux-mêmes ou grâce à des proches restés dans la région d'où ils sont originaires, qu'ils ont réussi, sans le vouloir, à éviter de s'exposer à une canicule. Cette heureuse coïncidence pourra leur servir dans le futur, pour choisir de partir face à l'annonce d'une canicule, mais cette fois-ci de manière consciente.

L'*inconscience* (11,9%) est une catégorie qui doit plutôt être considérée comme une question. Elle regroupe les touristes qui ne revendiquent pas ouvertement une quête de fraîcheur mais dont les habitudes en termes de destinations et de goûts thermiques sont similaires à ceux en revendiquant une. Leurs habitudes prises au cours de la vie, réduisant leur exposition à l'aléa canicule, auraient-elles eu une influence sur leur mémoire du risque ? Ou bien ce que l'on peut prendre comme étant une attirance implicite pour un climat frais n'est en fait que le fruit du hasard ? La question demeure ...

Enfin la *quête de fraîcheur*, dont cette enquête a pour objectif d'en déterminer l'existence, concerne finalement une large portion des touristes (45,6%). Les entretiens ont permis d'affiner la compréhension de cette quête explicitement revendiquée, notamment d'un point de vue temporel. Elle se décline sous deux formes, l'une stratégique (41,7%) l'autre tactique (3,9%) (Péguy, 1983). La première voit les touristes prendre uniquement en considération le climat, les réservations étant effectuées longtemps à l'avance. Cette stratégie témoigne d'une appétence particulière pour un climat thermique tempéré et permet dans le même temps d'éviter par chance certaines canicules en réduisant la probabilité d'exposition (chez eux ou dans des zones propices à ces phénomènes). La quête tactique, quant à elle, correspond peut-être davantage à ce dont la presse ou l'Insee se font l'écho. La prise de décision est tardive (moins de 15 jours avant le début du séjour) et permet donc de réagir volontairement à une canicule ou à son annonce. Cette quête tactique de fraîcheur n'est pas forcément habituelle, au contraire de la quête stratégique, et est directement liée au contexte météorologique. Elle représente une petite partie du total des enquêtés du fait de la faible occurrence de canicules lors des étés considérés, mais devient non négligeable lors des courtes vagues de chaleurs de 2020 avec 13% des enquêtés de cette sous-période. Les deux quêtes, bien que différentes, ne s'excluent pas. Certaines personnes habituées à une recherche de fraîcheur vont parfois, lorsque c'est possible, mobiliser une tactique d'adaptation, renforçant une stratégie préexistante. De même, la tactique peut parfois être élevée au rang de stratégie pour coller au mieux au temps qu'il fait, la nuance résidant ici dans la récurrence de l'usage de la tactique qui n'est plus une adaptation ponctuelle.

## Discussion et conclusion

Le recours aux îlots de fraîcheur comme le Cotentin semble d'ores et déjà être une réalité et pose ainsi les premiers jalons de l'émergence d'un refuge climatique. Se pose dès lors la question de la manière dont doivent être considérées certaines formes de tourisme, notamment les quêtes de fraîcheur tactique par la population locale. Est-ce une forme de tourisme parmi d'autres ou bien différente en ce qu'elle est le témoin de l'émergence de l'adaptation aux canicules par la mobilité ? Cette question devrait précéder toutes les autres sur ce sujet car de sa réponse dépendra les mesures qui pourront être prises pour traiter les conflits naissants entre touristes et locaux dans certains secteurs du Cotentin (La Presse de la Manche, 8 juillet 2021).

La forme de cette enquête ne permet pas de généralisation à l'ensemble de la population. Néanmoins, certaines observations poussent à une réflexion plus générale sur la place de la fraîcheur dans les idéaux climatiques des touristes. Ces derniers sont souvent lissés dans les études plus globales faisant ressortir une préférence météo-climatique, alors qu'il semblerait que plusieurs pourraient coexister (ce qui est déjà observable dans la population étudiée).

Cette comparaison permettrait dès lors de savoir si certains types pourraient être les témoins d'un essor de certains goûts climatiques, comme la quête de fraîcheur stratégique, ou d'un réajustement spatial des destinations, à goûts climatiques constants (exemple de l'opportunité). Quoi qu'il en soit, plusieurs comportements comme la quête tactique ou l'opportunisme semblent être à la fois des

conséquences du changement climatique et l'indication d'une prise de conscience sociale de ce changement.

### **Bibliographie**

Bulletin climatique mensuel de France Métropolitaine – Juin, Juillet et Août de 2015 à 2021

Cantat O., 2005 : Dynamique spatio-temporelle d'un événement météo-climatique extrême : la canicule de l'été 2003 en Europe de l'Ouest. *Climatologie*, **2**, 99-136.

David M., Cantat O., Planchon O., 2020 : Chaleur en Normandie, types de circulation atmosphérique et changement climatique (1970-2019). *Actes du XXXIII<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 187-192.

Fizel B., 24 août 2020 : Le succès touristique de La Hague ne fait pas que des heureux. *Le Parisien*.

Gérard É., 2021 : *Réflexions sur les possibilités de protection juridique des migrants environnementaux en droit international*. Mémoire de recherche en Droit des Libertés sous la direction du Pr. Jean-Manuel LARRALDE, Université de Caen, 120 pages.

La Presse de la Manche, 8 juillet 2021 : La Hague : des améliorations pour l'organisation de la saison estivale.

Marchand J-P., 1985 : *Contraintes climatiques et espace géographique : le cas irlandais*. Paradigme, 336 pages.

McAdam J., 2012 : *Climate Change and Displacement : Multidisciplinary Perspectives*. Hart Publishing, 274 pages.

Observatoire Participatif du Risque de Canicule (OPRIC) - <http://risquecanicule.fr/>

Ouzeau G., Soubeyroux J-M., Schneider M., Vautard R., Planton S., 2016 : Heat waves analysis over France in present and future climate : Application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. *Climate Services*, **4**.

Péguy C-P., 1983 : Informatique et climatologie. *Annales de géographie*, **511**, 284-304.

Poupet C., Raspaud G., 2018 : Saison touristique 2018. Fréquentation record en Normandie pour la deuxième année consécutive. *Insee Flash Normandie*, **71**.

Scott D., Lemieux C., 2010 : Weather and Climate Information for Tourism. *Procedia Environmental Sciences*, **1**, 146-183.

## RESPIRATORY DISEASES – RELATIONS TO CLIMATE PARAMETERS

Eduarda Rebelatto BRANDALISE<sup>1</sup>, Pedro MURARA<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal University of Santa Catarina, PhD student, [brandalise.duda@gmail.com](mailto:brandalise.duda@gmail.com)

<sup>2</sup>Federal University of Fronteria Sul, research professor, [pedro.murara@uffs.edu.br](mailto:pedro.murara@uffs.edu.br)

**Abstract :** The research aims to analyze the relations between the urban space and the respiratory diseases in the city of Chapecó located in the south region of Brazil, in the subtropical climate. The methodological procedures involved collection of hospitalization and weather data, statistic tests, and data collection and mapping from the Brazilian Postal Addressing Code (CEP). Results show that pneumonia was the most common disease observed in winter. Although the largest neighbourhoods show the highest absolute number of hospitalization cases, the neighbourhoods that were identified by their socioeconomic differentiation (suburban and impoverished areas) were the ones that proportionally showed the highest number of hospital admission cases.

**Keywords:** Climate and health; Pneumonia; Mapping

**Résumé :** La recherche vise à analyser les relations entre l'espace urbain et les maladies respiratoires dans la ville de Chapecó située dans la région sud du Brésil de climat subtropical. Les procédures méthodologiques impliquaient la collecte de données d'hospitalisation et de données météorologiques, des tests statistiques, ainsi que la collecte et la cartographie de données à partir du code postal brésilien (CEP). Les résultats montrent que la pneumonie est la maladie la plus fréquemment observée en hiver. Bien que les quartiers les plus grands affichent le nombre absolu le plus élevé de cas d'hospitalisations, les quartiers suburbains qui ont été identifiés comme défavorisés socio-économiquement sont ceux qui ont proportionnellement enregistré le plus grand nombre de cas d'hospitalisations.

**Mots clés :** Climat et santé ; Pneumonie ; Cartographie

### Introduction

Humans are in constant contact with climate elements that get altered due to modifications resulting from the alterations and changes in geographic space. The relations between climate, health and human diseases have been addressed specifically since changes in the environment can have consequences in human daily life and as a result in human health. From there, these relations can have repercussions on health system with, for example, increase in hospital admissions (SILVA *et al.*, 2016).

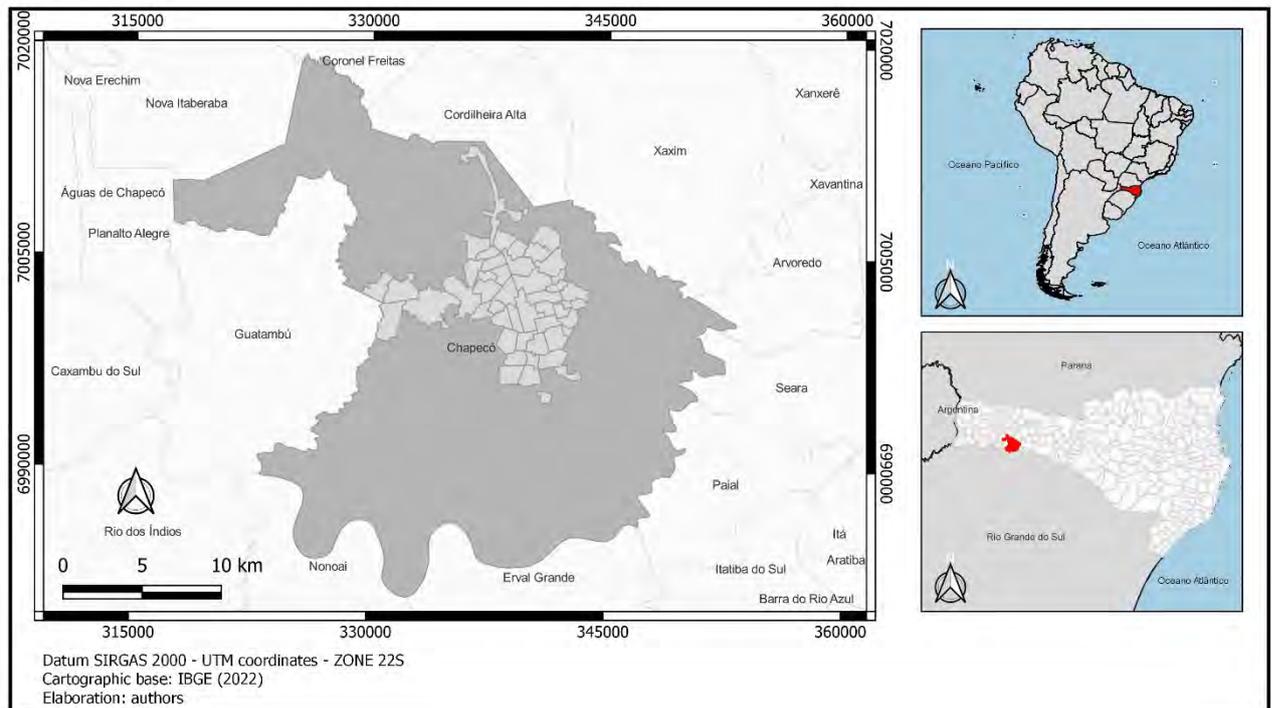
Diseases of the respiratory system (DRS) represent the highest percentage of hospitalizations in Brazil, corresponding to about 11.4% in the period from 2008 to 2019. It is the second largest cause of hospitalizations, behind only hospitalizations for pregnancy, childbirth, and puerperium with 20.9% (BRASIL, 2020). Respiratory diseases can be caused by the lifestyle of human beings or by natural factors exposed in the atmosphere which affect the lungs and breathing capacity. Among the anthropogenic influences, we can highlight air pollution, smoking, chemicals, etc. (NOGUEIRA *et al.*, 2011; BAKONYI *et al.*, 2004; MARTINS *et al.*, 2002) and among the environmental influences, we can mention climate change, dust, pollens, etc. (MOTA, 2009; MURARA; AMORIM, 2010).

We selected the city of Chapecó, located in the southern region of Brazil (**Figure 1**) in the subtropical climate to apply this study and understand the relations between the city (neighborhoods) and the spatialization of the respiratory diseases. Chapecó is a city with just over 220 thousand inhabitants, characterized as urban (91.6% of the population lives in the city and 8.4% in the rural area). Since the 50s, it is strongly influenced by the facilities of agro-industrie with agricultural and livestock production and large companies such as BRF and Cooperativa Aurora.

### Materials and methods

The methodological procedure involved data collection of hospitalization register from the Informatics Department of the Brazilian Unified Health System (Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde - DATASUS), National Ministry Health of Brazil. It also includes collection of meteorological data from the National Meteorological Institute (INMET): rainfall, minimum and maximum temperatures, and humidity. We used the period starting January 2008 until December 2019 (monthly data) for making the statistical tests (normality test of Shapiro-Wilk; Spearman correlations) between hospitalization and weather data.

Then, we classified data from the Brazilian Postal Addressing Code (CEP) to understand how the structuring and changes made to the urban site can affect the health and well-being of the population.



**figure 1.** Location of the study area – Chapecó-SC, Brazil.

For the elaboration of the maps, the ArcGis - ArcMap platform was used. The data and shapefile of the city taken from Chapecó's city hall were inserted into the platform. For the map, the frequency of each number and variation of non-uniform data was used. For the population, breaks were used for frequency. For the hospitalization rate, the following formula was used: (number of hospitalizations / population of the neighbourhood) x 1000.

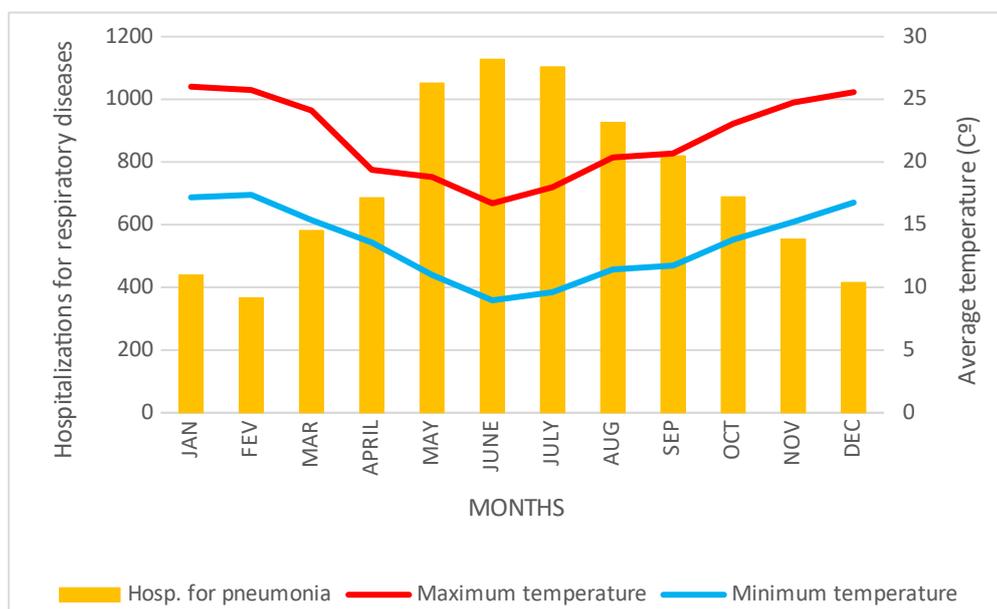
For the mapping and differentiation of the neighborhoods, we used Nascimento (2014) which presents a spatial pattern of downtown vs periphery based on the socioeconomic (monthly income of the head of the family), profile of the city resident population, and the levels of infrastructure and services in the neighborhoods.

## Results and discussion

According to the survey of respiratory disease data, 17,827 hospitalizations were registered from 2008 to 2019, corresponding to 12.3% of the total hospitalizations occurred by residents of Chapecó during that same period. The winter season (July, August, and September) has the highest records of hospitalizations and is also the period with the lowest temperatures (**Figure 2**). During the summer period (January, February, and March), a decrease in hospitalization records is observed which may be associated with higher temperatures when compared to winter.

With a percentage of 34.2%, the highest records of hospitalizations by age group occurred within the elderly population (60 years and over), and occurred during the winter period. The elderly population is the most sensitive to low temperatures as seen with the highest rate of hospitalization for respiratory diseases (MOTA, 2009; NOGUEIRA *et al.*, 2011; PANET *et al.*, 2015; PONTES *et al.*, 2016;) and, therefore, constitutes a risk group.

With a percentage of 29.7%, the population of children, from 1 to 14 years old, has the second highest number of hospitalizations by age group. They present high records during the months of June, July, and October, with an equal record of hospitalizations compared to the elderly population. Pontes *et al.* (2016), who analyzed the hospitalizations due to pneumonia of children under five years old, concluded that the increase in hospitalization records is related to the decrease in temperature during the winter months. In this sense, the rainy season is possibly related to excess humidity in children's living environments, which may be in constant contact with substances that cause allergies and with the growth of fungi related to excessive humidity (OLIVEIRA *et al.*, 2011).



**figure 2.** Monthly average of hospitalizations for respiratory diseases, average temperatures in Chapecó during the period from 2008 to 2019.

The records of hospitalizations by gender showed a higher prevalence among males which accounted for 55.6% of hospitalizations recorded for respiratory diseases, while females accounted for 44.3% of hospitalizations.

Among the group of diseases of the respiratory system, it was identified that pneumonia records represent more than half (50.8%) of the hospitalization cases in Chapecó. In second place in the records of hospitalizations for respiratory system diseases are other diseases of the respiratory system (16.0%), in third, chronic diseases of the tonsils and adenoids (11.6%) and in fourth, bronchitis, emphysema and other lung diseases chronic obstructive disorders (7.8%).

In this context, and for the analyzed period, it is clear that pneumonia has great relevance in hospitalization rates during the winter season, since it accounts for more than half of the total records in the city. The statistical study revealed that the minimum temperature is the element that shows the best anticorrelation with the records of hospitalizations for respiratory diseases with a correlation coefficient of -0,27 ( $p = 0,005$ ) (Table 1).

**Table 1.** Spearman correlation values for number of hospitalizations for pneumonia vs. weather parameters.

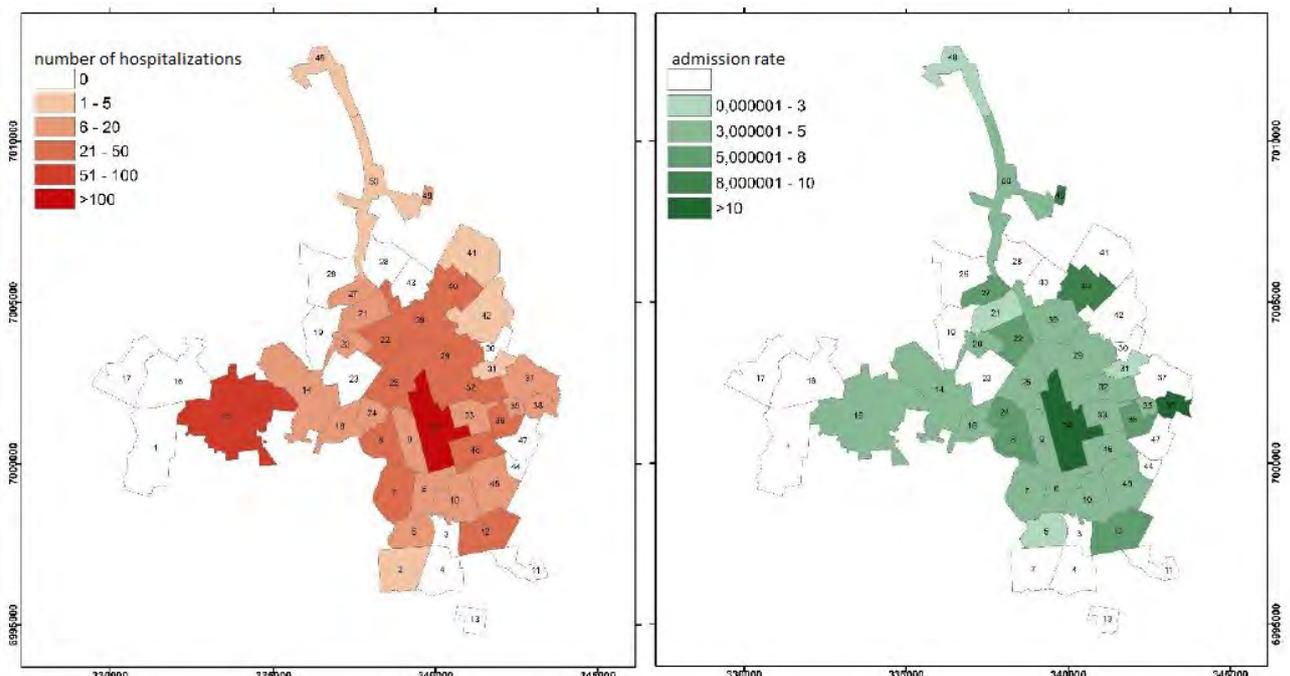
Tmax	Tmin	Rain	RH
-0,22	-0,27	-0,05	0,04

Significant at the level of  $p = 0,005$ .

Maximum temperature also shows an anticorrelation with the records of hospitalizations for respiratory diseases, though with a lower correlation coefficient (-0,22;  $p = 0,005$ ). However, the average maximum temperature also showed a negative correlation with the records of hospitalizations. This result may be associated with extremes of heat and cold. Rain and relative humidity have a correlation value lower than 0.1.

These results corroborate the investigations already carried out on the impact of climate in subtropical environments on respiratory diseases, showing that low temperatures, or decreasing temperatures, have an impact on diseases. (JOHNSTON Jr., 1991; VILKMAN *et al.*, 1996; BESANCENOT, 2001; SÄYNÄJÄKANGAS *et al.*, 2001; TOYOSHIMA *et al.*, 2005; HOSSAIN *et al.*, 2019).

Although the largest neighbourhoods reflect the highest absolute number of hospitalizations, the neighbourhoods that were identified by their socioeconomic differentiation, as pointed out by Nascimento (2017) to determine the suburban and poor areas in the city of Chapecó, were the ones that, proportionally, presented higher number of hospital admissions (**Figure 3**).



**figure 3.** Map of hospitalization records for pneumonia in the urban area of Chapecó, 2019

As for the spatialization of pneumonia cases, the results of the absolute numbers of hospitalizations are associated with the locations of higher density of population. However, when analysing the hospitalization rates by neighbourhoods, it can be shown (**Figure 3**, year 2019) that the highest percentages of hospitalizations occur in the more peripheral neighbourhoods that are characterized by socioeconomic inequalities (lower family income).

## Conclusion

We have identified relationships between climate and health. It was possible to notice that hospitalizations are more frequent during the autumn and winter periods when temperature are lower. On the opposite, during the period of temperature increase, there are lower records of hospitalizations.

The increase of diseases of the respiratory system and pneumonia during autumn and winter months may be linked with variations in weather conditions, but also with greater occurrence of viruses and respiratory bacteria (MURARA, 2012). The urban growth in Chapecó may be related to the increase in records for peripheral neighbourhoods, following the pattern of development of medium-sized Brazilian cities (BRITO *et al.*, 2021).

Though there is a relationship between climate and the occurrence of human diseases, not all city dwellers are affected in the same way. The relationship is indeed dependant on economical situation of the inhabitants as seen from the difference of hospitalization rates between neighbourhoods with differentiated average family income.

## Acknowledgement

We thank the Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) for the financial support in the development of the research.

## Bibliography

- BAKONYI, S. M. C. ; DANNI-OLIVEIRA, I. M. ; MARTINS, L. C. ; BRAGA, A. L. F. 2004. Poluição atmosférica e doenças respiratórias em crianças na cidade de Curitiba, PR. *Revista de Saúde Pública*. 2004; **38**(5):695-700.
- BESANCENOT, J-P. 2002. *Climat et santé*. Médecine et société, PUF, Paris, 128, p.
- BRASIL, Ministério da Saúde. 2020. Banco de dados do Sistema Único de Saúde - DATASUS. Disponível em: <<http://www.datasus.gov.br>> Acesso em: janeiro de 2020.
- BRITTO, N.D.S.S.; SPINELLI, J.; CATALÃO, I. 2021. *Explorações urbanas sobre o Programa Minha Casa Minha Vida em Chapecó, SC*. In: CALIXTO, M.J.M.S.; MORENO REDÓN, S. (Org.). O Programa Minha Casa Minha Vida e seus desdobramentos socioespaciais: os novos vetores da produção do espaço em cidades médias brasileiras. 1ed. Porto Alegre: TotalBooks, 2021, p. 108-143.
- HOSSAIN, M.Z.; TONG, S.; BAMBRICK, H.; KHAN, A.F.; HORE, S.K.; HU, W. 2019. Weather factors, PCV intervention and childhood pneumonia in rural Bangladesh. *International Journal of Biometeorology*, v. 64, n. 4, p. 561-569.
- JOHNSTON JR, R.B. 1991. Pathogenesis of pneumococcal pneumonia. *Reviews of Infectious Diseases*, v. 13, n. Supplement\_6, p. S509-S517.
- MOTA, L. M. M. 2009. Perfil das Hospitalizações por Doenças Respiratórias no Sistema Único de Saúde em Porto Alegre. *Boletim de Saúde*, Porto Alegre. v. **23**, n. 1, p. 23-30. Jan. /jun.
- MURARA, P. AMORIM, M. C.C.T. 2010. Clima e saúde: variações atmosféricas e óbitos por doenças circulatórias. *Revista Brasileira de Climatologia*. Ano **6**, v.6.
- NASCIMENTO, E. *Chapecó: Evolução urbana e desigualdades socioespaciais*. In: NASCIMENTO, E.; BRANDT, M. Oeste de Santa Catarina: território, ambiente e paisagem. São Carlos: Pedro & João Editores; Chapecó, UFFS, 2015, 242p.
- NOGUEIRA, V. B. M.; NOGUEIRA, R. N. CÂNDIDO, G. A.; SOUZA, V. C. de; SILVA, S. S. F. da. 2011. Efeitos das alterações climáticas e antrópicas na saúde do idoso. *Revista Brasileira de Ciências do Envelhecimento Humano - RBCEH*. Passo Fundo, v. **8** n. 1 p. 88-106, Jan. /abr.
- OLIVEIRA, T. G.; MORAES, J. S. B.; MOREIRA, F. T.; ARRELARO, R. C.; RICARDI, V. A.; BERTAGNON, J. R. D.; JULIANO, Y. 2011. Avaliação das internações de crianças de 0 a 5 anos por infecções respiratórias em um hospital de grande porte. *Einstein*; **9**(4 Pt 1):514-527.
- PANET, M. F.; ARAÚJO, V. M. D.; ARAÚJO, E. H. S. 2015. Vulnerabilidades da saúde da população geriátrica às variações climáticas em Campina Grande/PB. *Anais XIII encontro nacional e IX encontro latinoamericano de conforto no ambiente construído*. Campinas/SP: Pontifícia Universidade Católica de Campinas/SP, 2015. v.1. p. 01-10.
- PONTES, C. C.; LEITE, M. de L.; GAVÃO, N.; VIRGENS FILHO, J. S. das. 2016. Efeitos do clima na saúde: análise das internações de crianças menores de cinco anos por pneumonia no município de Ponta Grossa – PR. *Revista Brasileira de Climatologia*, Curitiba, ano 12, v. 18, p. 38-52, Jan. /jun.

ROSA, A. M. IGNOTTI, E.; HACON, S. S.; CASTRO H. A. 2008. Análise das internações por doenças respiratórias em Tangará da Serra – Amazônia Brasileira. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*. **34**(8):575-582.

SÄYNÄJÄKANGAS, P.; KEISTINEN, T.; TUUPONEN, T. Seasonal fluctuations in hospitalisation for pneumonia in Finland. 2001. *International Journal of Circumpolar Health*, v. **60**, n. 1, p. 34-40.

SILVA, J. F.; SALDANHA, T. L.; SOARES, S. A. N. 2016. Clima e Saúde - uma abordagem sobre pneumonia na população de Caucaia - Ceará em 2013. *Anais SBCG XII*, 2016. Goiânia. p. 2416- 2423.

TOYOSHIMA, M.T.K.; ITO, G.M.; GOUVEIA, N. 2005. Morbidade por doenças respiratórias em pacientes hospitalizados em São Paulo/SP. *Revista da Associação Médica Brasileira*. Vol. **51**, n. 4, p. 209-213.

## VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DES PM<sub>2.5</sub> ET NO<sub>2</sub> DANS LE XIIIÈME ARRONDISSEMENT DE PARIS

A. ABDMOULEH<sup>1</sup>, S. DAHECH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Abdmouleh Université de Paris, UFR GHES, UMR 8586 du CNRS (PRODIG), France  
abdmouleh.mohamedali@yahoo.com.

<sup>2</sup>Dahech Université de Paris, UFR GHES, UMR 8586 du CNRS (PRODIG), France. ;salem.dahech@gmail.com

**Résumé :** Ce travail a pour objectif d'analyser les variations spatiotemporelles du niveau de la pollution de l'air aux PM<sub>2.5</sub> et NO<sub>2</sub> dans le XIIIème arrondissement pendant et en dehors des confinements. Pendant le confinement et durant un temps stable, nous avons enregistré des dépassements de la norme préconisée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour les NO<sub>2</sub> durant les deux périodes de confinement en 2020 (250 µg/m<sup>3</sup>) notamment dans les rues de Tolbiac, de Chevaleret, au boulevard Périphérique et dans la place d'Italie. Les résultats issus des campagnes de mesures semi-itinérantes, montrent que les concentrations en PM<sub>2.5</sub> pendant et en dehors des confinements, varient en fonction de la densité du trafic routier et des conditions météorologiques. Ces derniers justifient certains dépassements, pendant le confinement. En effet, par temps radiatif, nous avons enregistrées des valeurs dépassant la norme (OMS) allant jusqu'à 35 µg/m<sup>3</sup> comme à rue de Tolbiac, rue Château des Rentiers. Par contre par temps perturbé le niveau baisse de 5 µg/m<sup>3</sup> en moyenne et la fréquence d'obtention de concentrations supérieures à 20 µg/m<sup>3</sup> était largement plus faible.

**Mots clés :** COVID-19, Paris XIII, PM<sub>2.5</sub> et NO<sub>2</sub>, temps

**Abstract :** The objective of this work is to analyze the spatiotemporal variations in the level of air pollution with PM<sub>2.5</sub> and NO<sub>2</sub> in the XIIIth arrondissement during and outside the confinements. During confinement and during stable weather, we recorded exceedances of the standard recommended by the World Health Organization (WHO) for NO<sub>2</sub> during the two confinement periods in 2020 (250 µg/m<sup>3</sup>), particularly in the streets rue Tolbiac, rue Chevaleret, boulevard Périphérique and in the place d'Italie. The results from the semi-itinerant measurement campaigns show that PM<sub>2.5</sub> concentrations during and outside confinement vary according to the density of road traffic and weather conditions. The latter justify certain overruns, during confinement. Indeed, in radiative weather, we recorded values exceeding the standard (WHO) up to 35 µg/m<sup>3</sup> as in rue de Tolbiac, rue Château des Rentiers. On the other hand, in disturbed weather, the level drops by 5 µg/m<sup>3</sup> on average and the frequency of obtaining concentrations above 20 µg/m<sup>3</sup> was much lower.

**Key words :** COVID-19, Paris XIII, PM<sub>2.5</sub> and NO<sub>2</sub>, weather

### Introduction

La pandémie du COVID-19 a provoqué des crises sanitaires et socio-économiques désastreuses à travers le monde (McKee et Stuckler, 2020). Depuis le 30 janvier 2020, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a déclaré la pandémie du COVID-19 comme une urgence sanitaire mondiale. Pendant cette pandémie, le trafic routier est devenu plus fluide d'où l'amélioration de la qualité de l'air (Keshtkar et al, 2021). La France, comme le monde entier, a été touchée par cette pandémie qui a impacté les déplacements des hommes et des bien notamment dans les grandes villes comme Paris. En effet, pendant la deuxième phase du confinement (en automne 2020), une adoption généralisée de politiques du travail à distance et des fermetures temporaires d'entreprises ont limité les déplacements habituels de la population. Ceci a provoqué des changements importants dans la qualité de l'air (Dutheil et al., 2020). Brunet et al (2020) confirment que des pics de pollution des particules fines ont été observés lors du premier confinement dépassant 65 µg/m<sup>3</sup> pour les PM<sub>2.5</sub> ayant comme origine le trafic routier et le chauffage en bois. Cette étude examine comment ces changements soudains dans les modèles de circulation ont affecté les concentrations des polluants problématiques à Paris, à savoir, les PM<sub>2.5</sub> et NO<sub>2</sub>.

Nous nous focalisons sur le XIIIème arrondissement, terrain d'une thèse en cours et nous tenons compte des types de temps. Pour cerner la variation spatiotemporelle des polluants précités, nous nous sommes basés sur des campagnes de mesures semi-itinérantes réalisées moyennant des stations portables « Aeroqual series 500 versions pro » pour couvrir 272 points de mesure du 03/11/2020 au 30/04/2021. Outre la couverture spatiale, à échelle fine, cette étude permettrait d'évaluer les concentrations de deux polluants atmosphériques qui ne sont pas enregistrés par la seule station de surveillance de la qualité de l'air du réseau AIRPARIF du XIIIème arrondissement. Les mesures sont réalisées par type de temps radiatif (stable) et perturbé.

## 1. Zone d'étude, méthodes et données

Au nord de la France, la région Île-de-France est source d'un dynamisme économique à l'échelle nationale, européenne et mondiale. Elle concentre la moitié des emplois de l'économie française (Camors et al., 2016). Suivant le dernier rapport de l'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE, 2020), l'Île-de-France compte 12 213 447 habitants. La région concentre diverses activités industrielles et tertiaires avec un trafic routier dense en raison des multiples déplacements de la population et des marchandises qui y convergent, notamment vers Paris intra-muros. Selon le dernier recensement de l'INSEE (2016), la densité moyenne de la population, XIIIème arrondissement, atteint 25 392 hab/km<sup>2</sup> pour une superficie de 7,2 km<sup>2</sup>. Sont plus denses, les quartiers anciens construits dans les années 70 ; comme Olympiade, place Nationale et place Pinel. Paris jouit d'un climat océanique de transition, la vitesse moyenne du vent ne dépassent pas 3m/s et des situations anticycloniques y sont probables durant toute l'année. La partie centrale enregistre des températures plus élevées et un ralentissement du vent par rapport à la périphérie rurale (Dahech et al., 2021). Nous avons réalisé des campagnes de mesures semi-itinérantes au XIIIème arrondissement de Paris pendant et en dehors du confinement automnal en 2020. Nous avons retenu 272 points de mesure, soit un enregistrement tous les 100m(fig.1). Les mesures mobiles ont été réalisées moyennant des stations portables « Aeroqual series 500 » par deux opérateurs. La collecte des données sur les rues a été divisée en deux sessions durant la journée : une première de 7h30 à 9h00 puis une deuxième de 17h00 à 19h00, donc pendant les deux pics du trafic routier, durant les jours ouvrables. En parallèle, nous mesurons le bruit induit par le trafic routier et la vitesse du vent. Chaque mesure dure 5 minutes par point, soit 20 enregistrements pour chaque polluant (à un pas de temps de 15 secondes). Quinze campagnes de mesures ont été réalisées du 03/11/2020 au 26/11/2020 pendant le confinement. En dehors du confinement, les mesures ont été réalisées au mois de juillet, septembre et octobre 2020 ainsi que durant janvier et février 2021. Les mesures ont été réalisées par temps stable (anticyclonique, faible nébulosité (<4octas), vent faible (<4m/s), et par temps perturbé dépressionnaire avec un ciel couvert (<7 octas), et un vent fort(>8m/s). Nous avons opté ensuite pour cartographier les points de mesure dépassant le percentile 75.

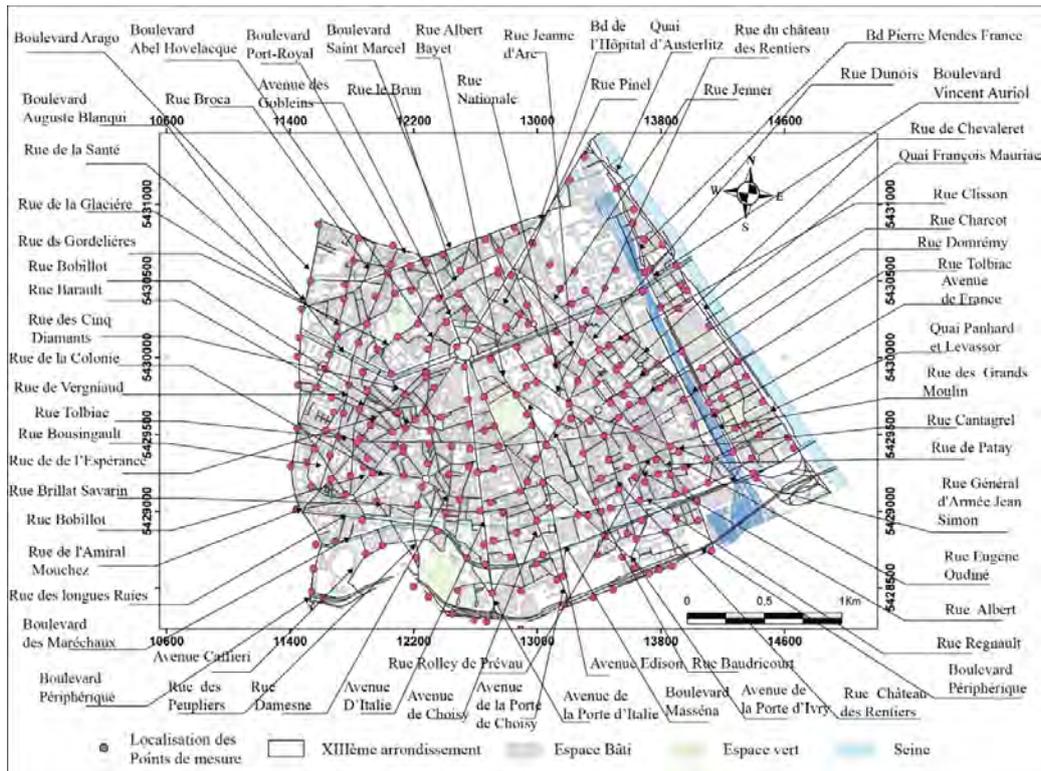
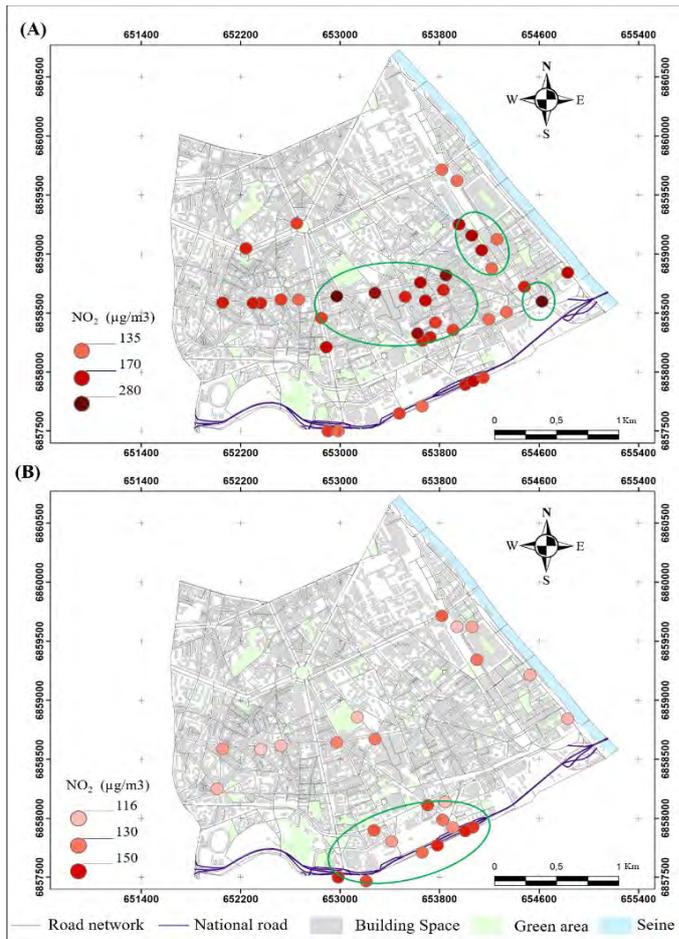


figure 1. Localisation des points de mesures (source : [www.data.gouv.fr](http://www.data.gouv.fr))

## 2. Variabilité spatio-temporelle des concentrations en $\text{NO}_2$

### 2.1. Répartition des $\text{NO}_2$ pendant le confinement suivant le type de temps

Par temps calme, le percentile 75 atteint  $133 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les concentrations qui dépassent ce seuil statistique présentent une distribution homogène dans la partie méridionale du XIIIème arrondissement, notamment à proximité du boulevard périphérique. Les valeurs qui dépassent  $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (seuil horaire préconisé par l'OMS depuis 2021) sont enregistrées principalement dans trois sites : la zone comprise entre rue Tolbiac et rue nationale, la rue de Chevaleret et le boulevard périphérique. Par ailleurs, les concentrations variant de  $150$  à  $170 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sont relevées à place d'Italie et au boulevard Auguste Blanqui (fig2.A). Cette configuration est totalement différente par temps perturbé. D'abord le percentile 75 baisse à  $116 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; ensuite nous observons que les valeurs les plus élevées, allant de  $130$  à  $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , se concentrent plus du côté du boulevard périphérique, à porte d'Ivry, et à porte d'Italie. Néanmoins, quelques concentrations légèrement plus faibles ( $110$  à  $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) sont relevées au centre et à l'Est (rue Tolbiac, avenue de France). Il s'agit des endroits caractérisés par un trafic routier congestionné (fig2.B)

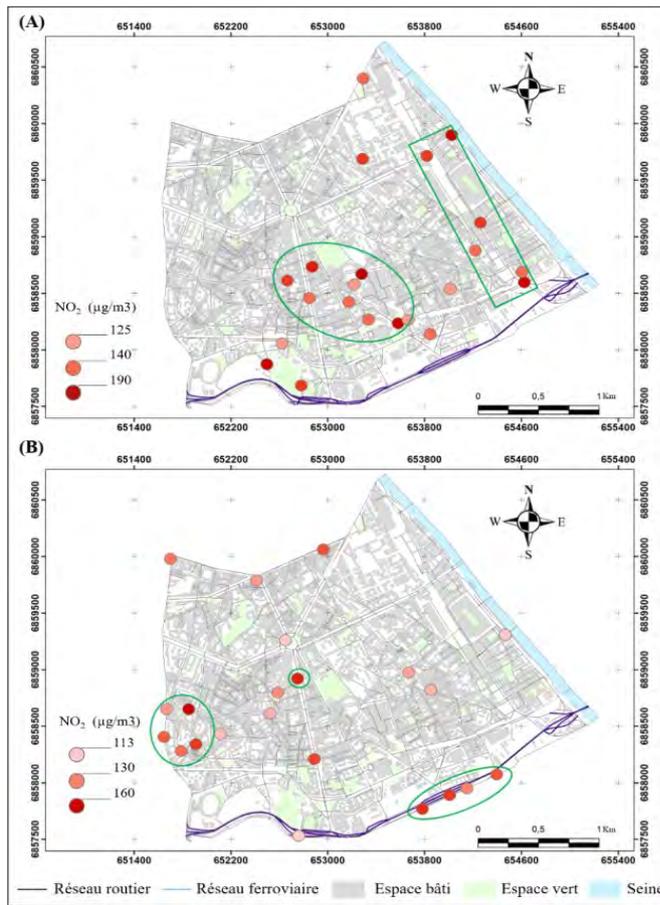


**figure 2.** La distribution des concentrations en  $\text{NO}_2$  au XIIIème arrondissement en 2020 pendant le confinement par temps stable(A) et temps perturbé (B) (Mesures par capteurs Aeroqual 500, nombre de campagnes 25 (Dahech et al, 2022).

## 2.2. Répartition des $\text{NO}_2$ en dehors du confinement par type de temps

Par un temps stable, deux clusters sont identifiés, un à l'ouest à l'avenue d'Italie et l'autre au sud le long du boulevard périphérique et Avenue de la porte d'Ivry. Ces clusters abritent des concentrations allant jusqu'à  $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Entre le boulevard des Maréchaux et avenue de la Porte d'Ivry ainsi que dans la rue Tolbiac, les concentrations dépassent  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Il s'agit presque des mêmes « points noirs » relevés pendant le confinement (fig.3). Les résultats issus des campagnes de mesures du  $\text{NO}_2$  sont concordants avec ceux obtenus pour le bruit : ils confirment la corrélation entre le trafic routier et le niveau sonore d'une part et entre le premier et la pollution atmosphérique de l'autre. Potentiellement, à l'échelle de la zone d'étude, la pollution sonore diminue en s'éloignant des routes nationales comme le boulevard périphérique et les routes principales comme rue Tolbiac.

Par temps perturbé, la qualité de l'air s'améliore. Des concentrations allant de  $113 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à  $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sont enregistré. La figure 3 montre que par temps perturbé, deux clusters sont identifiés, un à l'est au croisement rue des Grand Moulin/avenue de France et l'autre au boulevard Vincent Auriol. Le boulevard périphérique, avenue de la porte d'Ivry et avenue de la porte d'Italie enregistrent les valeurs les plus élevées (fig. 3B).



**figure 3.** Répartition des concentrations en  $\text{NO}_2$  au XIIIème arrondissement en 2020 et 2021 en dehors du confinement (A) par temps stable, (B) par temps perturbé (Mesures par capteurs Aeroqual 500, 25 campagnes de mesures (Dahech *et al.*, 2022).

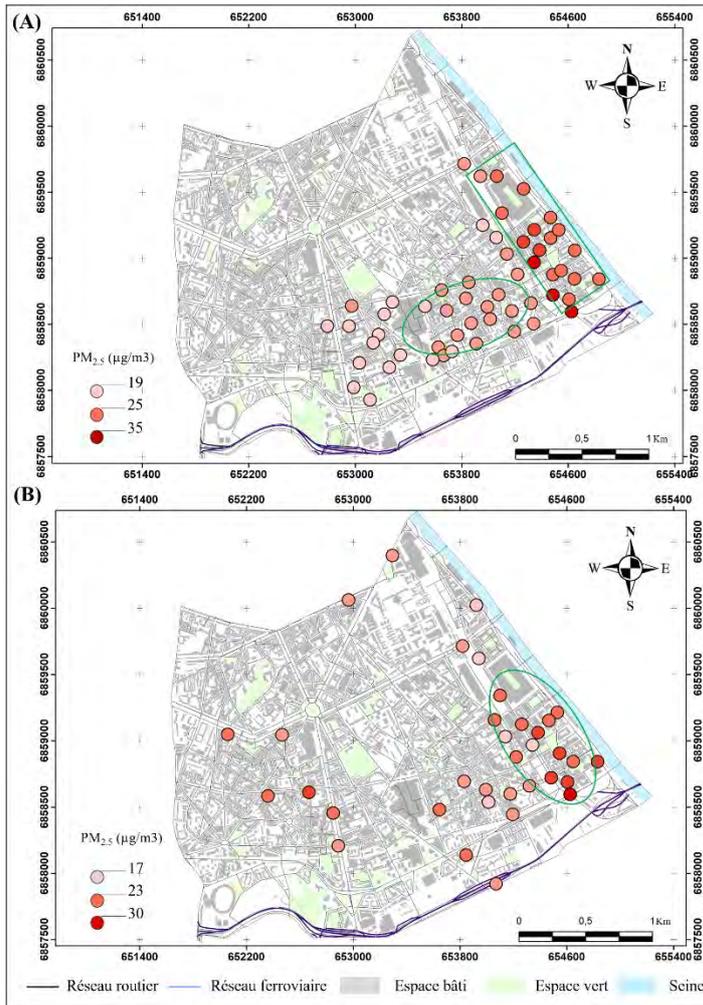
### 3. Variabilité spatio-temporelle des concentrations journalières de $\text{PM}_{2.5}$

#### 3. 1. Répartition des $\text{PM}_{2.5}$ pendant le confinement par temps stable et perturbé

Pendant le confinement, le percentile 75 des concentrations en  $\text{PM}_{2.5}$  atteint  $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour le temps stable (fig4.A) et  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pour un temps perturbé (fig4.B). Néanmoins, des valeurs dépassant la norme OMS (fig.4) sont observées par les deux types de temps le matin comme en fin de journée.

Nous avons enregistré des valeurs plus élevées par temps stable avec deux clusters : l'un à l'est, entre la rue des Grands Moulins et l'avenue de France, et l'autre au milieu du XIIIème arrondissement, au niveau rue de Tolbiac, rue Château des Rentiers, rue de Patay. Ces clusters ont des concentrations allant jusqu'à  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En effet, le long de l'Avenue de France et à la jonction de la Rue Tolbiac, des concentrations maximales ont été enregistrées près des bouches d'aération du métro et notamment à proximité des chantiers de constructions.

En revanche, lorsque le temps était perturbé, le percentile 75 a légèrement baissé. Les fortes concentrations variaient de  $17 \mu\text{g}/\text{m}^3$  à  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Elles sont réparties sur tout l'arrondissement. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées principalement au quai de Panhard et Levassor, au Boulevard du Général d'Armée Jean Simon, à la jonction entre rue Tolbiac et Avenue de France (fig. 4B). La fréquence d'obtention de concentrations supérieures à  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  était largement plus faible par temps perturbé.



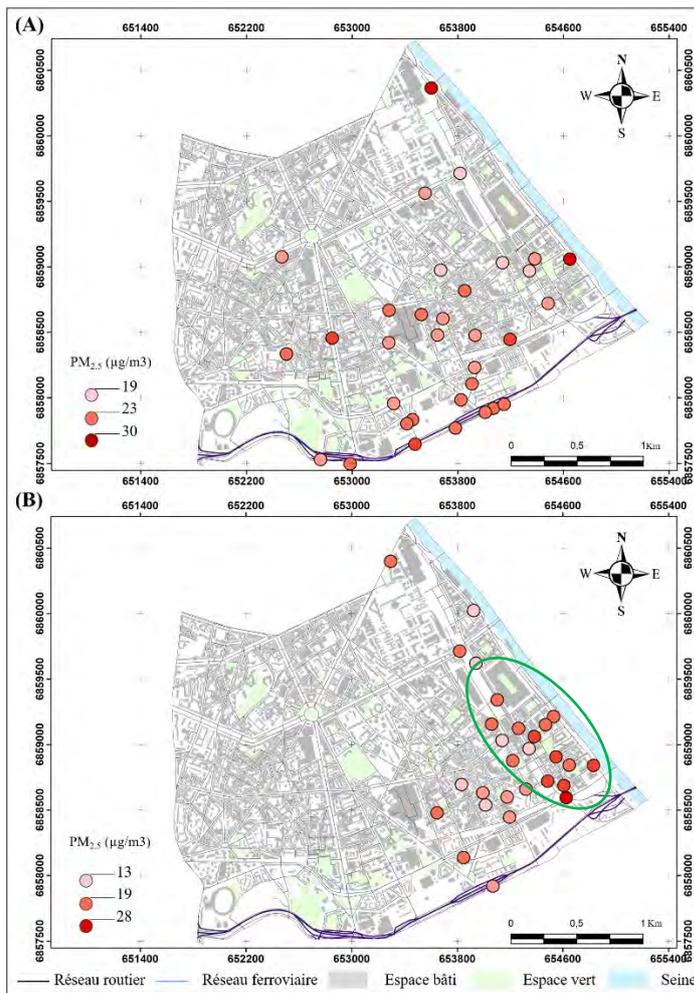
**figure 4.** Répartition des concentrations en PM<sub>2.5</sub> au XIII<sup>ème</sup> arrondissement en 2020 pendant le confinement (A) par temps stable, (B) par temps perturbé (Mesures par capteurs Aeroqual 500, 25 campagnes de mesures).

### 3. 2 Répartition des PM<sub>2.5</sub> en dehors du confinement par temps stable et perturbé

Par rapport à la période de confinement détaillée ci-dessus, les données enregistrées étaient comparables, à l'exception des concentrations maximales atteintes par beau temps, qui passaient de 35 à 30 µg/m<sup>3</sup> probablement parce que les conditions météorologiques étaient plus favorables à l'accumulation de particules et le temps a été plus froid, d'où un recours au chauffage plus important.

En dehors du confinement, le percentile 75 des concentrations en PM<sub>2.5</sub> atteint 19 µg/m<sup>3</sup> par temps stable (fig5.A) contre 13 µg/m<sup>3</sup> par temps perturbé (fig5.B). Néanmoins, des valeurs dépassant les normes OMS (fig.4) sont observées par les deux types de temps. Par temps radiatif, les valeurs les plus élevées, allant de 25 à 30 µg/m<sup>3</sup>, ont été enregistrées à proximité des routes principales ou des artères congestionnées comme le Boulevard Périphérique, le Quai Panhard-et-Levassor et l'Avenue de la Porte d'Ivry. Nous avons également observé des concentrations relativement élevées, supérieures à 23 µg/m<sup>3</sup>, principalement au Quai d'Austerlitz, à l'Avenue d'Italie et entre la jonction boulevard Masséna et rue Patay (fig. 5.A) soit l'une des zones les plus denses.

Par temps instable, malgré un trafic routier comparable à celui en temps stable (environ 700 véhicules par tranche de 5 min), la situation a été principalement marquée par des concentrations allant de 25 µg/m<sup>3</sup> à 28 µg/m<sup>3</sup> le long de l'Avenue de France, sièges des chantiers de construction et au Quai Panhard et Levassor (fig5.B).



**figure 5.** Répartition des concentrations en PM<sub>2.5</sub> au XIII<sup>ème</sup> arrondissement en 2020 pendant le confinement (A) par temps stable, (B) par temps perturbé (Mesures par capteurs Aeroqual 500, 25 campagnes de mesures).

## Conclusion

L'étude de cas du XIII<sup>ème</sup> arrondissement à Paris pendant le deuxième confinement est représentative de ce qui s'est passé à l'échelle de Paris, elle signale des valeurs de PM<sub>2.5</sub> et de NO<sub>2</sub> relativement élevées qui pourraient dépasser les valeurs recommandées par l'OMS. Nos mesures demeurent ponctuelles dans le temps et ne permettent pas de les comparer aux normes journalières de l'OMS. Nous avons conclu d'après les mesures de terrain que la probabilité d'avoir des fortes concentrations de NO<sub>2</sub> par temps stable est supérieure à celui perturbé en période de confinement. Des valeurs qui dépassent 250 µg/m<sup>3</sup> sont enregistrées principalement dans trois endroits : la zone comprise entre rue Tolbiac et rue national, à rue de Chevaleret et au boulevard Périphérique. En dehors du confinement nous n'avons pas enregistré des valeurs supérieures aux norme OMS par temps perturbé. Durant le deuxième confinement nous avons enregistré pour les PM<sub>2.5</sub> des concentrations supérieures à 32 µg/m<sup>3</sup> par temps radiatif dans l'Avenue de France, près des chantiers de construction. Par Temps perturbé les concentrations des PM<sub>2.5</sub> baissent à l'exception de certains sites proches des bouches d'aérations des métros et des chantiers de constructions. Les valeurs dépassant le percentile 75 deviennent plus dispersées dans l'espace. En dehors du confinement le niveau de PM<sub>2.5</sub> n'a pas beaucoup changé. Toutefois de nouveaux clusters apparaissent au boulevard périphérique, avenue d'Italie et quai d'Austerlitz où le trafic routier devient plus congestionné.

## Bibliographie

Brunet Y., Chevallier F., Colette A., Deniel C., Doussin J-F., Dubreuil V., Hanoune B., Lac C., Loubet B., Loustau D., Uzu G., Villenave E., 2020. *Effet du confinement du printemps 2020 sur la composition atmosphérique. Les outils de la recherche et l'expertise de la communauté scientifique au service du suivi des effets de la gestion de crise*. ALLEnvi Alliance Nationale de recherche pour l'environnement. <https://www.allenvi.fr/groupe-thematiques/atmosphere/actions>.

Camors C., Soulard O., Dezenaire F., Cyrille G., Renouvel S., Roger S., 2016. « *Économie numérique : 80 % des établissements franciliens en cœur d'agglomération* », Note rapide n° 710 ; « *Économie numérique : une dynamique d'emploi portée par les non-salariés* », Note rapide n° 711, IAU ÎdF, mars 2016.

Dahech, S. ; Abdmouleh , M.A. ; Lagmiri, S. Spatio temporal Variation of Air Quality (PM and NO<sub>2</sub>) in Southern Paris during COVID-19 Lockdown Periods. *Atmosphere*, 2022, vol. 13, no 2, p. 289. <https://doi.org/10.3390/atmos13020289>.

Dahech, S.; Charfi, S.; Madelin, M. Représentativité des températures mesurées dans la station météorologique Paris Montsouris. *Climatologie* 2021, 17, 5. <https://doi.org/10.1051/climat/202017005>.

Dutheil, F., Baker, J.S., Navel, V. COVID-19 as a factor influencing air pollution. *Environ. Pollut.* 2020, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.1144662019-2021>.

INSEE. Population légale de l'île de France. In *Insee Flash Île-de-France* N° 45; Paris, France. 2020. Available online: <https://www.insee.fr/fr/statistiques/5002478> (accessed on 17 May 2021).

Keshtkar, M., Heidari, H., Moazzeni, N., Azadi, H. Analysis of changes in air pollution quality and impact of COVID-19 on environmental health in Iran: application of interpolation models and spatial autocorrelation. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-22. 1 December 2021h. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17955-9>.

McKee, M., Stuckler, D. If the world fails to protect the economy, COVID-19 will damage health not just now but also in the future. *Nat. Med.* 2020, 26, 640–648. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0863-y>.

## TOPOCLIMAT DE LA RÉGION DE ZAHLE (LIBAN ORIENTAL)

Rabih ZEIN AL DINE<sup>1</sup>, Salem DAHECH<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Paris, laboratoire PRODIG, UMR 8586, [rabihzeineddin@hotmail.com](mailto:rabihzeineddin@hotmail.com)

<sup>2</sup> Université de Paris, laboratoire PRODIG, UMR 8586, [salemdahech@gmail.com](mailto:salemdahech@gmail.com)

**Résumé :** Ce travail porte sur les caractéristiques topoclimatiques de la région de Zahlé (Liban); notamment les brises thermiques. À Rayak des brises de montagne / vallée alternant entre jour et nuit ont été remarquées ; elles sont canalisées par la topographie de la vallée de la Békaa. A Houch El Oumaraa, les brises de types vallée-mer dominant durant le jour. Par contre, des brises de type campagne-montagne ont été observées durant la nuit. Pendant la période qui s'étend de 1994 à 2021, la fréquence des brises en saison estivale atteint 74 %. Ces brises agissent sur la distribution de la température et de l'humidité de l'air.

**Mots-clés :** Zahlé, brises thermiques, topoclimat

**Abstract:** This work focuses on the topoclimatic characteristics of the region of Zahle (Lebanon); in particular the thermal breezes. In Rayak, we noticed mountain / valley breezes alternating between day and night, and channeled by the topography of the Bekaa Valley. At Houch El Oumaraa, valley-sea breezes dominate during the day, while country-mountain breezes are observed during the night. During the period from 1994 to 2021, the frequency of breezes in the summer season reaches 74%. These breezes control airflow humidity and temperature distribution.

**Key words:** Zahle, thermal breezes, topoclimate

### Introduction

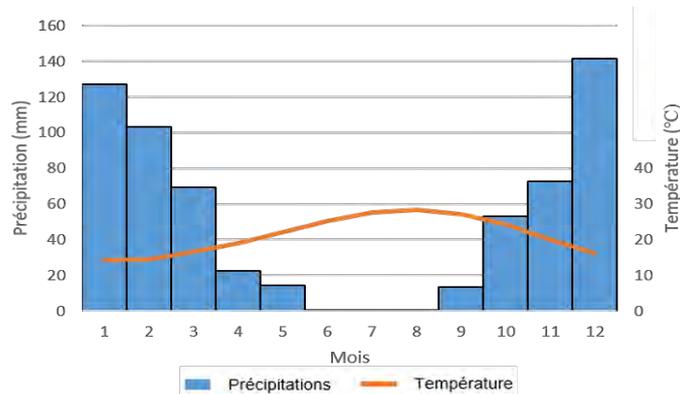
D'après Carrega (1994), les brises thermiques sont des vents d'origine thermique et d'échelle locale dont l'extension horizontale peut varier de quelques centaines de mètres à plusieurs dizaines de kilomètres. Ces brises sont, selon plusieurs études, favorables à la pollution atmosphérique (Simpson, 1994 ; Dahech, 2007). Elles agissent également sur le confort thermique en advectant de l'air frais et humide (Dahech, 2014). L'impact des brises thermiques sur le temps et la qualité de l'air varie suivant les conditions topoclimatiques et la taille des villes.

Les brises thermiques sont des phénomènes de temps radiatif (ciel clair et vent faible). Ce temps est très fréquent dans les régions Méditerranéennes, comme le Liban notamment l'été. Ce pays occupe une zone de transition entre les déserts tropicaux au Sud, et l'Europe tempérée au nord. C'est une zone qui est influencée par le vent synoptique d'ouest : en été cette circulation du flux d'ouest se contracte vers le nord et cède la place aux hautes pressions atmosphériques causées par la subsidence de la cellule de Hadley, et ceci se traduit par une sécheresse et une stabilité atmosphérique (Traboulsi, 1981). En altitude, un haut géopotential règne : l'anticyclone subtropical couvre toute la région, l'air est chaud, subsident et stable (Blanchet., 1979). Ces conditions atmosphériques estivales stables sont idéales pour l'apparition des brises thermiques.

L'objet principal de ce travail est d'étudier les caractéristiques des phénomènes topoclimatiques locaux tels que les brises, dans une région méditerranéenne caractérisée par un relief accidenté.

## Cadre de l'étude

Le caza<sup>1</sup> de Zahlé couvre 425 km<sup>2</sup>, doté comme le Liban par un climat typiquement méditerranéen avec une présence de deux périodes bien déterminées : une période sèche et chaude qui prédomine du mois de juin au mois de septembre, et une période humide et douce d'octobre jusqu'au mois de mai (figure 1).

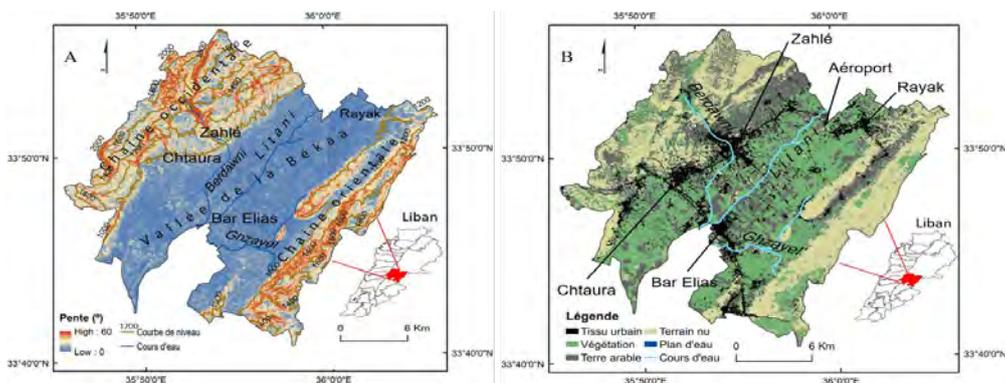


**figure 1.** Diagramme ombrothermique entre 1995 et 2015. Source : données météorologiques de la station de l'aéroport de Beyrouth.

Sur le plan topographique, c'est une vallée (la vallée de la Bekaa) insérée entre deux chaînes montagneuses : la chaîne orientale (Anti-Liban) et la chaîne occidentale (Mont Liban).

La topographie est accidentée avec des altitudes qui oscillent entre 900 m dans la vallée et 1920 m au niveau des hautes altitudes de la chaîne occidentale. La pente dans la vallée est faible, elle varie entre 0 et 11 degrés. Elle augmente tout en allant vers les chaînes montagneuses à l'est et à l'ouest. Les versants orientaux du Mont Liban sont escarpés, ils se distinguent par une forte valeur de pente (elle atteint 60°). Les versants de la chaîne orientale se distinguent par une valeur de pente qui atteint 42° et le point culminant atteint 1700 m (figure 2A).

L'agriculture est l'activité majoritaire. Néanmoins, on note l'activité industrielle dans la vallée et les carrières sur les versants. Les grandes agglomérations se trouvent à Zahlé, Taalabaya, Chtaura, Bar Elias et Rayak (figure 2B).



**figure 2.** A : topographie, source des données : image SRTM du Liban 2004, projection stéréographique; B : occupation du sol, source des données : image landsat 8 datée de 2017, projection stéréographique.

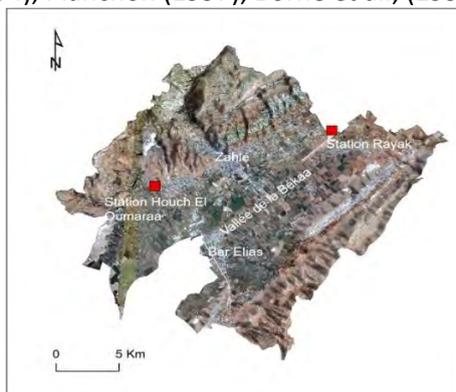
<sup>1</sup> Le caza désigne une entité administrative équivalente au département en France (délégation d'un gouvernorat).

## Données et méthodes

On a utilisé des données horaires du vent, de la température atmosphérique, de la pression atmosphérique et de la température du point de rosée issues des stations météorologiques conventionnelles fixes.

### Les données des stations fixes

On a utilisé essentiellement les données des deux stations météorologiques fixes présentes dans la zone d'étude : la station de Houch El Oumaraa (33° 49' N ; 35° 51' E) et la station de Rayak (33° 28' N ; 36° 30' E) (figure 3). La première est située dans une ville caractérisée par une densité urbaine remarquable sur les piémonts des versants Est de la chaîne mont Liban, et la seconde se trouve dans une vaste plaine dans la vallée de la Bekaa, dans un milieu péri-urbain. Les données du vent retenues correspondent aux valeurs tri-horaires pendant la saison estivale (Juin, Juillet et Aout) de la période comprise entre 1994 et 2021 pour la station de Houch El Oumaraa, et celle comprise entre 1994 et 2009 pour la station de Rayak. En complément, nous nous sommes appuyés sur les données tri-horaires du vent relevées de 1994 à 2021 dans deux autres stations hors de la zone d'étude : la station de l'aéroport de Beyrouth et la station de Dahr El Baidar. Outre le vent, nous utilisons les variables météorologiques suivantes : pression en surface et en altitude (géopotential 500 hPa), et le point de rosée. Un ensemble de filtres a été mis en place pour sélectionner automatiquement les brises. Toute situation dépressionnaire a été écartée, la vitesse du vent ne doit pas dépasser 11 m/s (c'est la vitesse maximale d'une brise selon l'échelle de Beaufort), et une alternance de directions entre les brises observées le jour et la nuit doit être observée. Ces filtres ont été utilisés dans plusieurs travaux pour sélectionner les journées de brises et ont été inspirés des travaux de Neumann et Mahrer (1971), Simpson (1994), Planchon (1997), Borne et al., (1998) et Dahech et al., (2005).

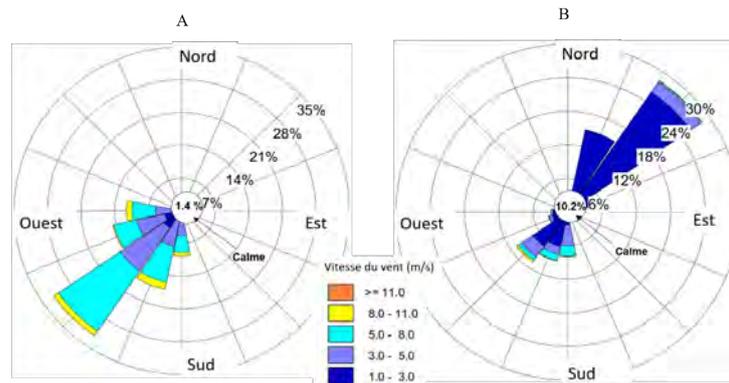


**figure 3.** Localisation des stations météorologiques fixes dans la zone de l'étude

## Résultats

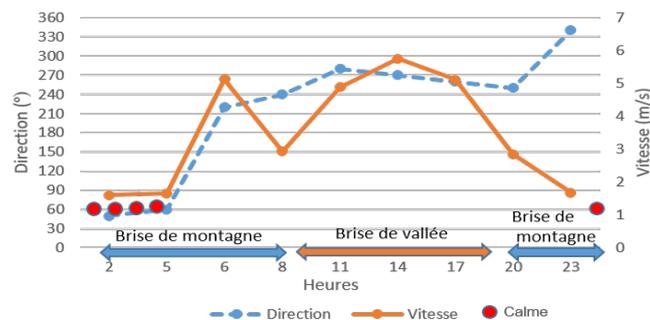
### Brises thermiques

À Rayak, la brise de vallée (se produisant de jour, figure 4-A) est de secteur Sud à Ouest, avec une prépondérance des vents de SO. Elle prend naissance de la vallée de la Bekaa, puis est canalisée vers le NE par le relief. Sa vitesse moyenne est comprise entre 5 et 8 m/s. La nuit, la rose des vents (figure 4-B) montre un flux dominant provenant du NE, ayant une vitesse comprise entre 1 et 3 m/s. C'est une brise de montagne canalisée par la topographie de la vallée, qui descend des hautes altitudes par l'effet du siphonage : l'air froid et dense s'écoule doucement vers les talwegs et remplace l'air de la vallée réchauffé pendant la journée. L'alternance entre ces deux brises est quasi-quotidienne ce qui renseigne sur la fréquence élevée du phénomène en été.



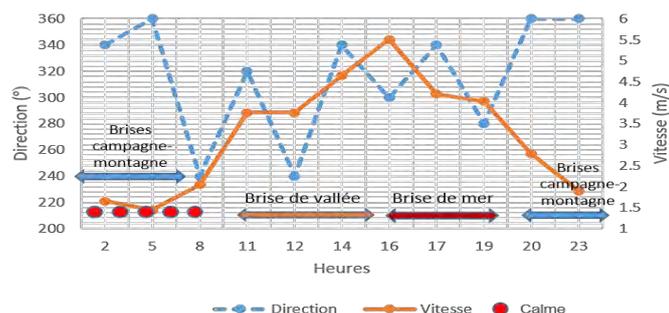
**figure 4.** Roses estivales des du vent par tranches de vitesse à Rayak le jour (TU +2 : 8, 11, 14, 16, 17, 18 h, A) et la nuit (20, 21, 22, 23, 2, 3, 5 h, B). Données horaires de la station météorologique de Rayak entre 1994 et 2009, source : NOAA

L'anémogramme (figure 5) montre qu'en moyenne, la brise de vallée prend naissance le matin vers 8 h, environ deux heures après le lever du soleil. Durant cette phase, le vent prend des directions allant du sud-ouest à l'ouest (de 240 à 280 degrés) et la vitesse moyenne du vent atteint sa valeur maximale de 5,7 m/s à 14 h. Cette brise dure environ 12 heures. À 21 h la renverse nocturne commence, la direction du vent est déviée progressivement vers le nord et les vitesses continuent à faiblir. La brise de montagne commence à s'installer la nuit, elle est caractérisée par des directions de secteur NE dominant. Le calme représente la situation dominante en phase nocturne.



**figure 5.** Anémogramme montrant l'alternance entre brise de montagne et brise de vallée à Rayak, données horaires (TU+2) de la station météorologique de Rayak en été entre 1994 et 2009, directions dominantes (mode), vitesses et directions moyennes, heures locales, source : NOAA

À Houch El Oumaraa, différents types de brises ont été observés (figure 6) : une brise de vallée qui prend naissance à 9h et perdure jusqu'à 16h, une brise de mer à partir de 16h et qui domine jusque vers 19h. La nuit, des brises de type montagne-campagne dominant.



**figure 6.** Anémogramme montrant l'alternance entre les brises vallée / mer durant la journée et les brises campagne / montagne durant la nuit à Houch El Oumaraa en été (données horaires de la station de Houch El Oumaraa de 1994 à 2021, TU +2, directions dominantes (mode), vitesses moyennes, source : NOAA)

## Conclusion

La vallée de la Békaa dans le district de Zahlé est soumise au jeu des brises thermiques remarquables en conditions atmosphériques stables et temps radiatif. A Rayak la brise de vallée domine pendant le jour, elle monte les versants à partir de 8 h. La nuit la brise de montagne domine, c'est une brise catabatique caractérisée par une descendance de l'air froid et dense des pentes vers la vallée. Cet air occupe la vallée pendant toute la nuit et le calme domine. La topographie de la vallée canalise les écoulements.

À Houch El Oumaraa la situation est différente. Une alternance entre brises vallée-mer le jour et campagne-montagne la nuit est remarquée. La canalisation des écoulements est bien observée, elle est causée par la topographie de la vallée.

## Bibliographie

- Beltrando G., Chemery L., 1995: Dictionnaire du climat. Paris, Larousse, 344 p.
- Blanchet G., 1976 : Le temps au Liban, approche d'une climatologie synoptique. Thèse de 3ème cycle, Lyon. T. 1 : 477 p.
- 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** et **36**, 408 p.
- Carrega P., 2013 : Le climat urbain de Nice en milieu géographique contrasté : synthèse par approche inductive. Climatologie, Association internationale de climatologie.
- Carrega P. et Martin R., 2017 : Le climat urbain de Nice, dans un contexte méditerranéen. XXXème colloque de l'association internationale de climatologie. Sfax 2017.
- Dahech S., 2007 : Le vent à Sfax (Tunisie), impacts sur le climat et la pollution atmosphérique (Thèse de Doctorat). Université Paris VII, France.
- Dahech S., 2014 : Impact de la brise de mer sur le confort thermique au Maghreb oriental durant la saison chaude. Cybergeog : European Journal of Geography [En ligne]. Environnement, Nature, Paysage, document 695, mis en ligne le 02 décembre 2014. URL : <http://cybergeog.revues.org/26555> ; DOI : 10.4000/cybergeog.26555
- Michelot N. et Carrega P., 2014 : Topoclimatologie et pollution de l'air dans les Alpes-Maritimes : mécanismes et conséquences en images. Echo Géo, 29.
- Simpson J. E., 1994: Sea breeze and local winds. Cambridge University Press, 234 p.
- Traboulsi M., 1981 : Le climat de la Syrie, exemple de dégradation vers l'aride du climat méditerranéen. Géographie. Université de Lyon II, 1981. Français.
- Sites Web : [www.ncdc.noaa.gov](http://www.ncdc.noaa.gov)

## LA POLLUTION DE L'AIR AU PM<sub>10</sub> DANS L'AGGLOMÉRATION DE CERGY-PONTOISE : LIENS ENTRE ÉPISODES DE POLLUTION ET TYPES DE TEMPS

**Souad LAGMIRI<sup>1</sup> et Salem DAHECH<sup>2</sup>**

(Université Paris Cité, UMR PRODIG, 75006 Paris, France)

Correspondance : [souad.lagmiri@gmail.com](mailto:souad.lagmiri@gmail.com) ; [salem.dahech@gmail.com](mailto:salem.dahech@gmail.com)

**Résumé :** Ce travail détermine les types de temps associés aux jours de dépassement de la norme préconisée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour les PM<sub>10</sub>. L'analyse s'est basée sur les champs de pression au niveau de la mer, le géopotential 500 hPa et les variables climatiques enregistrées par la station de « Cormeilles en Vexin ». Les concentrations horaires en PM<sub>10</sub> ont été fournies par AIRPARIF pour la période 2009-2020. La quasi-totalité des dépassements de la norme OMS ont été enregistrés entre novembre et avril. Trois types de temps distincts ont été déterminés pendant cette période. La grande partie des épisodes de pollution était associée aux types anticycloniques (2 sur 3) marqués par des inversions thermiques la nuit et le matin. Par ailleurs, lors d'un type de temps dépressionnaire, les concentrations étaient plutôt liées au chauffage urbain pendant le grand froid.

**Mots clés :** PM<sub>10</sub>, pollution de l'air, types de temps, Cergy-Pontoise

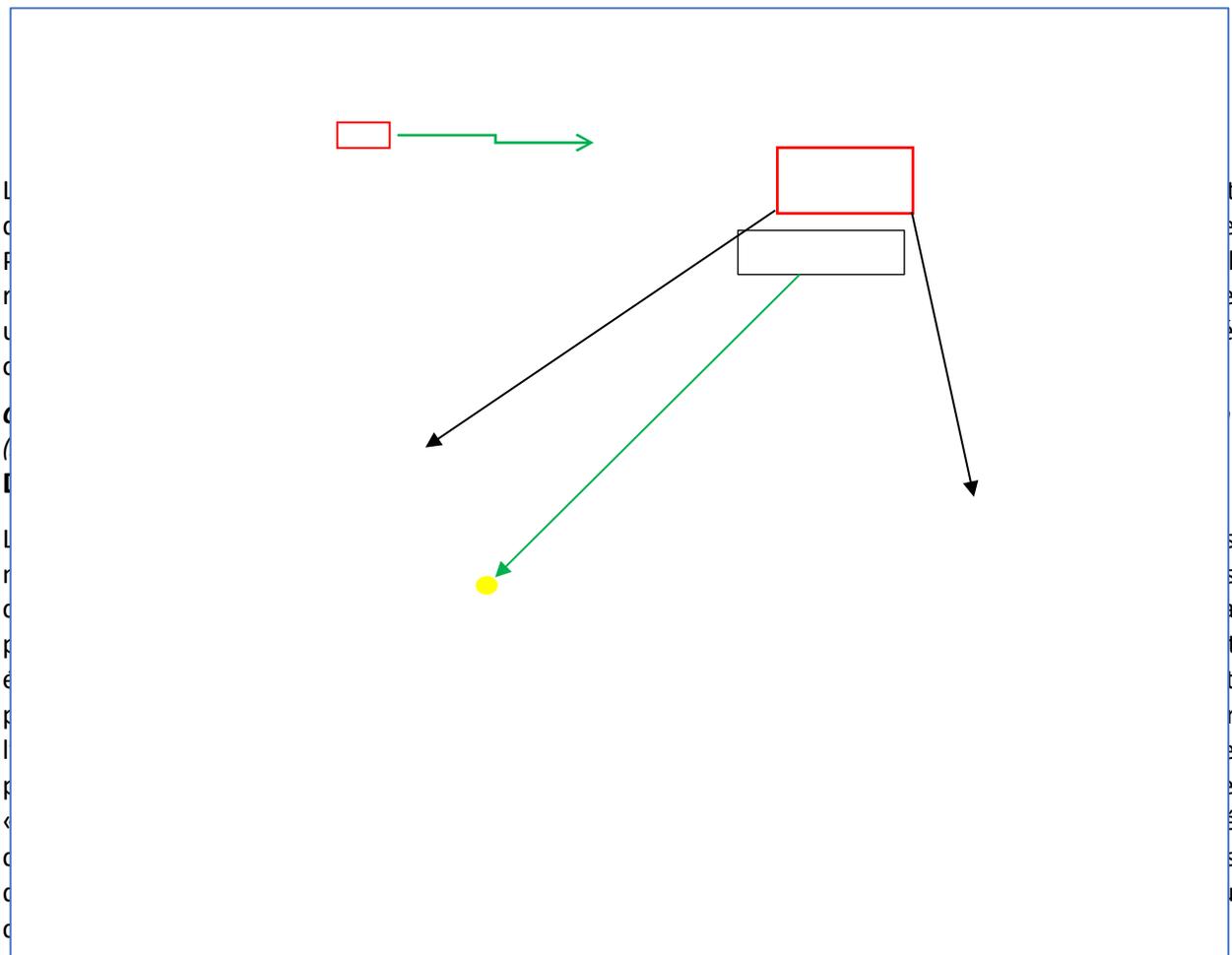
**Abstract :** This work determines the types of weather associated with days when the standard recommended by the World Health Organization (WHO) for PM<sub>10</sub> is exceeded. The analysis was based on the pressure fields at sea level, the 500 hPa geopotential and the climatic variables recorded by the "Cormeilles en Vexin" station. Hourly PM<sub>10</sub> concentrations were provided by AIRPARIF for the period 2009-2021. Almost all of the exceedances of the WHO standard were recorded between November and April. Three distinct types of weather have been determined during this period. Most of the pollution episodes were associated with anticyclonic types (2 out of 3) marked by thermal inversions at night and in the morning. Moreover, during a type of low pressure weather, the concentrations were more related to district heating during the extreme cold.

**Keywords :** PM<sub>10</sub>, air pollution, weather Types, Cergy-Pontoise

### Introduction :

La pollution de l'air est depuis longtemps, une préoccupation des pouvoirs publics. En France, bien que l'application d'une législation stricte ait permis de réduire significativement certains polluants, en Ile-de-France les particules PM<sub>10</sub> restent l'un des polluants problématiques (AIRPARIF, 2019). La Communauté d'Agglomération de Cergy Pontoise (CACP), depuis sa création dans la grande banlieue parisienne, se confronte à des journées de pollution aux PM<sub>10</sub>. En moyenne 16,5 jours/an de dépassement des normes OMS, sont enregistrés entre 2009 et 2020. Bien que les activités anthropiques affectent de manière significative les concentrations élevées des PM<sub>10</sub>, les paramètres météorologiques, notamment le vent et la pression atmosphérique, ont également un impact sur les niveaux de pollution de l'air (Li et al., 2015 ; Rimetz-Planchon et al., 2008; Rodriguez et al., 2001; Triantafyllou 2000; Querol et al., 2004). Des recherches approfondies montrent que la connaissance de la relation entre pollution et type de temps s'améliore lorsque l'approche utilisée examine les variables météorologiques dans un ensemble plutôt que de les isoler dans une analyse une à une (McGregor 1999). Dans le présent travail nous mettons l'accent sur les types de temps associés aux fortes concentrations en PM<sub>10</sub> de 2009 à 2020.

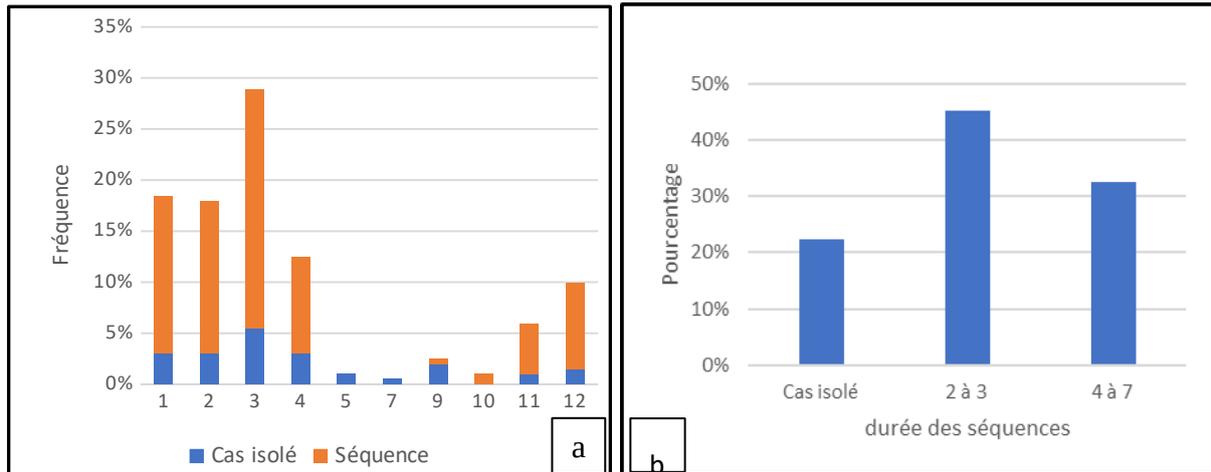
### Zone d'étude



## Résultats

### Étude fréquentielle des jours de dépassement des normes OMS

Le graphique n°1 démontre que, parmi les 198 jours de dépassement observés, certains sont isolés et d'autres font partie d'une séquence de plusieurs jours consécutifs. Les jours faisant partie des épisodes de pollution correspondent à 78% de l'ensemble des jours de dépassement sélectionnés, soit 155 jours. Les séquences de 2 à 3 jours représentent 45% (89 jours) et de 4 à 7 jours 32% (64 jours). Ils se répartissent principalement entre novembre et avril. Le mois de mars se distingue des autres mois par un nombre de dépassements plus élevé, soit près de 23%. Les jours ne faisant pas partie des épisodes de pollution (cas isolés) correspondent à 22% (43 jours) de l'ensemble des jours de dépassement. C'est de janvier à avril que leur fréquence est plus élevée avec en moyenne près de 7 jours/mois. Ils sont tous à des niveaux de concentrations inférieures à  $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Les séquences de longue durée (de 4 à 7 jours) sont principalement survenues de novembre à avril avec une dominance plus élevée en mars, novembre et décembre. En janvier, février et avril, ces séquences ont une fréquence de 63% à 80% (figure 1). En dehors de la période novembre-avril, trois courtes séquences sont notées en septembre et octobre ; elles sont de courte durée (de 2 à 3 jours).



**figure 1** : Répartition mensuelle des séquences de pollution aux PM<sub>10</sub> (a) ; persistance de pollution en nombre de jours (b) (données PM<sub>10</sub> de 2009-2020 à partir de la station AIRPARIF)

### Types de temps associés aux épisodes de pollution au PM<sub>10</sub>

Les types de temps représentent une combinaison de données météorologiques stationnelles influencées par les conditions locales et justifiées par la circulation. Ce sont des situations particulièrement caractéristiques (vigneau, 2000).

Une fois les jours marqués par des dépassements de la norme préconisée par l'OMS sont définis, nous examinons le champ de pression au sol et le géopotential à 500 hPa. Nous regardons ensuite l'état de l'atmosphère à partir des différentes variables climatiques enregistrées par la station météorologique. Cette approche nous permet de retenir trois configurations isobariques expliquant un temps particulier.

**Premier type (T1)** : C'est le type le plus dominant. Il est observé en hiver quand l'anticyclone des Açores déborde en surface sur l'Europe centrale et de l'est et surplombé par une dorsale étendue sur toute la France en altitude (géopotential 500 hPa). La France, sur le flanc ouest de cet anticyclone, ou sud quand il est centré sur les îles britanniques, est affectée par une masse d'air venant du sud-est en surface alors qu'un flux sud-ouest domine en altitude. Le ciel est clair car l'air est subsident (la pression au sol avoisine 1025 hPa). Le vent est faible (2-3m/s) avec des températures au-dessus des normales de saison (+3 °C). La formation des brouillards est expliquée par l'inversion thermique persistant sur plusieurs heures.

**Deuxième type (T2)** : Il se produit quand la France est coincée entre deux talwegs séparés par une dorsale qui monte jusqu'au pays Scandinaves en surface aussi bien qu'en altitude. En surface, un flux dominant d'est à nord-est est enregistré. L'extension de l'anticyclone sibérien à l'ouest (1022hPa) favorise l'infiltration d'un air très froid et sec sur toute l'Europe d'où la baisse de la température qui descend parfois jusqu'à -12°C. Parallèlement l'insolation avoisine 430Wh/m<sup>2</sup> et le vent est modéré (3-7m/s). Un temps ensoleillé mais très froid augmente le recours massif au chauffage.

**Troisième type (T3)** : Ce type de temps froid et nuageux est observé principalement au début du printemps. Des épisodes de pollution coïncident avec une configuration de bas géopotential et dépressionnaire en surface. La France est concernée par un talweg qui prolonge la dépression subpolaire et achemine un flux de nord-est. Comme T2, la température baisse. Elle est à 5°C en dessous des normales de saison. Contrairement aux situations radiatives précitées l'amplitude thermique diurne est faible (<5°C).

**Tableau 1** : Valeurs moyennes des concentrations des PM<sub>10</sub> et nombre de jours appartenant aux trois types des temps

Type des temps	Nombre des jours	Moyenne de PM <sub>10</sub>	Max. de PM <sub>10</sub>	Min. de PM <sub>10</sub>
	142	62	162	47

T1									
T2	19	55	78	46					
T3	37	54	74	45					

**Tableau 2:** valeurs moyennées des variables météorologiques pour les trois types des temps (2009-2020)

Type des temps	SLP (hPa)	T-min (C°)	T-max (C°)	$\Delta T$ (C°)	RH (%)	V (m/s)	Flux Surface	Flux altitude	Phénomènes observés
T1	1025	2,4	15	12,6	86	2 à 3	Est/sud-est	Sud-ouest	brouillard + ciel claire
T2	1022	-3,5	7	10,5	56	3 à 7	Est/nord-est	Nord-est	neige
T3	996	0,1	5,6	5,5	77	5 à 8	Est/nord-est	Ouest	brouillard + ciel partiellement couvert

## Conclusion

Le classement des jours de dépassement en catégories homogènes a permis de comprendre la relation complexe entre la pollution et les conditions météorologiques. Les résultats révèlent que, outre les émissions, la stabilité de l'atmosphère est le principal facteur explicatif de l'accumulation des PM<sub>10</sub> près de la surface. Cela concorde avec d'autres recherches (Xiaolan et al., 2019 ; Qianhui et al., 2020; Xu et al., 2011). Toutefois, en région parisienne un temps froid, au début du printemps avec un vent modéré peut expliquer certains épisodes de forte pollution au PM<sub>10</sub> car, durant cette saison l'utilisation du chauffage s'ajoute à la forte activité pollinique mesurée également dans la fraction des PM<sub>10</sub>. Un réseau de 16 stations fixes de mesures de la qualité de l'air de type « Ecosmart » est mis en place à partir de mars 2022 dans l'agglomération de Cergy Pontoise pour mieux observer la variation spatiotemporelle des PM<sub>10</sub> à échelle fine.

## Bibliographie

- Airparif., 2019. Bilan de la qualité de l'air Année 2018. Surveillance et information en Île-de-France. 98 p.
- Li, H. , Guo, B. , Han, M. , Tian, M. and Zhang, J. (2015) Particulate Matters Pollution Characteristic and the Correlation between PM (PM2.5, PM10) and Meteorological Factors during the Summer in Shijiazhuang. Journal of Environmental Protection, 6, 457-463. doi: 10.4236/jep.2015.65044.
- McGregor GR. Winter ischaemic heart disease deaths in Birmingham, United Kingdom. A synoptic climatological analysis. Clim Res 13:17–31. <https://doi.org/10.3354/cr013017>, 1999.
- Qianhui Li, Bingui Wu, Jingle Liu, Hongsheng Zhang , Xuhui Cai , Yu Song. Characteristics of the atmospheric boundary layer and its relation with PM2:5 during haze episodes in winter in the North China Plain. Atmospheric Environment, Volume 223, 15 February 2020, 117265 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117265>
- Querol, X., Alastuey, A., et al., 2004. Levels of particulate matter in rural, urban and industrial sites in Spain. The Science of Total Environment 334–335, 359–376.
- Rimetz-Planchon J, Perdrix Esperanza, Sobanska Sophie, Bremard Claude. PM10 air quality variations in an urbanized and industrialized harbor. Atmospheric Environment 42 (2008) 7274–7283. Doi:10.1016/j.atmosenv.2008.07.005
- Rodriguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Kallos, G., Kakaliagou, O., 2001. Saharan dust contributions to PM10 and TSP levels in Southern and Eastern Spain. Atmospheric Environment 35, 2433–2447.
- Triantafyllou. PM10 pollution episodes as a function of synoptic climatology in a mountainous industrial area. Environmental Pollution. Volume 112, Issue 3, May 2001, Pages 491-500. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00131-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00131-7)
- VIGNEAU J.P. Géoclimatologie. Ellipses. 334 p. 2000
- Xiaolan Li, Xiao-Ming Hu, Yanjun Ma, Yangfeng Wang, Liguang Li, Ziqi Zhao. Impact of planetary boundary layer structure on the formation and evolution of air-pollution episodes in Shenyang, Northeast China. Atmospheric Environment. Volume 214, 1 October 2019, 116850 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116850>

Xu, WY, Zhao, CS, Ran, L., Deng, ZZ, Liu, PF, Ma, N., Lin, WL, Xu, XB, Yan, P., He, X., Yu, J., Liang, WD et Chen, LL. Caractéristiques des polluants et leur corrélation avec les conditions météorologiques sur un site suburbain de la plaine de Chine du Nord, *Atmos. Chim. Phys.*, 11, 4353–4369, <https://doi.org/10.5194/acp-11-4353-2011>, 2011.

## ANTHROPOGENIC EMISSIONS, AEROSOL POLLUTION AND HEALTH IN WESTERN AFRICA

C. LIOUSSE<sup>1</sup>, V. YOBOUE<sup>2</sup>, S. KEITA<sup>1,2</sup>, T. DOUMBIA<sup>1</sup>, J.F. LEON<sup>1</sup>, J. ADON<sup>1</sup>, S. GNAMIEN<sup>2</sup>, E. N'DATCHOH TOURE<sup>2</sup>, A. BAEZA-SQUIBAN<sup>3</sup>, I. ANNESI-MAESANO<sup>4</sup>, S. BECERRA<sup>5</sup>, M. BELLAND<sup>5</sup>, A. AKPO<sup>6</sup>, J. DJOSSOU<sup>6</sup>, K. KOUAME<sup>7</sup>, M. OUAFO<sup>8</sup>, E. ASSAMOI<sup>2</sup>, J. BAHINO<sup>2</sup>, A. BONNASSIEUX<sup>5</sup>, H. CACHIER<sup>1</sup>, M. DIAS-ALVES<sup>1</sup>, M. DOUMBIA<sup>2</sup>, C. GALY-LACAUX<sup>1</sup>, E. GARDRAT<sup>1</sup>, C. GRANIER<sup>1</sup>, G. OSSOHO<sup>2</sup>, L. ROBLOU<sup>1</sup>, F. SOLMON<sup>1</sup> and H. XU<sup>9</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Aérodologie, CNRS/UPS, Toulouse, France, [lioc@aero.obs-mip.fr](mailto:lioc@aero.obs-mip.fr)

<sup>2</sup>Laboratoire des Sciences de la Matière, de l'Environnement et de l'énergie Solaire, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, [yobouev@hotmail.com](mailto:yobouev@hotmail.com)

<sup>3</sup>Université Paris Diderot, Unité de Biologie Fonctionnelle et Adaptative-RMCX, CNRS, UMR 8251, Paris, France, [armelle.baeza@u-paris.fr](mailto:armelle.baeza@u-paris.fr)

<sup>4</sup>IDESP, Université de Montpellier, France, [isabella.annesi-maesano@inserm.fr](mailto:isabella.annesi-maesano@inserm.fr)

<sup>5</sup>GET, CNRS, Toulouse, France, [sylvia.becerra@get.omp.eu](mailto:sylvia.becerra@get.omp.eu)

<sup>6</sup>Laboratoire de Physique du Rayonnement, Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, Benin, [akpoarist@yahoo.fr](mailto:akpoarist@yahoo.fr)

<sup>7</sup>Institut Pasteur, Abidjan, Côte d'Ivoire, [kouadiokouame@yahoo.com](mailto:kouadiokouame@yahoo.com)

<sup>8</sup>Université de Douala, Douala, Cameroun, [ouafoleumberoumy@gmail.com](mailto:ouafoleumberoumy@gmail.com)

<sup>9</sup>Xi'an Jiaotong University, China, [xuhongmei@xjtu.edu.cn](mailto:xuhongmei@xjtu.edu.cn)

**Abstract:** This work highlights the main issues concerning the impacts of anthropogenic emissions on air pollution and population health in West Africa: (1) Aerosol levels in urban areas are 3 to 15 times higher than the standards recommended by the World Health Organization (WHO); (2) Air pollution is due to a mixture of anthropogenic urban sources (domestic fires, old vehicles, waste burning, etc..) and regional sources (desert dust, savannah fires), with strong seasonal variations; (3) Health effects in terms of inflammation and premature deaths are due to fine particles and (4) Projections in the future show an increasing importance of anthropogenic emissions, air pollution and health impacts if no mitigation is implemented.

**Keywords:** anthropogenic emissions, aerosol pollution, health, mitigation

**Résumé:** Ce travail montre l'impact des émissions anthropiques sur la pollution atmosphérique et la santé des populations en Afrique de l'Ouest : (1) Les niveaux d'aérosols en ville sont 3 à 15 fois supérieurs aux normes recommandées par l'Organisation mondiale de la santé ; (2) La pollution atmosphérique est due à un mélange de sources anthropiques (feux domestiques, vieux véhicules, brûlage de déchets, etc.) et de sources régionales (poussières désertiques, feux de savane), avec de fortes variations saisonnières; (3) les particules fines ont un rôle important sur la santé en termes d'inflammation et de décès prématurés et (4) les projections montrent une importance croissante des émissions anthropiques et de leurs impacts si aucune mesure de réduction n'est mise en œuvre.

**Mots clés :** émissions anthropiques, pollution particulaire, santé, réduction des émissions

### Introduction

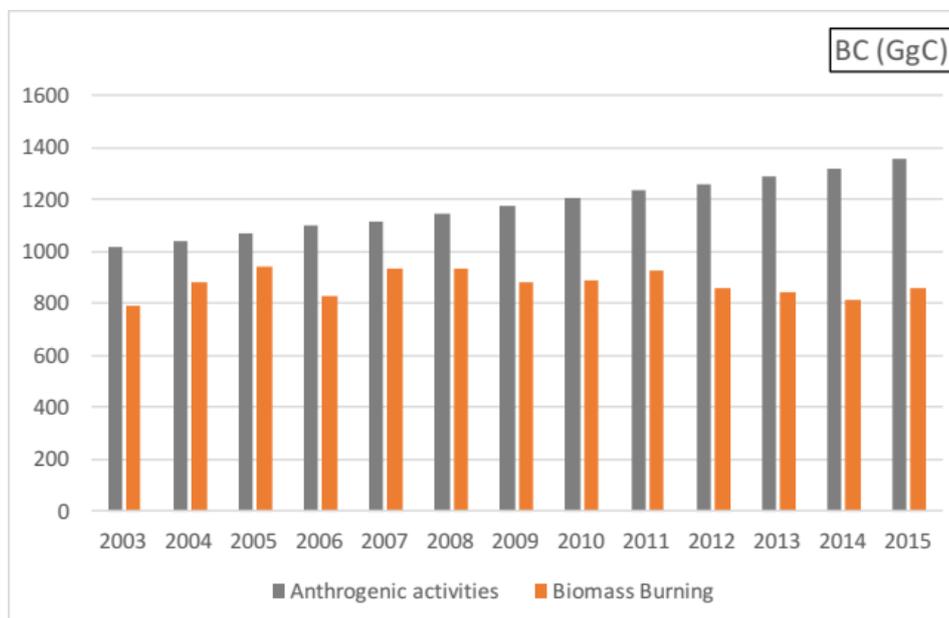
In a context of rapid urbanization, sub-Saharan Africa is confronted with increasing unregulated anthropogenic emissions of pollutants, which leads to a significant deterioration in the air quality of its cities and the health of its populations. However, those issues are poorly studied in this region of the world. First scientific projects focusing on these issues started around 2005 at different spatial scales (from the individual to the regional scale). The main results obtained by these projects, centered on West Africa with local studies in Bamako (Mali), Dakar (Senegal), Abidjan (Ivory Coast), Korhogo (Ivory Coast), and Cotonou (Benin) are discussed in this paper.

## 1. Anthropogenic emissions

During the last decade, African regional studies have started to point out the importance of anthropogenic activities and their associated emissions of air pollutant. Until then, most regional studies focused on the quantification on the emissions of savannah fires, as well as of desert dust, for example with the DECAFE (Dynamique et Chimie Atmosphérique en Forêt Equatoriale) and AMMA (African Monsoon Multidisciplinary Analysis) projects. Estimates of anthropogenic emissions were taken from global inventories that did not take into account the specificities of African emission sources.

We have developed regional and local anthropogenic emissions inventories in the frame of the DACCIWA and PASMU (Atmospheric Pollution in Urban Areas and Impact on Health) projects. We characterized and quantified the less-known emissions, i.e. domestic and commercial activities, charcoal making, road traffic taking into account the typical fleet of vehicles of African cities (old cars, 2 wheels, mini-buses ..), waste burning and flaring fires (Keita et al., 2018; Doumbia et al. 2018; Keita et al., 2021).

Figure 1 summarizes the relative importance of anthropogenic and biomass burning sources for the period 2003-2015 for black carbon, resulting from these projects.



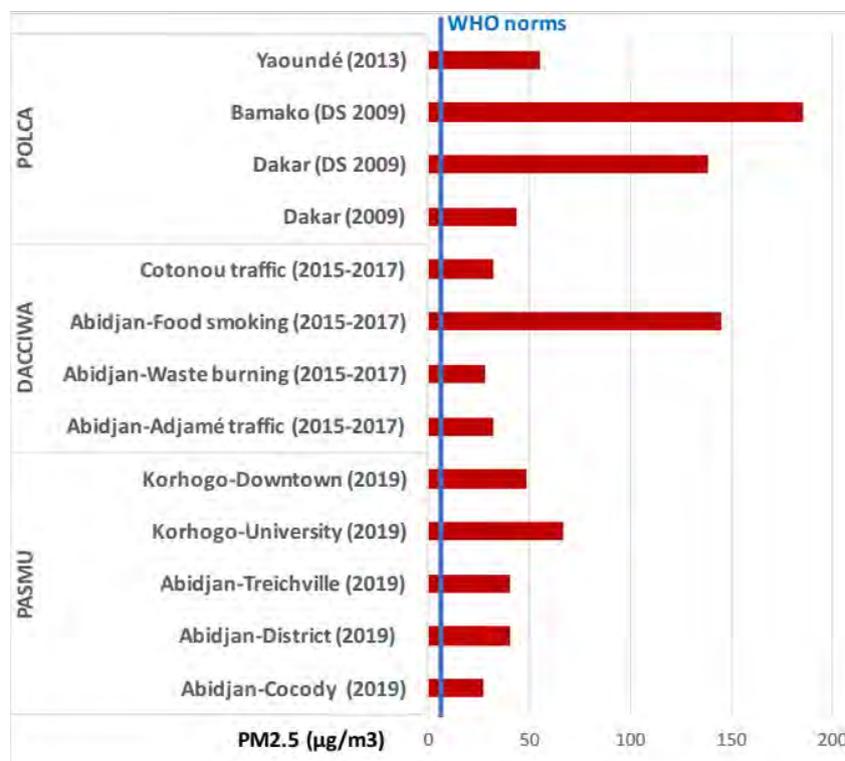
**figure 1.** Black carbon (BC) emissions in Africa.

While emissions from savannah fires show no significant variation during the past years, anthropogenic emissions are constantly increasing. For now, anthropogenic emissions are predominant, when compared to savannah fires. Anthropogenic emissions are expected to increase by a factor of 2 if no mitigation is implemented (Liousse et al., 2014).

These scientific studies continue today at the regional and city level. They are part of the African Emissions working group of the international GEIA (Global Emissions Initiative: [igacproject.org](http://igacproject.org)) project on emissions. The emissions data are made available to the community through ECCAD database ([eccad.aeris-data.fr](http://eccad.aeris-data.fr) and see presentation of Darras et al. in the conference).

## 2. Aerosol pollution

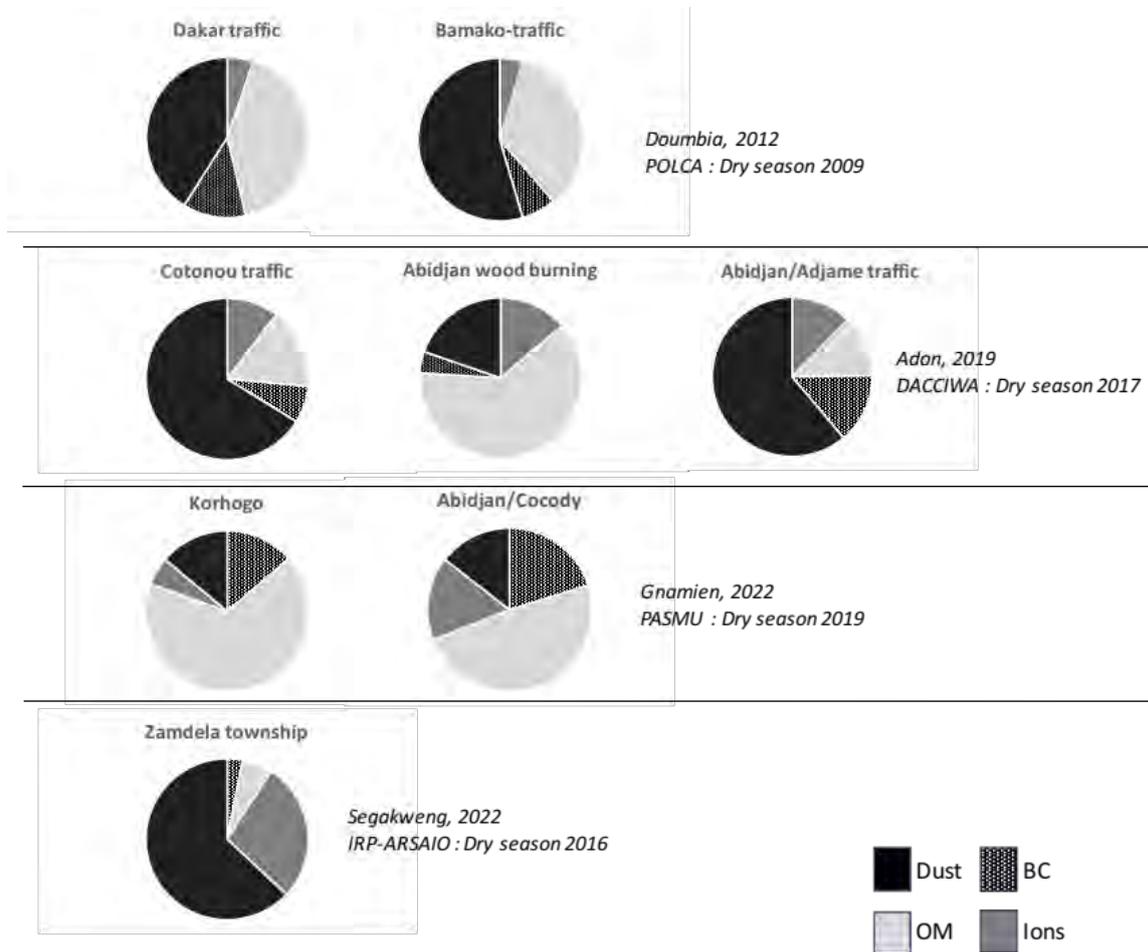
About ten years ago, there was few or no networks measuring gaseous and particulate pollutants in West African cities. In this context, we have developed several projects to characterize the levels of air pollution at the urban scale. Measurements were performed at sites close to the sources of emissions (traffic sites, waste burning sites, food cooking sites) and at urban background sites in the framework of the POLCA, DACCIWA and PASMU projects, in Abidjan (Ivory Coast), Cotonou (Benin), Korhogo (Ivory Coast), Dakar (Senegal) and Yaoundé (Cameroon). The results showed that the annual average concentrations of gaseous compounds do not exceed WHO standards (Bahino et al., 2018). However, the concentrations are 3 to 15 times higher for fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) (Doumbia et al., 2012; Ouafu 2017; Djossou et al., 2018; Adon et al., 2020; Gnamien et al., 2020). Figure 2 summarizes these results. Note that there is a very large spatial variability among gaseous and particulate concentrations across African cities (Bahino et al., 2018; Gnamien et al., 2020).



**figure 2.** Mean annual PM<sub>2.5</sub> concentrations in different African cities. The blue line represents the recommended WHO standard. DS is for dry season.

Preliminary estimates of daily concentrations of PM<sub>2.5</sub> in populations exposed to traffic, waste burning fires and food smoking were found to be 16 times higher than the WHO standard. We also measured the size speciated chemical composition of the urban aerosol. This step is essential because the chemical composition of the aerosol depends on the emission sources and produces more or less significant health and radiative effects. Figure 3 presents the aerosol chemical composition for fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) measured in different sites during the POLCA, DACCIWA and PASMU programs for West Africa. The concentrations for four main compounds are represented: black carbon, organic carbon, dust and ions (sulphates, nitrates, etc.). The results are presented for the dry season only, when the contribution of dust from the Sahara and aerosols of savannah fires is the highest in the cities of West Africa due to harmattan winds. In general, organic carbon, desert dust and black carbon are the main contributors. It may be highlighted that the relative importance of each of these compounds depends on (1) the relative importance of local combustion sources and regional sources (aerosols from savannah fires and desert dust), (2) the interannual variabilities of regional sources and

(3) the more or less incomplete nature of local combustion sources (e.g. traffic versus wood burning). It is interesting to compare these results with those obtained during the dry season in Zamdela township in Sasolburg in South Africa. A predominance of ions and dust in the aerosol is found, which can be linked to the influence of the source «industry and thermal power» in this region of Africa.



**Figure 3.** Aerosol chemical composition in different African cities (BC = Black Carbon, OM = Organic matter).

### 3. Health effects due to air pollution

#### 3.1. Aerosol inflammatory impact (in vitro and oxidative potential measurements)

The inflammatory capacity of the aerosol was studied in Bamako and Dakar in POLCA program, and at the DACCIWA sites in Abidjan and Cotonou. To do this, aerosols collected from the different measurement sites mentioned above were put in contact with human cells in the laboratory and the pro-inflammatory reactions related to the presence of particles were measured using different markers (e.g. GM-CSF, IL6, IL8). The most important reactions were generally obtained for ultra-fine and fine particles and for traffic and food smoking sites. It was shown that the pro-inflammatory impact of aerosols was rather correlated with carbonaceous aerosol (Val et al. 2013; Tran et al., in prep.). More recently, as part of the PASMU project, this protocol has been simplified by measuring the oxidizing potential of the aerosol directly on the samples, a parameter that allows us to simulate the inflammatory capacity of the aerosol. The carbonaceous aerosol showed the strongest correlations with the oxidizing potential of the aerosol (Gnamien, 2022).

### 3.2. Aerosol and premature deaths

Using the regional model (RegCM) and the emission inventories described above and following Anenberg et al., (2011), maps of the spatial distributions of fine particles were obtained at the scale of the African continent and excess mortality (all causes combined) due to fine particles was calculated for the month of January 2015 (period when particulate matter concentration is the highest in West Africa). Figure 4 shows the number of premature deaths in different African countries (N'Datchoh et al., in prep). The relative importance of Nigeria, Egypt and South Africa may be noted. On a continental scale, fine particulate pollution could be responsible for 1 million deaths.

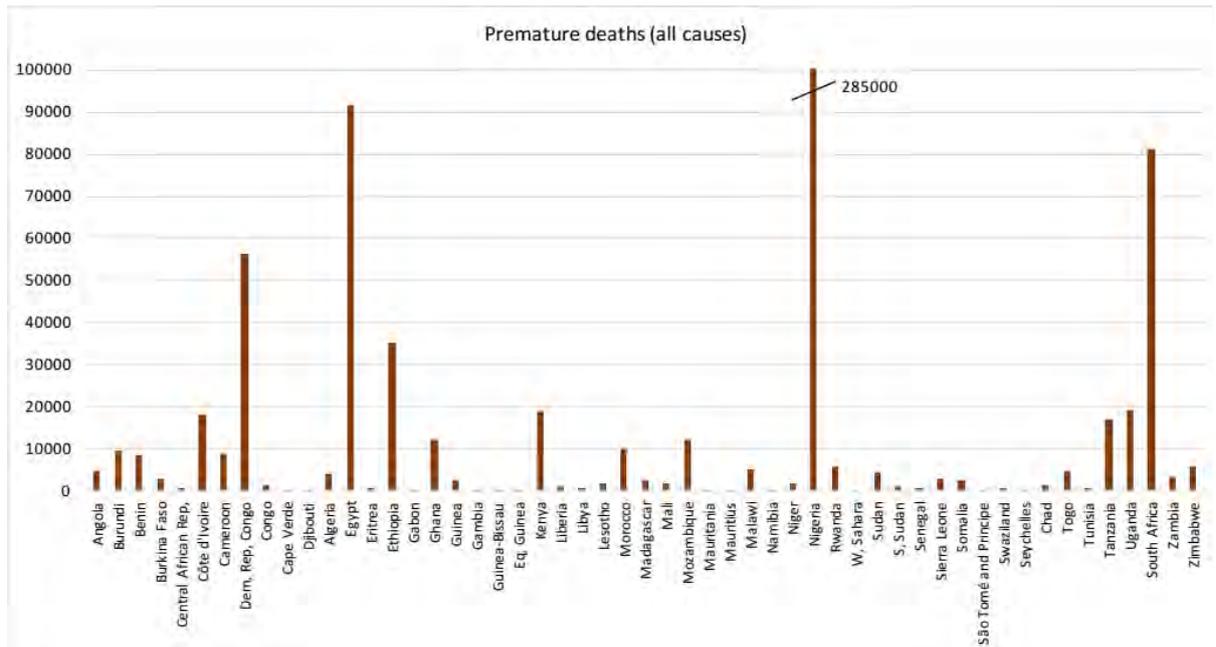


figure 4. Simulated premature deaths due to fine particles for African countries in January 2015.

Similar studies were also conducted for the year 2030 from two emission scenarios with or without anthropogenic emission reductions. Our calculations show that implementing mitigation measures would reduce the number of premature deaths by a factor of 3.

### Conclusion

In West Africa, urban pollution is increasing fast, and could become rapidly worse if no mitigation is implemented. Using the measurements of emission factors of the super emitters, we have determined solutions to reduce air pollution and health problems in African cities. But, as shown in Becerra et al. (2020), air pollution is one of the hazards faced by people on a daily basis, linked to poverty and/or the social hierarchy. Health risks in the long term are often not a priority, in favor of short-term risks. In order to take into account such issues, we have developed a new interdisciplinary program with a participatory approach including scientists, the civil society and local and national policy makers. This 3-year project is called APIMAMA (Air Pollution Mitigation Actions for Megacities in Africa) and will focus on the city of Abidjan as a real-world laboratory study.

### References

Adon A.J., Liousse C., Doumbia T., Baeza-Squiban A., Cachier H., Léon J.F., Yoboué V., Akpo A.B., Galy-Lacaux C., Guinot B., Zouiten C., Xu H., Gardrat E., and Keita S., 2020. Physico-chemical characterization of urban aerosols from specific combustion sources in West Africa at Abidjan in Côte d'Ivoire and Cotonou in Benin in the frame of the DACCWA program, *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 5327–5354, <https://doi.org/10.5194/acp-20-5327-2020>.

- Adon J., 2019. Impact sur la santé de l'aérosol de combustion pour différentes sources urbaines en Afrique de l'Ouest : caractérisation physico-chimique et toxicologique, Doctoral thesis, Toulouse University, France.
- Anenberg S. C., Talgo K., Arunachalam S., Dolwick P., Jang C., and West J. J., 2011. Impacts of global, regional, and sectoral black carbon emission reductions on surface air quality and human mortality, *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 7253–7267, <https://doi.org/10.5194/acp-11-7253-2011>.
- Bahino J., Yoboué V., Galy-Lacaux C., Adon M., Akpo A., Keita S., Liousse C., Gardrat E., Chiron C., Osohou M., Gnamien S., and Djossou J., 2018. A pilot study of gaseous pollutants' measurement (NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, HNO<sub>3</sub> and O<sub>3</sub>) in Abidjan, Côte d'Ivoire: contribution to an overview of gaseous pollution in African cities, *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 5173–5198, <https://doi.org/10.5194/acp-18-5173-2018>.
- Becerra S., Belland M., Bonnassieux A., and Liousse C., 2020. Living with" air pollution in Abidjan (Cote d'Ivoire): a study of risk culture and silent suffering, *Health, Risk & Society*. doi: 10.1080/13698575.2020.1721443.
- Djossou J., Léon J.F., Akpo A. B., Liousse C., Yoboué V., Bedou M., Bodjrenou M., Chiron C., Galy-Lacaux C., Gardrat E., Abbey M., Keita S., Bahino J., Touré N'Datchoh E., Osohou M., and Awanou C. N., 2018. Mass concentration, optical depth and carbon composition of particulate matter in the major southern West African cities of Cotonou (Benin) and Abidjan (Côte d'Ivoire), *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 6275–6291, <https://doi.org/10.5194/acp-18-6275-2018>.
- Doumbia T., Liousse C., Galy-Lacaux C., Seydi Ndiaye A., Diop B., Ouafou M., Assamoi E., Gardrat E., Castera P., Rosset R., Akpo A., and Sigha L., 2012. Real time black carbon measurements in West and Central Africa urban sites, *Atmos. Env.*, **54**, 529-537, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.02.005>.
- Doumbia T., 2012. Caractérisation physico-chimique de la pollution atmosphérique en Afrique de l'Ouest et étude d'impact sur la santé, Doctoral thesis, Toulouse University, France.
- Doumbia T., Liousse C., Keita S., Granier L., Granier C., Elvidge C.D., and Law K., 2018. Flaring emissions in Africa: distribution, evolution and comparison with current inventories, *Atmos. Env.*, **199**, 423-434, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.006>.
- Gnamien S., Yoboué V., Liousse C., Osohou M., Keita S., Bahino J., Siélé S. and Diaby L., 2020. Particulate Pollution in Korhogo and Abidjan (Cote d'Ivoire) during the Dry Season, *Aerosol Air Qual. Res.*, <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.05.0201>.
- Gnamien S., 2022. *Caractérisation de la pollution particulaire à Abidjan et Korhogo en lien avec la santé des populations*, Doctoral thesis, UFHB, Cote d'Ivoire.
- Keita S., Liousse C., Yoboué V., Dominutti P., Guinot B., Assamoi E.-M., Borbon A., Haslett S. L., Bouvier L., Colomb A., Coe H., Akpo A., Adon J., Bahino J., Doumbia M., Djossou J., Galy-Lacaux C., Gardrat E., Gnamien S., Léon J. F., Osohou M., N'Datchoh E. T., and Roblou L., 2018. Particle and VOC emission factor measurements for anthropogenic sources in West Africa, *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 7691–7708, <https://doi.org/10.5194/acp-18-7691-2018>.
- Keita S., Liousse C., Assamoi E.M., Doumbia T., N'Datchoh Touré E., Gnamien S., Elguindi N., Granier C., and Yoboué V., 2021. African Anthropogenic Emissions Inventory for gases and particles from 1990 to 2015, *Earth Syst. Sci. Data*, **13**, 3691–3705, 202, <https://doi.org/10.5194/essd-13-3691-2021>.
- Liousse C., Assamoi E., Criqui P., Granier C. and Rosset R., 2014. African combustion emission explosive growth from 2005 to 2030, *Environ. Res. Lett.* 9 035003 doi:10.1088/1748-9326/9/3/035003.
- Ouafou M., 2017. *Aérosols en zone rurale et urbaine*, Doctoral thesis, Yaoundé University, Cameroon.
- Segakweng K., 2022. *Size-revolved chemical characterisation of aerosols on low-income settlements in South Africa and their health-related effects*, Doctoral thesis, North-West University, South Africa.
- Val S., Liousse C., Doumbia T., Galy-Lacaux C., Cachier H., Marchand N., Badel A., Gardrat E., Sylvestre A. and Baeza-Squiban A., 2013. Physico-chemical characterization of African urban aerosols (Bamako in Mali and Dakar in Senegal) and their toxic effects in human bronchial epithelial cells: description of a worrying situation, *Particle and Fibre Toxicology*, **10** : 10, doi: 10.1186/1743-8977-10-10.

## **Acronyms:**

AMMA: African Monsoon Multidisciplinary Analyses (2002-2009)

APIMAMA: Air Pollution Mitigation Actions for Megacities in Africa (2022-2025)

DACCIWA: Dynamics-aerosol-chemistry-cloud interactions in West Africa (2014-2018)

DECAFE : Dynamique Et Chimie de l'Atmosphère en Forêt Equatoriale (1990-1994)

[ECCAD: Emissions of atmospheric Compounds and Compilation of Ancillary Data](#)

GEIA: Global Emission Initiatives (existing from 1990)

IRP-ARSAIO: International Research Project-Atmospheric Research in Southern Africa and Indian Ocean (2019-2023)

PASMU Côte d'Ivoire : Pollution de l'Air et Santé dans les Milieux Urbains (2018-2022)

POLCA : Pollution des Capitales Africaines (2008-2011)

WHO: World Health Organization

## RECENT WEATHER AND AIR POLLUTION CHANGES IN BRAZIL

Francisco Jablinski CASTELHANO<sup>1</sup>, Ana Clara Neme PEDROSO<sup>2</sup>, Igor Cabelo FERREIRA<sup>3</sup>, Weeberb J. REQUIA<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brazil, francisco.castelhano@ufrn.br

<sup>2</sup> Fundação Getúlio Vargas, Brasília, Brazil, acneme507@gmail.com

<sup>3</sup> Fundação Getúlio Vargas, Brasília, Brazil, cobelo.igor@gmail.com

<sup>4</sup> Fundação Getúlio Vargas, Brasília, Brazil, weeberb.requia@fgv.br

**Abstract :** Weather changes play an essential role in air quality levels due to the sensitivity of the air pollutants to weather conditions. In this study, we estimate the changes in ambient air pollution (CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, and PM<sub>2.5</sub>) and weather variables (Temperature, Precipitation, Relative humidity, and Wind Speed) in Brazil between 2003 and 2018. We obtained air pollution concentrations on a 6-hour scale from the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAM5)-Reanalysis and the meteorological data from the ERA-Interim model. Overall, ambient air pollution levels during the study period have decreased in most of the Brazilian states whereas meteorological variables indicate increases in temperature, relative humidity, and wind speed.

**Keywords:** Climate Change; Air pollution; Southern hemisphere; Brazil

**Résumé :** Le changement climatique et les conditions météorologiques jouent un rôle essentiel sur la qualité de l'air. Dans cette étude, nous avons estimé les variations de la pollution de l'air (CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> et PM<sub>2.5</sub>) et des paramètres météorologiques (température, précipitations, humidité relative et vitesse du vent) au Brésil entre 2003 et 2018. Les concentrations des polluants proviennent de la base de données CAM5 (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) et les données météorologiques, du modèle ERA-Interim. Au cours de la période d'étude, la pollution de l'air a diminué dans la plupart des États brésiliens, tandis que des augmentations de température, d'humidité relative et de vitesse du vent sont observées.

**Mots-clés :** Changement climatique; Pollution de l'air; Hémisphère sud; Brésil

### Introduction

Air pollution is considered one of the major environmental risks to health. Recent reports from the World Health Organization revealed that 92% of the world population are constantly exposed to PM<sub>2.5</sub> levels considered above the WHO standards (WHO, 2016).

Those reports also revealed that 87% of the deaths attributable to air pollution occurred in low or middle-income countries. (WHO, 2016). This value can be considered a consequence of the rapid urbanization and industrialization in developing countries, together with the lack of urban and environmental planning. (Manucci and Franchini, 2017).

Several studies also highlighted that weather changes play an important role in air quality levels due to the sensitivity of some pollutants such as nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>), sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>) among others, to weather dynamics. (Fernandes et al. 2021, Borge et al., 2019; Requia et al, 2020, Fang et al., 2013).

The literature also suggests an association between ozone (O<sub>3</sub>), sunlight, and temperature. The pollutant genesis results from photochemical reactions between nitrogen oxides (NO<sub>x</sub>) and organic compounds. However, low humidity, low nebulosity, lightning flashes, high temperature, and low wind speed are also related to meteorological factors related to O<sub>3</sub> formation (Lu et al., 2019).

That information, together with the WHO reports, reassures the importance of research on the air pollution and climate change fields, specifically in developing countries where the non-existence of an extensive air quality monitoring network creates a lack of data, resulting in few studies regarding low-income regions such as Africa and South America. (Mannucci and Franchini, 2017).

Our research focused its analysis on this gap, quantifying the average changes in weather factors (temperature, precipitation, relative humidity, and wind speed) and on ambient air pollutants (PM<sub>2.5</sub>, carbon monoxide (CO), NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, and SO<sub>2</sub>) for every state of Brazil.

We performed a trend analysis based on a 16-year daily remote sensing dataset of both pollutants and weather factors stratified by state (Figure 1), to understand the relationship between air pollution and atmospheric variables in Brazil, a country with a high climatic complexity due to its size and biodiversity, expecting to help the improvement of public policies on the air quality and climate change fields.



figure 1. States of Brazil

## 1.Data and Methods

We obtained air pollution concentrations of these pollutants from the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS)-Reanalysis (from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts – ECMWF) for the period 2003-2018. The data was retrieved at a spatial resolution of 0.125 degrees (approximately 12.5 km), covering Brazil, and a temporal resolution of 6 hours, including daily estimates for 00, 06, 12, and 18 UTC - Universal Time Coordinated. We calculated the daily mean concentration for each pollutant. The validation for the CAMS global model is reported by Inness et al. (2019). We removed the values above the 95th percentile to eliminate the effects of outliers and aggregated the datasets into a daily scale.

The meteorological data were collected from the ERA-Interim model consisting of a global atmospheric reanalysis performed by the ECMWF. The meteorological dataset was also retrieved at a temporal resolution of 6 hours and a spatial resolution of 12.5 km. As for the air pollution data, we calculated the daily means over the entire period of interest for each weather variable, then aggregated the data by the Brazilian state. We removed the weather values above the 95th percentile and aggregated both datasets into a daily scale to remove the effects from outliers.

We used generalized additive models (GAM) to estimate the long-term trends in temperature, humidity, precipitation, and wind speed for the study period (2003-2018). The GAM model was applied using the `mgcv` package for RStudio (Wood, 2017).

## 2.Results

Figure 2 highlights the results concerning the average change for every variable (pollutants and meteorological) for the 16-year study period (2003-2018) in the Brazilian states.

Regarding weather parameters, it is possible to notice that the majority of the Brazilian states had registered average increases in temperature during the study period. Only the states of Paraíba, in northeast Brazil, Mato Grosso do Sul at Midwest region, and Rondônia, at North region, have registered decreases on this variable. Paraíba registered an average decrease of 0.52 ° celsius in the 16-year period.

The state of Rio de Janeiro and Minas Gerais, both in the Southeast region of Brazil, on the other hand, registered the highest average increases of temperature, reaching 0.87 and 0.84 °C of increases respectively.

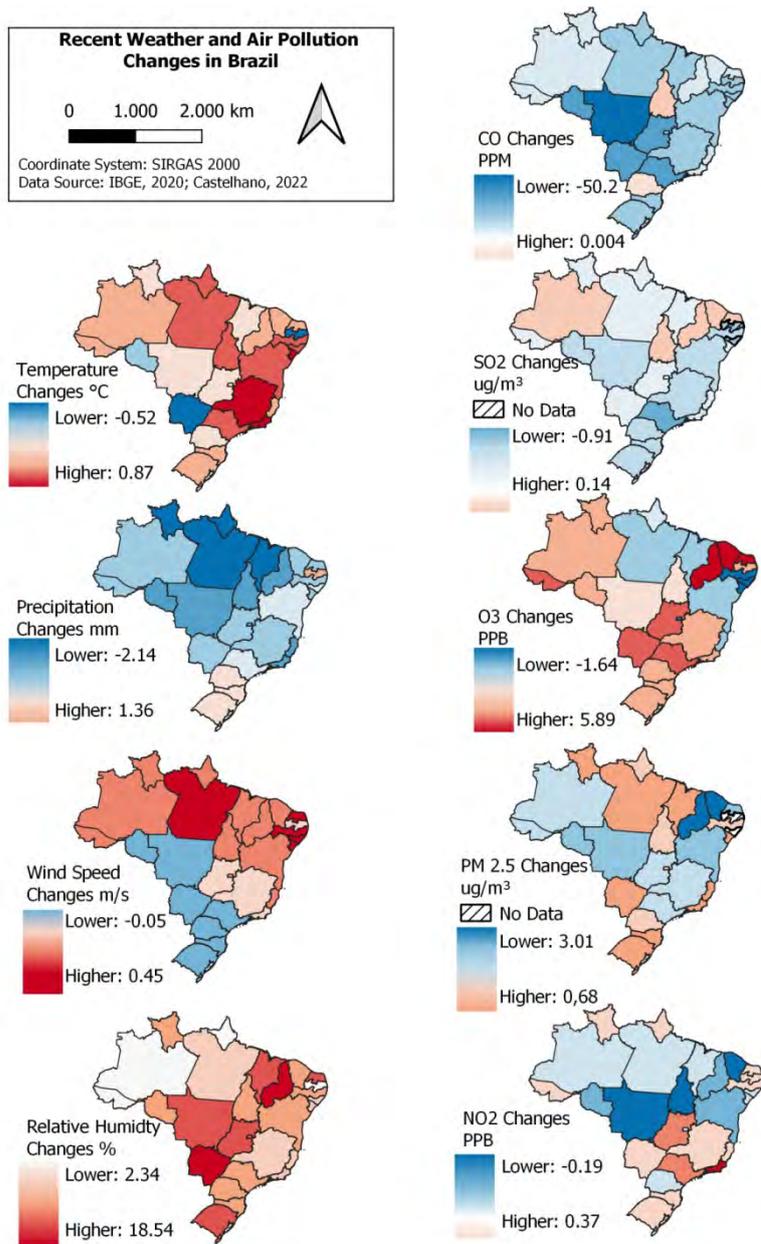
Twenty-four of twenty-seven states have registered decreases in precipitation during the study period. The highest decreases were both registered at Northern states, Roraima, with a decrease of 2.14 mm, and Amapá with 2.1 mm. The states where an increase in precipitation was registered are located in the Southern region of Brazil, except for Paraíba.

The northern states of Amazonas and Acre registered the lowest increase of relative humidity with an average amount of 2.34 % and 2.54% respectively. Meanwhile, Mato Grosso do Sul in the Midwest region, and Piauí, in the Northeast, registered the highest increases of relative humidity, with 18.52% and 18.14%.

The majority of the states also registered an increase in wind speed, highlighting Rio Grande do Norte and Pernambuco with increases of 0.44 and 0.42 m/s during the study period.

The results from the weather trends agree with the literature. Recent studies have shown a significant reduction in precipitation over the Northeastern states followed by an increase in temperature (Costa, 2020; Dubreuil et al, 2019; Marengo et al., 2017). Our findings showed a similar pattern for the North, Midwest, and Southeast states. The Northern states had the most substantial negative oscillation of precipitation. In this region, the Amazon biome predominates with the highest precipitation levels in the country (Da Silva et al, 2019).

Our findings are also in agreement with the recently published Sixth Assessment Report from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021). For the Southern states of Brazil, according to the IPCC, there is high confidence of increase, in mean and extreme temperatures as well as in annual precipitations and extreme precipitations. The report also shows decreases in annual precipitation for the other Brazilian regions, except for the South America Monsoon region, which includes the Midwest Brazil. However, there is low confidence for increases in precipitation intensity and high confidence for evidence concerning temperature increases for the entire country.



**figure 2.** Recent Weather and Air Pollution Changes in Brazil

Concerning air pollutants, both CO and SO<sub>2</sub> have registered decreases in the majority of the states during the study period. CO registered an increase only at Paraná, in the South region (0.002 ppb) and the Tocantins in the North region (0.004 ppb). SO<sub>2</sub> registered increases only in five states, three of them in the Northeast region (Rio Grande do Norte, Ceará and Piauí), and the others in the North region (Amazonas and Tocantins).

PM 2.5 registered increases in fourteen states, with the peak at Roraima (northern region, 0.68 µg/m<sup>3</sup>) and Rio Grande do Sul (south region, 0.55 µg/m<sup>3</sup>). All states with decreases in precipitation registered increases on PM2.5.

The reduction of ambient air pollutants concentration was expected, specifically for CO, PM2.5, and SO<sub>2</sub>. Indeed, the Brazilian government has been implementing a continuous program to reduce traffic emissions since 1986. The Brazilian Motor Vehicle Air Pollution Control Program (PROCONVE) aims to reduce atmospheric contamination by setting emission standards at the country level, thereby inducing technological improvements in industrial processes and monitoring new vehicles and engines to reach

the emission limits standardized. This program is based in the U.S. Program Low Emission Vehicle (LEV) from the California Air Resources Board (CARB) (Ribeiro et al., 2021; Saldiva, 2018).

In the Amazon states, however, we highlight the increase in PM<sub>2.5</sub> in the eastern states (Pará, Amapá, Roraima, and the Tocantins). That may be related to the high amount of wildfires and biomass burning in these regions. The increases in the deforestation process on the borders of the Amazon forest, due to agricultural uses, are more intense in those states, and brings together the increases in fires which can be related to an increase in PM<sub>2.5</sub>, even with increases in wind speed and temperature, meteorological factors that should help on the dispersion of this pollutant (Schmidt and Eloy, 2020; Rocha and Nascimento, 2021).

NO<sub>2</sub> registered a similar pattern, with increases in fourteen states and decreases in thirteen. The majority of northern and northeastern states registered decreases with a peak of -0.19 ppb of average decrease on Tocantins (Northern region). On the other hand, South, Midwest, and Southeast states registered increases on this pollutant, with a peak of an average increase of 0.37 at Rio de Janeiro state (Southeast region).

The pollutant with the most registers of increases along the Brazilian states is the tropospheric ozone. Eighteen states registered increases in this pollutant, highlighting the northeast region with Rio Grande do Norte and Ceara reaching the highest values (5.89 ppb and 4.43 ppb respectively). The ozone results can be associated with an increase in temperature and decrease in precipitations faced by most of the Brazilian states since ground-level O<sub>3</sub> is formed through photochemical reactions in the atmosphere, involving NO<sub>x</sub> and VOCs in the presence of sunlight.

## Conclusion

Our study revealed that most of the ambient air pollution levels in Brazil during the period 2003-2018 have been decreasing in most of its states for CO and SO<sub>2</sub>. Tropospheric ozone is been increasing in the majority of the states whereas PM<sub>2.5</sub> and NO<sub>2</sub> for half of the states. Regionally, we identified that the southern states of Brazil (Paraná, Santa Catarina, and Rio Grande do Sul) are where most pollutants (O<sub>3</sub>, PM<sub>2.5</sub> and NO<sub>2</sub>) are increased. At the same period, we also identified significant trends in meteorological factors. There has been an increase in temperature, relative humidity, and wind speed in every Brazilian region. Concerning temperature, the Southeast region registered the most intense increases, while the midwest registered increases in relative humidity and the Northeast region at wind speed levels.

The regional analysis purposed of this study highlights the need to develop specific regional policies not only to control and monitor the pollutants, but also to mitigate climate change based not only on their natural climate conditions, but also on their social, economical, and cultural characteristics. Analysing state by state, we can emphasize that the climate is not the only driver of the air quality issue. The success of public policies such as the PROCONVE, mentioned above, reinforces the social and political role on this subject, but it is suggested to be an isolated policy that contributed only to a few states. The investment in more local policies to control deforestation and biomass burning could not just decrease the air pollutants emissions but also, contribute to the reduction of climatic changes seen in Brazil.

## Bibliography

- Borge R., Requena W. J., Yagüe C., Jhun I. and Koutrakis P., 2019, Impact of weather changes on air quality and related mortality in Spain over a 25 year period [1993–2017], *Environment International*, **133**, 105272
- Costa R. L., Baptista G.M.M., Gomes H.B., Silva F.B.S., Rocha Júnior R.L., Salvador M.A., Herdies D.L., 2020, Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014, *Weather and Climate Extremes*, **28**.
- Dubreuil V., Fante K. P., Planchon O. and Sant'Anna Neto J. L., 2019, Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency, *International Journal of Climatology*, **39**, 1446–1456.

- Fang Y., Naik V., Horowitz L. W. and Mauzerall D. L., 2013, Air pollution and associated human mortality: The role of air pollutant emissions, climate change and methane concentration increases from the preindustrial period to present, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **13**, 1377–1394.
- Fernandes T., Hacon S. D. S. and Novais J. W. Z., 2021, Mudanças Climáticas, Poluição Do Ar E Repercussões Na Saúde Humana: Revisão Sistemática, *Revista Brasileira de Climatologia*, **28**.
- Inness A., Ades M., Agusti-Panareda A., Barré J., Benedictow A., Blechschmidt A.-M., Dominguez J.J., Engelen R., Eskes, H., Flemming J., Huijnen V., Jones L., Kipling Z., Massart S., Parrington M., Peuch V.-H., Razinger M., Remy S., Schulz M. and Suttie M., 2019, The CAMS reanalysis of atmospheric composition, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**, 3515–3556.
- IPCC. 2021, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Lu X., Zhang L., Chen Y., Zhou M., Zheng B., Li K., Liu Y., Lin J., Fu T.-M. and Zhang Q., 2019, Exploring 2016–2017 surface ozone pollution over China: source contributions and meteorological influences. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**, 8339–8361.
- Mannucci, P.M and Franchini, M., 2017, IHealth Effects of Ambient Air Pollution in Developing Countries. *Environmental Research and Public Health*, **14 (9)**, 1048.
- Marengo J. A., Torres R. R. and Alves L. M., 2017, Drought in Northeast Brazil—past, present, and future, *Theoretical and Applied Climatology*, **129**, 1189–1200.
- Requia W. J., Coull B. A. and Koutrakis P., 2020, Where air quality has been impacted by weather changes in the United States over the last 30 years? *Atmospheric Environment*, **224**.
- Ribeiro I.O., Andreoli R. V., Kayano M.T., Sousa T.R., Medeiros A.S., Godoi R.H.M., Godoi A.F.L., Duvoisin S., Martin S.T. and Souza R.A.F., 2018, Biomass burning and carbon monoxide patterns in Brazil during the extreme drought years of 2005, 2010, and 2015, *Environ. Pollut.*, **243**, 1008–1014.
- Rocha M.I.S. and Nascimento D.T.F., 2021, Distribuição espaço-temporal das queimadas no bioma Cerrado (1999/2018) e sua ocorrência conforme os diferentes tipos de cobertura e uso do solo, *Revista Brasileira de Geografia Física*, **14 (3)**, 1220-1235.
- Saldiva P., 2018, *Vida Urbana e Saúde: os desafios dos habitantes das metrópoles*. Editora Contexto.
- Schmidt I.B. and Eloy L., 2020, Fire regime in the Brazilian Savanna: Recent changes, policy and management, *Flora*, **268**.
- Da Silva P. E., Santos e Silva C. M., Spyrides M. H. C. and Andrade L. de M. B., 2019, Precipitation and air temperature extremes in the Amazon and northeast Brazil, *International Journal of Climatology*, **39**, 579–595.
- WHO, 2016, *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*, Available at: <https://www.who.int/phe/publications/air-pollution-global-assessment/en/>.
- Wood S. N., 2017, *Generalized Additive Models: An Introduction with R*, Chapman and Hall, 496 pages.

## INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE COMPORTEMENT DU BÂTIMENT DANS SON ENVIRONNEMENT URBAIN : QUEL FICHER MÉTÉO FUTUR UTILISER ?

**Sihem GUERNOUTI<sup>1</sup>, Auline RODLER<sup>2</sup>, Jeremy BERNARD<sup>3</sup>, Marjorie MUSY<sup>4</sup>, Benjamin MORILLE<sup>5</sup>, Adrien GROS<sup>6</sup>.**

<sup>1</sup> Cerema Ouest, Equipe BPE et Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, 9 rue René Viviani, 44262 Nantes, [sihem.guernouti@cerema.fr](mailto:sihem.guernouti@cerema.fr)

<sup>2</sup> Cerema Ouest, Equipe BPE et Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, 9 rue René Viviani, 44262 Nantes, [auline.rodler@cerema.fr](mailto:auline.rodler@cerema.fr)

<sup>3</sup> Université de Göteborg et chercheur associé au Lab-STICC, Guldhedsgatan 5a - 41320 Göteborg, [jeremy.bernard@gu.se](mailto:jeremy.bernard@gu.se)

<sup>4</sup> Cerema Ouest, Equipe BPE et Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, 9 rue René Viviani, 44262 Nantes, [marjorie.musy@cerema.fr](mailto:marjorie.musy@cerema.fr)

<sup>5</sup> Soleneos, [benjamin.morille@soleneos.fr](mailto:benjamin.morille@soleneos.fr)

<sup>6</sup> Soleneos, [adrien.gros@soleneos.fr](mailto:adrien.gros@soleneos.fr)

**Résumé :** Deux outils, CCWorldWeatherGen et Meteonorm sont aujourd'hui disponibles pour générer des données horaires météorologiques futures qui peuvent être utilisées en entrée des outils de simulation de la performance énergétique des bâtiments. Ces générateurs ont été développés à partir de méthodes différentes qui peuvent conduire à des résultats différents. Dans ce papier, nous proposons d'utiliser ces outils pour générer des données futures et comparer les fichiers météorologiques obtenus à l'aide d'indicateurs statistiques pour mieux comprendre leurs différences. Ces fichiers sont ensuite utilisés pour réaliser des simulations thermiques dynamiques de bâtiments afin d'évaluer leur impact sur la prédiction des besoins énergétiques et du confort thermique.

**Mots-Clés :** Changement climatique, fichiers météorologiques, canicule, simulation

**Abstract:** Two tools, CCWorldWeatherGen and Meteonorm are currently available to generate hourly future weather data that can be used as input to building energy performance simulation tools. These generators have been developed using different methods which may lead to different results. In this paper, we propose to use these tools to generate future data and compare the obtained meteorological files using statistical indicators to better understand their differences. These files are then used to perform dynamic thermal simulations of buildings in order to evaluate their impact on the prediction of energy needs and thermal comfort.

**Keywords:** Climate change, weather files, heat wave, simulation

### Introduction

Les dynamiques des profils de consommation des bâtiments vont évoluer avec le changement climatique avec des consommations hivernales très faibles et des appels de puissance de climatisation plus importants en été et en période de canicule. La vulnérabilité d'un bâtiment au changement climatique dépendra de sa typologie constructive mais également de l'environnement urbain dans lequel il est situé qui engendre des modifications microclimatiques locales. Il est donc nécessaire de comprendre l'influence de la typologie et de l'environnement urbain d'un bâtiment sur son comportement face au changement climatique afin de proposer des solutions d'adaptation et de résilience. La simulation thermique dynamique (STD) est un outil qui permet de simuler et d'analyser le comportement thermique des bâtiments sous différentes conditions climatiques. Pour cela, un fichier météorologique à une résolution horaire au minimum est indispensable pour mener les calculs. Ce fichier doit comprendre au moins ces cinq variables physiques : température sèche de l'air, rayonnement global horizontal, humidité relative de l'air, vitesse du vent, direction du vent. Généralement, 20 à 30 années d'observation de ces variables météorologiques sont « moyennées » pour générer un fichier

météorologique constitué d'une seule année, défini comme typique du climat du site étudié (Herrera et al., 2017). Afin de prévoir le climat futur, les climatologues utilisent des modèles climatiques globaux (MCG) et des modèles climatiques régionaux (MCR). Un MCR est généralement imbriqué dans un MCG, qui lui fournit une condition initiale et des conditions limites dépendantes du temps (Rummukainen, 2010). Cependant, la résolution spatiale et temporelle actuelle des MCR est trop grossière pour les STD. Nous pouvons trouver dans la littérature diverses méthodes pour augmenter la résolution spatiale et temporelle afin de créer des fichiers météorologiques futurs appropriés à la STD à l'échelle d'un bâtiment (Herrera et al., 2017; Nielsen and Kolarik, 2021). Ces méthodes sont communément appelées descente d'échelle. Il existe deux approches principales : la descente d'échelle dynamique basée sur une simulation des processus physiques et la descente d'échelle statistique. Les méthodes de descente d'échelle les plus utilisées sont le *morphing* ou l'outil Climate Change World Weather Generator, tous deux classés comme des méthodes de descente d'échelle statistique (Nielsen and Kolarik, 2021). Cependant, les fichiers météorologiques obtenus à partir de ces nombreuses méthodes peuvent avoir des différences importantes pour certaines variables.

L'objectif de ce travail est d'identifier le fichier météo qui semble le plus approprié pour analyser l'impact du changement climatique sur le comportement thermique des bâtiments. Ce travail est réalisé dans le contexte du projet CoolParks, dont le cas d'étude est la ville de Nantes (France) présentant un climat tempéré océanique. Nous avons sélectionné deux outils largement utilisés par la communauté scientifique, notamment pour leur facilité de générer des fichiers météo typiques (TMY<sup>2</sup> ou EPW<sup>3</sup>) : CCWorldWeatherGen (CCWWG) et Meteonorm (Nielsen and Kolarik, 2021). CCWWG permet de générer des fichiers météo sur le changement climatique prêts à être utilisés dans des programmes de STD. Il repose sur les données générées par le modèle HADCM3 avec le scénario A2 (CCWWG, 2013), il est basé sur la méthode de *morphing* (Belcher et al., 2005). Meteonorm permet de générer des données horaires futures à partir d'un modèle stochastique.

## 1. Méthodologie

### Comparaison des fichiers météo

Afin de comparer les performances de CCWWG et de Meteonorm, nous avons calculé l'écart des données climatiques obtenues avec ces outils et celles issues d'observations réelles. Nous avons ainsi utilisé les données de l'ECA&D<sup>4</sup>. Plusieurs variables météorologiques sont accessibles pour plus de 18000 stations européennes et méditerranéennes qui comprennent les températures maximales et minimales journalières, les précipitations journalières, etc. Nous avons ainsi considéré la période entre 1990 et 2019 comme période de référence pour la ville de Nantes conformément aux recommandations de l'Organisation Météorologique Mondiale, qui propose d'utiliser 30 années de données pour caractériser le climat d'une période donnée. Les données observées sont les températures maximales et minimales journalières ainsi que le rayonnement global horizontal journalier. Les périodes de référence et de projection utilisées pour l'étude comparative sont présentées dans le Tableau 1. Le scénario de changement climatique A2 (RCP8.5) est utilisé, étant donné que c'est le seul qui soit disponible avec CCWG.

**Tableau 1:** Récapitulatif des données d'analyse : les données du climat actuel sont utilisées pour la validation et celle du climat futur, pour la comparaison

Outils	Climat actuel- 2020	Climat futur- 2050	Résolution temporelle
Observation	1990-2019		Jour
CCWG	2010-2039	2040-2069	heure
Meteonorm	2015-2025	2045-2055	heure

<sup>2</sup> Typical Meteorological Year version 2

<sup>3</sup> Enregyplus Weather

<sup>4</sup> European Climate Assessment & Dataset : <https://www.ecad.eu/dailydata/predefinedseries.php>

Les trois indicateurs climatiques utilisés pour l'étude comparative sont :

1-Les températures extrêmes : En ce qui concerne l'observation, les extremums sont directement disponibles pour la ville de Nantes avec une fréquence journalière. Pour les données CCWG et Meteonorm (données simulées avec une fréquence horaire), les extremums sont déterminés en choisissant comme température maximale journalière le maximum des températures horaires de la journée et la température minimale journalière le minimum des températures horaires de la journée.

2-Les degrés jours (DJ) de chaud et de froid : Pour un lieu donné, le degré jour est la différence entre la température de l'air extérieure et une température de référence à l'intérieur du bâtiment sur une période donnée qui permet de réaliser des estimations de consommations d'énergie thermique pour maintenir un bâtiment confortable en fonction de la rigueur de l'hiver ou de la chaleur de l'été (Day and Karayiannis, 1998). Le nombre de DJ quotidien est calculé de la façon suivante :

$Moy = (T_x + T_N) / 2$  : Température Moyenne de la journée.

Pour calculer des besoins de chauffage :

- Si  $S_{chaueur} > T_x$  (cas fréquent en hiver) :  $DJ = S_{chaueur} - Moy$
- Si  $S_{chaueur} \leq T_N$  (cas exceptionnel en début ou en fin de saison de chauffe) :  $DJ = 0$
- Si  $T_N < S_{chaueur} \leq T_x$  (cas possible en début ou en fin de saison de chauffe) :

$$DJ = (S_{chaueur} - T_N) \times \left( 0.08 + 0.42 \times \frac{S_{chaueur} - T_N}{T_x - T_N} \right)$$

Pour calculer des besoins de climatisation :

- Si  $S_{froid} > T_x$  :  $DJ = 0$
- Si  $S_{froid} \leq T_N$  :  $DJ = Moy - S_{froid}$
- Si  $T_N < S_{froid} \leq T_x$  :

$$DJ = (T_x - S_{froid}) \times \left( 0.08 + 0.42 \times \frac{T_x - S_{froid}}{T_x - T_N} \right)$$

Avec :  $T_N$  : température minimale du jour J,  $T_x$  : température maximale du jour J, S : seuil de température de référence choisi (pour le chaud et le froid).

Les cumuls de Degrés Jour s'obtiennent de façon simple en additionnant les Degrés Jour quotidiens, obtenus sur la période de cumul souhaitée. Nous avons défini ici, la période de chauffage entre le 1er octobre et le 20 mai et la période de refroidissement entre le 21 mai et le 30 septembre (bornes traditionnellement utilisées en France métropolitaine). Les seuils de la température de référence pour le chaud ( $S_{chaueur}$ ) et pour le froid ( $S_{froid}$ ) sont fixés respectivement à 18°C et 26°C (Bernard, 2017).

3- Le nombre de jour de canicule : En France, les seuils de déclenchement d'une alerte canicule diffèrent pour chaque département (Wagner et al., 2018). Pour la ville de Nantes, l'alerte canicule est déclenchée lorsque pendant au moins deux jours consécutifs la température maximale dépasse 34°C et la température minimale dépasse 20°C.

Les indicateurs produits avec les fichiers météorologiques issus de CCWG et Meteonorm sont comparés avec ceux produits à partir des fichiers d'observation pour la période de climat actuel et entre eux pour la période de climat futur.

### **Application à la simulation thermique des bâtiments**

Les fichiers météo générés par CCWG et Meteonorm sont ensuite utilisés pour simuler le comportement de deux typologies de bâtiments résidentiels à Nantes (figure 1). L'objectif est d'évaluer comment l'utilisation de ces deux fichiers peut impacter la consommation énergétique et le confort thermique dans chaque bâtiment par rapport à une simulation de référence basée sur des données observées. Les données observées décrites précédemment sont des données journalières et ne peuvent donc être utilisées en entrée de la STD. Nous avons donc sélectionné une année supposément représentative du climat nantais de ces 30 dernières années à partir des données observées à la station Météo-France de Bouguenais (station la plus proche de Nantes). Sur la base d'une analyse menée selon les 3 indicateurs précédemment présentés, l'année 2013 a été choisie comme année de référence parmi

5 années de données horaires (2010 à 2015) que nous avons à notre disposition. Les simulations ont été réalisées avec Trnsys17 (Klein et al., n.d.). Les masques solaires ainsi que l'utilisation des occultations n'ont pas été considérés dans les deux cas pour se placer dans la situation estivale la plus défavorable. L'indice de perméabilité à l'air a été défini selon l'année de construction des bâtiments. Il est de 1 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup> et de 3 m<sup>3</sup>/h.m<sup>2</sup> respectivement pour les typologies 2 et 1. Une ventilation mécanique est considérée dans la typologie 2 avec un taux de renouvellement d'air de 0.6 vol/h. L'orientation est la même pour les deux cas d'étude avec la façade vitrée orientée à l'ouest. Les gains thermiques internes considérés selon l'occupation sont donnés dans la figure 1.

Nom	Classe	Période	Bâtiment exemple (vue Ouest)	Bâtiment exemple (Façades arrières)	composants	Coefficient de transmission thermique (W/m <sup>2</sup> .K)	Maison individuelle		Habitat Collectif			
							Heure	Jour Ouvré	Weekend	Jour Ouvré	Weekend	
Typologie 1	1 : Maison individuelle moyenne	Avant 1948			Mur	1,7	0h à 7h	2,53	2,53	3,05	3,05	
						Dalle						3,55
						Toit						1,35
						Fenêtre						4,8
						7h à 9h						9,1
9h à 18h	1,2	7,7	1,2	8,4								
18h à 19h	7,7	7,7	8,4	8,4								
19h à 23h	9,1	9,1	9,8	9,8								
23h à 0h	2,53	2,53	3,05	3,05								
Typologie 2	6 : Petit logement collectif	2012 - 2020			Mur	0,18						
						Dalle	0,21					
						Toit	0,15					
						Fenêtre	1,4					

**figure 1** : Gauche : Informations générales et techniques des deux cas d'étude simulés (TABULA Project Team, 2012) ; Droite : Apports internes (W/m<sup>2</sup>) selon les jours de la semaine et le type d'habitat (Jan, 2018)

## 2. Résultats et discussion

### Comparaison des fichiers météo

La figure 2 présente les écarts de températures des extremums calculés entre les données observées (1990 -2019) et celles issues des deux outils pour la période 2020. Nous pouvons y observer que pour la période hivernale, les températures minimale et maximale moyennes simulées par CCWWG sont globalement supérieures ou égales à celles observées tandis que le contraire est observé pour Meteonorm (températures max et min simulées inférieures ou égales à celles observées). Pour la période estivale, les températures maximale et minimale moyennes simulées par CCWWG sont aussi globalement supérieures à celles observées. Concernant Meteonorm, nous constatons que la température minimale moyenne est supérieure à celle observée alors que la température maximale moyenne est inférieure à celle-ci.

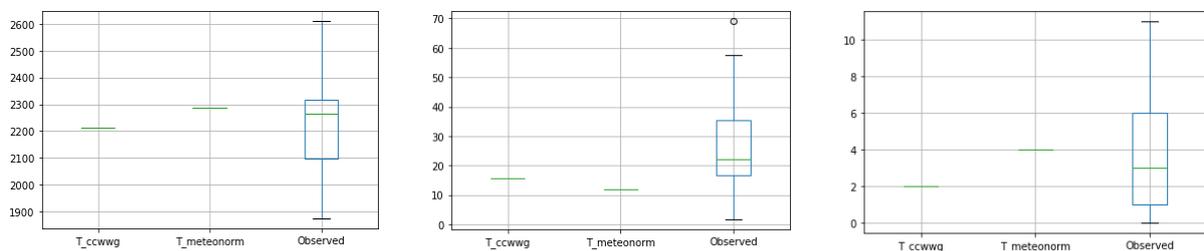
Modèles	Mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
CCWWG	MIN	VERT	VERT	JA									
	MAX	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
Meteonorm	MIN	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA
	MAX	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA	JA

**figure 2** observée (Tobs). – VERT : Test - Tobs > 0.5°C, JA: Ecart de température d'air estimée (Test) par les outils par rapport à celle UNE : 0.5°C >= Test - Tobs > -0.5°C et ROUGE Test - Tobs < 0.5°C

Le calcul des degrés jours de chauffage permet de constater que les hivers projetés avec Meteonorm sont plus rudes que l'observation (figure 3). Ceci est cohérent avec ce nous avons observé précédemment. En effet, nous avons constaté que l'hiver, la température max ou min calculée par Meteonorm est globalement inférieure ou égale à celle observée, c'est-à-dire que l'hiver simulé est beaucoup plus froid que l'hiver observé et par conséquent plus de chauffage est nécessaire. La même cohérence est observée pour CCWWG pour lequel les extremums sont globalement supérieurs ou égaux à l'observation, engendrant des hivers plus cléments qui nécessitent moins de chauffage (figure 3). Les degrés jours de climatisation sont quant à eux, inférieurs aux données observées. Cependant, les Dj simulés par CCWWG sont supérieurs à ceux simulés par Meteonorm (figure 3), ce qui signifie qu'il faut plus de climatisation avec le fichier CCWWG qu'avec celui de Meteonorm. Ceci s'explique par le fait que la température CCWWG est supérieure ou égale à la température observée pour la période estivale alors que l'inverse est constaté pour Meteonorm. Le graphique de droite de la figure 3 permet d'observer que

pour une température max supérieure à 30°C et une température min supérieure à 18°C pendant seulement une journée, le nombre de jours de canicule dans le fichier Metenorm est le double de celui de CCWWG. Cette même observation est constatée lorsque l'on décompte le nombre de jours où ces mêmes conditions météorologiques sont présentes pendant 2 jours consécutifs. L'analyse des variations temporelles des deux fichiers météo a montré plus de pics de températures dans celui de Metenorm que CCWWG. En comparaison avec les données observées, CCWWG sous-estime le nombre de jours de canicule alors que Metenorm les surestime. Il faut noter ici que les limites de canicule ont été modifiées car celles définies pour la ville de Nantes ( $T_{max} > 34^{\circ}\text{C}$  et  $T_{min} > 20^{\circ}\text{C}$ ) n'ont jamais été satisfaites dans les deux fichiers météo.

A partir de l'analyse des 3 indicateurs, nous pouvons dire qu'en moyenne, sur une année, CCWWG est le mieux adapté pour étudier l'effet du changement climatique car il présente des températures moyennes proches de celles observées. Pour les périodes de canicule, Metenorm semble être mieux adapté car malgré une sous-estimation notable de la température maximale moyenne en été, il permet de représenter plus de jours de canicule.



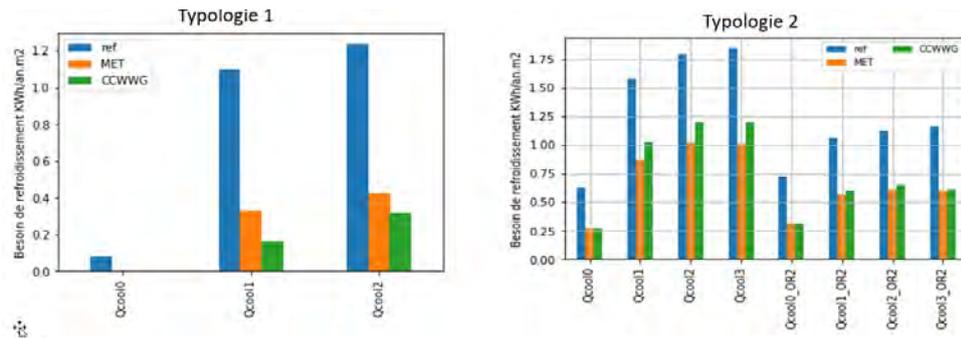
**figure 3:** Degrés Jours ( $^{\circ}\text{C j}$ ) de : gauche : chaud - milieu: froid /droite : Nombre de jours de canicule pour  $T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$  et  $T_{min} > 18^{\circ}\text{C}$  pendant une seule journée

### Application à la simulation thermique des bâtiments

La figure 4 présente les besoins énergétiques annuels pour 2020 pour les deux typologies de bâtiments. Nous observons que ces besoins sont sous-estimés par les deux outils et ce pour les deux typologies. CCWWG estime mieux les besoins pour la typologie 1 qui a plus de besoins de chauffage et Metenorm ceux de la typologie 2 qui est mieux isolée et a des besoins de refroidissement plus important. La figure 5 montre qu'il n'est pas aisé de trancher sur le choix du fichier météo pour les périodes caniculaires bien que nous ayons auparavant vu que Metenorm semblait être plus adapté pour les périodes chaudes. En effet, nous pouvons constater d'une part que les deux outils sous-estiment largement les besoins de refroidissement en comparaison avec la référence. D'autre part, pour les différentes zones thermiques de la typologie 1, Metenorm estime un peu mieux les besoins mais c'est l'inverse qui est observé pour la typologie 2. L'analyse des fichiers météo, nous a montré que la température et le rayonnement du CCWWG étaient plus élevés que ceux de Metenorm. Etant donné que la typologie 2 a un taux de vitrage plus élevé que la typologie 1, les apports solaires sont plus importants avec CCWWG qu'avec Metenorm. Ceci explique probablement les besoins plus importants avec CCWWG pour cette typologie. Le choix dépend ainsi non seulement de la typologie mais aussi des conditions météorologiques de la période de canicule étudiée.



**figure 4:** Analyse globale des besoins énergétiques annuels calculées avec les fichiers de référence (ref), de Metenorm (MET) et CCWorldWeatherGenerator (CCWWG) pour 2020



**figure 5:** Besoins de refroidissement en période de canicule en 2020 (3 jours du 20/07 au 22/07) pour chaque zone thermique des typologies 1 et 2

## Conclusion

Cette étude a permis de montrer que le choix de l'outil de génération du fichier météo du changement climatique dépend de l'objectif visé. En effet, pour étudier les périodes chaudes, Meteonorm semble être le mieux adapté pour les deux typologies de bâtiments étudiées (non isolé et fortement isolé), alors que CCWWG est plus adapté pour l'étude des périodes froides (essentiellement pour la typologie 2). Une des limites de cette étude réside dans le choix de l'année de référence pour les simulations thermiques ; il serait donc intéressant de mener le travail de comparaison avec une année de données horaires représentatives de la réalité et d'utiliser d'autres typologies pour savoir si le choix du générateur dépendra uniquement de la période d'intérêt de l'étude (hiver, été, année) ou s'il est lié aussi à la typologie constructive des bâtiments. Enfin, l'utilisation d'autres scénarios du changement climatique autre que le scénario A2 ainsi que la prise en compte de l'effet de l'îlot de chaleur urbain font partie des perspectives futures de ce travail.

## Remerciements :

Ces travaux de recherche sont menés dans le cadre du projet CoolParks lauréat de l'appel à projets MODEVAL URBA 2019 et co-financé par l'ADEME. Nous tenons à remercier Hafsa KHAYE pour le travail réalisé dans son master (2019-2020).

## Bibliographie

Belcher, S., Hacker, J., Powell, D., 2005. Constructing design weather data for future climates. *Building Services Engineering Research and Technology* **26**, 49–61. <https://doi.org/10.1191/0143624405bt112oa>

Bernard, J., 2017. Signature géographique et météorologique des variations spatiales et temporelles de la température de l'air au sein d'une zone urbaine (phdthesis). École centrale de Nantes.

CCWWG, 2013. Climate Change World Weather File Generator for World-Wide Weather Data - CCWorldWeatherGen [WWW Document]. University of Southampton Blogs. URL <https://energy.soton.ac.uk/climate-change-world-weather-file-generator-for-world-wide-weather-data-ccworldweathergen/>

Day, A.R., Karayiannis, T.G., 1998. Degree-days: Comparison of calculation methods. *Building Services Engineering Research and Technology* **19**, 7–13. <https://doi.org/10.1177/014362449801900102>

Guan, L., 2009. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings. *Building and Environment* **44**, 793–800. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.021>

Herrera, M., Natarajan, S., Coley, D.A., Kershaw, T., Ramallo-González, A.P., Eames, M., Fosas, D., Wood, M., 2017. A review of current and future weather data for building simulation. *Building Services Engineering Research and Technology* **38**, 602–627. <https://doi.org/10.1177/0143624417705937>

Jan, A., 2018. Les bâtiments résidentiels urbains face au changement climatique : étude du comportement thermique et analyse de sensibilité (Master's thesis). Ecole Nationale des travaux publics de l'état, Cerema.

Klein, S.A., Duffie, J.A., Mitchell, J.C., Kummer, J.P., Thornton, J.W., Bradley, D.E., Arias, D.A., Beckman, W.A., Duffie, N.A., Braun, J.E., n.d. Standard Component Library Overview 90.

Nielsen, C.N., Kolarik, J., 2021. Utilization of Climate Files Predicting Future Weather in Dynamic Building Performance Simulation – A review. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2069, 012070. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2069/1/012070>

Rummukainen, M., 2010. State-of-the-art with regional climate models. *WIREs Climate Change* **1**, 82–96. <https://doi.org/10.1002/wcc.8>

TABULA Project Team, 2012. Application of building typologies for modelling the energy balance of the residential building stock. IWU, Darmstadt.

Wagner, V., Ung, A., Calmet, C., Pascal, M., 2018. Évolution des vagues de chaleur et de la mortalité associée en France, 2004-2014 / Evolution of heat waves and associated mortality in France, 2004-2014. *Bulletin Epidemiologique Hebdomadaire* 16–17.

## A GLOBAL ATLAS OF AIR QUALITY, BASED ON THE COPERNICUS ATMOSPHERE MONITORING SERVICE REANALYSIS

Thierno DOUMBIA<sup>1</sup>, Claire GRANIER<sup>1,2</sup>, Sabine DARRAS<sup>3</sup>, Sekou KEITA<sup>1</sup>, Cathy LIOUSSE<sup>1</sup>, Antonin SOULIE<sup>1</sup>, Rajesh KUMAR<sup>4</sup>, Gabriele PFISTER<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire d'Aérodologie, Université de Toulouse, CNRS/UPS, Toulouse, France

<sup>2</sup>NOAA Chemical Sciences Laboratory–CIRES/University of Colorado, Boulder, CO, USA

<sup>3</sup>Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse, France

<sup>4</sup>National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, CO, USA

**Abstract** : An atlas of air quality has been developed, as part of the AQ-WATCH (Air Quality – Worldwide Analysis and Forecasting of Atmospheric Composition for Health) European project. This atlas is primarily based on the reanalysis of the global atmospheric composition performed by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) within the CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) project and the regional chemical reanalysis from the Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model. The atlas includes climatological distributions of the major particulate matter and gases, as well as their temporal variations and long-term trends. This tool can be used to assess the impact of policy decisions on air quality, identify hotspots of air pollution, and compare concentration levels across countries, states, provinces, and cities.

**Keywords**: Atlas, Air quality, Reanalysis

**Résumé** : Un atlas de la qualité de l'air a été développé dans le cadre du projet Européen AQ-WATCH (Air Quality-Worldwide Analysis and Forecasting of Atmospheric Composition for Health). Cet atlas est principalement basé sur la réanalyse de la composition atmosphérique globale effectuée par le Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) dans le cadre du projet CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) et sur la réanalyse régionale du modèle CMAQ (Community Multiscale Air Quality). L'atlas comprend des distributions climatologiques des principales particules et des gaz, ainsi que leurs variations temporelles, les tendances à long terme et les indices de santé associés. Cet outil peut être utilisé pour évaluer l'impact des décisions politiques sur la qualité de l'air, identifier les hotspots de la pollution atmosphérique et comparer les niveaux de concentration entre pays, états, provinces et villes.

**Mots clés** : Atlas, Qualité de l'air, Réanalyse

### Introduction

As part of the AQ-WATCH (<https://www.aq-watch.eu/>) European project, an atlas of global and regional air quality has been developed at the Laboratoire d'Aérodologie in Toulouse. This atlas is primarily based on a reanalysis of global atmospheric composition (PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO and SO<sub>2</sub>) performed by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) as part of the CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) project, as well as a chemical reanalysis developed by the National Center for Atmospheric Research (NCAR) using the coupled Weather Research Forecast and Community Multiscale Air Quality (WRF-CMAQ) model. The atlas also depicts the spatial and temporal distributions of NO<sub>2</sub> tropospheric columns from satellite instruments, as well as air quality indices at the county and state levels in the United States. This paper briefly describes the AQ-WATCH project and its goals, as well as the various types of datasets used in this work and the atlas' numerical and graphical contents.

### **The AQ-WATCH project**

The AQ-WATCH project is funded under the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation program. The goal of the project is to co-develop and co-produce tailored products and services that can be used by governmental institutions (at local, regional and national levels) and private companies in different sectors to help mitigate air pollution, and thus contribute to a better public health and optimized services from the energy sector. The different products developed in the project concern the design and development of global and regional air pollution atlases that include the climatological distributions of chemical pollutants complemented by quantities such as the diurnal and seasonal variations, air quality and related health indices, premature mortality exceedance frequency, long-term trends, etc. AQ-WATCH provides also daily forecasts of air pollution at the regional scale based on different predictive models and satellite and ground-based information: the tools are initially designed for three regions such as Chile, the Contiguous United States and China, but they could be expanded to cover additional geographical areas. Predictions of the degradation of air quality and reduction in visibility caused by the occurrence of wildfires and the development of a related regional alert system are another AQ-WATCH product, as well as the predictions of the degradation of air quality and reduction in visibility caused by dust mobilization and impact on solar energy systems. Model predictions of the potential impact on regional air quality (e.g., ozone levels) due to fracking operations and determination of the exposure of the local population to related emissions of hydrocarbons represent another product of the project. Finally, the development of a demonstration model to allow future customers to assess the efficiency of alternative actions to mitigate air pollution has been achieved, which helps the development of strategy options for air pollution abatement and support of air quality policy.

### **2. The input data for the atlas**

The AQ-WATCH global air quality atlas is using the results of the simulations from the most recent version of the global reanalysis developed within the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS: <https://atmosphere.copernicus.eu/>). The CAMS reanalysis combines model data with observations from across the world into a globally complete and consistent dataset using the atmospheric model (IFS: Integrated Forecasting System) of the ECMWF and data assimilation (Inness et al., 2019). For the CAMS reanalysis, satellite retrievals of carbon monoxide total column, nitrogen dioxide tropospheric column, aerosol optical depth, and ozone total column, partial column and profile retrievals are assimilated. The reanalysis has a horizontal resolution of about 80 km (0.75°x0.75°) and provides the distribution of chemical species at a sub-daily (3 hourly frequency) and monthly temporal resolution. The most recent global reanalysis spans January 2003 to June 2021, but only data up to December 2020 are included in the atlas.

The global atlas also includes an access to the NO<sub>2</sub> tropospheric columns from the satellite-based Ozone Monitoring Instrument (OMI) sensor (Boersma et al., 2011). The NO<sub>2</sub> tropospheric columns data observed by the OMI sensor are obtained from the temis website at: <https://www.temis.nl/airpollution/no2.php>. The data used in this project were generated as part of the QA4ECV (Quality Assurance for Essential Climate Variables) European project and are available as daily and monthly means since October 2004. We downloaded the monthly average values from version 1.1, which has a spatial resolution of 0.125°x0.125° (about 13x13 km<sup>2</sup>), for the period 2005-2020. We first converted the monthly mean ascii files to netcdf before regridding them to the same resolution as the CAMS reanalysis.

The regional atlas, which focuses on the contiguous United States, is based on atmospheric composition simulations performed by the NCAR's Research Application Laboratory (RAL) using a regional air quality model (CMAQ; Community Multiscale Air Quality) (Kumar et al., 2019). The CMAQ model uses meteorological fields derived from the Weather Research and Forecast (WRF) model, and assimilated MODIS aerosol optical depth (AOD) retrievals and other in-situ observations. The model domain is defined on a Lambert Conformal map projection centered at (40°N, 97°W) and a horizontal grid spacing of 12 km in both the longitudinal and latitudinal directions. The CMAQ outputs are available at a daily basis for the period 2005-2018 and include air quality indices, as well as some meteorological

parameters (temperature, cloud fraction, solar radiation, etc.). As for satellite data, the model simulations are regridded to  $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$  for the comparison with CAMS reanalysis.

### The AQ-WATCH atlas of air quality

The home page of the atlas is shown in Figure 1. The final version of the atlas has not yet been made available to the public. Discussions are currently taking place with possible hosts for this website.



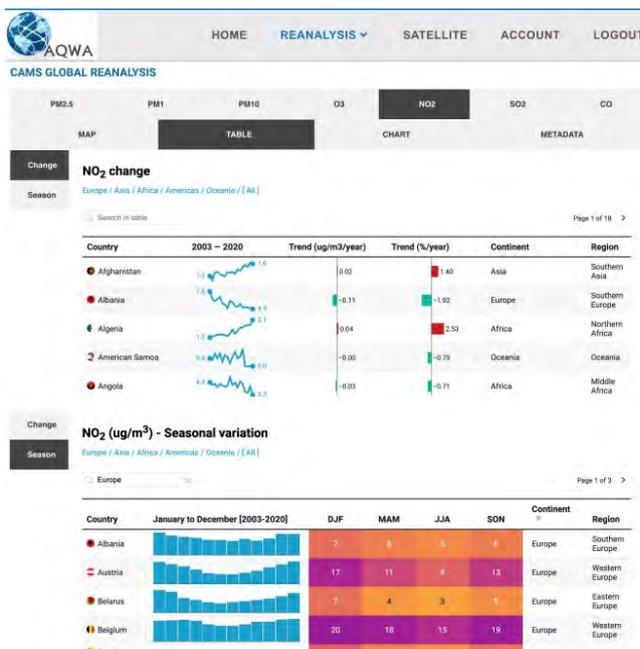
**figure 1.** Homepage of the AQ-WATCH atlas.

The data in the atlas are derived from sub-daily and monthly CAMS reanalysis, as well as daily average CMAQ model outputs and monthly average OMI NO<sub>2</sub> tropospheric columns. For each of the dataset, data are averaged seasonally and yearly. All of these statistics are also calculated for every country in the world, as well as for every state and county in the United States and every province in China. The system developed for this atlas allows an interactive visualization of the different statistics for the surface concentrations of the following species: PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, O<sub>3</sub>, daily maximum 8h average ozone (MDA8), CO, NO<sub>2</sub> and SO<sub>2</sub>. More species could be added in the future at the request of users. After choosing the species, maps of the average concentrations and trends for the dates chosen by the users can be obtained. Figure 2 depicts an example of such a map, which shows the concentration of PM<sub>2.5</sub> in 2019 (top panel) and the absolute change in PM<sub>2.5</sub> from 2003 to 2020 (bottom panel) at the country, state, and province levels. The user can, for example, display the PM concentration level on the map in comparison to WHO (World Health Organization) standards, as well as the trend and its significance or not for different time periods.



**figure 2.** Average PM<sub>2.5</sub> concentration in 2019 (top panel) and trend in PM<sub>2.5</sub> from 2003 to 2020 (bottom panel).

In addition to plots of species global distribution, data are presented as tables providing the user with a more effective way to visualize the data. For example, Figure 3 (top panel) shows change in atmospheric composition for each country in the world, with the user able to obtain trends as graphs, as well as trends in absolute values and percentages over time. The atlas also allows users to visualize seasonal variations in atmospheric pollutant levels (bottom panel).



**figure 3.** Change in NO<sub>2</sub> surface concentration (top panel) and seasonal variation (bottom panel).

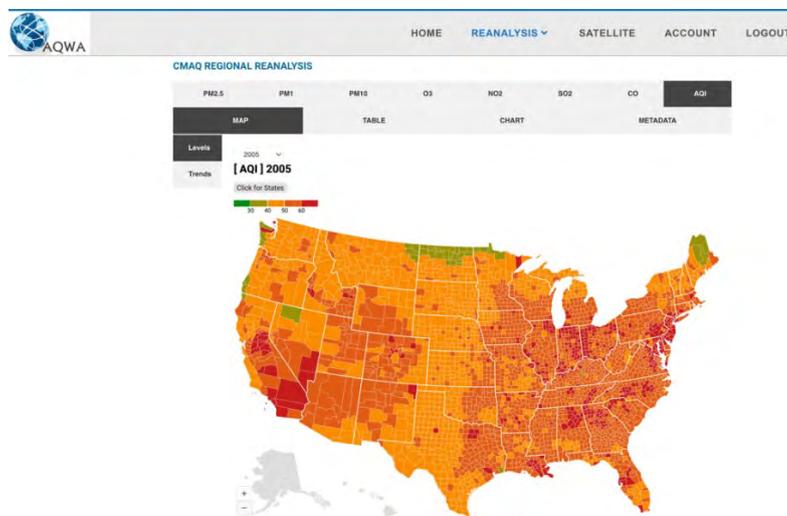
The atlas also contains additional statistics. For example, the ranking of surface pollutant concentrations per continent, as well as the evolution of these concentrations in all countries in classified regions over the selected period, can be visualized. Figure 4 displays the average

concentration levels in various European countries as well as the changes in average ozone mixing ratio from 2003 to 2020.



**figure 4.** Annual average ozone surface concentrations in European countries from 2003 to 2020.

Figure 5 depicts a spatial distribution of air quality index (AQI) derived from the CMAQ model result in 2005 for various counties in the United States as an example of the regional atlas. Users can also switch from county to state and vice versa by clicking on the button at the top of the map. It should be noted that the AQI values from the regional CMAQ model will be used in the evaluation of the global AQI calculation method.



**figure 5.** Map of air quality indices (AQI) at the county level in the United States in 2005.

## Conclusion

An atlas of air quality at the global and regional scales has been developed at the Laboratoire d'Aerologie in Toulouse as part of the AQ-WATCH European project. This atlas is based on the CAMS reanalysis of global atmospheric composition, as well as CMAQ model simulations and satellite observations of NO<sub>2</sub> tropospheric columns.

This paper describes the AQ-WATCH project and the various datasets (particularly reanalysis and satellite data) that were used to create our atlas of air quality. The AQ-WATCH atlas allows us to promote reanalysis data, which are still underutilized due to a lack of information available to people who are unfamiliar with their application. Our tool allows users to better understand the chemical composition of the atmosphere in the different parts of the world, as well as their concentration levels, spatial

distributions, and historical trends. This atlas may also be useful as a decision-making tool for assessing the impact of air quality policies on human health and the environment.

The atlas is for now developed in a local website: discussions are taking place with institutions interested in hosting the website.

## **Bibliography**

Boersma, K.F., Eskes, H.J., Dirksen, R. J., van der A, R. J., Veefkind, J. P., Stammes, P., Huijnen, V., Kleipool, Q. L., Sneep, M., Claas, J., Leitao, J., Richter, A., Zhou, Y., and Brunner, D., 2011 : An improved retrieval of tropospheric NO<sub>2</sub> columns from the Ozone Monitoring Instrument, *Atmos. Meas. Tech.* 4, 1905-1928, doi:10.5194/amt-4-1905-2011.

Inness, A., Ades, M., Agustí-Panareda, A., Barré, J., Benedictow, A., Blechschmidt, A.-M., Dominguez, J. J., Engelen, R., Eskes, H., Flemming, J., Huijnen, V., Jones, L., Kipling, Z., Massart, S., Parrington, M., Peuch, V.-H., Razinger, M., Remy, S., Schulz, M., and Suttie, M., 2019 : The CAMS reanalysis of atmospheric composition, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 3515–3556, <https://doi.org/10.5194/acp-19-3515-2019>.

Kumar, R., Delle Monache, L., Bresch, J., Saide, P. E., Tang, Y., Liu, Z., da Silva, A., Alessandrini, S., Pfister, G., Edwards, D., Lee, P. and Djalalova, I., 2019 : Toward improving short-term predictions of fine particulate matter over the United States via assimilation of satellite aerosol optical depth retrievals. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 2753–2773. <https://doi.org/10.1029/2018JD029009>.

## THE ECCAD DATABASE: ACCESS TO A VARIETY OF INVENTORIES OF EMISSIONS FOR GREENHOUSE GASES AND AIR POLLUTANTS

Sabine DARRAS<sup>1</sup>, Claire GRANIER<sup>2,3</sup>, Cathy LIOUSSE<sup>2</sup>, Thierno DOUMBIA<sup>2</sup>, Sekou KEITA<sup>2</sup>, Antonin SOULIÉ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse, France

<sup>2</sup>Laboratoire d'Aérodologie, Université de Toulouse, CNRS/UPS, Toulouse, France

<sup>3</sup>NOAA Chemical Sciences Laboratory–CIRES/University of Colorado, Boulder, CO, USA

**Abstract:** ECCAD (Emissions of atmospheric Compounds and Compilation of Ancillary Data: [eccad.aeris-data.fr](http://eccad.aeris-data.fr)) is the emissions database of the GEIA (Global Emission Initiative: [geiacenter.org](http://geiacenter.org)) international project. ECCAD provides a user-friendly access to many datasets of emissions, as well as detailed metadata for each of the datasets. ECCAD includes various tools for data visualization, computation of global and regional totals, and for interactive spatial and temporal analysis. The data are interoperable NetCDF CF-compliant files. The presentation will provide information on the datasets available in ECCAD, as well as examples of the analysis work that can be done online.

**Keywords :** Emissions ; Future scenario ; Data analysis; Database

### Introduction

ECCAD (Emissions of atmospheric Compounds and Compilation of Ancillary Data: [eccad.aeris-data.fr](http://eccad.aeris-data.fr)) is the emissions database of the GEIA (Global Emission Initiative: [geiacenter.org](http://geiacenter.org)) international project, which represents a community effort dedicated to emissions information exchange. The ECCAD database provides a user-friendly access to global and regional surface emissions for a large set of chemical compounds (greenhouse gases, atmospheric pollutants, aerosols and their precursors) and ancillary data (land use, active fires, burned areas, population, etc). The emissions inventories consist of different datasets at the global and regional scales, at various spatial resolutions from 0.05x0.1 to 1x1 degree in latitude and longitude. They are developed by groups in different world countries. The emissions are provided from the pre-industrial period to the end of the 21st century, on a daily, monthly or yearly basis, depending on the dataset and for different origins, anthropogenic, fires and natural (i.e. vegetation, soils, oceans, volcanoes) and for a large set of sectors (i.e. energy, industries, transportation, agriculture, etc.).

### 1. ECCAD portal

ECCAD (<http://eccad.aeris-data.fr>) is developed as part of the French Atmospheric Data Center AERIS (<http://www.aeris-data.fr>). ECCAD has currently more than 2000 users originating from more than 80 countries. The project benefits from the large GEIA international community of users, who actively contribute to extend the number of available emission datasets.

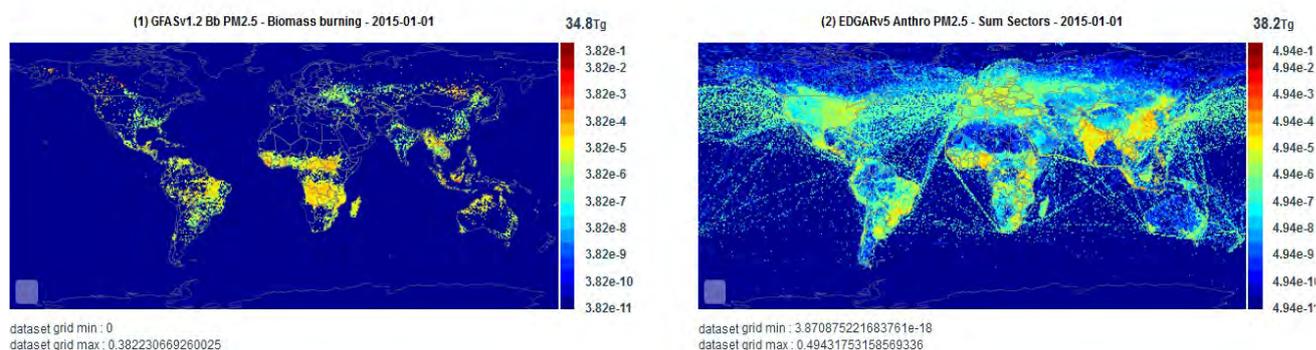
The portal distributes more than 80 inventories, and half the inventories include emissions from anthropogenic or biomass burning sources, for CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> and particles/precursors emissions.

In the following paragraphs, we present the tools that can be used to evaluate the emissions from different inventories available in ECCAD, and provide some examples of the results.

### Maps of the emissions

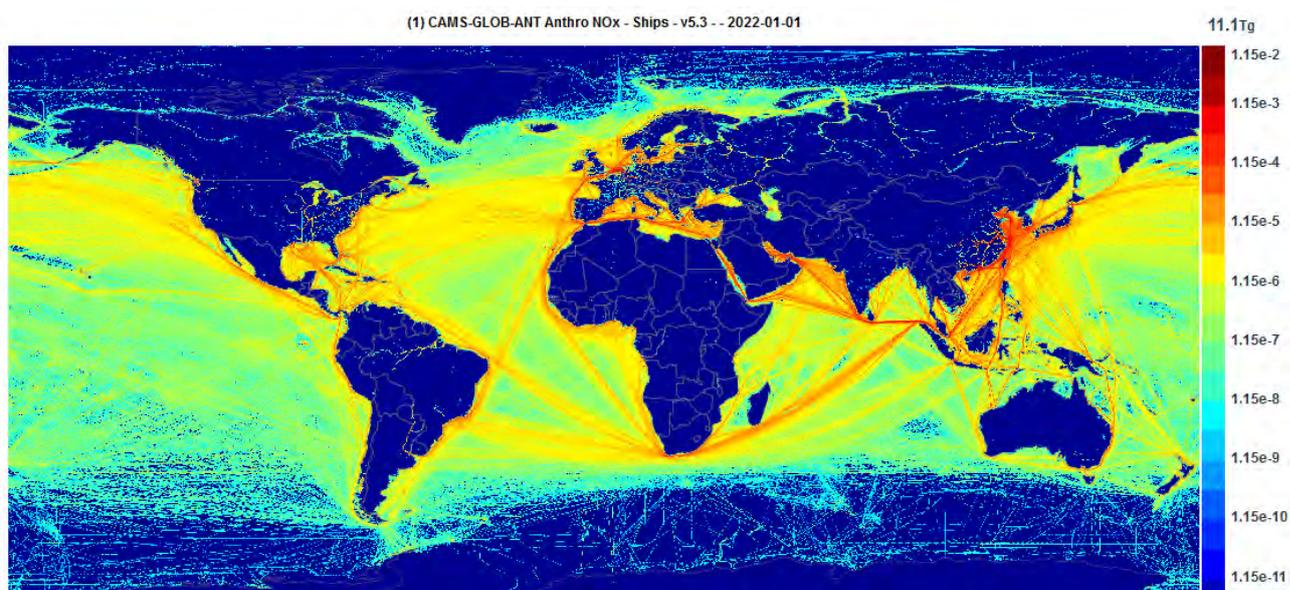
In ECCAD, after selecting the inventories, users can draw maps of the emissions for all the species, types of emissions and sectors. Figure 1 shows an example of maps that can be drawn by the users, for the emissions of PM<sub>2.5</sub> by biomass burning from the GFAS inventory (<https://atmosphere.copernicus.eu/global-fire-emissions>), and for the PM<sub>2.5</sub> anthropogenic

emissions from the EDGARv5 inventory (Emission Database for Global Atmospheric Research: [data.jrc.ec.europa.eu/collection/edgar](http://data.jrc.ec.europa.eu/collection/edgar)) inventory.



**figure 1.** PM2.5 emissions from biomass burning (left) and from anthropogenic sources (right) in 2015.

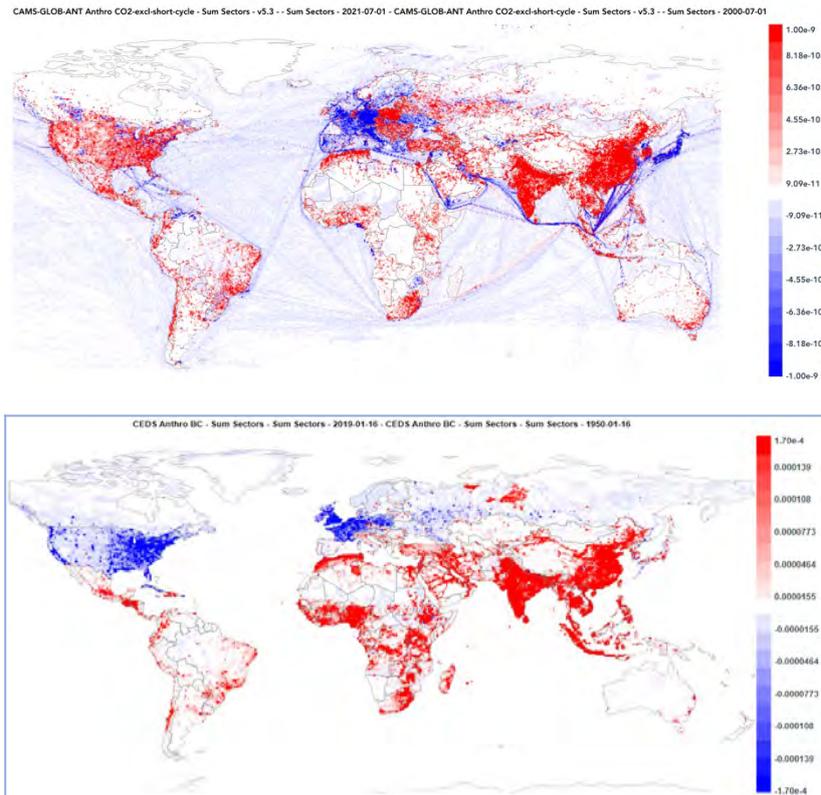
Another example of the maps than can be generated in ECCAD is given in Figure 2, which displays the distribution of ships emissions in 2022 from the CAMS-GLOB-ANT version 5.3 inventory (see companion paper from Soulié et al. in the conference).



**figure 2.** SO2 global ship emissions for year 2022

### 3. Map Comparison tool

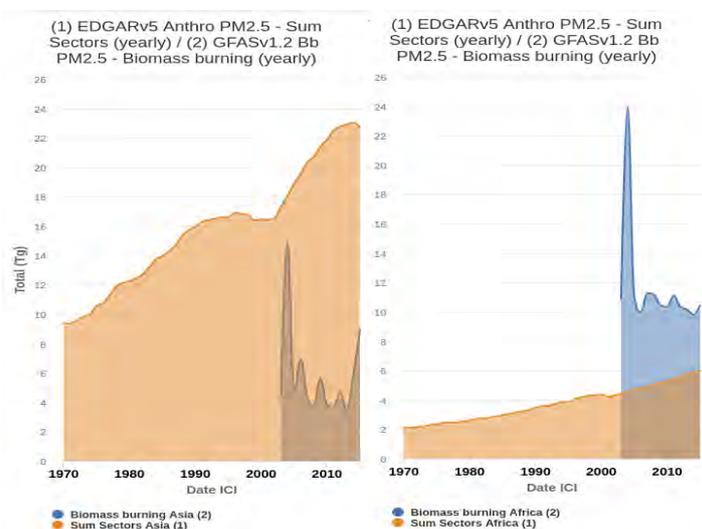
ECCAD includes a tool allows to compare maps, in order to understand the location of the differences between two datasets, and to display the differences in the emissions provided by an inventory at different periods. An illustration is given in Figure 3 (top), which compares the CO<sub>2</sub> distribution 2000 and 2021 from the CAMS-GLOB-ANT inventory. This comparison shows the large increase in CO<sub>2</sub> emissions in most regions of the world, except for Europe. Figure 3 (bottom) shows another comparison, for the BC anthropogenic emissions between 1950 and 2019 from the CEDS inventory (McDuffie et al., 2020). This comparison shows the impact of the regulations in pollutant emissions in Europe and North America, as well as the large increase in emissions in most areas of Asia, Latin America and Africa.



**figure 3.** Change in CO2 emissions from 2000 to 2021 from the CAMS-GLOB-ANT version 5.3 inventory (top) and change in BC emissions between 1950 and 2019 from the CEDS inventory (bottom)

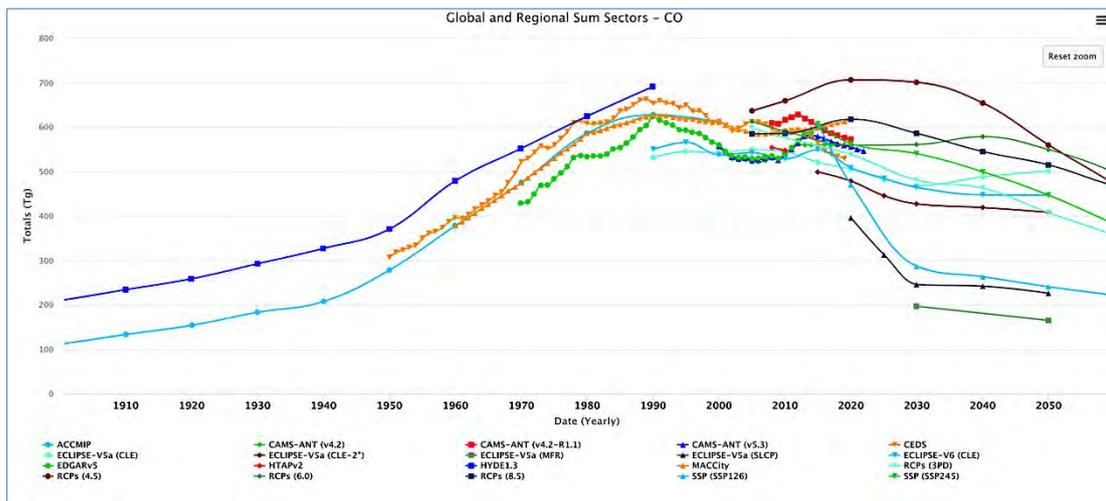
#### 4. Time series tool

ECCAD includes tools that can be used to plot time series and compare time series. This tool includes a comparison of different types of emissions, together with comparisons that can be done by countries, regions and the global scale. Figure 4 shows an example, where anthropogenic emissions from the EDGARv5 inventory are compared with the fires emissions provided by the GFAS dataset, for Asia (left) and Africa (right). Figure 4 shows that, for Africa, emissions from fires were dominant in the 2000s, but, with the growth of anthropogenic emissions in this region, anthropogenic emissions might become soon of the same magnitude as the emissions from fires.

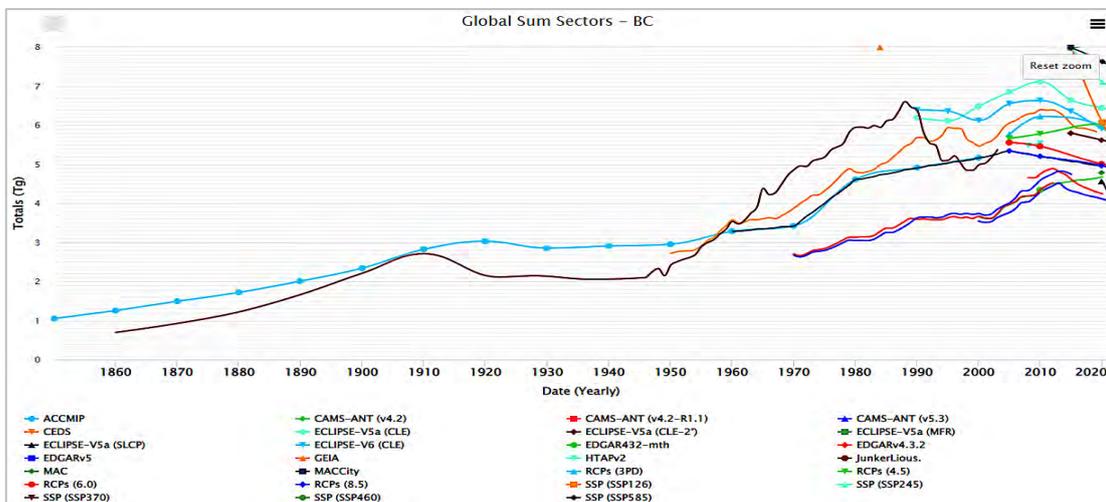


**figure 4.** Biomass burning and anthropogenic black carbon emissions for year 2015 for Asia (left) and Africa (right)

ECCAD can also be used to compare different time series, in order to have a general look at the inventories. Figures 5 show an example of the time series for global CO anthropogenic emissions from the beginning of the 20<sup>th</sup> century to 2060, and Figure 6 show the time series for global BC from the start of the preindustrial period to 2020. These graphs show the large differences between the inventories: to understand better these differences, analyses by sectors can then be done by the users as shown in section 5.



**figure 5.** Yearly CO emissions for various inventories.

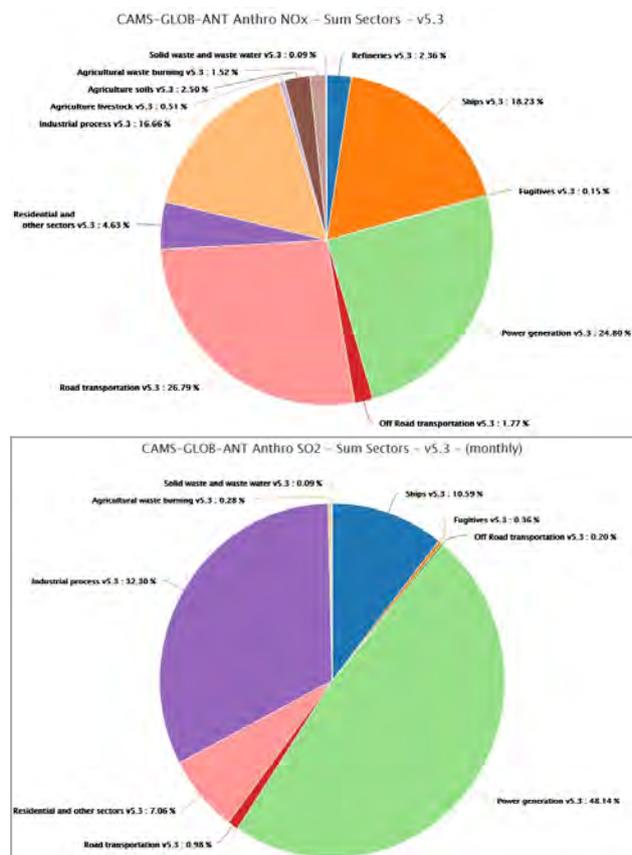


**figure 6.** Black carbon time series from historical period 1860 to 2020.

### Tool for sectors analysis

Most of the inventories available in ECCAD are provided for different sectors. Information on the different sectors are provided in the ECCAD catalog. A tool for the analysis of the emissions provided by different sectors is also available in ECCAD. Figure 7 shows two examples of the analysis that can be done, for the NO<sub>x</sub> (left) and SO<sub>2</sub> (right) anthropogenic sources from the CAMS-GLOB-ANT version 5.3 inventory. This figure highlights that the NO<sub>x</sub> major emission sources are transportation, power generation and industry sectors. Shipping accounts for nearly the same amount than road

transportation. For SO<sub>2</sub>, power generation and industry processes account for the major part of the emissions with less than 1% contribution from road transport and up to 10% from ships.



**figure 7.** Contribution of different sectors to the global emissions of NO<sub>x</sub> (left) and SO<sub>2</sub> (right) (percentage over the 2000-2020 period)

## 6. Tools for point source emissions

ECCAD also includes point sources emissions. An example of such sources is the emissions of SO<sub>2</sub> from continuously degassing volcanoes. Figure 8 shows an example of these emissions, from the CAMS-GLOB-VOLC dataset, based on the observations from the NOVAC network (Arellano et al., 2021). The emissions are very variable in time, and ECCAD allows a detailed analysis of these emissions, for each volcano included in the dataset.

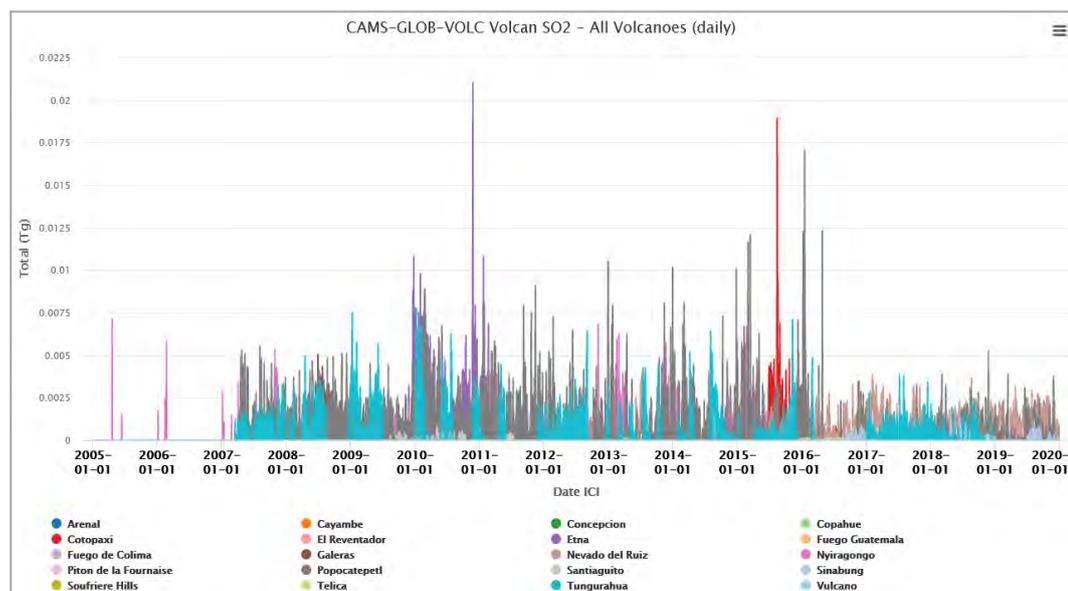


figure 8. SO2 daily emissions from NOVAC volcanoes.

## Conclusion

ECCAD is the database of the GEIA network, which provides an access to a large number of emissions datasets. In the presentation, we will provide an online demonstration of the ECCAD system, and show how users can analyze in a user-friendly way the emission datasets included in ECCAD. Details on the download of the datasets will also be provided during the demonstration.

## References

Arellano, S., Galle, B., Apaza, F., Avard, G., Barrington, C., Bobrowski, N., Bucarey, C., Burbano, V., Burton, M., Chacón, Z., Chigna, G., Clarito, C. J., Conde, V., Costa, F., De Moor, M., Delgado-Granados, H., Di Muro, A., Fernandez, D., Garzón, G., Gunawan, H., Haerani, N., Hansteen, T. H., Hidalgo, S., Inguaggiato, S., Johansson, M., Kern, C., Kihlman, M., Kowalski, P., Masias, P., Montalvo, F., Möller, J., Platt, U., Rivera, C., Saballos, A., Salerno, G., Taisne, B., Vásquez, F., Velásquez, G., Vita, F., and Yalire, M., 2021: Synoptic analysis of a decade of daily measurements of SO<sub>2</sub> emission in the troposphere from volcanoes of the global ground-based Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change, *Earth Syst. Sci. Data*, **13**, 1167–1188, <https://doi.org/10.5194/essd-13-1167-2021>.

McDuffie, E. E., Smith, S. J., O'Rourke, P., Tibrewal, K., Venkataraman, C., Marais, E. A., Zheng, B., Crippa, M., Brauer, M., and Martin, R. V., 2020: A global anthropogenic emission inventory of atmospheric pollutants from sector- and fuel-specific sources (1970–2017): an application of the Community Emissions Data System (CEDS), *Earth Syst. Sci. Data*, **12**, 3413–3442, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3413-2020>.

Soulie, A., C. Granier, H. Denier van der Gon, J. Kuenen, S. Arellano, S. Darras, T. Doumbia, B. Galle, M. Gauss, M. Guevara, J.P. Jalkanen, S. Keita, C. Liousse, J. Doubalova, D. Simpson, K. Sindelarova, 2022: The Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) emissions of greenhouse gases and air pollutants, *Proceedings of the 35th Annual Conference of the International Association of Climatologie, Toulouse, France, July 2022*.

## CITIZENS AS ADDITIONAL MOBILE SENSORS IN CASE OF NATURAL DISASTERS: A NEW EMERGENCY DECISION SUPPORT SYSTEM FOR ITALY AND CROATIA

### LES CITOYENS COMME CAPTEURS MOBILES SUPPLÉMENTAIRES EN CAS DE CATASTROPHE NATURELLE : UN NOUVEAU SYSTÈME D'AIDE AUX DÉCISIONS D'URGENCE POUR L'ITALIE ET LA CROATIE

**Antonio CARDILLO<sup>1</sup>, Valentina DI TALIA<sup>2</sup>, Giacomo ANTONIONI<sup>3</sup>.**

<sup>1</sup> Regione Molise, IV Dipartimento Governo del Territorio, Servizio di Protezione Civile, Responsible of the decentralized functional center (forecasting and monitoring), [cardillo@protezionecivile.molise.it](mailto:cardillo@protezionecivile.molise.it)

<sup>2</sup> CIRI Frame - Unibo, Via Sant'Alberto 163, Ravenna, research fellow, [valentina.ditalia2@unibo.it](mailto:valentina.ditalia2@unibo.it)

<sup>3</sup> CIRI Frame - Unibo, Via Sant'Alberto 163, Ravenna, associate professor, [giacomo.antonioni3@unibo.it](mailto:giacomo.antonioni3@unibo.it)

**Abstract:** A novel Emergency Decision Support System (EDSS) platform has been developed within the Interreg E-CITIJENS project and will be presented in this work. Similarly to other DSSs, the platform's purpose is not to "impose" a choice but to provide further support to technicians and decision-makers in analysing emergency situations related to natural disasters to ensure an efficient and effective response. In particular, the risk typologies addressed are floods, forest fires and earthquakes. Besides the entry of data from sensor networks and institutional sources, contributions from the citizen are envisaged in the EDSS platform through posts published on the main social media.

**Keywords:** crowdsourcing, social media, emergency management, Decision Support Systems

**Résumé:** Une nouvelle plateforme EDSS (Emergency Decision Support System) a été développée dans le cadre du projet Interreg E-CITIJENS et sera présentée dans ce travail. Comme les autres DSS, la vocation de la plateforme n'est pas « d'imposer » un choix mais d'apporter un soutien supplémentaire aux techniciens et décideurs dans l'analyse des situations d'urgence liées aux catastrophes naturelles pour assurer une réponse efficiente et efficace. En particulier, les types de risques auxquels ils sont confrontés sont les inondations, les feux de forêt et les tremblements de terre. En plus de l'insertion de données provenant de réseaux de capteurs et de sources institutionnelles, des contributions des citoyens sont fournies dans la plateforme EDSS à travers des messages publiés sur les principaux médias sociaux.

**Mots clés:** sciences participatives, médias sociaux, gestion des urgences, systèmes d'aide à la décision

#### Introduction

The Croatian and Italian Adriatic regions are subjected to almost all types of natural hazards, including earthquakes, fires, landslides, mudslides, floods and extreme weather conditions, and they have been affected by various natural and man-made disasters in recent years (CEMS, 2022). In this sense, joint risk management and the prevention of damage caused by natural and man-made disasters, mainly based on the improvement of monitoring and emergency management measures, represent a necessity and an opportunity to increase the safety and overall environmental quality in the Adriatic basin.

Identifying the event scenario quickly in case of emergencies and, consequently, providing an intervention of human resources and means proportionate to the need is the main challenge to address nowadays. The line between success and failure is very fine and the development of innovative Decision Support Systems able to include alternative data sources using new IT solutions can make a difference (Hellmund et al., 2019). Social media platforms are widely recognised as a valuable source of data during crises, but their potential is still not fully exploited, mainly because of their complex nature (Zhang et al., 2019).

The Interreg E-CITIJENS project aims at promoting and enhancing, through cross-border cooperation between Italy and Croatia, the sharing and use of non-sensitive data and information, communications and geospatial and space-based technologies and related services to support national measures for successful disaster risk management and communication in compliance with the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction (UNDRR). The project aimed at developing a trans-frontier and innovative Emergency Decision Support System (EDSS) platform with the prospect of integrating the information provided by citizens through social media into the traditional emergency management process.

The methodology developed for selecting emergency-relevant posts by social media users and integrating additional traditional sensors into this system will be presented in the following sections, along with the description of the EDSS's potential use for emergency response.

## 1. Methodology

The Emergency Decision Support System EDSS developed within the Interreg project E-CITIJENS, a semantically enriched web-enabled platform has been designed to be a decision support multi-channel tool in emergency contexts to define an event scenario in the shortest possible time and to coordinate emergency interventions. Taking a cue from the Sendai Framework for Disaster Risk Reduction (UNDRR), where the international community has given total value to social networks, social connectors are also to be included. Therefore, the goal in the EDSS development has been to define a system able to exploit institutional sources (reliable monitoring network) and social networks to acquire the information necessary to identify critical situations regarding three target risk typologies: floods, forest fires and earthquakes. To pursue this target, inputs to the platform have also been integrated with mobile or permanent amateur connectors (sensors installed by private citizens). First, these external data sources must be restricted to the area of interest through geographic positioning, in order to eliminate non-required information that can cause a sort of "external noise" and compromise the result of the analyses. The result will be a platform able to provide to the Civil Protection experts, in the shortest possible time and in an area of competence pre-defined by the user, the event scenario. The platform will be fully operational at the end of the E-CITIJENS project (after June 2022). After extensive research work and internal surveys within the Project partnership, the essential platform characteristics to be developed in order to obtain the desired result have been identified. These are listed and briefly described below.

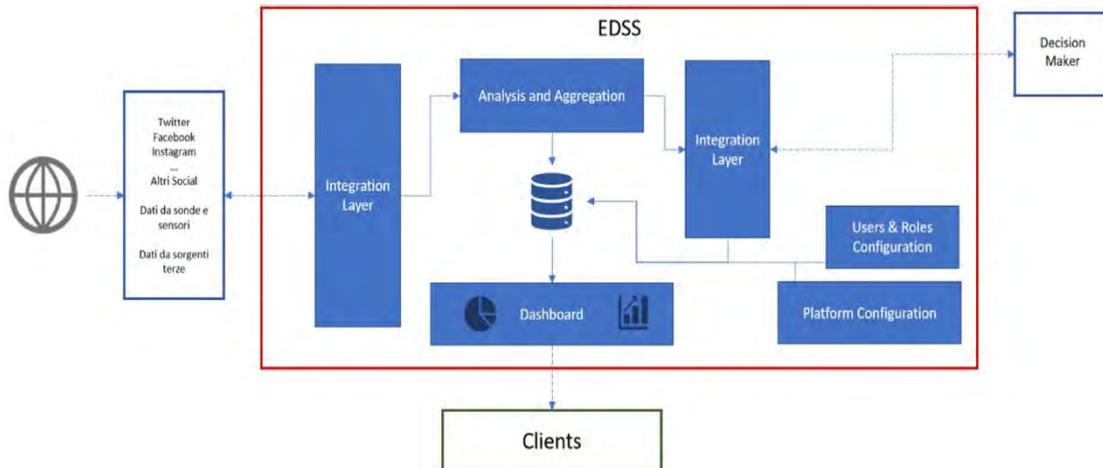
1) External searchable interfaces; 2) Analysis and classification core component, 3) Data persistence; 4) Display component.

The external searchable interfaces are specifically search engines and data assimilators. The platform must be able to activate APIrest connectors or directly search for information and "capture" solutions on web pages of interest (e.g. webcams, data in tables). Therefore, it is understood that the platform will have to assimilate data coming from heterogeneous sources and reproduce them in its own database. Based on methodologies identified by the design team, the platform also needs to be able to analyse the assimilated data and classify them in an analysis and classification core component. The analysed data will constitute the database history (data persistence), which will be essential for a correct evaluation of the obtained results. Furthermore, to ensure an improvement in data analysis over time, the analysis could be performed through an Artificial Intelligence (AI) component. Finally, to limit the evaluation and implementation time of an event scenario, the operational parts of the platform that provide direct interaction with the user must have a graphic interface with display components to filter and analyse the results.

After this preliminary analysis, the principal platform's modules to be deployed have been identified as they define the desired EDSS architecture (Figure 1). A brief description of the primary functions of each module is provided below.

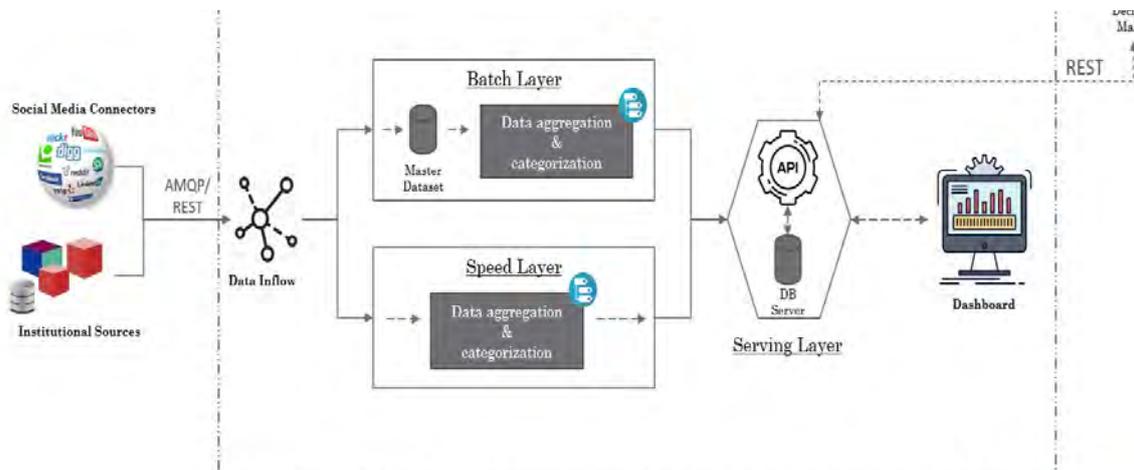
- The first "Integration Layer" (on the left in Figure 1) collects data from institutional sources, social media sources and non-institutional amateur sensors. It is the connection with the social world, able to scan the various platforms such as Facebook, Twitter, and Instagram, identifying pre-inserted guiding terms in geo-localised posts.
- The "Analysis and Aggregation" module contains data evaluation algorithms based on the semantic classification developed during the Project.

- The second "Integration Layer" (on the right in Figure 1) compare data with the institutional sources and sends the aggregated data to the "Decision-Maker" module to automatically classify the event.
- The "Decision-maker module will be an Artificial Intelligence component to improve the semantic analysis over time and to help an automatic decision for the ongoing event.



**figure 1.** Emergency Decision Support System architecture.

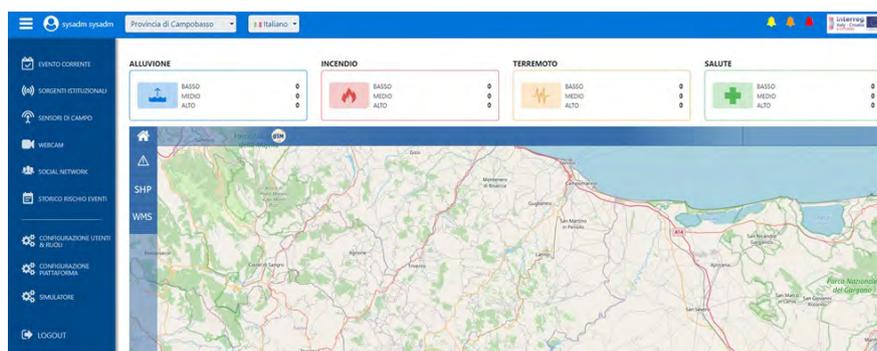
Figure 2 provides further details on the EDSS infrastructure. Specifically, it addresses two data flows within the first integration layer and the analysis and aggregation module and how they are presented to the users in the dashboard.



**figure 2.** Scheme of the final EDSS infrastructure.

It can be seen that the data flow "captured" on social media and institutional web resources is split into two equal flows: one is analysed in an engine with speed layer components and one on batch layer components. Specifically, the speed layer analyses the data without interacting with them, operating a geographic and semantic evaluation (data located within the geographic box of the tenant). On the other hand, the batch layer analyses the same data but processes thematic aggregations and categorisations according to the target risk typologies. Subsequently, thanks to the comparison of data stored in the DB server and through API Rest connectors towards the Decision Maker, external to the platform, the result of the analysis and classification of the "criticality of the captured" data is proposed on the user dashboard.

Concerning the platform's practical use, it is to stress that the EDDS developed will be easily accessible by the Civil Protection users as it has a user dashboard (as depicted in Figure 3) and a user and role configuration module.



**figure 3.** The EDSS platform dashboard.

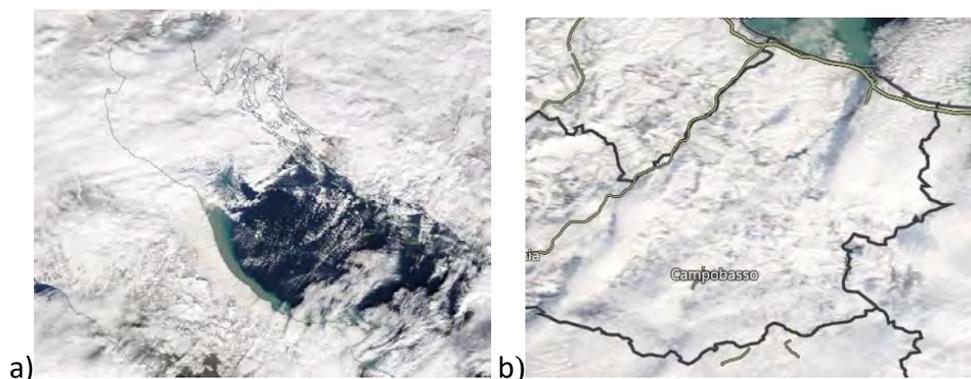
Each user (tenant) operates exclusively in his/her box of competence, but in case of need for support or discussion with other operators, a collaborative interoperable chat between tenants (i.e. the project partners of the Adriatic basin) is activated. In other words, this chat is a virtual copy of the functional principles of the network of decentralised functional centres.

## 2. Use case

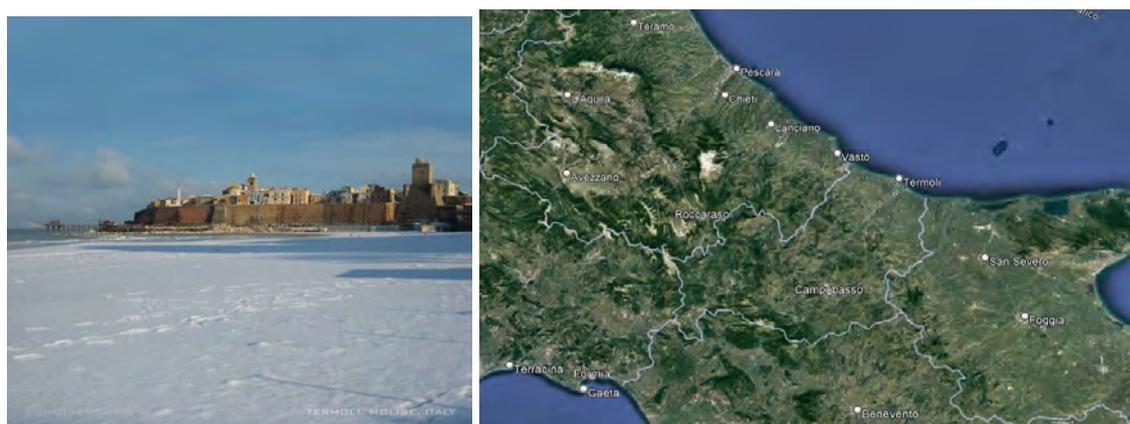
Additionally, the platform will represent an essential source of data for those phenomena not otherwise monitored both due to instrumental limits (e.g. hailstorms) and lack of sensors (e.g. exceptional low-altitude snowfalls). , With this innovative tool, we expect to start obtaining and improving the information on events where, for example, information is lost due to a lack of sensors or events not correctly evaluated due to spatial exemption.

With geo-localised posts and possibly the publication of a photograph of the moment, the social network users will act as "mobile sensors" describing much more than a sensor placed incorrectly or even not present. Furthermore, the platform is conceived to connect with amateur meteorological data networks that, even if they are not fully complying with the Standards for monitoring stations (WMO, 2018), can supply knowledge on intense and localised meteorological events (e.g. downburst and summer storms) in areas not covered by institutional networks. Clearly, data acquisition is only possible when the amateur network exposes web services such as APIRest or grants acquisition through "capture" mechanisms on web pages for publishing data. In order to illustrate the potential use of the EDSS, three examples of events that could have been recorded by amateur networks or "mobile sensors" if the platform had been active is now presented.

The first example is the significant snowfall of February 2012 (Figures 4ab); this case is representative of extreme events related to climate change (Cardillo et al. 2013 - Fazzini et al., 2013). Institutional sensors did not record this event as it occurred at sea level (snow gauges are usually installed at mountain or sub-mountain altitudes) and involved the entire Adriatic coast from Friuli Venezia Giulia to Puglia. On the other hand, the social world documented this event extensively with posts, videos and photos, providing helpful information to define the event that could have been processed by the EDSS. An example is the photo presented in Figure 5. It was published on Facebook by a user and represents the snowfall of 17.2.2012 in Termoli (Campobasso).

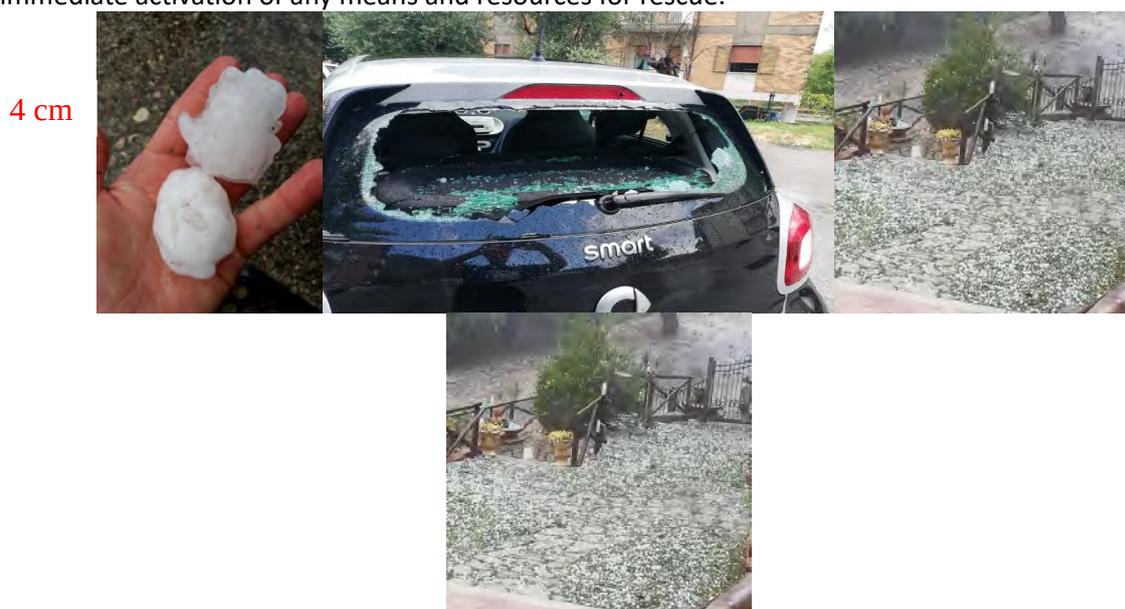


**figure 4.** Example of an Adriatic coast (a) and a low-altitude snow event in the Molise region not recorded by institutional networks (b) (image NASA Worldview application, Molise Region, 11.2.2012).



**figure 5.** Example of a low-altitude snow event not recorded by institutional networks (Costa Adriatica, litorale Termoli Nord, 17.12.2012) – Lat  $41^{\circ}59'45.75''\text{N}$  – Long  $14^{\circ}59'42.42''\text{E}$ .

The hailstorm of 19.7.2019 that occurred in Venafro (Lat  $41^{\circ}29'0''\text{N}$  –  $14^{\circ}3'0''\text{E}$  - Isernia) represents another interesting case to analyse, especially considering the absence of specific sensors for this typology of meteorological events. Also in this situation, processing the data provided by mobile sensors through social networks (examples of retrievable information are presented in Figure 6) with the EDSS, it would have been possible to reconstruct approximately the areal extension and the intensity of this highly geolocalised phenomenon, and eventually to estimate the damage (e.g. from the dimensions of the hail grains), allowing the immediate activation of any means and resources for rescue.



**figure 6.** Example of information that can be retrieved if geolocated (Venafro, 18.7.2019).

The last example concerns the exceptional snowfall of 5 and 6 March 2015 that affected the Adriatic coast and the Apennine hinterland. If the platform had been active, it could have had a double function: aiding the creation of the event scenario as previously described and, secondarily, providing support to the demonstration of a wrong meteorological record (in the specific case, the certification of a record snowfall recorded in the town of Capracotta situated in the northern part of Molise Region). Social network users documented a snowfall intensity of 256 cm/24 h; however, in many publications, it has been shown that this data does not conform to reality (Cardillo et al., 2015). With a proactive use of the platform, information similar to the images in Figure 7 would have been captured showing the exceptional snow accumulation due to the wind (Fig.7a) and the evidence of completely uncovered areas, testifying the false communication of an exceptional but not record-breaking snowfall.



**figure 7.** a) Photo of a snow accumulation due to the wind in the town of Capracotta. Photo of a snow accumulation due to wind in Capracotta (b) and Vastogirardi (c), with evidence of wind erosion on roofs and ground.

## Conclusion

The main novelty of the EDSS platform presented in this paper is that, besides the entry of data from sensor networks and institutional sources, contributions from the citizen are envisaged through posts published on the primary social media. These geo-referenced posts could include photos, videos or texts and can actively contribute to a better description of the event scenario in which citizens act as mobile sensors.

Moreover, this platform is able to provide to Civil Protection valuable information on local severe weather conditions that cannot be detected with traditional systems. It is well known that these conditions could create an emergency situation by themselves or worsen the emergency situation caused by other risk typologies (e.g. earthquake) and make the necessary intervention operations more complex (e.g. based on specific weather conditions, the use of different resources could be required). Thus, concerning meteorological aspects, this platform allows citizens to create an unstructured monitoring network through privately owned meteorological sensors, potentially recording phenomena that would otherwise be lost, such as hailstorms or snowfalls at low altitudes.

**Acknowledgements:** The Project E-CITIJENS is kindly acknowledged. We also acknowledge the use of imagery from the NASA Worldview application (<https://worldview.earthdata.nasa.gov>), part of the NASA Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS).

## Bibliography

Cardillo A., Di Pilla S., Fazzini M.: Exceptional snowfalls in the region Molise (Central Italy) in a contest of extremes of climate. 32nd International Conference on Alpine Meteorology, ICAM, 3-7 giugno 2013, Kranjska Gora, Slovenia. ISBN 978-961-6024-60-0, 98.

Cardillo A., Cassardo C., Fazzini M., Scarlatelli S.: The incorrect information of extreme weather events: the case of the "record snowfall" in the mountains of Abruzzo and Molise of March 2015. 33rd International Conference on Alpine Meteorology, Proc. 23, ICAM Innsbruck (Austria), 115-116.

Copernicus Emergency Management Service (CEMS), Directorate Space, Security and Migration, European Commission Joint Research Centre (EC JRC), <<https://www.copernicus.eu/>>, accessed 1.02.2022.

Fazzini M., Cardillo A., Di Pilla S., Beltrando G.: Tendences des précipitations depuis le milieu du XXème siècle sur le versant adriatique de la Région Molise (Italie Centrale). Actes XXVI Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, 3-7 settembre 2013, Cotonou, Benin. ISBN 10- 999919-58-64-9; ISSN 18405452, 230-235.

Hellmund T., Schenk M., Hertweck P., Moßgraber J.: Employing Geospatial Semantics and Semantic Web Technologies in Natural Disaster Management, Proceedings of the Posters and Demo Track of the 15th International Conference on Semantic Systems co-located with 15th International Conference on Semantic Systems (SEMANTICS 2019), Karlsruhe, Germany, September 9th - to - 12th, 2019. Volume 2451 of CEUR Workshop Proceedings, CEUR-WS.org, 2019.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030, <<https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>> accessed 20.01.2022.

World Meteorological Organization WMO, 2018, *Guide to instrumentation and method of measurement (WMO – No. 8)*.

Zhang C., Fan C., Yao W., Hu X., Mostafavi A., 2019: Social Media for intelligent public information and warning in disasters: An interdisciplinary review, *International Journal of Information Management*, **49**, 190-207.

## CLIMATE AND COVID-19 IN THE STATE OF PARANÁ (BRAZIL)

**Francisco MENDONÇA, Pedro Augusto Breda FONTÃO, Wilson Flavio Feltrim ROSEGHINI**

*Federal University of Paraná – UFPR/LABOCLIMA, Brazil, [chico@ufpr.br](mailto:chico@ufpr.br), [pedrofontao@ufpr.br](mailto:pedrofontao@ufpr.br), [feltrim@ufpr.br](mailto:feltrim@ufpr.br)*

**Abstract:** The relationship between climate and diseases is a classic theme in the field of climatology and epidemiology. In this context, the present study sought to analyze, from a spatial and temporal approach, the transmission and mortality by COVID-19 in the State of Paraná (Brazil), in relation to climate dynamics during the pandemic and their interactions. The results allowed to identify : 1) the transmission dynamics over time, 2) the variation in the number of cases in relation to predominant types of weather. The climate its one of the components of a complex system of multicausalities : it isn't the determining factor in the transmission process of COVID-19.

**Keywords:** Climate, COVID-19, Paraná State, Brazil.

**Résumé :** La relation entre le climat et les maladies est un thème classique dans le domaine de la climatologie et de l'épidémiologie. Dans ce contexte, la présente étude a cherché à analyser, à partir d'une approche spatiale et temporelle, la transmission et la mortalité par COVID-19 dans l'État du Paraná (Brésil) en relation avec la dynamique climatique au cours de la pandémie et leurs interactions. Les résultats ont permis d'identifier : 1) la dynamique de transmission dans le temps, 2) la variation du nombre de cas en rapport aux types de temps prédominants. Le climat est l'un des composants d'un système complexe de multi causalités : il n'est pas le facteur déterminant dans le processus de transmission de la COVID-19.

**Mots-clés :** Climat, COVID -19, État du Paraná, Brésil.

### 1. Introduction

The relationship between climate and respiratory diseases is a classic topic in the field of climatology and epidemiology. Several studies have proven the intricate relationship between the occurrence of infectious diseases and climatic seasonality in different climates around the globe (Fisman, 2007; Lowen and Steel, 2014), in addition to the effects of the variability of some climatic variables (temperature and relative humidity of the air, for example) in disease transmission. Although the influence of seasonal cycles and environmental patterns are well known on the influenza virus (Tamerius *et al.*, 2013), which causes the common flu and epidemics. Other types of pathogens can also present this characteristic and have its effects related to the variability of climate elements, including the coronavirus, according to Chan *et al.* (2011).

In recent years, humanity has experienced a new public health emergency caused by the emergence of a new human coronavirus (SARS-CoV-2), which causes the severe acute respiratory syndrome called COVID-19 (Coronavirus Disease 2019). The disease probably emerged in the month of December 2019 in the city of Wuhan, Hubei province, China (Yuen *et al.*, 2020), and has spread across the entire planet. The disease has seriously affected the economic and social development of several nations around the world and has even been officially declared a global pandemic on March 11, 2020 by the World Health Organization (WMO, 2022).

The speed at which the virus has been transmitted and spread over time and space has disturbed scientists and alarmed the general population, especially the elderly and those with comorbidities (hypertensive, diabetic, immunoexpressed, *etc.*). However, it should be noted that coronaviruses (CoVs) are a large family of viruses with a single-stranded RNA genome, already well known in academia, and cause respiratory, gastrointestinal, liver and neurological diseases (Weiss and Leibowitz, 2011), being generally associated with common colds (Matoba *et al.*, 2018). However, COVID-19 clearly differs from other respiratory syndromes in terms of infectious period, transmissibility, clinical severity and speed of

dissemination in communities, considerably increasing the susceptibility of the population to contracting the disease and the risks related to the disease (Shi *et al.*, 2020; Wilder-Smith *et al.*, 2020).

Since the beginning of the pandemic, several scholars have tried to establish relationships between the climate and the rapid spread and contagion of the population by SARS-CoV-2 in different countries and places with the temporal bias (Araujo and Naimi, 2020; Auler *et al.*, 2020, among many others). In this context, the present study highlights an analysis, from a spatial and temporal approach of the transmission, contagion and mortality by COVID-19 in the State of Paraná (Brazil). The study deals with the climate dynamics during the pandemic in a multicausal perspective and was prepared in accordance with the pathogenic complexes (Sorre, 1984), with climate being one of the important elements in this approach (Besancenot, 2001).

## 2. Methodology

### 2.1. Study area and prior research knowledge

Paraná is located in the southern region of Brazil, has a population of about 11.5 million inhabitants and is characterized by two predominant climate types according to the Köppen classification (Mendonça and Danni-Oliveira, 2007): Cfa (humid temperate climate with hot summer) and Cfb (humid temperate climate with cool summer). In the territory under study, intense dynamics prevail in atmospheric terms, susceptible to variability and extreme events, in addition to having recorded an episode of meteorological and hydrological drought during the 2020-2021 biennium, which coincided with the pandemic period.

The knowledge obtained until the moment of carrying out the research on COVID-19 and its relationship with the climate was collected and systematized (Wilder-Smith *et al.*, 2020; Zaitchik *et al.*, 2020; WMO, 2022). The particularities of Brazil and the study area (Prata *et al.*, 2020; Martinuci *et al.*, 2020), and aspects of the tropical world were also taken into account during the investigation (Mendonça, 2020).

### 2.2. Data collection and analysis

For the elaboration of this study, the survey and collection of official data on cases and mortality by COVID-19 was carried out with SESA/PR - Paraná State Health Department - for the period from March 2020 to August 2021. Although official, the data contained sub notifications and data damming in some cases, such as Curitiba, which readjusted its case data on December 16, 2020 (increase of 14 thousand cases) and March 7, 2021 (more than 40 thousand cases in one day). Such data were organized by quarters and mapped by cities, based on ArcGIS Pro software, for further spatial analysis of the results. At the same time, the 4 cities in Paraná (Figure 2) that had the most registered cases of COVID-19 were selected: Curitiba, Londrina, Maringá and Foz do Iguaçu, to carry out the survey and analysis of meteorological data, and subsequent correlation with the cases of the disease.

To complement the climate analysis, the results of the SACER – Climate Alert System for Respiratory Diseases (LABOCLIMA, 2022) were used. It is a platform developed by Climatology Laboratory of the Federal University of Paraná during the pandemic to evaluate in the epidemiological weeks the parameters and climatic thresholds (from temperature and humidity) of transmission based on the relationship between the climate and COVID-19. The analysis was carried out in an integrated way, observing all the variables on a daily and weekly level. It is worth noting that the historical series was from March 2020 to May 2021, but the SACER data appear in the chart only after its implementation (April 19, 2020), as it was not produced before that. The Foz do Iguaçu Meteorological Station had problems in generating some data in this period, but it was maintained because it is an important city and was covered by the SACER platform.

## 3. Results

### 3.1. Temporal evolution of the spatial distribution of COVID-19 in Paraná

Regarding the dynamics of COVID-19 in the State of Paraná, it was observed, in the first pandemic quarter (since March 2020), a concentration of cases in cities near to the state capital (Curitiba) and in some cities to the north and west. In the second semester there is an expansion of this area and by cities generally located along the transport axes to the North-RMC-East (RMC: Metropolitan Region of Curitiba). In the second quarter, there is also an expansion in relation to the number of cities affected, leaving a small portion of cities without records in the period from June to August 2020, as well as in the third quarter. In the fourth quarter, between December 2020 and February 2021, all cities in the State were affected by COVID-19 to a lesser or greater extent. A pattern of fewer cases and a lower proportion of incidence of the disease in the Center-South region of the state can be seen in all quarters, and Figure 1 summarizes the information described.

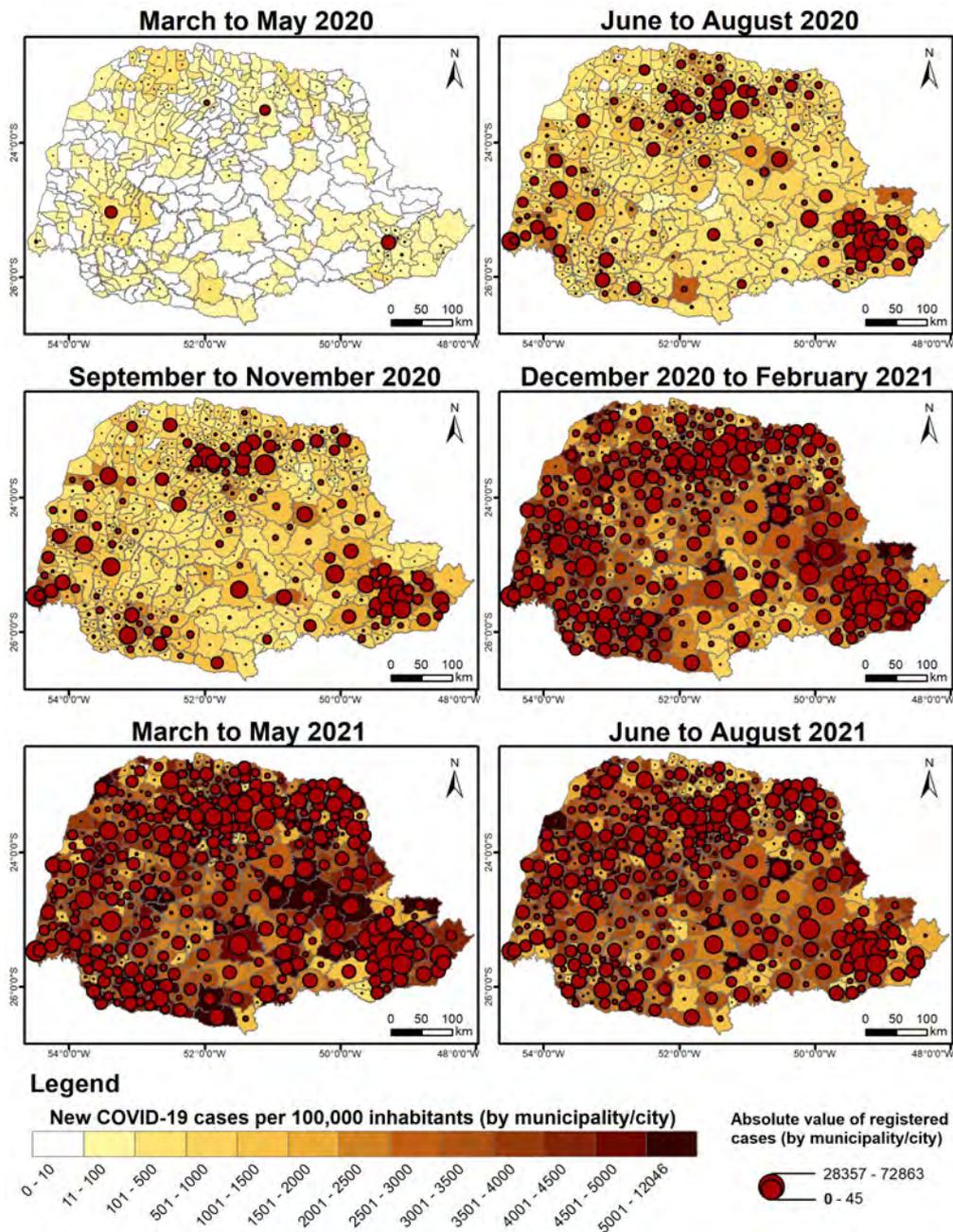
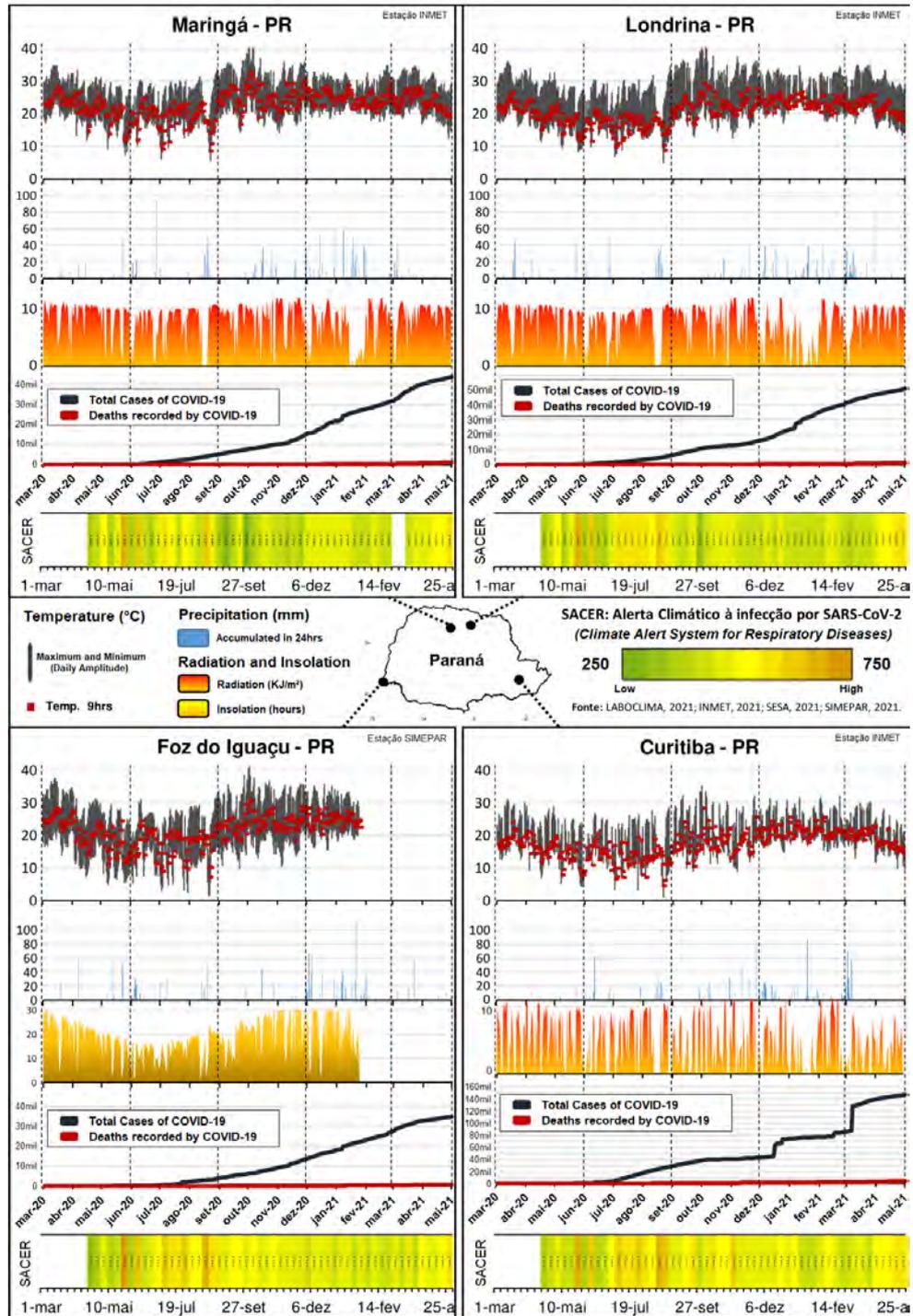


figure 1. Quarterly maps of the temporal and spatial dynamics of COVID-19 cases in the State of Paraná (2020-2021).

The distribution of deaths recorded by COVID-19 followed, in the State of Paraná, the dynamics of cases and transmission, with results similar to Figure 1. It is important to note that the last three quarters (December 2020 to August 2021) were much more contagious and lethal than the first months of the pandemic, referring to issues such as the relaxation of social isolation measures and the entry of new variants of the virus. On August 31, 2021, although vaccination has finally advanced in Brazil, only 28.9% of the population of Paraná had access to the two recommended doses of the vaccine (and were immunized). By the end of 2020, all 399 municipalities in the state were affected by the pandemic, with no exception. In this scenario, there are several possibilities to analyze the temporal and spatial dynamics of the disease and, in a multicausal perspective and considering the different pathogenic complexes involved in the occurrence of COVID-19, the climate must be considered as one of the variables involved in the process of transmission – not necessarily being the main factor. Figure 2 depicts the variability of meteorological elements and climate alert levels (SACER – low to high) for the four cities with the highest number of COVID-19 cases in Paraná.

### **3.2. Relationship between COVID-19 and climate variability**

The Figure 2 depicts the variability of meteorological elements and climate alert levels (SACER – low to high) for the four cities with the highest number of COVID-19 cases in Paraná. In general terms, COVID-19 cases and deaths in the State of Paraná had a significant increase in two main waves/periods: in the beginning of the winter of 2020 and in the end of the summer of 2021. Although seasonally distinct, the first wave of cases occurred a few days after the advance of high intensity cold waves, which affected the State in the months of July and August. In these months, the performance of the Atlantic Polar Air Mass (mPa) stands out, which advanced on August 21, 2020 and caused a drop in temperatures, even causing snow precipitation in some cities in the state. The wind and intense cold, which lead to the agglomeration of people in closed and poorly ventilated environments, added to the less restrictive measures that were adopted this month, may be associated with the increase in the number of cases in the period.



**figure 2.** Climate and COVID-19: daily and weekly situation of the main cities in the State of Paraná.

In addition to the weather and climate mentioned above, one must also consider the intensification of the fragility of the respiratory tract in winter situations and the greater occurrence of different types of influenza. At the height of the first wave, SACER recorded much higher levels of climate alert for the four cities evaluated, with high values greater than 550 and which even exceeded 650.

In the case of the second wave of cases, when there was a significant increase in the number of COVID-19 records (after January 2021), there was a predominance of hotter days and one less rainy than in the previous year. SACER started to register higher levels of weather alert from the end of February, which may have favored the spread of the disease, which was already on the rise over the following months. However, although it may have contributed, the main trigger of this process may have been the

relaxation of preventive measures by the population, which was intensified by the entry of new, more transmissible variants of the virus (strain P.1). In this circumstance, climate dynamics had the potential to affect, for example, human behavior, an important factor that influences contact between people and social isolation, preventing (or facilitating) the transmission of the disease by droplets expelled by contaminated users.

Thus, it was noted that the spread of the virus through the territory occurred in dependence on territorial structures and dynamics, a process very similar to that verified by Martinuci et al. (2020). Curitiba, due to the greater concentration of national and international air connections through airports, in addition to the high population, was the location that recorded the first cases of COVID-19 and the reflexes of the new strains at the beginning of 2021, a performance that is in accordance with the models systematized by Spengler et al. (2021). Maringá and Londrina, cities relatively close together in the north of the state and with a Cfa-type climate (according to the Köppen classification), showed similar behavior, both from the climatic point of view and in the records of cases and deaths from the disease. Foz do Iguaçu, being located in a border region with Argentina and Paraguay, which were closed until October 15, 2020, had the first wave much milder than the second, even though SACER recorded higher levels of climate risk in the winter.

Therefore, although the underreporting and damming of data may have hindered the analysis a little, it was possible to recognize the climate as one of the components of a complex system of multicausalities, but which did not prove to be the determining factor in the transmission process of COVID-19. In that regard, it is worth mentioning the climatic/meteorological influence on the virus (direct influence) has not yet been clearly proven, especially since the transmission and contamination of the disease occurred in practically under the different climatic types of the Planet. Zaitchik et al. (2020) show that «Early studies of weather, seasonality, and environmental influences on COVID-19 have yielded inconsistent and confusing results», and among other issues, the «Government interventions rather than meteorological factors primarily curb COVID-19 spread» (WMO, 2022). Transmission was shown to be influenced by many factors including socioeconomic, demographic and environmental aspects, and the climate can influence this process and the behavior of society (indirect influence) (Byun et al., 2021).

#### 4. Conclusion

From the research carried out, it was possible to observe the dynamics of transmission of COVID-19 over time in the State of Paraná, as well as to highlight the variation in the number of cases/deaths in relation to atmospheric conditions and prevailing climate alert levels. Specifically, transmission was found to intensify during the autumn and winter season, although it was also important during spring and summer.

Regarding this issue, the direct and indirect influences of the climate on the behavior of the population, especially with regard to social isolation, were evidenced in the study, considering them as complementary factors of a multicausal relationship. Based on the results obtained here, progress should be made in understanding the other factors for a better understanding of the dynamics of the pandemic, such as barrier gestures (respected or not), emergence of new variants of COVID-19, epidemiological and contagious aspects of the virus, and others, based on new scientific advances and recent literature. Science must greatly advance in the investigation of the relationship between climate and COVID19, both in the direct and indirect influence on the pathogen and on human organisms and their population.

**Acknowledgement:** CAPES (Ministry of Education of Brazil) and UFPR for supporting the development of the research.

#### Bibliography

Araujo, M. B., & Naimi, B., 2020 : Spread of SARS-CoV-2 Coronavirus likely to be constrained by climate. *MedRxiv*.

- Auler, A. C., Cássaro, F. A. M., Da Silva, V. O., & Pires, L. F., 2020 : Evidence that high temperatures and intermediate relative humidity might favor the spread of COVID-19 in tropical climate: a case study for the most affected Brazilian cities. *Science of the Total Environment*, 729, 139090.
- Besancenot, J. P., 2015 : *Climat et santé* (Medicine et santé). Presses universitaires de France.
- Byun, W. S., Heo, S. W., Jo, G., Kim, J. W., Kim, S., Lee, S., ... ?? & Baek, J. H., 2021. : Is coronavirus disease (COVID-19) seasonal? A critical analysis of empirical and epidemiological studies at global and local scales. *Environmental Research*, 196, 110972.
- Chan, K. H., Peiris, J. M., Lam, S. Y., Poon, L. L. M., Yuen, K. Y., & Seto, W. H., 2011 : The effects of temperature and relative humidity on the viability of the SARS coronavirus. *Advances in virology*,
- Fisman, D. N., 2007: Seasonality of infectious diseases. *Annu. Rev. Public Health*, 28, 127-143.
- Laboclima, 2022 : *Laboratório de Climatologia*. UFPR. <http://www.terra.ufpr.br/portal/laboclima/>
- Lowen, A. C., & Steel, J., 2014 : Roles of humidity and temperature in shaping influenza seasonality. *Journal of virology*, 88(14), 7692-7695.
- Martinuci, O. S., Endlich, Â. M., Montanher, O. C., Felini, M. G., Rigoldi, K. C., Caraminan, L. M., ... & Ferreira, M. R., 2020 : Dispersão da covid-19 no estado do paraná. *Hygeia-Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde*, 251-262.
- Matoba, Y., Aoki, Y., Tanaka, S., Unno, M., Komabayashi, K., Ikeda, T., ??& Mizuta, K., 2018 : The trends of human coronaviruses in Yamagata, Japan, in 2015 to 2016: Occurrence of OC43 outbreak in June 2016. *Japanese Journal of Infectious Diseases*, JJID-2017.
- Mendonça, F. ; Danni-Oliveira, I.M. 2007. Climatologia : No es básicas e climas do Brasil. São Paulo : Oficina de Textos.
- Mendonça, F., 2020 : Mudanças climáticas e saúde – Concep es, desafios e particularidades do mundo tropical. In: Murara, P. G. S.; Aleixo, N. C. R. *Clima e saúde no Brasil*. Jundiá/SP: Paco Editorial, 309-336.
- Nitsche, P. R., Caramori, P. H., Ricce, W. S., & Pinto, L. D., 2019 : *Atlas climático do estado do Paraná*. Londrina, PR: IAPAR.
- Prata, D. N., Rodrigues, W., & Bermejo, P. H., 2020 : Temperature significantly changes COVID-19 transmission in (sub) tropical cities of Brazil. *Science of the Total Environment*, 729, 138862.
- Shi, Y., Yu, X., Zhao, H., Wang, H., Zhao, R., & Sheng, J., 2020 : Host susceptibility to severe COVID-19 and establishment of a host risk score: findings of 487 cases outside Wuhan. *Critical care*, 24(1), 1-4.
- Sorre, M., 1984: *A adapta o ao meio climático e biossocial–geografia psicol gica*. Max Sorre. São Paulo:  tica, (46).
- Spengler, H. C., Loch, G. V., & Scarpin, C. T., 2021 : SEIR Subregion Model Analysis: a case study of Curitiba. *IEEE Latin America Transactions*, 19(6), 1050-1056.
- Tamerius, J. D., Shaman, J., Alonso, W. J., Bloom-Feshbach, K., Uejio, C. K., Comrie, A., & Viboud, C., 2013 : Environmental predictors of seasonal influenza epidemics across temperate and tropical climates. *PLoS pathogens*, 9(3), e1003194.
- Weiss, S. R., & Leibowitz, J. L., 2011: Coronavirus pathogenesis. *Advances in virus research*, 81, 85-164.
- WHO, 2022: *World Health Organization*. Responding to Community Spread of COVID-19. <https://www.who.int/>
- Wilder-Smith, A., Chiew, C. J., & Lee, V. J., 2020 : Can we contain the COVID-19 outbreak with the same measures as for SARS?. *The lancet infectious diseases*, 20(5), e102-e107.
- Yuen, K. S., Ye, Z. W., Fung, S. Y., Chan, C. P., & Jin, D. Y., 2020 : SARS-CoV-2 and COVID-19: The most important research questions. *Cell & bioscience*, 10(1), 1-5.
- Zaitchik, B. F., Sweijid, N., Shumake-Guillemot, J., Morse, A., Gordon, C., Marty, A., ... & Rod , X., 2020 : A framework for research linking weather, climate and COVID-19. *Nature communications*, 11(1), 1-3.

## CONTRIBUTION À L'ÉTUDE DES AMBIANCES CONTRAIGNANTES CHAUDES LIÉES À L'HUMIDITÉ DE L'AIR EN TUNISIE

**Mustapha RIAHI<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Université de Jendouba, Laboratoire Géomatique des Géosystèmes, [riahimostapha@gmail.com](mailto:riahimostapha@gmail.com)

**Résumé :** Un air excessivement humide peut être un facteur de risque important puisque l'air humide entrave l'évacuation de la vapeur d'eau par la respiration et la sueur, ce qui altère la qualité de confort thermique et accroît le stress voire le danger lié à la chaleur. Dans ce travail, on se propose d'étudier les ambiances stressantes chaudes générées par l'humidité relative de l'air en Tunisie. L'impact de l'humidité de l'air sera examiné, uniquement, pour des classes de chaleur intermédiaires car dès qu'il s'agit de chaleur paroxysmique, il n'est plus le meilleur discriminant notamment pour la Tunisie (Ben Boubaker 2010). On se propose, donc, d'analyser la fréquence de ces ambiances contraignantes dans quelques stations côtières tunisiennes. L'étude sera menée sur la période 1997 – 2016 en utilisant des données météorologiques et des indices appropriés.

**Mots clés :** température, humidité relative, ambiance contraignante, Tunisie.

**Abstract:** Excessively humid air can be a significant risk factor since humid air hinders the evacuation of water vapor through breathing and sweat, which alters the quality of thermal comfort and increases stress or even danger related to heat. In this work we propose to consider the study of hot stressful environments generated by the relative humidity of the air. The impact of air humidity will be examined only for intermediate heat classes because when it comes to paroxysmal heat, it is no longer the best discriminating in particular for Tunisia (Ben Boubaker 2010). We propose, therefore, to analyze the frequency of these constraining atmospheres in some Tunisian coastal stations. The study will be conducted over the period 1997 – 2016 using meteorological data and appropriate indices.

**Keywords:** temperature, relative humidity, restrictive atmosphere, Tunisia.

### Introduction

En saison chaude, qu'il s'agisse d'ambiances contraignantes ou d'ambiances rafraichissantes, elles sont essentiellement tributaires des conditions thermiques. Néanmoins, les autres paramètres de définition d'ambiance, comme le vent et l'humidité relative, sont aussi importants dans la mesure où ils contribuent soit à accentuer ou atténuer ces conditions.

Dans cette étude, l'examen des ambiances contraignantes chaudes est abordé sous l'angle de l'impact de l'humidité relative de l'air, et ce pour deux raisons. D'abord, en saison chaude, l'influence de l'humidité atmosphérique sur la température est plus importante que la vitesse du vent. Ensuite, abstraction faite des conditions de températures stressantes très élevées, l'humidité atmosphérique élevée s'impose comme un meilleur discriminant de fortes chaleurs dès qu'il s'agit de classes de températures intermédiaires. Elle renforce la sensation de chaleur en occasionnant des ambiances contraignantes malgré la présence de températures modérées.

Il s'agit, dans ce travail, de calculer les ambiances contraignantes générées par l'humidité relative de l'air qui demeurent encore méconnues afin de les dissocier des ambiances contraignantes d'origine essentiellement thermique. Pour des raisons de comparaison, le calcul des ambiances contraignantes déterminées par l'excès de température sera également effectué.

On se propose donc d'analyser la fréquence de ces ambiances contraignantes dans quelques stations côtières tunisiennes. L'étude sera menée à partir de données météorologiques et des indices appropriés

## 1. Données et méthodes

### 1.1 Données

Dans cette étude nous cherchons à mettre en évidence les ambiances contraignantes chaudes d'origine hygrométrique dans quelques stations côtières tunisiennes. La quantification de ces ambiances est réalisée à partir de données trihoraires de température de l'air et d'humidité relative de l'air. Les relevés retenus sont ceux de 9h, 12h, 15h et 18h heure mondiale (10h, 13h, 16h et 17h heure locale) et concernent la station météorologique de Tunis Carthage située sur la façade orientale et la station de Tabarka située sur la façade septentrionale à l'extrême nord-ouest de la Tunisie (Figure1). Ces données couvrent la période 1997-2016 et sont gracieusement fournies par l'Institut National de la Météorologie (INM).

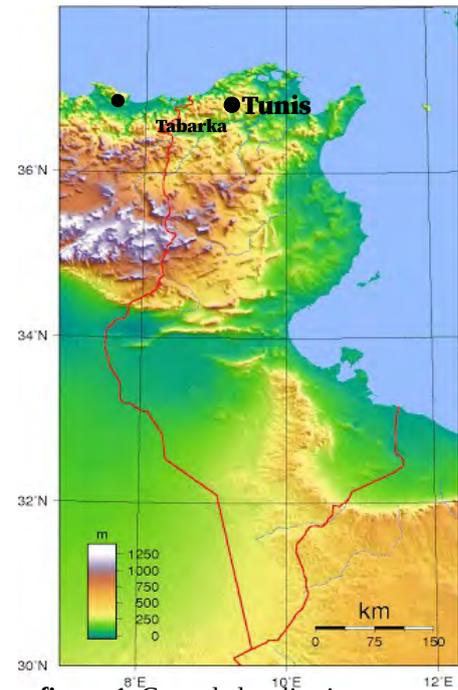


figure 1. Carte de localisation

### 1.2 Méthode

La caractérisation des ambiances contraignantes d'origine hygrométrique nous a incités à opter pour l'approche bioclimatique. Dans une première étape, il s'agit de retenir un seuil thermique ayant une référence physiologique, à savoir 33°C qui correspond à la température ordinaire de la peau (Vigneau 2000). En effet, au-delà de 33°C, l'homme au repos commence à ne plus pouvoir émettre toute sa chaleur, ce qui accentue la sensation d'inconfort. Compte tenu de ces considérations, nous tenons à clarifier que les cas des ambiances contraignantes liées à l'humidité de l'air sont distingués lorsque la température de l'air est inférieure à 33°C. Ces classes de températures, jugées comme ordinaires en Tunisie, génèrent des ambiances contraignantes lorsqu'elles se combinent à des humidités élevées.

En deuxième étape nous utilisons l'indice THI de Thom. Cet indice donne la température ressentie en combinant la température mesurée de l'air (en °C, notée ici T°) et l'humidité relative de l'air (en % notée ici U%) (Besancenot 1990). Il est couramment utilisé en Tunisie pour déterminer les ambiances chaudes. Il est jugé assez fiable et peu complexe. Il s'exprime comme suit :

$$\text{THI} = T^\circ - ((0,55 - 0,0055 * U\%) * (T^\circ - 14,5))$$

Tableau 1. Classes des ambiances thermiques selon l'indice THI de Thom.

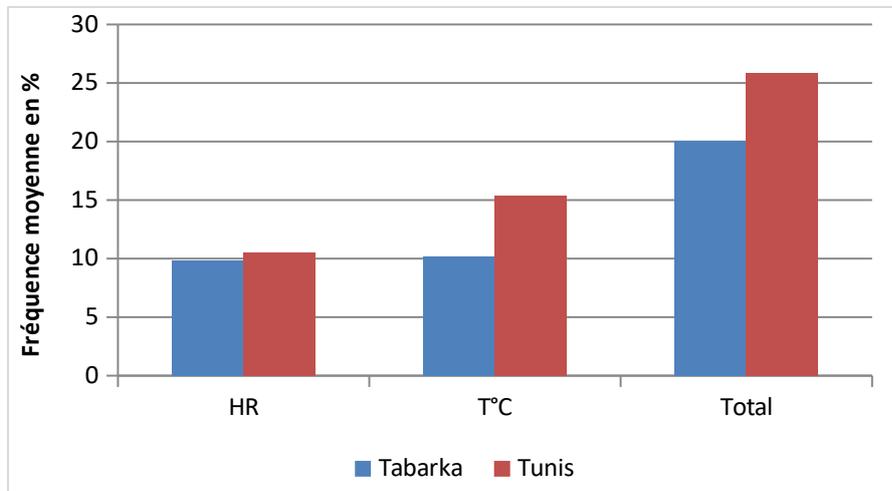
Classes	Très Froid	Froid	Frais	Confortable	Chaud	Très chaud	Torride
Limites	< - 1,7	- 1,7 à 12,9	13 à 14,9	15 – 19,9	20 – 26,4	26,5 – 29,9	> à 29,9

Source : Besancenot 1990

Il est associé à des classes d'ambiances thermiques (Tableau 1). Par ailleurs, dans cette étude, les ambiances contraignantes sont identifiées dès que l'on passe en classe très chaude. Il est à signaler, d'autre part, que l'indice THI présente quelques imperfections. En effet, le seuil de 29,9° de la classification originelle a été remplacé par 29° car avec une température mesurée de 43°C et une humidité relative de 15%, le THI indique une température de 29,7° ; or, une telle ambiance ne peut être que torride.

## 2. Résultats

### 2.1 Répartition des ambiances contraignantes en saison chaude

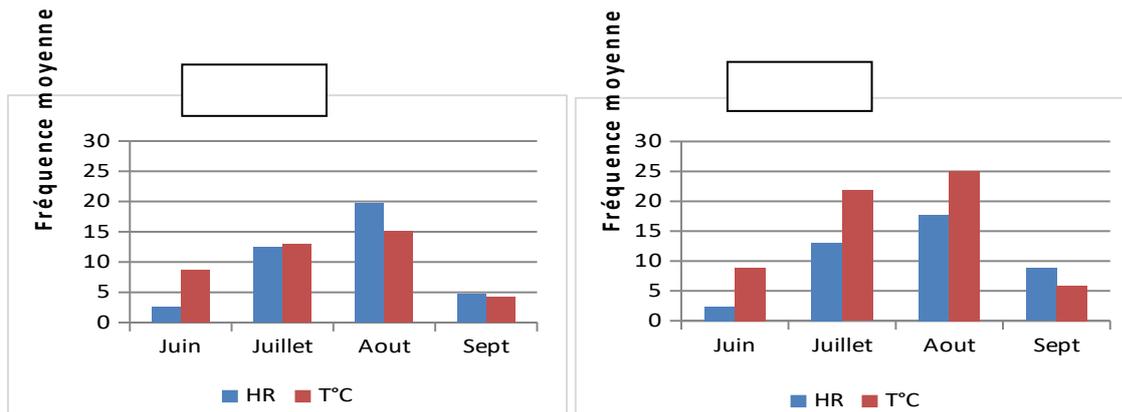


**figure 2.** Répartition moyenne des ambiances contraignantes liées à l'humidité relative (HR) et à la température (T°C) en saison chaude (moyenne 1997 – 2016).

En saison chaude (de juin à septembre), les ambiances contraignantes connaissent une part non négligeable avec 1/5 et plus du quart des observations trihoraires, respectivement à Tabarka et à Tunis (Figure 2). La part des ambiances contraignantes occasionnées par l'humidité de l'air (pour  $T < 33^{\circ}\text{C}$ ) est quasi-égale dans les deux stations, autour de 10%. Les ambiances stressantes engendrées par l'excès de température ( $T \geq 33^{\circ}\text{C}$ ) connaissent la même fréquence d'occurrence que les précédentes, à Tabarka ; tandis qu'à Tunis, elles voient leur part augmenter au-delà de 15%, en raison du phénomène de l'îlot de chaleur urbain qui provoque l'élévation de la température et explique l'importance de ces ambiances comparativement à Tabarka.

### 2.2 Répartition mensuelle

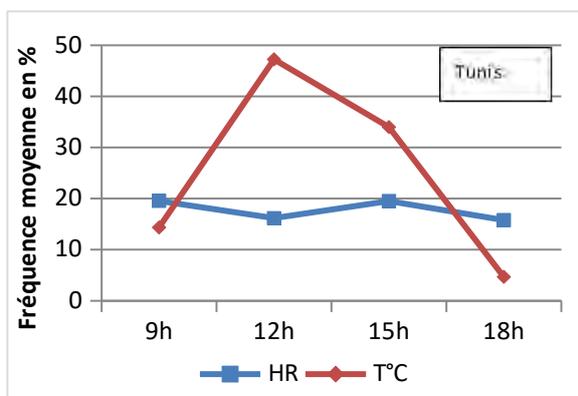
À l'échelle mensuelle, les ambiances contraignantes liées à une humidité relative élevée se concentrent au mois d'août (Figure 3). Elles le sont plus à Tabarka avec environ 20% des observations moyennes trihoraires contre environ 15% des observations moyennes pour les ambiances stressantes liées aux fortes températures. À Tunis, ce sont, plutôt, les ambiances contraignantes dues à la forte température qui prennent le dessus avec plus du quart des observations moyennes trihoraires. Les ambiances stressantes dues à la forte humidité sont, certes, moins fréquentes mais leur part demeure assez significative avec 18% soit 42% du total des ambiances contraignantes. Au mois de juillet, l'inconfort diminue relativement. À Tabarka, que les deux catégories se partagent la dominance avec des fréquences supérieures à 12%. À Tunis, l'inconfort lié aux fortes températures devance celui engendré par les humidités élevées avec respectivement 22% et 13%. À Tunis, ce n'est qu'au mois de septembre que l'inconfort lié à l'humidité élevée prend le dessus sur l'inconfort lié aux fortes températures avec respectivement 9% et 6%.



**figure 3.** Répartition mensuelle des ambiances contraignantes liées à l'humidité (HR) et à la température (T°C) (moyenne 1997 – 2016).

### 2.3 Variation tri-horaire des ambiances contraignantes

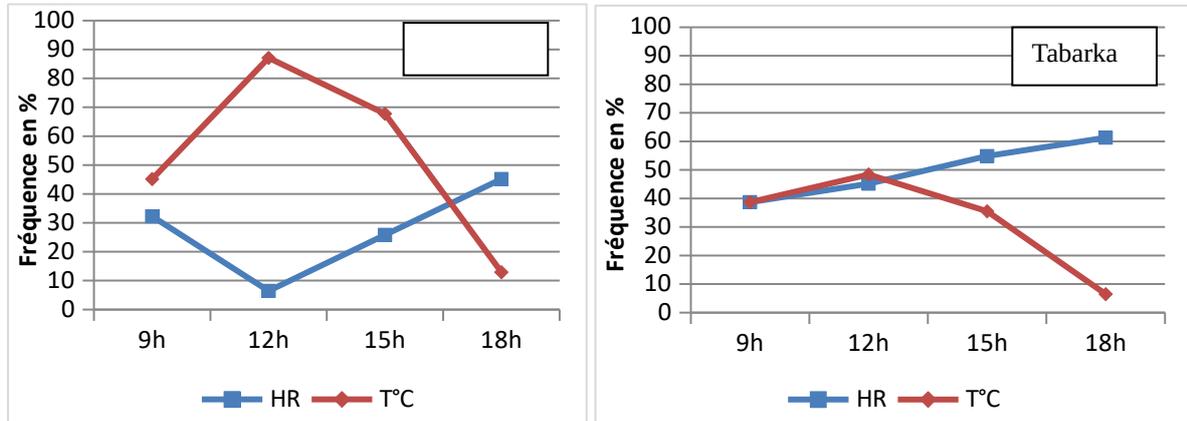
À Tunis, l'effet de la température sur l'évolution tri-horaire des ambiances contraignantes est primordial. Au mois d'août, mois le plus chaud, cet effet est très manifeste notamment à midi (Figure 4) avec un taux qui frôle 50% des observations moyennes tri-horaires. L'après-midi est sensiblement moins chaud avec une fréquence qui tourne autour du 1/3 des observations. Pendant le reste de la journée, la situation s'inverse et le rôle joué par l'humidité dans l'inconfort devient plus marqué, surtout au début de la soirée. À Tabarka, l'évolution journalière des ambiances stressantes au mois d'août montre qu'elles sont relativement plus impactées par l'humidité comparativement à la température. Tout au long de la journée, la courbe de l'inconfort d'origine hygrométrique surmonte celle de l'inconfort lié à la température. Les écarts, en termes de fréquences, sont peu significatifs mis à part à 18 h où ils se creusent légèrement. Ces divergences de l'évolution journalière des ambiances tiennent, en fait, aux sites des deux stations. En effet, à Tabarka, plus proche du littoral (à 2 km seulement de la mer), les températures enregistrées à 15h sont presque égales à celles relevées à midi car la brise s'y déclenche plus tôt (entre midi et 13h), comparativement à Tunis, d'où son effet rafraîchissant. D'autre part, cette position de bord de mer fait augmenter l'inconfort en raison de l'humidité élevée de l'air marin. Cependant, à Tunis-Carthage, plus éloignée de la mer (environ 10 km de la côte), la température est plus élevée à midi qu'à 15h car la brise de mer se déclenche tard par rapport à Tabarka ; elle est bien développée vers 15h (sa vitesse moyenne varie de 5 à 8 m/s). Cette localisation permet à l'air marin de pénétrer dans le continent et de devenir moins humide ce qui réduit l'inconfort lié à l'humidité atmosphérique à la station de Tunis (Dahech 2014).



**figure 4.** Répartition moyenne quotidienne des ambiances contraignantes liées à l'humidité (HR%) et à la température d'après l'indice THI (1997 – 2016).

Cette fréquence moyenne ne révèle pas suffisamment la fréquence exceptionnelle lors de certaines années particulièrement chaudes, en l'occurrence le mois d'août 2003 (Figure 5). À Tunis, le rôle de la

température à midi dans la genèse du stress est décisif (près de 90%) ; l'après-midi, la situation rappelle celle de 12h. À Tabarka, les deux courbes se superposent lors de la première moitié de la journée, tandis qu'elles se détachent au cours de la deuxième moitié de la journée (15h – 18h). À 18h, l'écart devient très significatif et les ambiances contraignantes générées par l'humidité représentent plus de 61% des observations du mois d'août, contre 6% seulement pour les ambiances contraignantes occasionnées par la température.



**figure 5.** Répartition quotidienne des ambiances contraignantes liées à l'humidité (HR%) et à la température d'après l'indice THI (Août 2003).

## 2.4 Facteurs aérologiques générateurs des ambiances contraignantes chaudes

La journée du 25 août 2003 a été marquée par la présence d'ambiances très chaudes, voire même torrides. Pourtant, à Tabarka, les températures n'ont pas été excessives pour cette saison.

**Tableau 2.** Relevés trihoraires de température et d'humidité relative observées le 25 août 2003

Heure	Température mesurée °C				Humidité relative en %				THI en°			
	9h	12h	15h	18h	9h	12h	15h	18h	9h	12h	15h	18h
Tunis	33,8	39,2	35,1	31,1	32	27	53	60	26,6	29,3	29,8	27,6
Tabarka	29,8	31,3	30,1	28,3	88	77	83	88	28,8	29,2	28,6	27,4

La situation de 25-08-2003 se caractérise par l'établissement d'un champ de basse pression sur la Méditerranée centrale et la Tunisie. L'isobare 1012 hPa passe par la station de Tabarka pour longer la côte orientale avant de rejoindre la Méditerranée orientale (Figure 6). Cette situation véhicule vers la Tunisie septentrionale un flux de Nord dont l'humidité relative dépasse, très souvent, la barre de 80% à Tabarka. Elle rend l'atmosphère suffocante et explique l'existence de cette ambiance sur la côte. À Tunis, l'existence de cette ambiance tient essentiellement aux températures excessives surtout au milieu de la journée, mais aussi à l'air marin assez humide en après-midi et en fin de journée.

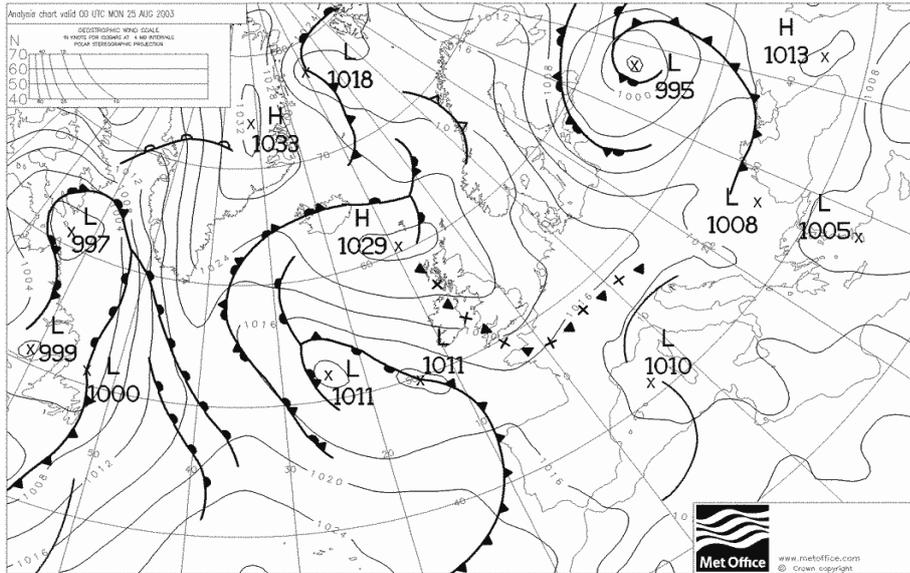


figure 6. Champ barométrique de surface du 25 août 2003.

## Conclusion

L'examen des ambiances contraignantes en saison chaude a montré un poids variable de la température et de l'humidité relative de l'air dans la détermination de l'inconfort thermique. Ce poids révèle les caractéristiques du site des deux stations d'étude. À Tunis, agglomération abritant plus de 2,5 millions d'habitants en 2014, l'îlot de chaleur urbain est la principale origine des températures excessives. Celles-ci, expliquent l'existence de cette ambiance thermique extrême notamment aux heures les plus chaudes de la journée alors que l'impact de l'humidité se manifeste surtout à la fin de la journée. À Tabarka, les températures peu excessives, conséquences de l'effet modérateur de la mer, sont contrebalancées par une humidité atmosphérique assez élevée et parfois excessive favorisant l'apparition d'ambiances suffocantes chaudes et humides.

## Bibliographie

- Ben Boubaker H., Chehaieb S., et Aguerbi-Jaouadi H., 2018 : Les nuits tropicales, révélatrices d'un risque thermique majeur en Tunisie : approche méthodologique. *Publication de l'AIC*, Nice, pp. 68-73.
- Ben Boubaker H 2015 : Les vagues de chaleur en Tunisie. In *Contribution à l'étude des risques climatiques en Tunisie*. Collectif, Coord. Henia L. et Hlaoui Z. Edition Université Tunis p. 126-161
- Boubaker H., 2010 : Les paroxysmes climatothermiques en Tunisie : approche méthodologique et étude de cas. *Climatologie*, vol. 7, p. 57- 87.
- Ben Boubaker H., 2008 : Le flux de Sud-Est maritimisé (*Chlouk*) et ses ambiances bioclimatiques en Tunisie. *Bioclimatologie et topoclimatologie*. Publication F.L.A.H. Manouba. p. 151-172.
- Besancenot JP., 1990 : *Climat et tourisme*. Edit. Masson, 223p.
- Dahech S., 2014 : Impact de la brise de mer sur le confort thermique au Maghreb oriental durant la saison chaude. *Cybergéo*, 38p.
- Vigneau J. P., 2000 : *Géoclimatologie*. Editions Ellipses, 334 pages.

## PERCEPTION DE LA FORTE CHALEUR DANS L'AGGLOMÉRATION DE KAIROUAN (TUNISIE)

Mohamed CHEBLI<sup>1et2</sup>, Sami CHARFI<sup>1</sup>, Salem DAHECH<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Université de Sfax, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, SYFACTE, (cheblimohamed3@yahoo.fr) (charfisami\_geo@yahoo.fr),

<sup>2</sup>Université de Paris Diderot, UMR PRODIG (salem.dahech@gmail.com)

**Résumé :** Kairouan est une ville de la rive sud de la Méditerranée. Elle est marquée par une forte occurrence des jours de forte chaleur. Le site de la ville, au fond d'une cuvette à 50 km de la mer, accentue la sensation du stress thermique. Une enquête menée dans l'agglomération de Kairouan en 2021 auprès de 425 chefs de ménage montre que 70.5% de la population enquêtée souffrent de la forte chaleur et de l'inconfort thermique pendant les vagues de chaleurs. La sensation de l'inconfort thermique s'amplifie chez les ménages non équipés en climatisation (environ 60 %) et quand les maisons sont mal isolées (75%).

**Mots clés :** Kairouan, forte chaleur, vulnérabilité, stress thermique

**Abstract :** Kairouan is a city on the south bank of the Mediterranean. It is marked by a high occurrence of hot days. The location of the city, at the bottom of a basin 50 km from the sea, accentuates the feeling of heat stress. A survey conducted in the Kairouan agglomeration in 2021 among 425 heads of households show that 70.5% of the population surveyed suffer from high heat and thermal discomfort during heat waves. The feeling of thermal discomfort is amplified in households not equipped with air conditioning (about 60%) and when the houses are poorly insulated (75%).

**Key words :** Kairouan, heat waves, vulnerability, heat stress

### Introduction

Depuis les années quatre-vingt, une augmentation du nombre de jours exceptionnellement chauds a été observée à l'échelle mondiale (Cuesta et al., 2017). Les vagues de chaleur sont devenues plus fréquentes dans le nouveau contexte des changements climatiques (GIEC, 2014). Elles constituent un défi supplémentaire pour les populations vulnérables et leurs activités, particulièrement en Afrique. Les risques liés aux canicules suscitent beaucoup d'intérêt en raison de leurs répercussions sur la santé et le bien-être humain (Myers et Patz, 2009, Costello et al., 2009). Les agglomérations sont particulièrement touchées par la forte chaleur en raison de l'impact de l'îlot de chaleur urbain. La vulnérabilité de la population face à la forte chaleur en ville, dépend de plusieurs facteurs comme la qualité des services de santé, les conditions de vie, et les stratégies d'adaptation aux échelles multiples, allant de l'individu à l'état (Nitschke et al., 2011). Éventuellement, les perceptions des risques liés à la forte chaleur peuvent influencer le comportement des citoyens (Michelozzi et al., 2005).

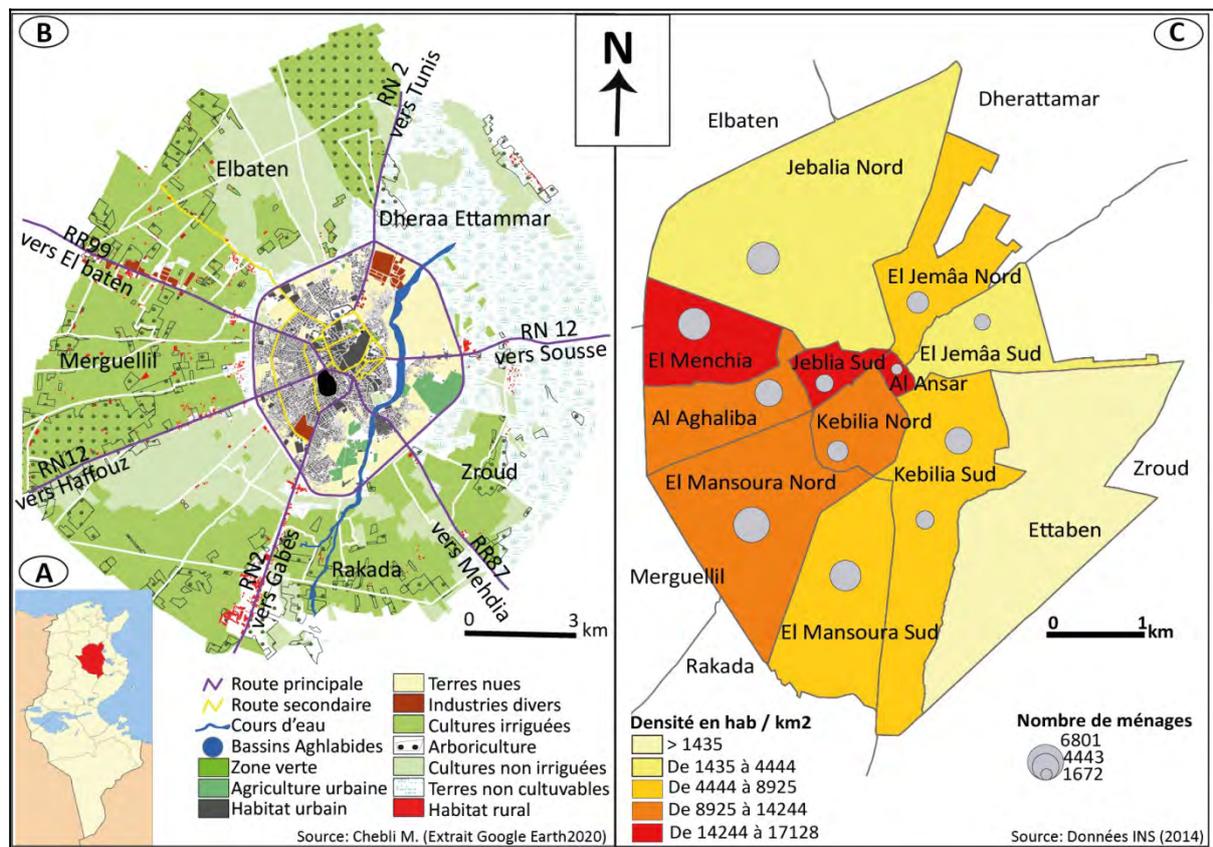
En Tunisie, sur la rive méridionale de la Méditerranée, les villes continentales, à l'instar de Kairouan, sont plus touchées par les vagues de chaleur en été (Ben Boubaker, 2010). La vague de chaleur la plus récente qui a touché la population Kairouanaise en 2021 est considérée parmi les plus intenses et les plus longues. En effet, elle a duré du 23 juillet au 17 Août 2021 avec un record de 50,3°C (le 11/08/2021) et des températures maximales au-dessus de 40°C durant 23 jours. De telle vague de chaleur pourraient être à l'origine de cas de détresse émotionnelle et psychologique pour de nombreuses personnes, en particulier celles qui sont plus vulnérables. Par ailleurs, les attitudes et la perception de la population des vagues de chaleur, peuvent être façonnées par leurs connaissances et informations préexistantes qu'ils reçoivent de nombreuses sources. Il est donc intéressant d'examiner la perception des vagues de chaleur par la population Kairouanaise dans un contexte climatique global et local marqué par une fréquence accrue des canicules. Le but de cette étude est d'évaluer le degré de vulnérabilité humaine face à la forte

chaleur en examinant deux éléments majeurs : la sensibilité de la population et sa capacité de réponse. Les résultats sont issus d'une enquête menée auprès de 425 ménages répartis dans douze quartiers.

## 1. Cadre spatial et méthodologie

### 1.1. Cadre spatial

L'agglomération de Kairouan est située au Centre-Ouest de la Tunisie à 50 km du littoral (fig. 1). Elle s'étale sur 23 km<sup>2</sup> et compte 200 000 habitants (INS, 2014). Elle est marquée par la rareté des espaces verts et des plans d'eau. Le tissu urbain est dominé par les constructions de faible hauteur (fig. 1). La densité urbaine dépasse 8000 hab/km et « *avoisine le double dans les secteurs populaires denses comme EL Menchia à l'ouest de l'agglomération* » (Chebli et al., 2020).



**figure 1** : Localisation (A), Occupation du sol (B), densité urbaine et nombre ménages par secteur (C) à Kairouan

Kairouan, dotée d'un climat méditerranéen a été chaud et sec (fig.2A), est implantée sur une plaine basse dominée par les cultures irriguées et drainées pas un réseau hydrographique assez dense et ceinturé par des collines molles inférieures à 200 mètres d'altitude (fig. 3A). Le vent est faible à modéré toute l'année.

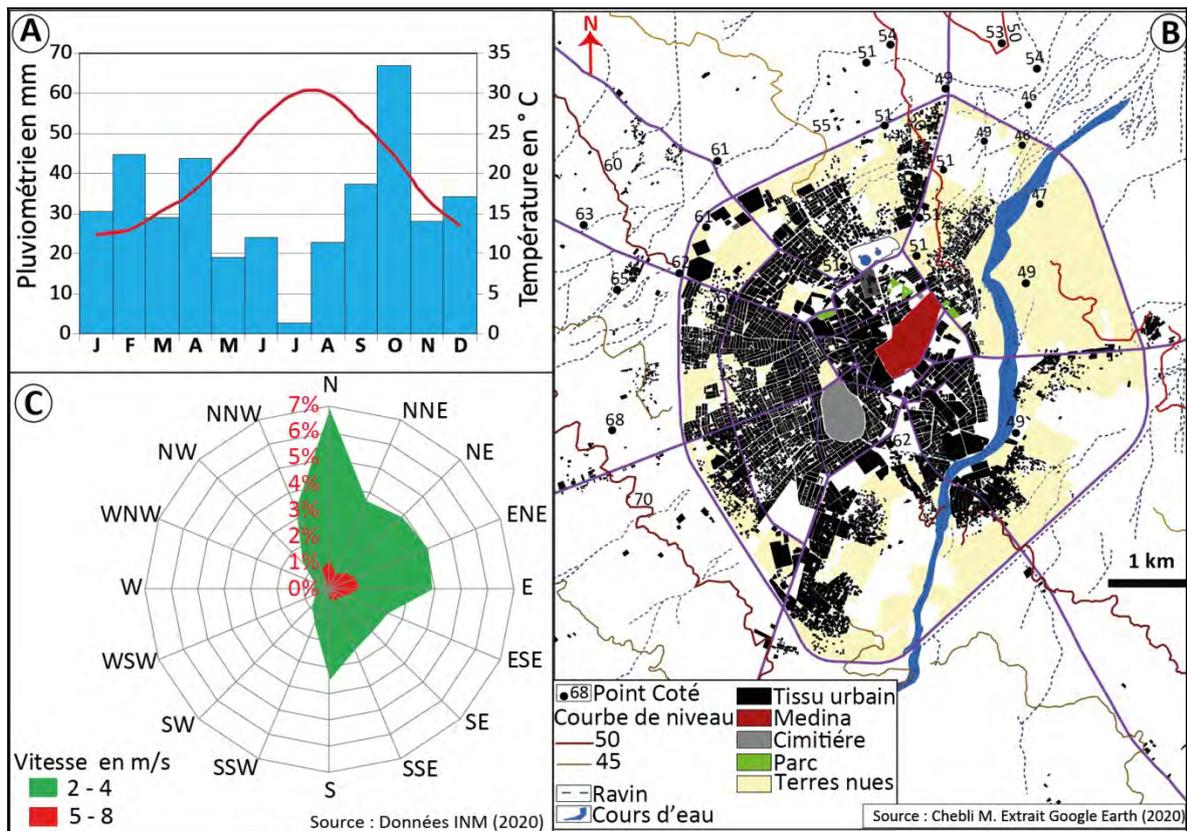
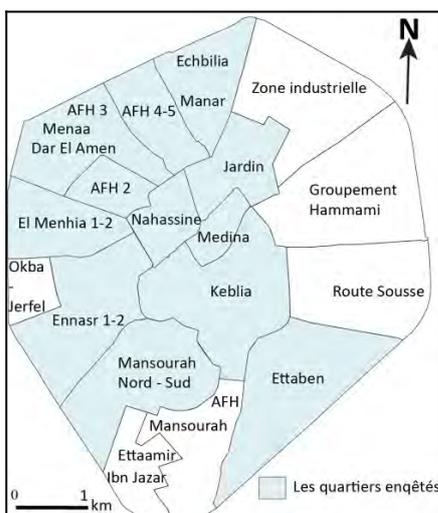


figure 2 : Diagramme ombrothermique (A), rose moyenne annuelle du vent sur la période 1973-2019 (C), courbes de niveau et réseaux hydrologique de la ville de Kairouan (B).

## 1.2. Méthodologie

Nous avons développé une enquête transversale et quantitative pour étudier la vulnérabilité de la population Kairouanaise face à la forte chaleur au niveau individuel, et cerner les facteurs potentiels de risque.



L'enquête a été menée par deux enquêteurs au mois de mars 2021 dans douze quartiers de l'agglomération de Kairouan auprès de 425 personnes (fig. 3). Certaines questions demandent à la fois des réponses fermées et ouvertes. Nous avons utilisé un échantillonnage stratifié en fonction des paramètres socio-économiques. Au moins vingt personnes ont été enquêtées pour chacun des douze quartiers sondés. Les questions ont été administrées en arabe (dialecte locale).

figure 3 : Localisation des quartiers enquêtés

## 2. Résultats

### 2.1. Caractéristiques démographiques des répondants

Le tableau 1 synthétise certaines caractéristiques démographiques des enquêtés. Plus de la moitié des répondants (70.30 %) étaient des hommes. La majorité d'entre eux (76,52 %) appartient à la tranche d'âge 20-60 ans. Plus de 1/3 des répondants (29.28 %) ont un niveau d'instruction primaire et 44.75 % des enquêtés ont arrêté leurs parcours scolaires au lycée. L'enquête nous fournit aussi une idée sur le revenu mensuel des ménages enquêtés, ce qui renseigne sur le niveau de vie de la population. En effet, la moitié des répondants (56,63 %) ont un revenu ne dépassant pas 800 dinars tunisien (287 \$), 27.06 % sont des chômeurs et 27.90 % sont des ouvriers.

**Tableau 1** : Quelques caractéristiques démographiques des enquêtés

Caractéristiques démographiques (n= 425)		Pourcentage (%)
Sexe	H	70.44
	F	29.56
Age	<20	9.72
	20 – 40	43.06
	40 – 60	34.17
	>60	13.06
Scolarité	An alphabétique	7.73
	Primaire	21.55
	Secondaire	44.75
	Supérieur	25.97
Revenu en DT	< 800	56.63
	800 - 1500	31.49
	> 1500	7.73

Ces pourcentages concordent avec ceux fournis par le dernier recensement national de la population daté de 2014 pour les délégations de Kairouan Nord et Sud qui forment le noyau central de l'agglomération de Kairouan. Ainsi, Kairouan enregistre les taux de pauvreté les plus élevés en Tunisie selon le rapport de l'institut national de statistique en 2020.

Source : Enquête personnelle (Mars 2021)

### 2.2. Perception de la variabilité temporelle des fortes chaleurs par les enquêtés

Les fortes chaleurs sont perceptibles à partir du mois de mai jusqu'au mois d'octobre, particulièrement en juillet et août (fig. 4A). La figure 4B montre la perception du nombre de jours de forte chaleur par année. D'après cette figure, la classe de 1 à 10 jours occupe le 1er rang avec environ 30 % et celle de 21 à 30 jours se trouve en 2ème rang avec 20.8 % des réponses. Notons que 22.2 % des enquêtés n'ont pas défini la durée des épisodes de forte chaleur. Ces résultats sont en accord avec ceux de Ben Boubaker (2010) qui a montré que la durée moyenne des jours de forte chaleur à Kairouan dépasse généralement 15 jours. La forte chaleur s'explique essentiellement par le site de cuvette et la position continentale qui caractérise l'agglomération de Kairouan (Ben Boubaker, 2010).

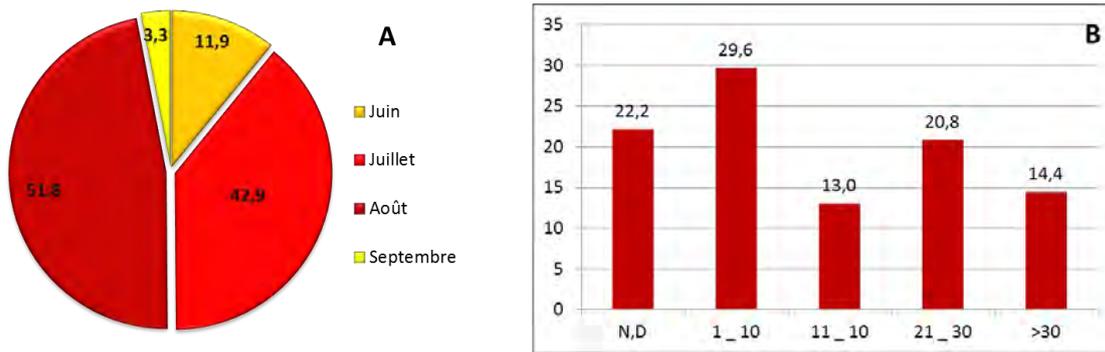
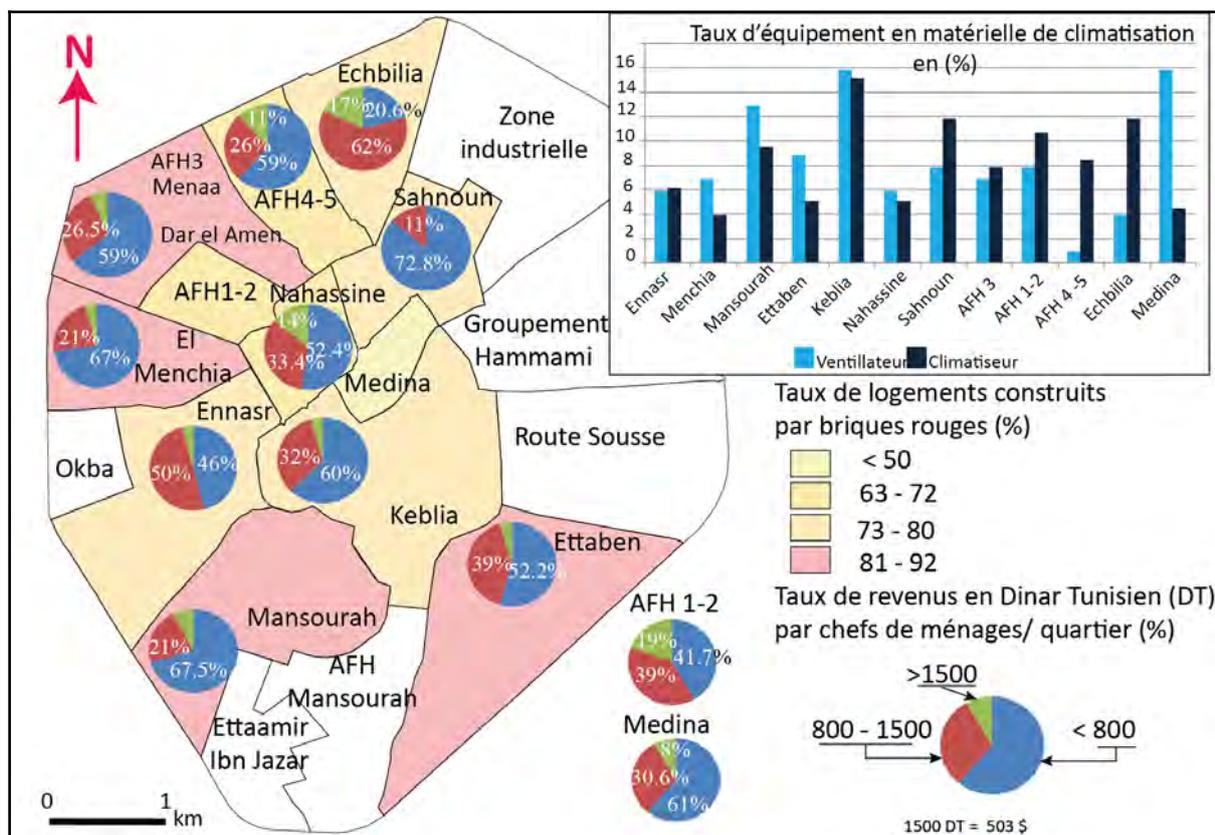


figure 4 : Le mois le plus chaud (A) et la durée des épisodes de fortes chaleurs selon les



enquêtés (B).

figure 5 : Quelques aspects socio-économiques des quartiers enquêtés

La sensation de surchauffe en été s'intensifie dans les logements mal ventilés et mal isolés: plus de 75 % des logements sont construits par des briques rouges et mal isolés (forte conductivité thermique) (fig. 5). Dans les quartiers pauvres (fig. 5) comme Mansourah, Ettaben, El Menchia et Sahnoun la plupart des habitations sont mitoyennes de trois côtés (82.5 %) ce qui limite la possibilité de ventiler naturellement les foyers.

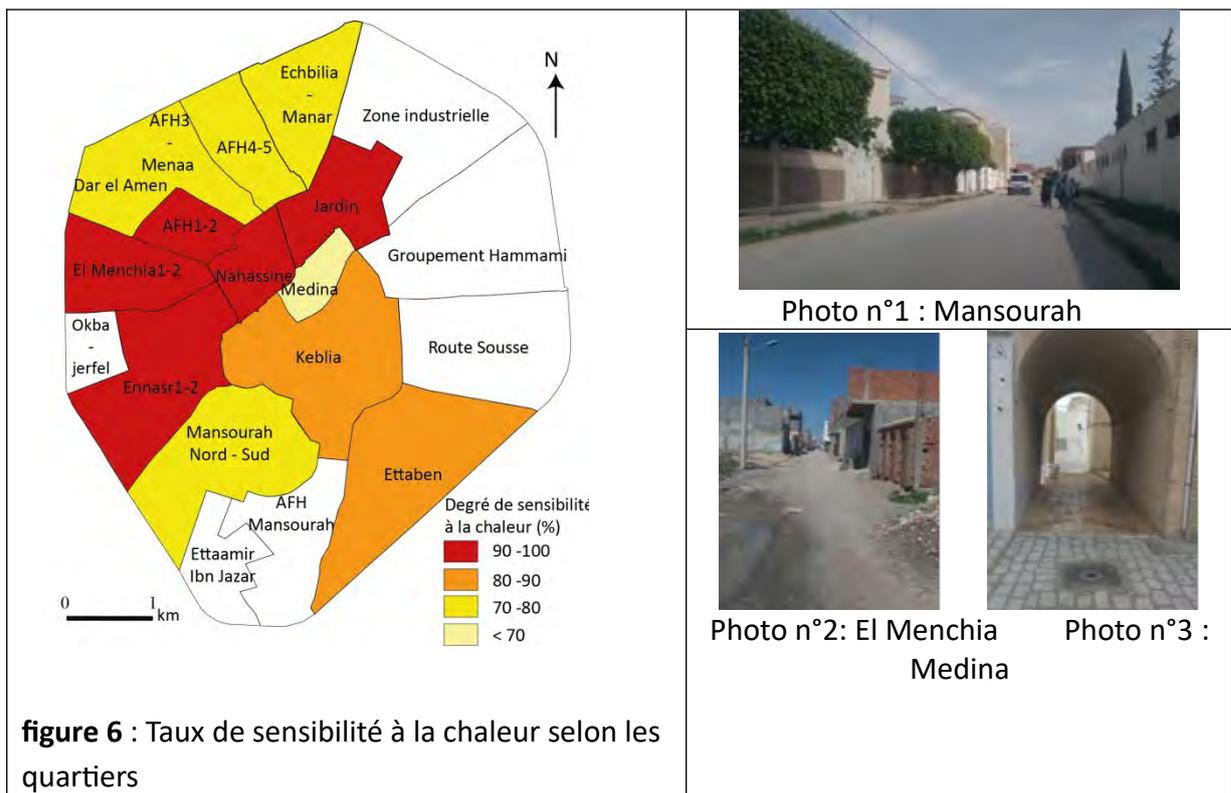
### 2.3. Perception de la vulnérabilité face à la forte chaleur

Près des 3/4 des enquêtés (73.1 %) se sentent vulnérables face à la forte chaleur. Ce pourcentage est plus élevé chez les hommes (53.4 %) que les femmes (29.6 %). En effet, les hommes sont plus exposés à la forte chaleur en raison de leurs taux d'activités en plein air, plus élevés par rapport aux femmes. La chaleur est qualifiée de torride, très forte et forte par 53 % des répondants. Cette perception varie d'un quartier à un autre en fonction du niveau socio-économique de la population. Les quartiers denses et « pauvres » sont les plus touchés comme El Menchia (photo n°2), Ennaser, AFH2, Faubourg Nhasine et Jardin (Cité Sahnoun) (fig. 6).

### 2.4. Adaptation aux fortes chaleurs

Face à la forte chaleur, l'adaptation paraît nécessaire pour les Kairouanais. L'enquête montre que le rafraîchissement des logements par pulvérisation à l'intérieur pendant le jour et l'arrosage à l'extérieur en fin d'après-midi est adopté par les 2/3 des enquêtés. Une bonne partie de ces derniers pensent que se doucher entre 2 et 5 fois par jour améliore la sensation de confort thermique.

60 % des chefs de ménage pensent que l'eau potable est requise pour minimiser l'effet de la forte chaleur. Par contre, 33.4 % estiment que la climatisation est la seule solution pour rendre l'ambiance thermique clémente.



## Conclusion

Pendant la saison estivale, les épisodes de forte chaleur prolongés restent un aspect particulier de la ville de Kairouan. Cette étude montre une forte vulnérabilité de la population des quartiers pauvres face à cet aléa. Les styles architecturaux, le choix des matériaux de constructions et la rareté des espaces verts accentuent la chaleur à Kairouan. La combinaison de ces facteurs intensifie la sensation d'inconfort thermique, aggravée avec le confinement en 2021, selon les enquêtés. Par conséquent, le rafraîchissement par pulvérisation et par arrosage, comme étant une solution «des pauvres», augmentent la demande en eau potable, en revanche, la climatisation augmente la consommation de l'énergie électrique.

## Remerciement

Les auteurs adressent leurs vifs remerciements à Wassim Madani qui a participé au déroulement de l'enquête.

## Bibliographie

- Ben Boubaker H., 2010 : Les paroxysmes climato-thermiques en Tunisie : approches méthodologiques et Ben Boubaker H., 2010 : Les paroxysmes climato-thermiques en Tunisie : approches méthodologiques et études de cas, *Climatologie*, **7**, 57-87.
- Chebli et al., 2020. Répartition spatio-temporelle des températures dans l'agglomération de Kairouan (Tunisie) pendant la saison chaude 2019. *Climatologie*, **17**, 14.
- Costello, A., et al., 2009, Managing the health effects of climate change. *Lancet*, **373**, pp 1693–1733.
- Cuesta J.G,et al., 2017, General Population Knowledge about Extreme Heat: A Cross-Sectional Survey in Lisbon and Madrid, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **122**, 14.
- Michelozzi P., et al., 2005, The impact of the summer 2003 heat waves on mortality in four Italian, *Euro Surveill.* **10**(7), 11-12.
- Myers S., Patz J., 2009, Emerging threats to human health from global environmental change. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, **34**, 223–252.
- Nitschke et al., 2011: Impact of two recent extreme heat episodes on morbidity and mortality in Adelaide, South Australia: a case-series analysis, *Environmental Health* **10**, 16.

## FICHIERS MÉTÉOROLOGIQUES DE VAGUES DE CHALEUR FUTURES POUR ÉVALUER LA RÉSILIENCE THERMIQUE DES BÂTIMENTS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Anaïs MACHARD <sup>1,2</sup>, Emmanuel BOZONNET <sup>1</sup>, Agnese SALVATI <sup>3,4</sup>,  
Mamak POURABDOLLAHTOOKABONI <sup>5</sup>, Abhishek GAUR <sup>6</sup>.

<sup>1</sup> Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement (LaSIE, UMR CNRS 7356), La Rochelle Université, 23 Avenue Albert Einstein, 17000 La Rochelle, France, [emmanuel.bozonnet@univ-lr.fr](mailto:emmanuel.bozonnet@univ-lr.fr)

<sup>2</sup> Département Energie et Environnement, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), 84 Avenue Jean Jaurès, Champs-sur-Marne, 77447 Marne-la-Vallée CEDEX 2, France, [anaïs.machard@cstb.fr](mailto:anaïs.machard@cstb.fr)

<sup>3</sup> Institute for Energy Futures, Brunel University London, Uxbridge, UK

<sup>4</sup> Barcelona School of Architecture ETSAB-UPC, Diagonal 649, 08028 Barcelona, Spain, [agenese.salvati@upc.edu](mailto:agenese.salvati@upc.edu)

<sup>5</sup> Department of Energy, Politecnico di Torino, 10129 Turin, Italy, [mamak.ptookaboni@polito.it](mailto:mamak.ptookaboni@polito.it)

<sup>6</sup> National Research Council Canada, Construction Research Centre, 1200 Montreal Road, Building M24, Ottawa, ON K1A 0R6, Canada, [abhishek.gaur@nrc-cnrc.gc.ca](mailto:abhishek.gaur@nrc-cnrc.gc.ca)

**Résumé :** Cet article présente une méthodologie développée pour reconstituer des fichiers météorologiques comprenant des vagues de chaleur futures extrêmes comme données d'entrée pour les simulations thermiques dynamiques de bâtiments. Des fichiers ont été développés pour douze villes dans le monde, réparties selon la classification des zones de l'ASHRAE à partir de données CORDEX. Ces fichiers météorologiques peuvent être utilisés pour comparer différentes solutions de rafraîchissement et analyser la résilience thermique du bâtiment à la surchauffe dans des périodes extrêmes futures.

**Mots-Clés :** vagues de chaleur, surchauffe, bâtiment, résilience

**Abstract:** FUTURE HEATWAVE WEATHER FILES TO ASSESS BUILDINGS THERMAL RESILIENCE TO CLIMATE CHANGE - This paper proposes a methodology to reconstruct meteorological files to be used as input data for building simulations and focused on extreme future heatwaves. Built from CORDEX data, these files have been developed for twelve cities around the world, distributed according to the ASHRAE zone classification. These weather files will be useful to compare different cooling solutions and analyze the building thermal resilience to overheating in future extreme periods.

**Keywords:** heatwaves, overheating, buildings, resilience

### Introduction

Les chiffres actuels et les projections de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) prédisent une augmentation fulgurante de la climatisation de « confort » dans le monde. Aujourd'hui, la consommation d'électricité mondiale liée à la climatisation représente 10% de la consommation globale, et elle devrait tripler d'ici à 2050. Aux consommations d'énergie s'ajoute l'impact environnemental colossal des fuites des réfrigérants (Agence Internationale de l'Énergie 2018). En France, ces dernières années l'usage et l'équipement en climatisation des ménages est en très forte augmentation, ce qui peut être corrélé aux canicules récurrentes : alors qu'en 2016 11 % des ménages étaient équipés en climatisation d'après l'INSEE, en 2019 c'étaient 22 % des ménages et 26 % fin 2020 (ADEME 2021).

Dans ce contexte, le projet Annexe 80 « Resilient Cooling for Buildings » a vu le jour au sein du programme « Energy in Buildings and Communities » de l'Agence Internationale de l'Énergie (« IEA EBC Annex 80 - Resilient Cooling of Buildings » 2022). L'objectif de ce projet international de recherche est de soutenir une transition rapide des bâtiments vers des solutions résilientes de limitation des surchauffes et peu consommatrices, que ce soit par des solutions de climatisation (systèmes dits actifs) ou par des solutions de rafraîchissement dits passifs. Le terme « Resilient cooling » est utilisé ici pour désigner des solutions qui intègrent l'échelle de l'individu et de la société dans son ensemble, ainsi que leur capacité à

résister, ou à prévenir, les effets de surchauffe des habitats liés au changement climatique. Le concept de résilience dans le domaine du bâtiment a fait l'objet d'un état de l'art et de définitions des concepts spécifiques à ce projet (Miller et al. 2021 ; Attia et al. 2021 ; Zhang et al. 2021). Afin de qualifier et quantifier ces impacts thermiques, il a été également nécessaire de déterminer l'exposition à la chaleur, qui impacte directement le risque de surchauffe des bâtiments. Un groupe de travail spécifique à sa caractérisation, et à la production de séquences climatiques, a été mis en place. Les fichiers météorologiques créés ont été utilisés comme données d'entrée du groupe de travail pour les simulations thermiques de bâtiment (Zhang et al. 2021).

Au sein de la communauté de recherche de la thermique du bâtiment, le développement de fichiers météorologiques futurs incluant des extrêmes de température est un sujet de recherche nouveau et complexe, qui fait débat au sein de la communauté. Historiquement, les fichiers météorologiques utilisés comme données d'entrées des simulations de bâtiment pour caractériser les besoins en énergie (chauffage et refroidissement) des bâtiments sont une année type représentative d'une trentaine d'années historiques (ISO 2006). Ce sont ces données climatiques (réglementaires) qui sont utilisées par tous les acteurs de la construction pour définir les objectifs de performance énergétique des bâtiments neufs et qui n'incluent pas les spécificités des besoins croissants de rafraîchissement. L'objectif ici est donc de compléter l'approche traditionnelle des données climatiques, basée uniquement sur la performance liée au chauffage, pour une meilleure prise en compte de la performance énergétique globale des bâtiments, qui reposera de plus en plus sur les effets de la climatisation avec les effets d'amplification liés au réchauffement climatique.

L'année type est construite par une sélection de mois statistiquement les plus proches de la médiane, pour quatre variables météorologiques : la température, l'humidité relative, le rayonnement solaire global et la vitesse du vent (second ordre). Ces dernières décennies, des fichiers météorologiques types incluant des projections climatiques de changement climatique ont été développés (CCWeatherGen, WeatherShift, Meteororm) et sont largement utilisés par la communauté scientifique de la thermique du bâtiment. Cependant, le changement climatique influe non seulement sur l'augmentation de la médiane de la température mais également la variance. Pour cette raison, utiliser seulement des années types futures n'est pas suffisant pour évaluer le risque de surchauffe de bâtiments lors de futures canicules. La méthodologie mise en œuvre ici, initialement proposée par (Machard et al., 2020), a permis de reconstituer des fichiers météorologiques comprenant des vagues de chaleur futures à partir de projections de modèles de climat régionaux. Une vingtaine d'institutions ont préparé des fichiers météorologiques comprenant des vagues de chaleur futures, qui sont présentées dans cet article. Ces données d'entrée pour les simulations thermiques dynamiques de bâtiment sont critiques pour l'évaluation de la performance et/ou de la résilience des différentes technologies de climatisation ou rafraîchissement. Chaque stratégie sera alors évaluée sous différentes conditions : un cas durant l'année future type, un cas durant la vague de chaleur extrême, un cas durant la vague de chaleur extrême avec une coupure de réseau électrique.

## **Méthodologie**

La méthodologie adoptée pour générer les fichiers météorologiques futurs comme données d'entrée pour les simulations thermiques de bâtiments consiste en une succession d'étapes présentées sur la figure 1. Les données climatiques sont extraites (STEP 1) de la base de données CORDEX sur les périodes contemporaines (2000-2019) et futures (2041-2060 et 2081-2100). Les données brutes du modèle climatique régional sont ensuite corrigées avec des observations disponibles sur une vingtaine d'années historiques pour les différentes variables climatiques (STEP 2). Certaines variables nécessaires et manquantes ont été calculées par des modèles complémentaires, comme la répartition du rayonnement solaire global en rayonnement solaire direct et diffus. Enfin, à partir des périodes de vingt ans futurs de données débiaisées, des fichiers météorologiques d'années types et vagues de chaleur futures ont été reconstitués (STEP 3).

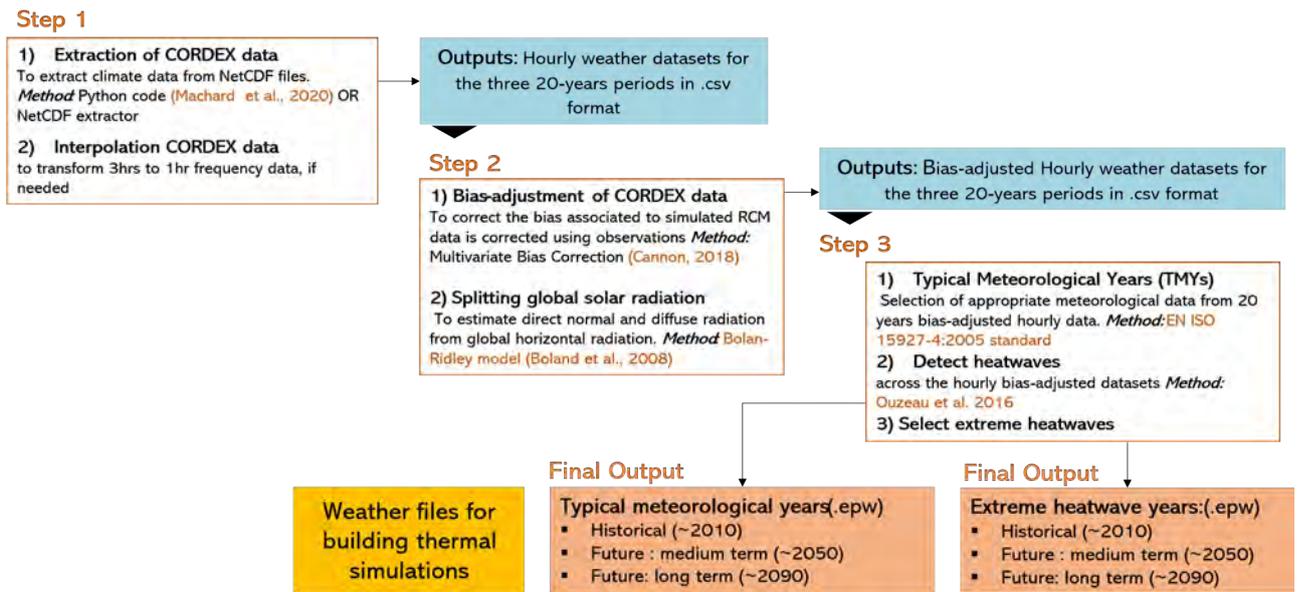


figure 1 – Méthodologie de reconstitution des fichiers météorologiques à partir de la base de données CORDEX

### Sélection des villes

Les fichiers météorologiques ont été créés pour 14 villes représentatives de 10 zones climatiques selon la classification de l'association américaine de chauffage, ventilation et climatisation ASHRAE (ASHRAE 2013) présentées sur la figure 2 - classification différente d'autres approches géographiques, mais spécifique au domaine du conditionnement des ambiances habitées. Les villes ont été choisies en termes d'impacts et donc de population minimum (toutes les villes ont plus de 1.5 M d'habitants et incluent des mégapoles telles que Sao Paulo et Buenos Aires), ainsi qu'à l'exigence de données d'observations historiques disponibles pour corriger les biais sur une vingtaine d'années consécutives passées.

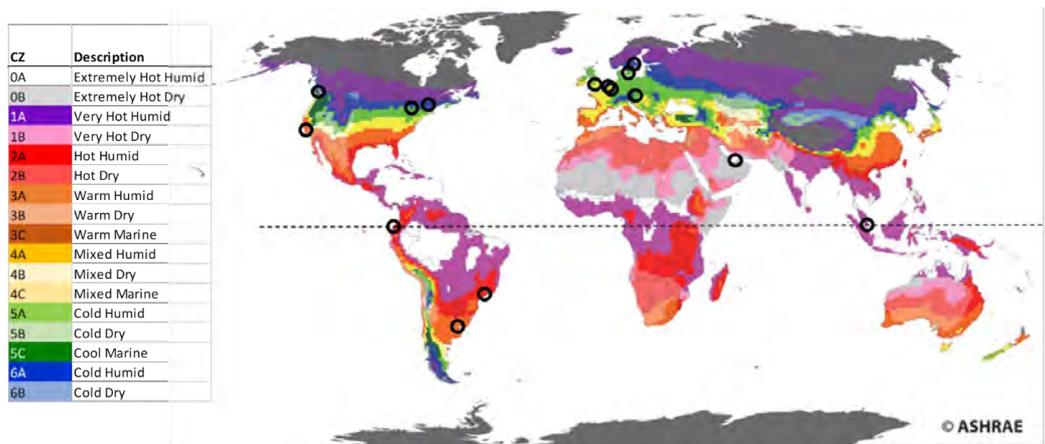


figure 2 - Villes sélectionnées et zones climatiques de l'ASHRAE selon la norme 169-2013 (ASHRAE 2013)

### Sources des données climatiques

Les données climatiques sont issues de la base de données CORDEX. Trois modèles de climat régional proposaient des données sur tous les domaines, nous avons sélectionné le modèle global MPI-M-MPI-ESM-LR couplé au modèle régional REMO-2015 par manque de ressources pour utiliser les trois modèles. Ce modèle est connu pour être un modèle médian comparé aux autres modèles en ce qui concerne les projections de température (Flato et al. 2013). Le scénario socio-économique RCP 8.5 a été

choisi pour étudier le risque le plus élevé. Les données sont disponibles à une échelle de 12.5 km sur le domaine européen et à 25 km pour les autres domaines. Elles sont à un pas de temps horaire sur le domaine européen et trihoraire sur les autres domaines. Les variables téléchargées sont présentées sur le Tableau 1.

**Tableau 1 – Données CORDEX utilisées pour la reconstitution des fichiers météorologiques**

	Domaine Europe (EUR)	Autres domaines (AFR, SEA, EU, SAM,
Température de l'air	tas	tas
Humidité relative ou spécifique	hurs	huss
Rayonnement solaire global	rsds	rsds
Vitesse du vent	sfcWind	sfcWind
Pression atmosphérique	ps	ps
Couverture nuageuse	clt	

### Correction du biais

La correction du biais des variables climatiques est une étape critique, en particulier pour les extremums de la distribution. Les méthodes de quantile delta mapping (QDM) (Cannon, Sobie, et Murdock 2015) et la correction multivariable (MBCn) (Cannon 2018) ont été utilisées. La méthode QDM préserve les projections du modèle climatique tout en corrigeant les biais dans les quantiles. Les données futures corrigées sont obtenues en ajoutant au modèle climatique les projections dans les quantiles. La méthode QDM a été appliquée à toutes les variables climatiques. Puis, la méthode MBCn a été utilisée (uniquement sur les variables température, humidité et pression atmosphérique) afin de corriger l'interconnexion entre les différentes variables. Le biais des variables a été corrigé indépendamment pour chaque mois afin de préserver la variabilité du climat. Cette étape a été validée en comparant les données corrigées et les observations sur la période de référence. Par exemple, on a pu observer les effets de la correction sur la température qui était surévaluée dans les villes les plus chaudes, et sous-évaluée dans les villes moins chaudes durant la période historique.

### Élection des vagues de chaleur

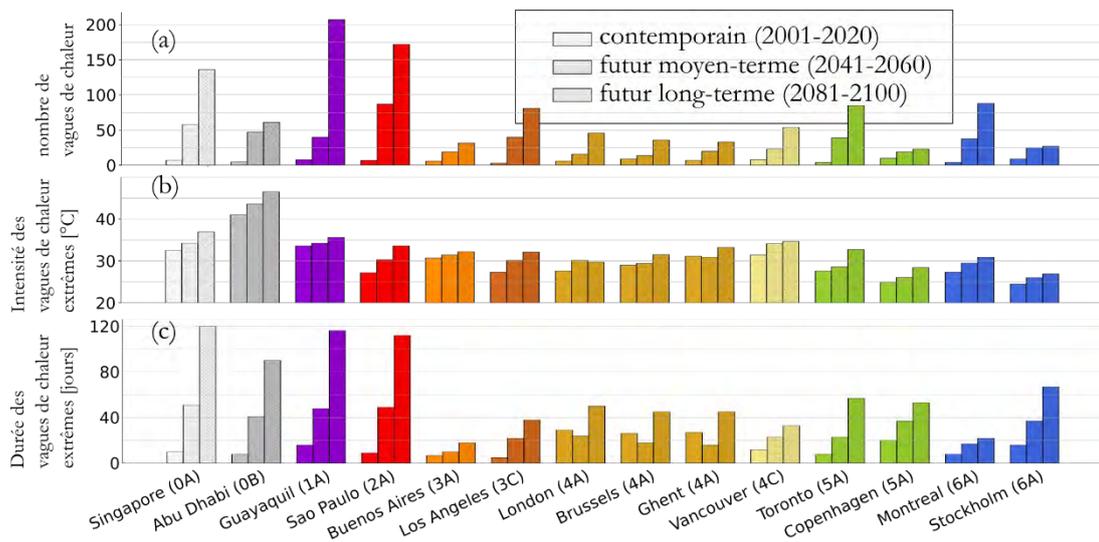
Les vagues de chaleur ont été sélectionnées pour chaque période de données corrigées sur 20 ans à partir de la méthodologie proposée par (Ouzeau et al. 2016), validée à l'échelle de la France. Cette détection à partir de seuils relatifs permet d'étendre la méthodologie à d'autres types de climat. Elle a donc été choisie pour caractériser les vagues de chaleur d'une façon simple et standardisée dans tous les climats. Trois seuils permettent la détection des vagues de chaleur, calculés sur des percentiles des vingt années de température historiques : Le seuil Spic (99.5 percentile), le seuil Sdeb (97.5) et le seuil Sint (95). Les vagues de chaleur peuvent être caractérisées par trois critères : l'intensité (température journalière maximum en °C), la durée (nombre de jours) et la sévérité (°C.jours au-dessus du seuil Sdeb). Pour chaque ville et chaque période, la vague de chaleur la plus intense, la plus sévère et la plus longue ont été sélectionnées. Souvent, la vague de chaleur la plus sévère est également la plus intense, ou la plus longue.

On peut noter que les seuils définis ici sur la base des vingt années historiques sont indépendants des typologies de construction, des caractéristiques des populations, des systèmes de climatisation et de tous les autres paramètres de résilience. En effet, cette approche doit permettre d'analyser et de comparer sur des bases identiques et objectives des stratégies d'adaptation, de résilience ou les performances. Les années futures sont analysées à seuils constants, ce qui permet aussi de montrer l'évolution de l'exposition aux vagues de chaleur des bâtiments, des systèmes, et des occupants.

### Analyse des résultats : Vagues de chaleur futures extrêmes sélectionnées

Nous avons ainsi obtenu le nombre, l'intensité et la durée des vagues de chaleur pour chaque ville et chaque période (figure 3). Alors qu'aucune des villes n'a fait face à plus de dix vagues de chaleur durant

la période contemporaine, on constate une augmentation très forte du nombre de vagues de chaleur dans le futur, notamment dans les quatre villes les plus proches de l'équateur (zones climatiques de l'ASHRAE 0 à 2). En effet, à Singapour cela correspondrait à une moyenne de trois canicules par an d'ici le milieu de siècle, et sept par ans d'ici la fin du siècle contre une tous les trois ans aujourd'hui. A Guayaquil et Sao Paulo le nombre de vague de chaleurs détecté sur la fin du siècle est également impressionnant, supérieur à 150. L'augmentation dans les autres villes est moins contrastée mais toujours élevée, la plupart des villes présentent plus de vingt vagues de chaleurs dans le futur moyen-terme, soit en moyenne une vague de chaleur chaque année.



**figure 3** – Vagues de chaleurs (nombre, intensités, et durées), par ville et périodes d'étude (modèle climatique MPI-M-MPI-ESM-LR/REMO 2015, scénario socio-économique RCP 8.5)

Concernant l'intensité de la vague de chaleur la plus extrême (figure 3b), on constate une très forte augmentation de la température journalière moyenne atteinte durant la canicule pour certaines villes, jusqu'à + 5 °C (Abu Dhabi, Sao Paulo, Los Angeles, Toronto). Dans les autres villes, bien que l'augmentation soit moins marquée elle est bien présente, avec des nuances : pour certaines villes (Londres, Vancouver, Montréal, Stockholm) l'augmentation est plus marquée entre le moyen-terme et aujourd'hui, alors que dans d'autres (Singapour, Guayaquil, Toronto, Copenhague) l'augmentation est plus forte durant la fin de siècle.

Enfin, pour la durée de la vague de chaleur la plus extrême sélectionnée (figure 3c), on peut observer une forte augmentation dans les quatre villes les plus chaudes (canicule d'au moins un mois en milieu de siècle, et de plus de trois mois à la fin du siècle). A Buenos Aires, en contraste avec Sao Paulo, l'augmentation de la durée des vagues de chaleur est plutôt faible (ce qui est également remarqué pour l'intensité et pour le nombre de canicules futures). Pour presque toutes les villes, la vague de la chaleur la plus longue du milieu du siècle est d'une durée supérieure à trois semaines. On peut noter une forte augmentation de la durée de la vague de chaleur en fin de siècle à Stockholm (plus de deux mois), à Copenhague et à Toronto, ce qui est remarquable pour ces villes au climat froid.

## Conclusion et Perspectives

Les fichiers météorologiques incluant les différents types de canicules futures selon les critères définis ici sont nécessaires pour le développement des solutions de rafraîchissement étudiées dans la communauté de l'énergétique du bâtiment. Ce travail marque une première étape dans la constitution de fichiers de référence permettant l'inter-comparaison de stratégies face aux vagues de chaleur futures, représentatives de toutes les zones climatiques de l'ASHRAE. Ces fichiers seront accessibles en open data, et pourraient être réutilisés pour des études d'adaptation à la chaleur dans des domaines proches (ex. cultures, serres, élevage). La méthodologie répliquable est adaptable, p. ex. pour d'autres modèles ou scénarios socio-économiques, ou encore pour quantifier les incertitudes liées aux modèles de

projections climatiques utilisés. Par ailleurs, alors que la plupart des bâtiments sont situés en ville, ces fichiers n'incluent pas l'îlot de chaleur urbain (ICU) qui a été étudié aussi en première approche par des modèles simplifiés (Machard, et al. 2020). Enfin, les périodes de vingt années futures de données corrigées développées dans ce travail ouvrent des perspectives d'amélioration de la sélection de canicules spécifiques au climat local de certaines villes (par exemple, ajouter l'humidité comme paramètre de détection pour les villes où le climat est très humide).

## Remerciements

Les auteurs remercient le World Climate Research Programme's Working Group on Regional Climate (WGRC), le Working Group on Coupled Modelling (WGCM), l'Institut Max Planck pour avoir mis les données de climat à disposition à travers le programme CORDEX, et les différents instituts qui ont contribué à la production de ces fichiers météos.

## Bibliographie

- ADEME. 2021. « La climatisation dans le bâtiment - Etat des lieux et prospective à 2050 ».
- Agence Internationale de l'Énergie. 2018. « The Future of Cooling », **92**.
- ASHRAE. 2013. *ANSI/ASHRAE standard 169-2013, Climatic Data for Building Design*.
- Attia, Shady, Ronnen Levinson, Eileen Ndongo, Peter Holzer, Ongun Berk Kazanci, Shabnam Homaei, Chen Zhang, et al. 2021. « Resilient Cooling of Buildings to Protect against Heat Waves and Power Outages: Key Concepts and Definition ». *Energy and Buildings* 239 (mai): 110869. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110869>.
- Cannon, Alex J. 2018. « Multivariate Quantile Mapping Bias Correction: An N-Dimensional Probability Density Function Transform for Climate Model Simulations of Multiple Variables ». *Climate Dynamics* **50** (1-2): 31-49. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>.
- Cannon, Alex J., Stephen R. Sobie, Trevor Q. Murdock. 2015. « Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? » *Journal of Climate* **28** (17): 6938-59. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>.
- Flato, G., J. Marotzke, B Abiodun, P Braconnot, S.C. Chou, W. Collins, P. Cox, et al. 2013. « Evaluation of Climate Models. In: Climate 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.
- « IEA EBC Annex 80 - Resilient Cooling of Buildings ». 2022. *Energy in Buildings and Communities Programme 2022*. <https://annex80.iea-ebc.org/>.
- ISO. 2006. *NF EN ISO 15927-4 Performance hygrothermique des bâtiments - Calcul et présentation des données climatiques. Partie 4 : Données horaires pour l'évaluation du besoin énergétique annuel de chauffage et de refroidissement*.
- Machard, Anaïs, Christian Inard, Jean-Marie Alessandrini, Charles Pelé, et Jacques Ribéron. 2020. « A Methodology for Assembling Future Weather Files Including Heatwaves for Building Thermal Simulations from the European Coordinated Regional Downscaling Experiment (EURO-CORDEX) Climate Data ». *Energies* **13** (13): 3424. <https://doi.org/10.3390/en13133424>.
- Machard, Anaïs, Simon Martinez, Emmanuel Bozonnet, Eleonora Lacedra, et Christian Inard. 2020. « How to Assess Ecodistrict Resilience to Urban Heat Stress under Future Heatwaves? A Case Study for the City of Paris ». *ICRBE Procedia*, septembre, 11-24. <https://doi.org/10.32438/iCRBE.202044>.
- Miller, Wendy, Anaïs Machard, Emmanuel Bozonnet, Nari Yoon, Dahai Qi, Chen Zhang, Aaron Liu, et al. 2021. « Conceptualising a Resilient Cooling System: A Socio-Technical Approach ». *City and Environment Interactions* **11** (août): 100065. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2021.100065>.
- Ouzeau, G., J.-M. Soubeyroux, M. Schneider, R. Vautard, et S. Planton. 2016. « Heat Waves Analysis over France in Present and Future Climate: Application of a New Method on the EURO-CORDEX Ensemble ». *Climate Services* **4** (décembre): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.09.002>.
- Zhang, Chen, Ongun Berk Kazanci, Shady Attia, Ronnen Levinson, Sang Hoon Lee, Peter Holzer, Agnese Salvati, et al. 2021. « IEA EBC Annex 80 - Dynamic Simulation Guideline for the Performance Testing of Resilient Cooling Strategies », **28**.
- Zhang, Chen, Ongun Berk Kazanci, Ronnen Levinson, Per Heiselberg, Bjarne W. Olesen, Giacomo Chiesa, Behzad Sodagar, et al. 2021. « Resilient Cooling Strategies – A Critical Review and Qualitative Assessment ». *Energy and Buildings* **251** (novembre): 111312. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111312>.

## **MODÉLISATION DES IMPACTS CLIMATIQUES SUR LA CROISSANCE RADIALE DU PIN MARITIME (PINUS PINASTER) POUR ÉVALUER LA VULNÉRABILITÉ DES ARBRES À LA SÉCHERESSE PENDANT LE DÉPÉRISSEMENT DES FORÊTS DE BENI DERDJINE CHLEF (ALGERIE)**

Malik KACI <sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Département des Sciences Agronomiques et Biotechnologie, université Hassiba Benbouali de Chlef, [m.kaci@univhb-chlef.dz](mailto:m.kaci@univhb-chlef.dz)*

**Résumé :** les résultats effectués au niveau du laboratoire central de mycologie et de pathologie forestière de Bâinem (INRF, Alger) confirment l'identification des espèces entomologiques, mycologiques et nématologiques déprédatrices et pathogènes qui ont affectés en majeure partie la vitalité du pin maritime citant un champignon qui appartient à l'ordre des (Ascomycota) et nématode du bois la classe des (Némathelminthes). En deuxième étape Nous avons comparé 15 coupes transversales du bois des arbres coexistant en déclin avec le climat (T(°C) et P(mm)) par la modélisation (l'application Dendro sous logiciel libre R). L'indice de croissance moyen est de

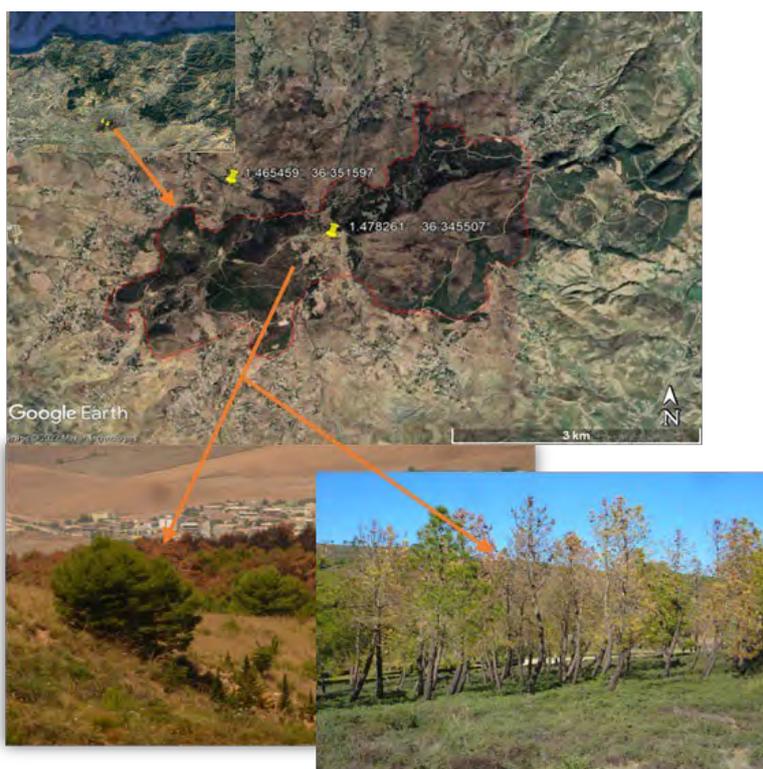
**Keywords:** maritime pine, dieback, tree rings, dendrochronology

### **Introduction**

La température de la Terre a augmenté de 0,14° F (0,08° C) par décennie depuis 1880, et le taux de réchauffement au cours des 40 dernières années est plus du double : 0,32° F (0,18° C) par décennie depuis 1981 (Sánchez-Lugo, et al., 2020). L'accélération du réchauffement climatique entraînant une diminution de l'humidité du sol, exacerbant ainsi le stress hydrique (Trenberth et al., 2014). Des conditions plus chaudes et plus sèches ont conduit à des sécheresses plus chaudes et longues, qui ont un impact négatif sur les forêts du monde entier et provoquent par la suite le dépérissement des forêts (Allen et al., 2010, 2015). Une telle perte de vigueur des arbres est caractérisée par une défoliation de la cime et des taux de mortalité accrus (Carnicer et al., 2011). Dans cette étude, nous avons étudié la croissance radiale et la dendroclimatologie ainsi l'état de santé du Pinus pinaster en dépérissement de la forêt domaniale de Beni Derdjine. Notre hypothèse est que les arbres dépérissant montreront une phase avec des taux de croissance plus élevés similaires et une plus faible dont la croissance devrait être plus contrainte par la grave pénurie d'eau récente. Ici, nous visons : (i) à déterminer le moment de la mort des arbres à l'aide des cernes annuels, (ii) à évaluer comment la mortalité était liée à la sécheresse, (iii) pour déterminer si les arbres morts étaient plus sensibles à la sécheresse que leurs congénères vivants. L'obtention de ces informations permettrait d'avancer notre compréhension sur où et quand un dépérissement sévère se développe en réponse à la sécheresse prolongée entraînant des réponses non linéaires telles que des taux de dommages et de mortalité élevés, et une perte de la productivité et de la croissance à l'échelle locale.

### **Présentation du secteur d'étude**

La forêt de Beni Derdjine s'étend sur une superficie de 750 ha, la moitié de la surface (400 ha), est une forêt mixte des résineux : Pin d'Alep, Pin Maritime, Pin Pignon et le Cyprès vertical et horizontal. La formation matorral occupe 316 ha soit 20 ha sont des tranchées par feu et le reste 14 ha, sont des vides labourables (Fig .1 ,Tab.1).

**figure 1.** Situation géographique de la zone d'étude**Tableau 1.** Caractéristiques des sites échantillonnés

Site	Latitude	Longitude	Altitude moyenne	Profondeur moyenne du sol (cm)	Âge (an) moyen	Densité moyenne (pieds/ha)
Forêt de Beni Derdjine	X1=36°					
	20.063'					
	N	Y1= 1°				
	X2=36°	26.989'E				
	21.467'	Y2= 1°				
	N	30.173'E	900m	45,7 ± 8,6	22	100 ± 61

### Données et méthodes

Les peuplements qui ont été soumis à une légère éclaircie dans le passé et qui présentent maintenant un dépérissement récent de la canopée et des taux de mortalité élevés (après 2014), qui peuvent représenter 22 à 35 % des arbres à certains endroits. Le site étudié est situé sur des pentes plus raides (plage de pente de 15 à 20°). On distingue trois strates de végétation : une strate arborescente constituée exclusivement de pin d'Alep ; une strate arbustive avec de nombreux arbustes parmi lesquels le chêne vert (*Quercus ilex*), le genévrier de Phénicie (*Juniperus phoenicea*), le genévrier oxycèdre (*Juniperus oxycedrus*), le filaire (*Phillyrea angustifolia*) et les pistachiers (*Pistacia lentiscus* et *Pistacia terebinthus*) ; une strate herbacée dominée par deux graminées, le diss (*Ampelodesma mauritanicum*) et l'alfa (*Stipa tenacissima*).

Les données climatiques ont été obtenues à une résolution quotidienne et mensuelle de la station météorologique de Beni Derdjine (36.336716° N, 1.473177° W, 782 m d'altitude), située à 300 m du site d'échantillonnage. La série de données comprenait la température moyenne quotidienne ( $T_m$ ), la température maximale ( $T_x$ ), la température minimale ( $T_n$ ) et Prec. Pour la période 1990-2020. De plus, la  $T_m$  saisonnière et la Prec totale ont été calculés pour l'hiver (décembre à février), le printemps (mars à mai), l'été (juin à août) et l'automne (septembre à novembre). Les températures minimales sont caractérisées par une diminution de (-7.38%) par décennie. La lithologie de la zone est dominée par la classe Calcimagnésique produisant des sols bruns et rocheux à texture limon-sableux et relativement peu profonds (20–50 cm). L'échantillonnage a été effectué en 2019. Nous avons effectué 15 sections transversales à 1,3 m (diamètre à hauteur de poitrine (Dhp)) des arbres en dépérissements et évalué visuellement le pourcentage de défoliation de la cime et l'état sanitaire des arbres.

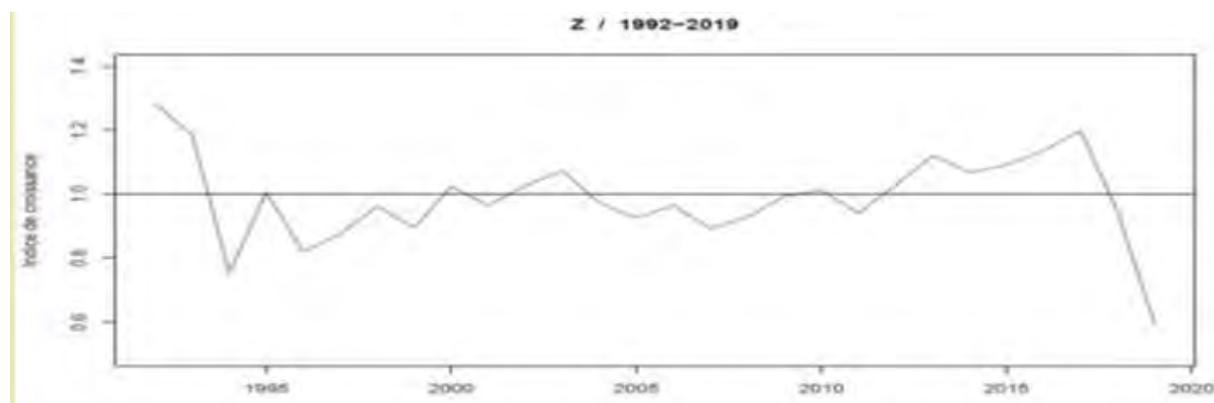


**figure 2.** Les sections transversales échantillonnées

Les mesures ont été effectuées au laboratoire de la qualité du bois à l'université de Chlef. Divers paramètres statistiques ont également été calculés afin d'évaluer la qualité et la force du signal climatique contenu dans les séries de cernes. L'analyse de la réponse aux événements climatiques extrêmes (fortes sécheresses estivales, froids hivernaux intenses) par le calcul des années caractéristiques, aussi de calculer des fonctions de réponse et de corrélation entre les indices de croissance et les régresseurs climatiques (Cook et Kairiukstis, 1990 ; Fritts, 1976 ; Guiot, 1991; Schweingruber et al., 1990), a été réalisée à l'aide de l'application POINTER développée sous le logiciel libre R (R Development Core Team, 2011) par Mérian (2012a). Mais aussi de calculer des fonctions de réponse et de corrélation entre les indices de croissance et les régresseurs climatiques (Cook et Kairiukstis, 1990 ; Fritts, 1976 ; Guiot, 1991).

## Résultats et discussion

### *Variation de l'épaisseur standardisée des cernes*



**figure 3.** Variation de l'indice de croissance des cernes en fonction du climat T (°c) et P (mm)

Les valeurs élevées des écarts types entre 1,34 et 3,10 ainsi les coefficients de variation entre 29,69 et 80,14 % indiquent une grande fluctuation de la croissance radiale entre individus de la même station, et traduisent aussi la variabilité temporelle à l'intérieur d'une même chronologie. Cette réaction différenciée peut être attribuée soit à une variabilité climatique vers l'aride à Beni Derdjine, soit à la nature particulière du biotope (pédoclimatique). La population de pin maritime de Beni Derdjine, implantée sur un versant d'une pente moyenne 12,5%, ne bénéficie pas de mêmes conditions susceptibles d'emmagasiner l'eau des pluies pour une longue durée et par conséquent de tamponner les effets du facteur climatique limitant. Dans notre cas, le facteur limitant la croissance radiale du pin maritime peut être attribué à l'eau (précipitations). La sensibilité moyenne (sens1) calculée sur les chronologies de synthèses brutes est de l'ordre 0,35. Cette valeur est supérieure au seuil moyen de 0,20 pour les espèces méditerranéennes, ce qui démontre une bonne réactivité du pin maritime aux variations interannuelles de l'environnement. Les coefficients de sensibilité moyenne les plus élevés sont toujours observés dans les régions semi-arides. Safar (1994) obtient pour le pin d'Alep de Djelfa des valeurs de 0,14 à 0,31 et attribue le caractère sensitif de ces régions aux influences désertiques. Le coefficient d'autocorrélation d'ordre 1 est de 0,10 plus faible que les pinèdes de Djelfa sont de l'ordre 0,28. Ce coefficient exprime le phénomène de « persistance » dans la mesure où le cerne de l'année  $t$  se trouve déjà prédéterminé en grande partie par la croissance et les conditions climatiques de l'année antérieure  $t - 1$  qui déterminent le niveau des réserves (carbohydrates et réserves hydriques, en particulier) disponibles au moment du démarrage de la croissance (Fritts, 1976).

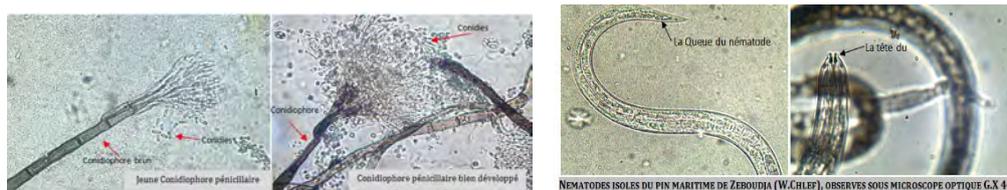
À Beni Derdjine l'épaisseur des cernes est négativement et significativement corrélées avec les précipitations mensuelles de septembre (P9) et d'octobre (P10) selon le régresseur climatique BBC. Les températures automnales et printanières (T10 et T5) sont positivement corrélées avec la croissance du pin maritime. Les précipitations enregistrées en octobre de l'année précédente (P10) jouent un rôle négatif sur l'épaisseur des cernes dans la station étudiée. Le cumul de la précipitation de la saison d'automne entre 1990 et 2019 est caractérisé par une diminution de (-1.81%) par décennie avec une valeur maximale 245.1 mm en automne 1991 et une valeur minimale 31.5 mm en automne 2006. Supérieures à la moyenne des cumuls de la précipitation automnale (102,83 mm) entre 1990 et 2019 peuvent contribuer de façon notable à reconstituer le stock hydrique dans le sol disponible pour la phase ultérieure de croissance par une bonne mise en condition physiologique du pin maritime (Becker, 1977).

#### Sur le plan Mycologique

Parmi les champignons connus à potentialités pathogènes isolés des sujets de pin maritime dépérissants, le genre *Leptographium* sp. est un champignon qui appartient à l'ordre des Ophiostomatales (Ascomycota). Les espèces de *Leptographium* sont des anamorphes (ou formes asexuées) du téléomorphe (ou forme sexuée) du genre *Grosmannia*.



figure 4. Aspect du leptographium sp en culture sur milieu malt



**figure 5.** Nématodes isolés du pin maritime observé sous microscope optique (G\*40)

### **Sur le plan Némathologique**

Le phénomène de bleuissement du bois est dû à la présence du nématode du bois de pin (en anglais, pinewood nematode, PWN), *Bursaphelenchus xylophilus*, agent causal du dépérissement du pin. D'où la confirmation de leur présence au niveau du pin maritime de l'impact visité. Il s'agit de vers microscopiques ronds de la classe des Némathelminthes avec une structure anatomique simple, un corps rond, normalement cylindrique et allongé, sans tête bien défini, non segmenté et à symétrie bilatérale.

### **CONCLUSION**

À la lumière de toutes les constatations et observations réalisées sur le terrain et les résultats de laboratoire, nous pouvons supposer que ce dépérissement est plutôt dû à des causes d'origine écologique (climat, sol, sylviculture) qu'à l'action d'insectes ou de champignons pathogènes. Le phénomène de dépérissement du pin maritime serait essentiellement dû à une sécheresse physiologique, due aux facteurs climatiques. Le manque d'éclaircies, de travaux d'assainissement, les délits de coupes et les incendies, ne seraient que des facteurs aggravants du phénomène. En effet, cet état de faiblesse engendré par ces facteurs a rendu les sujets assez vulnérables aux attaques des insectes xylophages et des micro-organismes pathogènes. Le pouvoir de multiplication rapide de ces insectes et la faculté chez certaines espèces à évoluer dans les biotopes en sève, leur revêt un caractère d'Out breaks. C'est pourquoi, les pullulations des insectes xylophages et particulièrement les scolytes sont très redoutées et qu'un intérêt particulier leur est accordé.

### **Références bibliographiques:**

- Allen, C. D., Breshears, D. D., and McDowell, N. G., 2015: On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere* **6**, 1–55. doi: 10.1890/ES15-00203.1
- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., et al., 2010: A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manage.* **259**, 660–684. doi: 10.1016/j.foreco.2009.09.001.
- Becker M., 1977 : Contribution à l'étude de la transpiration et de l'adaptation à la sécheresse des jeunes plants résineux. Exemple de 3 sapins du pourtour méditerranéen (*Abies alba*, *A. nordmanniana*, *A. numidica*). *Annales des Sciences Forestières*, **34** (2): 137-158.
- Carnicer, J., Coll, M., Ninyerola, M., Pons, X., Sánchez, G., and Peñuelas, J., 2011 : Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **108**, 1474–1478. doi: 10.1073/pnas.1010070108.
- Cook E. R., Kairiukstis L. A. E., 1990 : *Methods of dendrochronology: Applications in the environmental sciences*. Dordrecht, Pays-Bas, Kluwer Academic Publishers, 408 p.
- Fritts H. C., 1976 : *Tree rings and climate*. Londres, Royaume- Uni, Academic Press, 567 p.

Guiot J., 1991 : Methods and programs of statistics for paleoclimatology and paleoecology. Quantification des changements climatiques : Méthodes et programmes. Monographie 1. INSU, PNEDC, 253 p.

Mérian P., 2012a : POINTER et DENDRO : deux applications sous R pour l'analyse de la réponse des arbres au climat par approche dendroécologique. Outils et méthodes. Revue Forestière Française, 64 (6) : 789-798.

Safar W., 1994 : Contribution à l'étude dendroécologique du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) dans une région semi-aride d'Algérie : l'Atlas Saharien (Ouled Naïl, Aurès, Hodna). Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille III, France, 215 p.

Sanchez-Lugo. A, Berrisford .P, Morice .C, Argüez.A ,2020 : State of the climate in 2020. Special Suppl Bull Am Meteorolog Soc **99**:S11–S12.

Schweingruber F. H., Eckstein D., Serre-Bachet F., Brakero U., 1990: Identification, presentation and interpretation of event years and pointer years in dendrochronology. *Dendrochronologia*, **8**: 9-38.

Trenberth, K. E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., et al. ,2014: Global warming and changes in drought. *Nat. Clim. Chang.***4**, 17–22. doi: 10.1038/nclimate2067.

## CHANGEMENT CLIMATIQUE ET ADAPTATION DES PAYSANS DE NAPIÉ (NORD DE LA CÔTE D'IVOIRE)

Sangboliéwa Lanzeny OUATTARA<sup>1</sup>, Aichatou KONE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> docteur en sociologie à l'université Félix Houphouët Boigny, [lanzeny@gmail.com](mailto:lanzeny@gmail.com)

<sup>2</sup> doctorante en sociologie à l'université Félix Houphouët Boigny, [aichakone574@gmail.com](mailto:aichakone574@gmail.com)

**Résumé :** L'étude analyse les stratégies endogènes mises en place par les producteurs pour s'adapter aux mutations induites par les changements climatiques (CC). Basé sur une étude qualitative auprès d'une trentaine de producteurs et agents d'encadrement du département de Napié, cet article mobilise la théorie de la perception Rodrigue Dimon (2008). Les résultats observés montrent que les paysans ont une perception différenciée du CC. Ensuite, le CC restructure sur les rapports de productions agricoles et le mode de vie des populations. Enfin, la reconversion des activités agricoles, l'utilisation de nouvelles techniques culturales et les stratégie culturelle, recours aux pratiques anciennes sont des stratégies de lutte contre le CC.

**Mots clés :** Changement climatique, perceptions sociales, productions agricoles, stratégies d'adaptation

**Abstract:** This study analyzes the endogenous strategies implemented by producers to adapt to changes induced by climate change (CC). Based on a qualitative study of thirty farmers and supervisors in the department of Napie, this article uses the theory of perception Rodrigue Dimon (2008). The results show that farmers have a differentiated perception of the CC. Secondly, the CC restructures the agricultural production relationships and the way of life of the populations. Finally, the reconversion of agricultural activities, the use of new cultivation techniques and cultural strategies, recourse to old practices are strategies to fight against CC.

**Keywords:** Climate change, social perceptions, agricultural production, adaptation strategies

### Introduction

L'arrêt précoce des pluies et la fréquence plus élevée des poches de sécheresse (Sarr et al., 2015; Nielsen et Reenberg, 2010; Ouédraogo et al., 2010 ; West et al., 2008). Les agriculteurs perçoivent la variabilité climatique à travers l'augmentation des températures moyennes, la réduction pluviométrique, le démarrage tardif de la saison des pluies, des périodes de sécheresse ou des séquences sèches plus longues depuis les 20 dernières années (Bryan et al., 2013). Les agriculteurs constatent également une récession pluviométrique, des hausses de températures, des sécheresses, des inondations et des cyclones plus fréquents depuis les 20 dernières années (Uddin et al., 2017). Le changement climatique représente une menace de plus en plus perceptible pour la viabilité des ménages ruraux d'Afrique subsaharienne où les communautés vivent principalement de l'exploitation des ressources naturelles. La forte pression humaine sur les zones semi-arides sahélo-soudaniennes de l'Afrique rend les écosystèmes plus vulnérables aux effets du changement climatique (Sop et al., 2010 ; Rasmussen et al., 2001; Nicholson et al., 1998). Selon le Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (GIEC, 2007), les conséquences du changement climatique sur les économies des pays d'Afrique sont déjà considérables, et la situation pourrait être encore plus désastreuse vu les prédictions d'augmentation des fréquences d'événements extrêmes avec le réchauffement climatique (Houghton et al., 2001).

Le Sahel ouest-africain connaît une tendance générale au réchauffement depuis 1950 (GIEC, 2007). Ce réchauffement se traduit par une baisse du nombre de jours et de nuits froids et une hausse des jours et des nuits chauds entre 1960 et 2010 (Ly et al., 2013). Pourtant, les événements climatiques extrêmes ont un impact négatif sur l'agriculture, l'élevage et les ressources naturelles (Karimou Barké et al., 2015) sur lesquels repose l'essentiel des économies des pays sahéliens.

Dans les pays en voie de développement, de nombreuses études ont mis en exergue la perception du changement climatique par les populations locales. Au Burkina Faso par exemple, plusieurs études montrent que les populations locales perçoivent le changement climatique à travers la baisse et les irrégularités pluviométriques, le démarrage tardif de la saison des pluies,

Les producteurs agricoles perçoivent aussi le changement climatique à travers ses impacts négatifs sur la production agricole et le milieu naturel. En effet, les agriculteurs ouest-africains soulignent que la baisse des pluies, les hausses de température et les vents violents expliquent entre 30 et 50 % de la diminution de la production agricole en fonction des cultures et des zones (Mertz et al., 2010). Le dessèchement et la mortalité des ligneux, la baisse de la production fruitière, le tarissement précoce des retenues d'eau, et la dégradation du couvert végétal sont imputables aux effets néfastes des changements climatiques (Bambara et al., 2013) et aux fortes pressions anthropiques. La baisse des rendements du mil et du sorgho dans les régions semi-arides du de la Côte d'Ivoire, est due à la variabilité et aux changements climatiques, et la diminution de la fertilité des sols (Sarr et al., 2015). Les organisations internationales considèrent les paysans comme la catégorie d'acteurs la plus exposée aux effets du changement climatique (GIEC 2001a, OCDE, AVSF 2011, AVSF 2018). En effet, ces acteurs font face à une instabilité des saisons et baisse de la pluviométrie (la sécheresse, les pluies tardives) comme effets du changement climatique. Sans soutien et accompagnement, on constate que les producteurs de Napié arrivent à faire face au changement climatique. Ils développent des stratégies d'adaptation. En effet, les paysans modifient leurs calendriers culturaux, changent de variétés en prenant des variétés plus précoces. Ils modifient leur calendrier cultural et des techniques employées (abandon de la production de riz de basfond, pour le riz irrigué dans les barrages certains cas par exemple pour le riz).

Dans un contexte où le changement climatique produit des effets profonds sur l'agriculture, couplés avec la faible résilience et la grande vulnérabilité des populations aux chocs, en termes de leur capacité de gestion des ressources naturelles et altération de leurs moyens d'existence, leur sécurité alimentaire et leur bien-être ; il devient impérieux de mieux comprendre les efforts déployés par les cultivateurs pour faire face aux changements climatiques qui les affectent. Devant cet état de fait, l'étude analyse les stratégies endogènes mises en place par les producteurs pour s'adapter aux mutations induites par les changements climatiques.

### **1. Données et méthodes**

Au plan méthodologique, cette étude adopte une approche essentiellement qualitative. De ce fait, elle mobilise les techniques de collecte de données et méthodes d'analyse appropriés à savoir la recherche documentaire, l'observation directe, les entretiens individuels, les focus group et l'analyse de contenu thématique. Les données ont été collectées dans la ville de Napiédougou située à 16 km du chef-lieu de Région et de Département qu'est KORHOGO dans le Nord de la Côte d'Ivoire.

Le choix de ce champ géographique s'explique par le fait que, dans cette ville les effets du changement climatique sont décriés par les paysans. Par ailleurs, les participants à l'étude ont été sélectionnés à partir de la technique d'échantillonnage par réseau et a tenu compte de leur statut social. Sur cette, trente-trois (33) entretiens individuels et 12 focus group ont été réalisés. La taille de cet échantillon se justifie par le principe de saturation (A. Blanchet & A. Gotman, 1992) et la triangulation.

Les entretiens individuels ont été réalisés avec un responsable l'Agence Nationale d'Appui au Développement Rural (ANADER), Quant aux discussions de groupe, elles ont été réalisées essentiellement avec les producteurs.

En outre, les données recueillies ont fait l'objet d'une analyse de contenu thématique (L. Bardin, 1977). Concrètement, les données retranscrites ont été découpées et codées. Le codage s'est fait sur la base des thèmes du guide d'entretien. Ensuite, les catégories analytiques ont été construites en fonctions des thématiques mais aussi, d'autres catégories ont émergé de la classification analogique d'éléments non pris en compte par les catégories prédéfinies. Cette analyse de contenu thématique a permis d'obtenir les résultats suivants.

### **2. Perceptions différenciées des effets du changement climatique chez les paysans de Napié**

### **Abandon des pratiques ancestrales (endogènes) comme référent idéologique de justification du changement climatique**

Nos investigations dans la localité de Napié nous ont permis de découvrir que, le changement climatique du point de vue des perceptions locales, est la résultante du détachement aux pratiques culturelles endogènes.

Les pratiques ancestrales pour le peuple sénoufo sont indispensables pour leur bien-être. A travers ces pratiques, ils se représentent et consolident sa démarcation sociale à travers un rapport à la culture spécifique. Ce rapport se traduisait par les pratiques suivantes : prières, adorations des idoles, rituel sacrificiel d'animaux, offrandes aux ancêtres etc.

Ces pratiques font parties intégrantes de leurs vies, leurs cultures et permettent de se distinguer des autres peuples. Elles sont aussi, un moyen pour eux d'être proche de leurs ancêtres et leurs divinités. L'homme sénoufo est amené à suivre ces pratiques et traditions ancestrales, pour son épanouissement, car, elles se font de générations en générations. Cependant, ce peuple sénoufo est confronté à un phénomène sans recrudescence qu'est le changement climatique.

En effet, selon les dires des populations enquêtés, le changement climatique est la conséquence de leurs négligences et de leurs manques de respect envers les divinités. C'est en ce sens qu'un enquêté dira ceci : « *Je crois que c'est parce que Dieu est fâché contre nous, on ne fait pas les bonnes choses, on ne prie plus, chacun fait ce qu'il veut, Dieu nous punit* ». Extrait de l'entretien n°2.

Pour eux, la rupture d'avec la tradition et le bouleversement social en sont les principales causes. La vie de débauche que mènent les jeunes aujourd'hui et les actes contre nature tels les tueries, le manque de tolérance, le vol, ont poussé Dieu à puni l'homme et ainsi à le priver d'une bonne répartition pluviométrique selon leurs dires. Cela induit le fait que dans leur rapport à la réalité sociale, la relation entre le « religieux » et la « prospérité sociale » est au cœur des perceptions sur le changement climatique. Il est prospecté à travers cette perception, que l'abondance dans les pratiques culturelles (production sans beaucoup d'efforts) était le fait du respect des usages et coutumes. Plus les ancêtres étaient satisfaits, plus les productions agricoles étaient potentiellement bonnes.

Ce rapport d'interdépendance étant ancré dans les esprits sous les traits d'une croyance partagée, il paraît évident pour ces populations, que les effets du changement climatique sont des réponses au détachement des pratiques ancestrales. En ce sens, pour parler d'abandon des traditions, un enquêté renchérit en ces termes :

« *il y a des terres qu'on adorait, il y a des fétiches qu'on adorait maintenant on ne fait plus ça, on a arrêté ça et puis le monde d'aujourd'hui on fait des bêtises. Quand on dit ça ce n'est pas bon c'est ça même les gens d'aujourd'hui veulent faire.* ». **Extrait de l'entretien n°1**

À travers cette manière de voir ou de percevoir la réalité sociale, l'on comprend que les facteurs producteurs du changement climatiques ne sont pas à appréhender du côté de la nature, comme le démontre les sciences dures. Ces facteurs du point de vue des populations enquêtés sont à rechercher dans le rapport aux religieux, et sa capacité à influencer sur la réalité sociale.

### **Reconversion des activités agricoles comme stratégies d'adaptation**

La reconversion des activités agricoles comme stratégies d'adaptation au changement climatique se détermine par les aptitudes des producteurs. En effet, les producteurs adoptent les cultures de rentes telles que l'anacarde, le coton qui sont moins exigeant en eau pour afin de maintenir un équilibre favorable. Ce verbatim permet de mieux illustrer cette assertion : « *Avant il pleuvait, je faisais le mil, le maïs, le riz, maintenant c'est plus difficile à cause du manque de pluie donc maintenant j'ai laissé tout ça pour faire le coton.* » Un autre dira à ce sujet : « *ça fait 15ans je suis producteur, je faisais, mil, maïs, riz, je n'arrivais plus à m'en sortir, il ne plus pleut plus, on ne peut plus faire le mil ici, maintenant j'ai fait mon champ d'anacarde et ça c'est mieux* » ; Un autre affirme à ce sujet : « *Actuellement, c'est anacarde qui nous réussit, les autres cultures là on peut plus faire ho, il ne pleut pas comme ça et puis la terre n'est plus bonne* ».

Il découle de ces verbatim que, face au changement climatique et la baisse de la pluviométrie qui est un indicateur important pour l'agriculture et plus précisément pour certaines cultures dont le mil et

l'igname, les producteurs se reconvertissent vers les cultures plus rustiques, moins dépendante des saisons pluvieuses.

### **3. Utilisation de nouvelles techniques culturales**

Face aux effets indésirables du changement climatique sur les productions agricoles, les producteurs ont adopté l'utilisation de nouvelles techniques culturales. En effet, ils modifient leurs calendriers culturaux. A travers cela un enquêté affirme : « *On s'adapte, si par exemple j'ai cultivé l'année dernière en juin que ça réussit, l'année qui suit je fais à la même date* ».

Certains quant à eux, proposent entre eux de faire une culture intensive. A ce propos dira un enquêté dira : « *On mise sur les cultures intensives au lieu des cultures extensives, parce-que c'est vrai qu'on veut produire beaucoup mais on ne comprend pas que ça agit sur nous* » (producteur, M.C) ;

« En tout on arrive à cultiver plus mieux avec l'utilisation de l'engrais, avec les déchets des bœufs, aussi la fumée organique sur les parcelles, permet de meilleur rendement ». (Producteurs)

### **4. Stratégie culturelle, recours aux pratiques anciennes comme stratégie de lutte contre le Changement Climatique**

Parmi les différentes enquêtes, certains ont recours aux pratiques culturelles comme stratégies d'adaptation. En effet, le recours au divin se présente comme la solution aux difficultés rencontrées lors de la production. Un enquêté affirme : « *je prie mon Dieu, pour que ma récolte réussisse et ça va, ça réussit bien* » ; Une autre ajoute « *c'est Dieu qui fait qu'il pleut, donc s'il ne pleut pas c'est à lui on doit demander pardon, et quand on demande pardon, il envoie la pluie, en tout cas ça va* ». Certains enquêtés font recours aux pratiques ancestrales, supplications des divinités, sacrifices pour la venue de la pluie et pour des meilleurs rendements. A ce propos des enquêtés diront : « *on fait des sacrifices, pour que nos récoltes réussissent* ». Ces différents verbatim des enquêtés démontrent qu'ils arrivent à s'adapter au changement climatique à travers les mécanismes qu'ils mettent en place.

### **Discussion**

Notre étude aboutit au résultat principal selon lequel, l'adaptation des paysans de Napié est liée à leurs perceptions individuelles du changement climatique. Ces résultats corroborent ceux de Pamalba N. et al. (2019). La perception du changement climatique par les populations de Napié à travers la baisse et l'irrégularité des pluies, le démarrage tardif de la saison des pluies, l'arrêt précoce des pluies, la fréquence plus élevée des séquences sèches confirme les travaux antérieurs (Sarr et al., 2015 ; Nielsen et Reenberg, 2010 ; Ouédraogo et al., 2010 ; West et al., 2008). Les pauses pluviométriques ordinaires moyennes (8 à 14 jours) et majeures (15 jours) sont plus fréquentes dans les zones soudanienne et sahélienne de l'Afrique de l'Ouest (Salack et al., 2012). La période 1994-2015 est caractérisée par une alternance des années sèches et des années humides, traduisant une variabilité interannuelle plus forte de la pluviométrie dans la région (Kaboré et al., 2017).

### **Conclusion**

L'étude portant sur « le changement climatique et les stratégies d'adaptations culturales et alimentaires des producteurs à Korhogo : le cas de Napié » révèle qu'à Korhogo plus particulièrement à Napié, les effets du changement climatique sont perçus tant sur le volet climatique, les populations et leurs activités. Notre étude s'est fixée comme objectif principal « comprendre les perceptions des producteurs agricoles face aux changements climatiques et contribuer à une meilleure connaissance des stratégies endogènes mises en place par les producteurs agricoles pour s'adapter aux mutations induites par les changements climatiques ».

### **Bibliographie**

Bambara, D., A. Bilgo, E. Hien, D. Masse, A. Thiombiano et V. Hien, 2013, Perceptions paysannes des changements climatiques et leurs conséquences socio-environnementales à Tougou et Donsin, climats sahélien et sahélo-soudanien du Burkina Faso, *Bulletin de la Recherche Agronomique du Bénin*, 74, pp. 8-16

Bardin, L. (1977). *L'analyse de contenu*. Paris, PUF.

Blanchet, A., Gotman, A. (1992). *L'enquête et ses méthodes : l'entretien*, Paris, Nathan Université.

Bryan, E., C. Ringher, B. Okoba, C. Roncoli, S. Silvestri et M. Herrero, 2013, Adapting agriculture to climate change in Kenya : Household strategies and determinants, *Journal of Environmental Management*, 114, pp. 26-35

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), 2007, Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri R.K. et Reisinger A. (publié sous la direction de )]. GIEC, Genève, Suisse, 103 p.

Kaboré, P.N., A. Ouédraogo, M. Sanon, P. Yaka. et L. Somé, 2017, Caractérisation de la variabilité climatique dans la région du Centre-Nord du Burkina Faso entre 1961 et 2015, *Climatologie*, 14, pp. 82-95

Ly, M., B.S. Traoré, A. Alhassane et B. Sarr, 2013, Evolution of some observed climate extremes in the west African Sahel, *Weather and Climate Extremes*, 1, pp. 19-25

Mertz, O., C. Mbow, J. Nielsen, A. Maiga, D. Diallo, A. Reenberg, A. Diouf, B. Barbier, I.B. Moussa et M. Zorom, 2010, Climate factors play a limited role for past adaptation strategies in West Africa, *Ecology and Society*, 15, 25 p.

Nielsen, J. A. et A. Reenberg, 2010, Temporality and the problem with singling out climate as a current driver of change in a small West African village, *Journal of Arid Environments*, 74, pp. 464-474.

Ouédraogo, A. et A. Thiombiano, 2012, Regeneration pattern of four threatened tree species in Sudanian savannas of Burkina Faso, *Agroforestry Systems*, 86, pp. 35-48.

Salack, S., B. Muller, A.T. Gaye, F. Hourdin et N. Cisse, 2012. Analyses multi-échelles des pauses pluviométriques au Niger et au Sénégal, *Sécheresse* 23, pp. 3-13.

Sarr, B., S. Atta, M. Ly, S. Salack, T. Ourback, S. Subsol et D.A. Geoges, 2015, Adapting to climate variability and change in smalholder farmin communities: A case study from Burkina Faso, Chad and Niger (CVADAPT), *Journal of Agricultural Extension and Rural Development*, vol. 7, 1, pp. 16-27

Uddin, M.N., W. Bokelmann et E.S. Dunn, 2017, Determinants of Farmers' Perception of Climate Change : A Case Study from the Coastal Region of Bangladesh, *American Journal of Climate Change*, 6, pp. 151-165

West, C.T., C. Roncoli et F. Ouattara, 2008, Local perceptions and regional climate trends on the Central Plateau of Burkina Faso, *Land degradation & Development*, 11p.

## PERCEPTION ET ADAPTATION PAYSANNES SELON LES VALEURS PLUVIOMÉTRIQUES EXTRÊMES DANS LES RÉGIONS FORESTIÈRES IVOIRIENNES DEPUIS 1961

**Serge Olivier SOHOU et Kouadio Christophe N'DA**

*Institut de Géographie Tropicale (IGT), Université Félix HOUPHOUËT-BOIGNY, Cocody-Abidjan, Côte d'Ivoire ;  
sohousergerolivier@gmail.com, christndak@yahoo.com*

**Résumé :** L'Afrique de l'Ouest est de plus en plus vulnérable aux changements climatiques. L'évolution du climat y est marquée par une modification des cumuls pluviométriques. Dans le sud forestier ivoirien, ces modifications des pluies sont observées ces dernières décennies par les paysans. Cet article analyse les perceptions et stratégies d'adaptation des paysans face aux extrêmes pluviométriques. Les pluies journalières depuis 1961 ont été étudiées selon l'intensité moyenne journalière des pluies, les périodes humides, très humides et extrêmement humides, une intensification des périodes sèches étant constatée.

**Mots-clés :** Perception et adaptation climatique, pluviométrie extrême, régions forestières, Côte d'Ivoire.

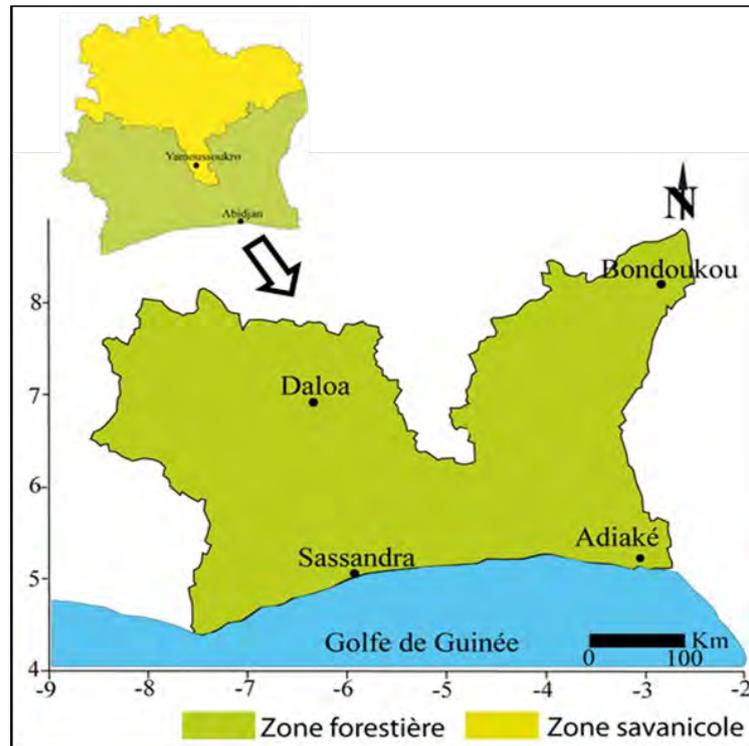
**Abstract:** West Africa is increasingly vulnerable to climate change. The evolution of the climate is marked by a modification of the rainfall totals. In the southern forest of Côte d'Ivoire, these changes in rainfall have been observed in recent decades by farmers. This article analyzes the perceptions and adaptation strategies of farmers in the face of extreme rainfall. Daily rainfall since 1961 has been studied according to the average daily intensity of rainfall, wet, very wet and extremely wet periods, with an intensification of dry periods being observed.

**Keywords:** Climate perception and adaptation, extreme rainfall, forest regions, Ivory Coast.

### Introduction

Depuis plus de 50 ans, le climat en Afrique subsaharienne subit une instabilité (Paturel *et al.*, 1998 N'Da *et al.*, 2016 ; Sohou *et al.*, 2021). Ce dérèglement climatique a des impacts sur les activités socio-économiques (Brou *et al.*, 2005 ; Sultan *et al.*, 2008 ; Sultan, 2011 ; Tidjani *et al.*, 2017). En Côte d'Ivoire, l'évolution climatique récente indique que la décennie 1970-1980 marque un tournant dans ces modifications. Elle est définie par la baisse des cumuls annuels des pluies et la hausse des températures (N'Guettia *et al.*, 1995 ; N'Da *et al.*, 2016 ; Coulibaly *et al.*, 2021). Cela entrave le développement des activités agricoles ; les paysans étant conscients de ces changements climatiques et des impacts sur leurs activités, pour y faire face, adoptent diverses stratégies (Amani, 2012).

L'objectif de cet article est d'analyser les perceptions et stratégies d'adaptation des paysans face à l'évolution des valeurs pluviométriques extrêmes entre 1961 et 2014 dans le sud forestier ivoirien (figure 1). En effet, cette région à fortes productions agricoles est sujette de plus en plus à des déficits pluviométriques et à des sécheresses récurrentes, faisant d'elle l'une des zones vulnérables aux aléas climatiques (Noufé, 2011 ; Coulibaly *et al.*, 2021 ; Koli Bi *et al.*, 2021). Région du domaine des forêts denses humides sempervirentes et semi-décidues, le climat est de type subéquatorial sur le littoral (Adiaké et Sassandra) et dans le Centre-Ouest (Daloa), et équatorial de transition atténué au Nord-Est (Bondoukou). La moyenne pluviométrique varie entre 1000 et 2000 mm/an (Brou *et al.*, 2005).



**figure 1** : Localisation du sud forestier ivoirien et des 4 stations pluviométriques analysées (source : Sohoun et al., 2021).

## 1. Données et méthodes

### 1.1. Données pluviométriques et socio-anthropologiques

Les données pluviométriques analysées ont été fournies par la SODEXAM (SOciété D'EXploitation de Développement Aéroportuaire aéronautique et Météorologique). Elles sont toutes au pas de temps journalier et vont du 1 janvier 1961 au 31 décembre 2014. Quatre stations synoptiques (Adiaké, Bondoukou, Daloa et Sassandra) sont étudiées, compte tenu de la longueur des séries et de la représentativité spatiale dans le sud forestier ivoirien. L'étude des valeurs pluviométriques extrêmes a été abordée à travers la méthode de la Théorie des Valeurs Extrêmes (TVE), intégrée à l'outil numérique en libre accès RCLimDex 1.0 (Zhang *et al.*, 2004 ; <http://cran.r-project.org/bin/windows/base/>). Les indices pluviométriques retenus sont l'intensité des pluies tombées atteignant 1 mm par jour (SDII), le nombre maximal des jours consécutivement humides avec les hauteurs de pluies supérieures à 1 mm par jour (CWD), le nombre maximal des jours consécutivement secs avec les hauteurs de pluies inférieures à 1 mm par jour (CDD) et enfin, les valeurs du 95<sup>e</sup> percentile des pluies pour les jours très humides (95p) et 99<sup>e</sup> percentile pour des jours extrêmement humides (99p).

Les données socio-anthropologiques sont issues d'une enquête de terrain que nous avons menée en août 2019 et fondée sur la Méthode Active de Recherche Participative, MARP (Lassissi, 1998). La MARP demande une présence sur le terrain de quatre à six jours par zone enquêtée. Les critères comme l'observation semi-directe, la mise en place d'un processus collectif et de discussion avec les paysans et le témoignage sont considérés (Berthier, 2010). Ce sont des données de perception et d'adaptation, collectées grâce à un protocole de questionnaire pré-codé sur un support papier. Les données recueillies suite à cette enquête ont aidé à l'analyse de la variabilité des pluies extrêmes, les perceptions et mesures d'adaptation des paysans. L'enquête a concerné les paysans (chefs de ménage ou leurs femmes ayant au moins 30 ans d'expérience) et a été effectuée dans l'ancien front pionnier agricole dans la région du N'Zi Comoé et l'actuel front pionnier agricole dans la région du Bas-Sassandra (tableau 1).

**Tableau 1** : Localités enquêtées en août 2019 dans les zones de déprise (N'Zi Comoé) et d'intensification (Bas-Sassandra) agricole (source : RGP 1998 et 2014, INS).

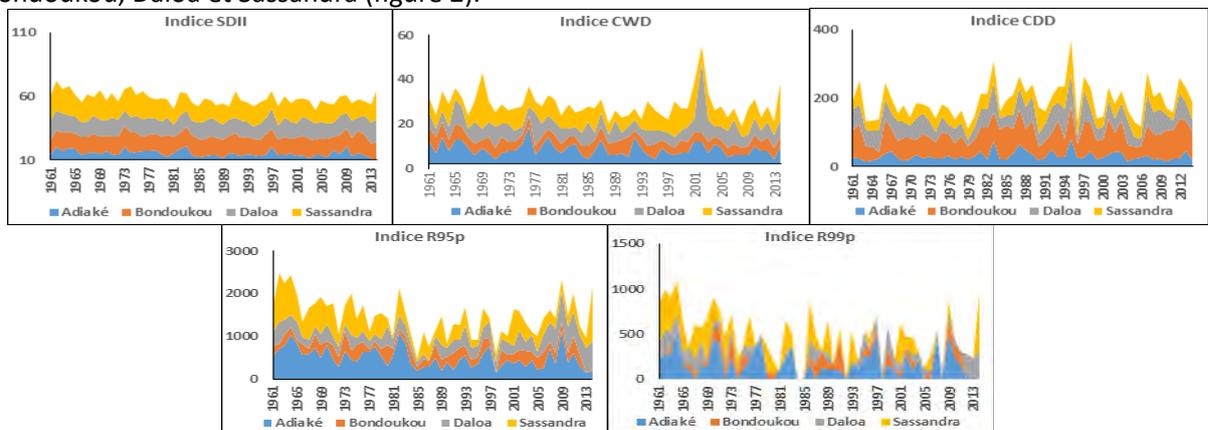
Régions	Départements	Sous-préfectures enquêtées	Effectif de la population	Populations enquêtées (%)
N'Zi Comoé	Bocanda	Bocanda/Diangokro	218 874	8
Bas-Sassandra	Soubré	Méagui/Grand-Zattry	355 111	12

La taille de l'échantillon a été obtenue, suite à un calcul basé sur la proportionnalité de la population agricole totale du sud forestier ivoirien. L'échantillonnage est exprimé à travers la formule suivante :  $n = \frac{t^2 \cdot p(1-p)}{\beta^2}$  avec  $n$  : la taille de l'échantillon,  $t$  : le niveau de confiance déduit du taux de confiance (1,96 pour un taux de confiance de 95 %),  $p$  : la proportion estimative de la population montrant la caractéristique étudiée (Doukpolo, 2014). Elle est traduite par  $p \frac{n}{N}$ , avec  $p$  comme la proportion des populations agricoles avec ( $n = 368,79$ ) par rapport au total des populations rurales des régions de l'ancienne et de la nouvelle boucle du cacao. Pour une population estimée à 573 985 paysans soit une prévalence estimative de la population d'environ 60 % où  $p = 0,6$ . La valeur  $\beta^2$  est l'écart d'erreur toléré (5 %, valeur type 0,05). Suite à ce calcul, 369 paysans sur 573 985 seront interrogés soit 207 paysans interrogés à Soubré, contre 162 à Bocanda. Au total, l'échantillon analysé est constitué de 76 % d'hommes et 24 % de femmes. Les paysans d'origine ivoirienne représentent 53 % des enquêtés, 29 % des paysans sont burkinabés, 13 % sont maliens et 5 % constituent les autres nationalités (guinéenne, béninoise, togolaise, etc.).

## 2. Résultats

### 2.1. Évolution des valeurs pluviométriques extrêmes

De façon générale, le test basé sur la Théorie des Valeurs Extrêmes met en évidence deux tendances dans l'évolution des indices sur la période 1961-2014 : une décroissance des indices des périodes humides et une croissance des indices des périodes sèches pour l'ensemble des stations d'Adiaké, Bondoukou, Daloa et Sassandra (figure 2).



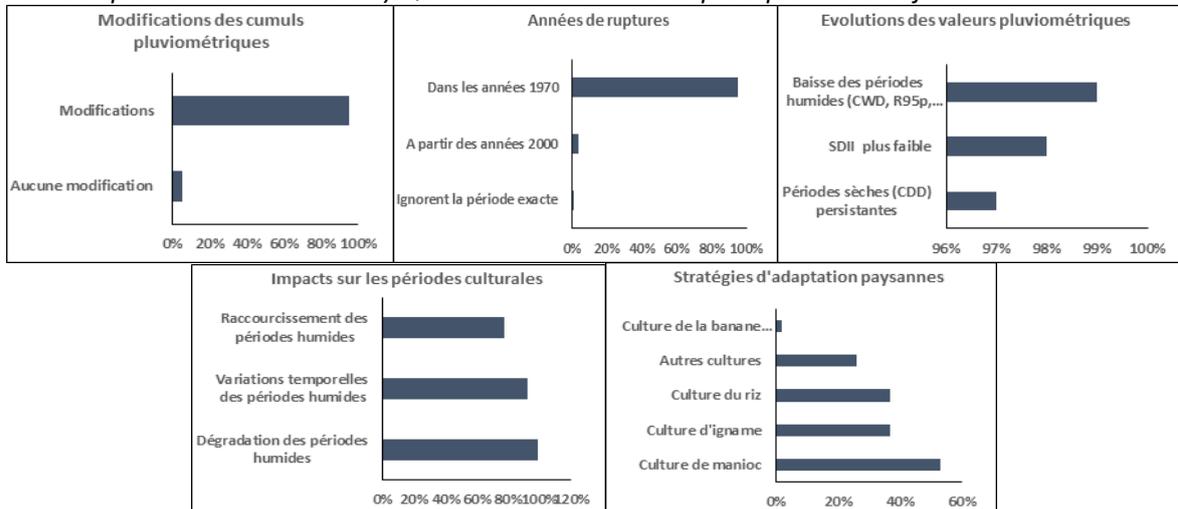
**figure 2** : Évolution des valeurs pluviométriques extrêmes dans les stations synoptiques d'Adiaké, Bondoukou, Daloa et Sassandra de 1961 à 2014 (source : SODEXAM, 2015).

Les indices des périodes humides (CWD), très humides (R95p) et extrêmement humides (R99p), ainsi que de l'intensité moyenne journalière des pluies (SDII) baisse progressivement de 1961 à 2014. Cependant, sur ce même intervalle, l'indice des périodes sèches (CDD), faible au début, croît et s'amplifie à partir des années 1980. L'évolution des indices des périodes humides et la croissance des périodes sèches mettent en évidence la vulnérabilité des paysans et des productions agricoles à Adiaké, Bondoukou, Daloa et Sassandra.

### 2.2. Impacts et perception anthropiques

Les résultats de l'analyse des données collectées font ressortir que les paysans des régions enquêtées dans le sud forestier ivoirien reconnaissent depuis plus de cinq décennies la variabilité pluviométrique et

ses impacts sur leurs activités agricoles. Les principales questions de l'enquête étaient les suivantes (figure 3) : 1) *selon vous, le temps qu'il fait aujourd'hui est-il le même qu'avant ?* 2) *Si non, qu'est-ce qui a changé ?* 3) *Selon vous, à quelle année remonte ces modifications pluviométriques ?* 4) *Depuis cette année de rupture, comment se présentent les saisons pluvieuses ?* 5) *L'intensité moyenne journalière des pluies est-elle de plus en plus variable ?* 6) *Quels sont les effets de cette baisse pluviométrique sur vos activités ?* 7) *Quelles cultures vivrières pratiquez-vous aujourd'hui ?*



**figure 3** : Impacts et perception anthropiques dans les zones de déprise (N'Zi Comoé) et d'intensification (Bas-Sassandra) agricole (source : données d'enquête de terrain, août 2019).

Dans l'analyse de la perception paysanne des pluies, 98 % des enquêtés ont noté des modifications des cumuls pluviométriques. Pour ces paysans, ces modifications ont débuté dans les années 1970 et sont caractérisées par la dégradation des périodes humides (CWD), très humides (R95p), extrêmement humides (R99p), de l'intensité moyenne journalière des pluies (SDII) et la hausse des périodes sèches (CDD). Cette baisse pluviométrique a des impacts négatifs sur la dynamique spatiale et temporelle des saisons humides, propices aux productions agricoles dans les régions du Bas-Sassandra et du N'Zi Comoé. Face aux conséquences négatives de cette variabilité pluviométrique, les paysans des zones enquêtées ont mis en place des mesures d'adaptation dont les plus répandues sont l'utilisation des variétés précoces surtout pour les cultures vivrières (manioc, igname, riz, banane plantain, etc.), l'exploitation des terres de bas-fond, l'association des cultures vivrières et industrielles, desessais endogènes d'adaptation des calendriers culturaux et autres activités génératrices de revenus (le commerce, le transport, etc.).

### 3. Discussion et conclusion

Les manifestations de la variation des valeurs pluviométriques extrêmes et ses impacts sur les productions agricoles, la perception et stratégie d'adaptation développée par les paysans dans le sud forestier ivoirien, sont semblables à celles observées dans les autres régions de la Côte d'Ivoire par Brou *et al.* (2005), Diomandé (2013), Dibi Kangah et Sohoun (2016), N'Da *et al.* (2016), Kouakou *et al.* (2021), Koli Bi *et al.* (2021) ou bien Kobenan *et al.* (2021). Ailleurs dans la sous-région, les travaux de Ouédraogo *et al.* (2010), Agossou *et al.* (2012), Coulibaly (2012), Yabi (2013) et de Vodounou et Doubogon (2016), ont mis en exergue ces mêmes observations. En effet, dans leurs différents travaux, ces auteurs ont montré que la baisse pluviométrique est perçue par les paysans et considérée comme le principal facteur affectant le plus les productions agricoles. Selon ces auteurs, les paysans s'adaptent à ces changements en se référant aux conditions climatiques anciennes considérées comme habituelles ou normales qui leur permettaient de mener leurs activités normalement.

Cette recherche a permis de mieux appréhender les perceptions et adaptations paysannes selon les variations des valeurs pluviométriques extrêmes et leurs impacts sur certaines productions agricoles dans les régions forestières ivoiriennes. Car pour les cinq indices pluviométriques retenus, la baisse des périodes humides (CWD), très humides (R95p) et extrêmement humides (R99p), ainsi que de l'intensité

moyenne journalière des pluies (SDII) et la hausse des périodes sèches (CDD) sont désormais plus préjudiciables du fait des impacts et dégâts potentiels engendrés sur l'agriculture. Pour les paysans, ces perturbations pluviométriques causent à divers degrés des dommages sur la quantité et la qualité des productions agricoles. En réponse, ils mettent en œuvre des mesures adaptatives. Dans ce cadre, une démarche interdisciplinaire (agronomes, climatologues, sociologues, économistes, etc.) reste donc essentielle afin de produire des connaissances scientifiques qui prennent en compte des savoirs empiriques en vue d'accompagner le développement de la production agricole dans le sud ivoirien et ailleurs en Côte d'Ivoire.

## Bibliographie

- Agossou D. S. M., Tossou C. R., Vissoh V. P. et Agbossou K.E., 2012 : Perception des perturbations climatiques, savoirs locaux et stratégies d'adaptation des producteurs agricoles béninois. *African Crop Science Journal*, **20**, 565-588.
- Amani Y. C., 2012 : Production agricole et changement climatique: vers une tragédie des comportements paysans à Tiassalé ? *European Scientific Journal*, **8**, 16, 227-244.
- Berthier N. , 2010 : *Les techniques d'enquête en sciences sociales. Méthodes et exercices corrigés*. Paris, Armand Colin (4<sup>e</sup> éd.).
- Brou Y. T., Akindès F. et Bigot S., 2005 : La variabilité climatique en Côte d'Ivoire : entre perceptions sociales et réponses agricoles. *Cahiers Agricultures, Agence Universitaire de la Francophonie (AUF)*, **14**, 6, 533-540.
- Coulibaly H., 2012 : *Adaptation de l'Agriculture Pluviale au Changement Climatique dans le Triangle de la Pauvreté en Mauritanie : Cas de la Commune Rurale de Diadjibiné*. Centre régional AGRHYMET, Niamey, Niger, 90 pages.
- Coulibaly K. A., Dibi-Anoh P. A., Koli Bi Z. et Djè K. B., 2021 : Modifications des paramètres agroclimatiques majeurs des calendriers agricoles en Côte d'Ivoire entre 1951 et 2017. Journées Géographiques de Côte d'Ivoire, 2020, *Generis Publishing*, **1**, 366-387.
- Dibi Kangah A.P. et Sohou S.O., 2016 : Impacts de la variabilité pluviométrique sur la banane plantain dans les régions ouest et sud-ouest ivoiriennes. *Revue Anyasa*, **6**, 37-50.
- Diomandé M., 2013 : *Impact du changement de pluviosité sur les systèmes de productions agricoles en zone de contact forêt-savane de Côte d'Ivoire*. Thèse de Doctorat unique, Université Felix Houphouët Boigny, Abidjan, 181 pages.
- Doukpolo B., 2014 : *Changements climatiques et productions agricoles dans l'Ouest de la République Centrafricaine*. Thèse en Géographie et Géosciences de l'Environnement (Agroclimatologie et Développement), Université de Abomey-Calavi (Bénin), 338 pages.
- Kobenan R., Dibi-Anoh P. A. et Kouassi N. F., 2021 : Perceptions des changements et variabilités climatiques et stratégies d'adaptation des populations dans leurs pratiques agricoles à Nassian (Côte d'Ivoire). Journées Géographiques de Côte d'Ivoire, 2020, *Generis Publishing*, **1**, 569-588.
- Koli Bi Z., Dibi-Anoh P. A. et Kouamé K. R., 2021 : Identification et analyse des stratégies d'adaptation et de résilience à la variabilité pluviométrique dans le Centre-Est de la Côte d'Ivoire. Journées Géographiques de Côte d'Ivoire, 2020, *Generis Publishing*, **1**, 243-264.
- Kouakou A. L., Aménan M. K. -K., Gnamba Y. J. B. et Yao J. C., 2021 : Incidences de la variabilité pluviométrique sur la production de l'igname dans le terroir de Guiendé (sous-préfecture de Tanda). Journées Géographiques de Côte d'Ivoire, 2020, *Generis Publishing*, **1**, 266-281.
- Lassissi A., 1998 : *La MARP dans les communautés de pêche (un guide pour les agents de terrain)*. Programme pour le Développement Intégré des Pêches Artisanales en Afrique de l'Ouest (DIPA), Cotonou, Bénin, 125 pages.
- N'Da K. C., Dibi Kangah P., Djibril D. N., Kouakou B. D. et Zuéli K. B., 2016 : Changement climatique : quelques aspects de la variabilité climatique dans le bassin versant du Bandama en Côte d'Ivoire. *RSS-PASRESS*, **10**, 56-104.
- N'Guettia R. Y., Dofissi S. O.-D., Koffi B. et Lassina F., 1995 : Déclin de la pluviosité en Côte d'Ivoire : impact éventuel sur la production du palmier à huile. *Sécheresse*, **3**, 6, 265-271.

- Noufé D., 2011 : *Changements hydroclimatiques et transformations de l'agriculture : l'exemple des paysanneries de l'Est de la Côte d'Ivoire*. Thèse soutenue à l'Université de Paris 1, France, 375 pages.
- Paturel J.E., Servat E., Delattre M.O. et Lubes-Niel H., 1998 : Analyse de séries pluviométriques de longue durée en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne dans un contexte de variabilité climatique. *Hydrological Sciences Journal*, **43**, 937-946.
- Ouédraogo M., Dembélé Y. et Somé L., 2010 : Perceptions et stratégies d'adaptation aux changements des précipitations : cas des paysans du Burkina Faso. *Sécheresse*, **21**, 2,87-96.
- Site de téléchargement du logiciel R : <http://cran.r-project.org/bin/windows/base/>
- Sohou S. O., N'Da K. C. et Dibi Kangah A. P., 2021 : Impacts climatiques et stratégies d'adaptation paysannes dans les zones forestières ivoiriennes depuis 1961. *Géovision Mieux comprendre l'espace*, Numéro Hors-série, **2**, 3, 442-458.
- Sultan B., Janicot S., Christian B., Michael D., Bertrand M., Seydou T., Benoît S., 2008 : Les impacts agronomiques du climat en Afrique de l'Ouest : une illustration des problèmes majeurs. *Sécheresse*, **19**,1, 29-37.
- Sultan B., 2011 : *L'étude des variations et du changement climatique en Afrique de l'Ouest et ses retombées sociétales*. Mémoire de synthèse des activités scientifiques présenté en vue de l'obtention de l'Habilitation à diriger des recherches, Université Pierre et Marie Curie, Paris, 137 pages.
- Tidjani A. D., Abdou A. A., Faran M., Amadou O., Amoukou I., Ozer P., Bouzou I. et Ambouta K. J.-M., 2017 : Perceptions de la variabilité climatique et stratégies d'adaptation dans le système oasien de Gouré (Sud-Est Niger). *Agronomie Africaine*, **28**, 2, 25-37.
- Vodounou B., et Doubogon O. Y., 2016 : Agriculture paysanne et stratégies d'adaptation au changement climatique au Nord-Bénin. *Revue Cybergeo : European Journal of Geography, Environnement, Nature, Paysage*. Disponible en ligne à : <URL://cybergeo.revues.org/27836>, 28 pages.
- Yabi I., 2013 : Perceptions paysannes des facteurs de risques climatiques sur la production de l'ananas à Toffo au Bénin. *Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, **1**, 84-96.
- Zhang X. et Yang F., 2004 : *RClimDex1.0, User Manual*. Climate Research Branch Environment, Downsview, Ontario, Canada, 23 pages.

## IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR L'ÉVOLUTION DES CONDITIONS AGROCLIMATIQUES DU BASSIN IVOIRIEN DE LA COMOÉ

Djibril D. NOUFÉ\*<sup>1</sup>, Amidou DAO<sup>1</sup>, Emile G. SORO<sup>1</sup>, Pauline K. DIBI<sup>2</sup>, Dominique DUMAS<sup>3</sup>,  
Télesphore Y. BROU<sup>4</sup>, Sylvain BIGOT<sup>5</sup>, Bamory KAMAGATE<sup>1</sup>, Lanciné D. GONE<sup>1</sup>,  
Bi Tié A. GOULA<sup>1</sup>, Eric SERVAT<sup>6</sup>, Gil MAHE<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Université Nangui Abrogoua - Laboratoire Géosciences & Environnement, 02 BP 801 Abidjan 02, Côte d'Ivoire  
([dnoufe@hotmail.com](mailto:dnoufe@hotmail.com)/[dabissinou.sge@univ-na.ci](mailto:dabissinou.sge@univ-na.ci))

<sup>2</sup> Université Félix Houphouët Boigny - Institut de Géographie tropicale (IGT), Abidjan, Côte d'Ivoire

<sup>3</sup> Université Lyon3 - UMR Environnement Ville Société (EVS), France

<sup>4</sup> Université de La Réunion - Laboratoire Océan Indien : Espaces et Sociétés (OIES), France <sup>5</sup> Université Grenoble Alpes - Laboratoire Interdisciplinaire de Physique (LIPhy), France <sup>6</sup> Université Montpellier - UMR 050 HSM (IRD)/UMR 5569 (CNRS), France

**Résumé** : Zone d'agriculture pluviale conventionnelle, le bassin de la Comoé subit des modifications environnementales et climatiques, depuis les décennies 1970 et 1980. Cette recherche évalue l'impact des changements climatiques sur l'évolution des conditions hydriques de production ; l'analyse fréquentielle des saisons culturales par simulation du bilan hydrique de culture et l'estimation des cumuls annuels de déficits hydriques, mettent en évidence les impacts du changement climatique sur les conditions hydriques de production: les indicateurs agroclimatiques, notamment les besoins en eau de culture et les cumuls annuels de déficits hydriques calculés, montrent une évolution spatio-temporelle hétérogène des potentialités agroclimatiques du bassin.

**Mots clés** : Agroclimatologie, bilan hydrique de culture, sous-bassin sud de la Comoé, Côte d'Ivoire

**Abstract**: The Comoe river Basin is a conventional rainfed agricultural area that has been subject to environmental and climatic changes, since the 1970s and 1980s. This research assesses the impact of climate change on the evolution of water production conditions. The frequency analysis of crop seasons by simulation of the crop water balance and the estimation of annual accumulated water deficits highlight the impacts of climate change on water production conditions: agroclimatic indicators, notably crop water requirements and calculated annual accumulated water deficits, show a heterogeneous spatiotemporal evolution of the basin's agroclimatic potentials.

**Keywords**: Agroclimatology, crop water balance, southern Comoe sub-basin, Côte d'Ivoire

### INTRODUCTION

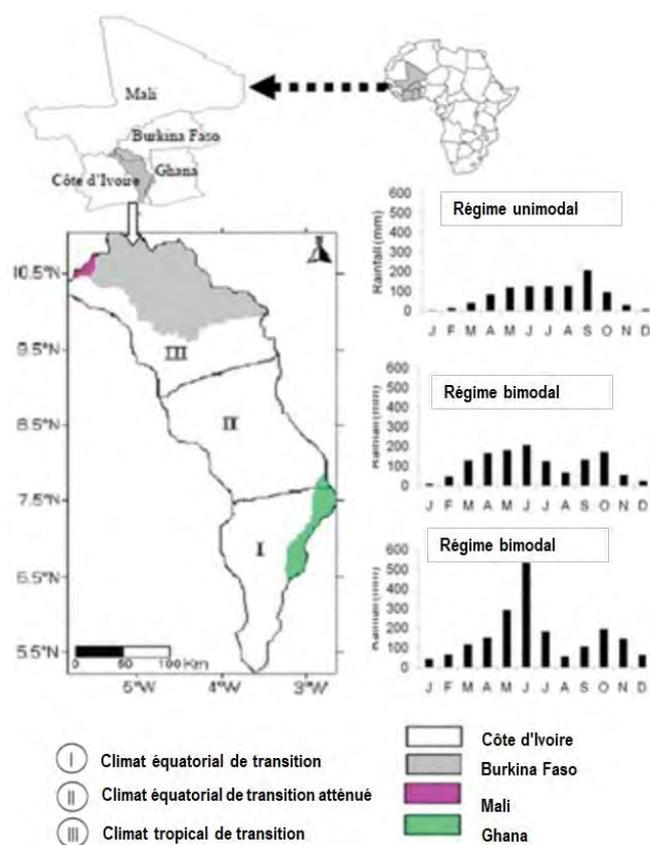
Depuis des décennies, le bassin de la Comoé subit une sécheresse récurrente qui se manifeste par des déficits pluviométriques et des modifications du régime des pluies (Noufé *et al.*, 2011 ; Ismaël *et al.*, 2022). En effet, la baisse pluviométrique amorcée dans le golfe de Guinée à la fin des années 1960, s'est intensifiée durant les décennies 1970 et 1980, avant une certaine rémission au cours des années 1990. Toutefois, les études agroclimatiques sont rares à l'échelle de ce bassin. Celles qui existent sont basées sur la pluviométrie, perdant ainsi de vue que le climat agricole diffère de la seule occurrence ou absence de pluies (Noufé *et al.*, 2011) ; car du point de vue agroclimatique, de simples variations de température, de précipitation, d'humidité de l'air et du sol, peuvent conditionner le potentiel de productivité, en impactant la croissance des cultures. Aussi, tenant compte du niveau de la réserve utile du sol (RU), de la pluviométrie et de

l'évapotranspiration journalières, cette étude vise à montrer, à partir de la simulation du bilan hydrique journalier (Allen *et al.*, 1998), l'évolution spatio-temporelle de la durée des saisons culturales, et du risque de déficit hydrique (DH). Les résultats obtenus permettent d'évaluer l'impact des changements climatiques sur les conditions hydriques de production du bassin.

## PRÉSENTATION DE LA ZONE, MATÉRIEL ET MÉTHODES

### La zone d'étude

Situé entre 5°-11°N et 5°30'-3°30'W, le bassin ivoirien de la Comoé est assez représentatif des domaines écologique et climatique du pays. Du fait des balancements saisonniers de la zone de convergence intertropicale (ITCZ), la mousson ouest-africaine provoque dans la partie sud de ce bassin, deux saisons de pluies au printemps et à l'automne, entrecoupées de deux saisons sèches : une longue en hiver et une courte en été (Figure 1). Plus bas sont évoquées les saisons culturales, la grande et la petite, peut-être serait-il utile de les mentionner ici ?



**figure 1 :** Situation du bassin de la Comoé et domaines climatiques associés (*synthèse établie d'après des données provenant de la SODEXAM, de 1950 à 2010*)

### Données d'analyse

Cette recherche retient la période d'étude allant de 1950 à 2010, qui présente une fenêtre temporelle commune aux 12 stations retenues. Les données utilisées sont principalement de deux ordres : (i) climatiques, (ii) et agroclimatiques.

**Les données climatiques** comprennent les séries pluviométriques journalières et les données d'évapotranspiration potentielle (ETP) mensuelle. Les variables pluviométriques journalières sont issues de la base de données de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN). Elles ont été critiquées et archivées au Laboratoire HydroSciences Montpellier sur le site SIEREM (Boyer *et al.*,

2006). Quant aux données d'évapotranspiration potentielle, elles dérivent de la base de données de l'Unité de Recherche Climatique de l'Université de l'Angleterre de l'Est (<http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>).

**Les données agroclimatiques** sont constituées des niveaux de réserve maximum en eau utile (RU) du sol (60, 120 et 200 mm) obtenus suivant un gradient régional nord/sud (Morel *et al.*, 1979), tandis que les valeurs de Kc dérivent quant à elles, des Bulletins FAO (24 & 56).

### Les méthodes

Les méthodes reposent ici sur trois approches : (i) la méthode des écarts centrés réduits couplée avec celle du filtre passe-bas de "Hanning" d'ordre 2, (ii) la méthode de détermination des déficits hydriques annuels cumulés et (iii) la simulation du bilan hydrique de culture.

La simulation du bilan hydrique de culture intègre respectivement les données pluviométriques journalières, les données d'évapotranspiration potentielle (ETP), la réserve utile (RU) en eau du sol et les coefficients culturaux (kc).

Ces approches doivent permettre d'aboutir à une caractérisation de la durée fréquentielle (8 années sur 10) des saisons culturales, avant et après 1970 (date de rupture définie par Noufé *et al.* (2011)), en tenant compte de la durée des cycles culturaux et du drainage (DR) qui constitue un facteur d'engorgement des sols.

### Caractérisation de la sécheresse dans la zone d'étude

Il s'agit de mettre en évidence les périodes d'excédent et de déficit pluviométrique. Ainsi, un indice pluviométrique annuel est déterminé comme une variable centrée réduite, au moyen de l'équation suivante :

$$X_{ij} = \frac{(x_{ij} - \bar{x}_i)}{\sigma_i} \quad (1)$$

avec :

$x_{ij}$  : hauteur de pluie totale pour une station i à une année j donnée ;

$\bar{x}_i$

— : moyenne interannuelle de pluie à la station i sur la période

$\bar{x}_i$  d'observation ;

$\sigma_i$  : écart type de la série pluviométrique annuelle.

$\sigma_i$

Cette méthode est couplée avec la méthode dite de "filtre passe-bas non récursif de Hanning d'ordre 2", en vue d'éliminer les variations saisonnières dans les séries temporelles. Chaque terme de la série est calculé de la manière suivante :

$$X_{(t)} = 0,06x_{(t-2)} + 0,25x_{(t-1)} + 0,38x_{(t)} + 0,25x_{(t+1)} + 0,06x_{(t+2)} \quad (2)$$

Pour  $3 \leq t \leq (n-2)$  et où :

$X_{(t)}$  = le total pluviométrique pondéré du terme t,

$X_{(t-2)}$  &  $X_{(t-1)}$  = les totaux pluviométriques des deux termes qui précèdent immédiatement le terme t,  $X_{(t+2)}$

et  $X_{(t+1)}$  = les totaux pluviométriques des deux termes qui suivent le terme t.

Les totaux pluviométriques pondérés des deux premiers termes [ $X_{(1)}$ ,  $X_{(2)}$ ] et des deux derniers termes [ $X_{(n-1)}$ ,  $X_{(n)}$ ] de la série, sont calculés comme il suit (*n étant la taille de la série*) :

$$X_{(1)} = 0,54x_{(1)} + 0,46x_{(2)} \quad (2.1)$$

$$X_{(2)} = 0,25x_{(1)} + 0,50x_{(2)} + 0,25x_{(3)} \quad (2.2)$$

$$X_{(n-1)} = 0,25x_{(n-2)} + 0,50x_{(n-1)} + 0,25x_{(n)} \quad (2.3)$$

$$X_{(n)} = 0,54x_{(n)} + 0,46x_{(n-1)} \quad (2.4)$$

### Caractérisation de l'évolution de la durée des saisons culturales

Les conditions hydriques de production sont caractérisées par le modèle d'équation du bilan hydrique suivant :

$$RS_i = RS_{i-1} + P_i - ETR_i - DR_i$$

(3)

Où :

$RS_i$  = lame d'eau stockée dans le sol (mm) au jour i

$P_i$  = pluviométrie (mm) du jour i

$ETR_i = (1 - k_s)ETP_i$  = Evapotranspiration réelle de la culture (mm) du jour i

$ETP_i$  = Evapotranspiration potentielle (mm) du jour i

$k_s = 1 - \min\left(\frac{RS_{i-1} + P_i - ETP_i}{RU - RFU}, 1\right)$  = coefficient de stress hydrique

$RU$  = réserve en eau utile du sol (mm)

$RFU$  = réserve en eau facilement utilisable du sol (mm)

$DR_i = \max(RS_{i-1} + P_i - ETR_i - RU, 0)$  = lame d'eau percolée (mm) du jour i

Le modèle itératif ci-dessus permet de déterminer les dates de début, de fin et de durée des saisons culturales, c'est-à-dire des périodes au cours desquelles les besoins en eau des cultures sont considérés couverts. On en déduit leurs fréquences d'occurrence de part et d'autre de 1970 (date de rupture

préalablement définie). L'estimation de la fonction de répartition de ces événements est obtenue en application d'une loi de distribution empirique de Weibull. La durée de la saison culturale est déterminée à la probabilité « p » de 80 % (durée atteinte ou dépassée 8 années sur 10). La probabilité complémentaire « p' » = 100 % – p = 20 % ; ce qui suppose que le l'agriculteur devra s'accommoder d'une perte partielle ou totale de sa récolte 2 années sur 10 ; cette valeur de 20 % traduit l'occurrence maximale du risque encouru par l'agriculteur (Noufé *et al.*, 2011).

### Caractérisation du risque interannuel de déficit hydrique

On parle de déficit hydrique lorsque l'eau disponible pour une plante quelconque ne lui permet plus de répondre à la demande évaporative (Noufé *et al.*, 2011). Ainsi, la transpiration de la plante (ETr) sera inférieure à l'évapotranspiration maximale (ETM). Sur la base du modèle de bilan hydrique journalier déjà explicité, et par analogie au seuil de risque précédemment fixé, nous avons déterminé les déficits hydriques atteints ou dépassés 2 années sur 10 (20 %). Ainsi, il y a déficit hydrique (DH), si le bilan hydrique (*BHc*) est négatif :

$$DH = -BH \quad (4)$$

L'année étant divisée en périodes élémentaires de 10 jours, pour chaque période élémentaire on calcule le déficit hydrique cumulé ( $DH_{10}$ ), c'est-à-dire la somme des déficits journaliers tels que :

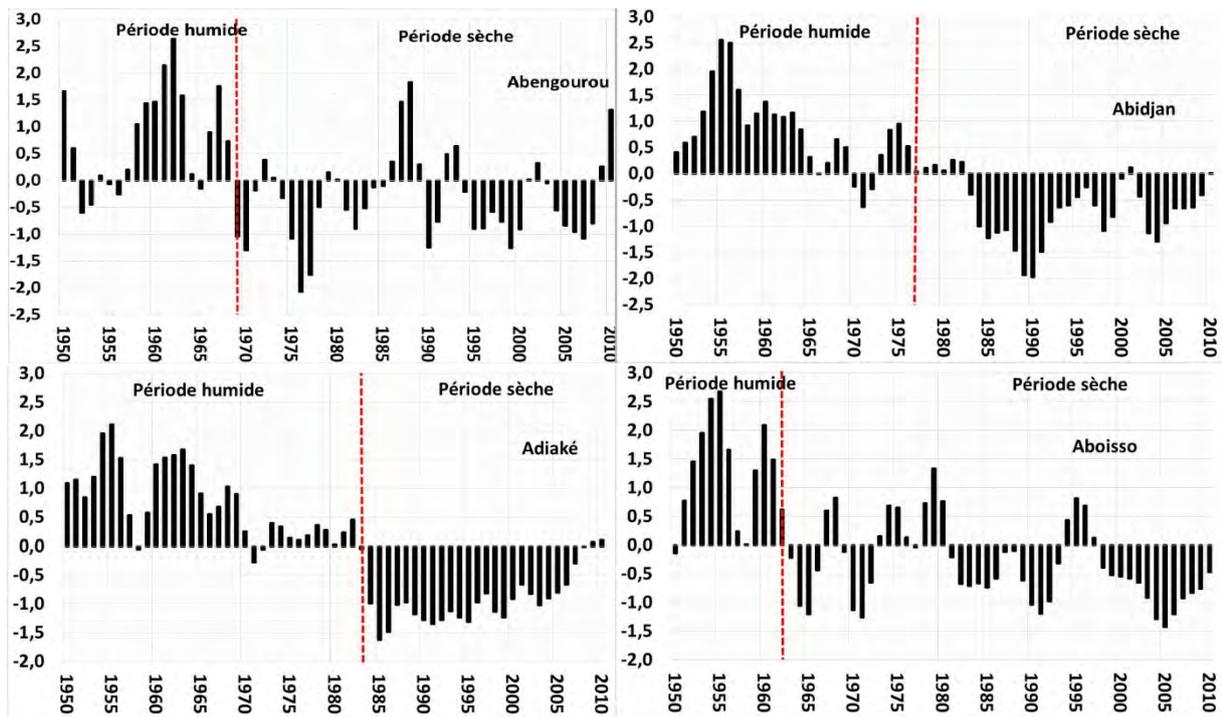
$$\left( DH_{10} = \sum_{j=1}^{10} DH_j \right) \quad (5)$$

Sur cette base, la répartition interannuelle des déficits hydriques décennaires ( $DH_{10}$ ) est analysée statistiquement par classification fréquentielle.

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 2.1. Une baisse significative des cumuls pluviométriques à partir des années 1970, associée à une réduction marquée de la durée des saisons culturales

La représentation des écarts pluviométriques standardisés (Figure 2) montre deux périodes opposées dans l'évolution de la pluviométrie du bassin : au cours des décennies 1950 et 1960, les cumuls pluviométriques interannuels sont globalement excédentaires sur l'ensemble ; mais à partir des années 1970, ils sont devenus dramatiquement déficitaires. Ces résultats confirment et complètent des études antérieures (Mahé *et al.*, 2001) pour lesquelles cette transition se serait plutôt produite autour des années 1970. Notons toutefois, qu'au cours des années 1990 (Mahé *et al.* 2001 ; Noufé *et al.*, 2011), un retour temporaire à des conditions plus pluvieuses s'observe dans l'ensemble du bassin, sauf dans certaines stations du littoral (Figure 2).



**figure 2 :** Écart centrés réduits des précipitations pour quatre stations du bassin, entre 1950 et 2010 (les traits verticaux pointillés correspondent à des ruptures statistiques des séries calcul effectués).

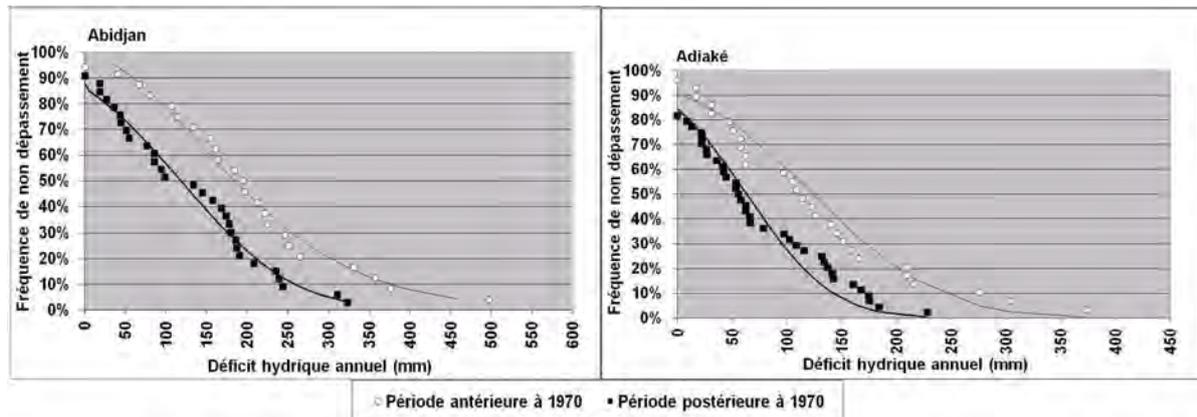
La détérioration des conditions pluviométriques analysées ci-dessus, se répercute sur le déroulement et la durée des saisons culturales. On constate que si la grande saison culturale des régimes bimodaux en moyenne et basse Comoé n’a pas connu de variation significative au sens statistique, la petite saison culturale a en revanche, pratiquement disparu sur le littoral où elle n’atteint même plus 80 jours, sauf à Aboisso où, au seuil de probabilité 8 années sur 10, elle est passée de 108 à 83 jours, avant et après 1970 (Tab. 1).

**Table 1 :** Variation de la durée des saisons culturales au seuil de probabilité 8 années sur 10 (80 %), dans le bassin de la Comoé, avant et après la rupture pluviométrique.

	zones	1 <sup>ère</sup> saison culturale			2 <sup>ème</sup> saison culturale		
		Avant 1970	Après 1970	Variation (%)	Avant 1970	Après 1970	Variation (%)
<b>Haute Comoé</b>	Zone soudanaise						
Ouangolodougou		168	146	13			
Ferkessédougou		183	165	10			
Bouna		181	180	1			
<b>Moyennes</b>		<b>175</b>	<b>161</b>	<b>8</b>			
<b>Moyenne Comoé</b>							
Bondoukou	Zone de transition	117	117	0	85	85	0
Abengourou		140	140	0	83	83	0
Adzopé		142	120	15	52	68	-31
<b>Moyennes</b>		<b>131</b>	<b>128</b>	<b>2</b>	<b>93</b>	<b>86</b>	<b>7</b>
<b>Basse Comoé</b>	Zone guinéenne						
Abidjan		167	155	7	86	76	12
Adiaké		187	167	11	90	73	19
Aboisso		173	171	1	108	83	23
<b>Moyennes</b>		<b>176</b>	<b>164</b>	<b>6</b>	<b>95</b>	<b>77</b>	<b>18</b>

## 2.2 Un gradient de diminution nord/sud du cumul annuel de déficit hydrique

Par analogie au seuil de risque précédemment fixé, il ressort des résultats obtenus sur les deux périodes considérées, que la variation du déficit hydrique cumulé évolue suivant un gradient de diminution nord/sud. Ainsi, à l'exception du secteur nord, le déficit hydrique n'a pas significativement varié à Abengourou et à Aboisso, en moyenne et basse Comoé (Figure 3). Toutefois, sur le secteur littoral, les distributions statistiques ne s'ajustent pas aux lois normales (Figure 3), preuve s'il en fallait, que les événements extrêmes ne sont pas à exclure dans cette zone.



**figure 3** : Durée fréquentielle du cumul interannuel de déficit hydrique, au seuil de probabilité 2 années sur 10 (20 %), dans deux stations assez représentatives du sous-bassin sud de la Comoé, avant et après 1970.

## CONCLUSION

L'étude montre une succession d'années déficitaires et excédentaires associées à une dégradation des conditions agroclimatiques sur l'ensemble du bassin. Les séquences de périodes humides et sèches définies par l'estimation des écarts standards des séries temporelles, ont permis d'apprécier l'évolution spatiale de l'offre pluviométrique interannuelle. Quant à la simulation du bilan hydrique de culture, elle a permis la discrimination du bassin en aires de potentialités agroclimatiques relativement homogènes. Aussi, convient-il d'ajouter que le Sud-Comoé constitue un territoire d'économie de plantation ancienne et de front pionnier saturé où l'absence de forêts induit désormais un net recul des superficies emblavées en café et cacao. Ainsi, les perspectives s'inscrivent ici dans la reconversion vers de nouvelles spéculations pour lesquelles la donne climatique actuelle constitue un défi majeur.

**Remerciements** : les auteurs remercient la Région AURA (Auvergne-Rhône-Alpes) pour son soutien financier dans le cadre du projet incitatif Pack Ambition International 2020 (n° 20 006900 01-40892).

## Bibliographie

- Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., et Smith M. 1998 : Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements : UN Food and Agricultural Organization, Irrigation & Drain. N° 24 & 56.
- Boyer J.F., Dieulin C., Rouche N., Cres A., Servat E., Paturel J.E., Mahe G., 2006 : SIEREM an environmental information system for water resources. *IASH*. **308**, 19-25
- Ouattara I., Dao A., D. Noufé D., 2022 : Assessment of Meteorological Drought in Climate Variability Context within the Comoé Transboundary Watershed. *Atmospheric and Climate Sciences*, **12**, 1-17.
- Mahé G., L'Hôte Y., Olivry J.C., Wotling G. 2001: Trends and discontinuities in regional rainfall of west and central Africa–1951–1989. *Hydrol Sci J*; **46** (2), 211-226.

Morel R., Raoult B., 1979 : Agroclimatologie de la Côte d'Ivoire. Ministère du Plan, Abidjan, *Éditions BDPA Paris*, (1), 5-10.

Noufé D., Lidon B., Mahé G., Servat E., Brou Y. T., Koli B. Z., Chaléard J.-L., 2011 : Variabilité climatique et production de maïs en culture pluviale dans l'Est ivoirien. *Hydrol., Sci.*, J. **56** (1), 152–167.

## VARIABILITÉ DE LA TEMPÉRATURE DE L'AIR À BISKRA (ALGÉRIE)

**Mohammed FACI<sup>1</sup>, Miloud OUBADI<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA), Campus universitaire - Biskra, Algérie, [fm\\_alg@yahoo.fr](mailto:fm_alg@yahoo.fr)

<sup>2</sup> Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA), Station expérimentale de Naama, Algérie, [oubadi@hotmail.fr](mailto:oubadi@hotmail.fr)

**Résumé :** Dans la présente contribution, nous avons analysé la variabilité de la température dans la région de Biskra, sur une période de 68 années (1951-2018). Nous avons recouru dans un premier temps au test de Mann-Kendall, afin de faire ressortir les tendances et période d'apparition de ces tendances. Dans un deuxième temps, nous avons analysé le nombre et la répartition des vagues de chaleur durant la période estivale. Les températures ont connu une tendance à la hausse à partir de l'année 1992, alors qu'il ressort que le nombre et la répétitivité des vagues de chaleur ont connu une tendance vers la hausse au début des années 1980. En général, ces vagues sont réparties sur les deux mois les plus chauds de l'année, à savoir juillet et août ; ce qui répercuterait négativement sur la qualité des dattes, étant donnée leur coïncidence avec la période de maturité du fameux fruit 'Deglet Nour'.

**Mots-Clés :** température, hausse, Biskra, Deglet Nour.

**Abstract:** In this contribution, we have analyzed the variability of temperature in the region of Biskra, over a period of 69 years (1951-2018). We have used in a first step the Mann-Kendall test, in order to highlight the trends and period of appearance of these trends. In a second step, we analyzed the number and distribution of heat waves during the summer period. Temperatures have shown an upward trend since 1992, while the number and repetitiveness of heat waves have shown an upward trend since the early 1980s. In general, these waves are spread over the two hottest months of the year, namely July and August, which would negatively affect the quality of dates, given their coincidence with the period of maturity of the famous fruit 'Deglet Nour'.

**Keywords:** temperature, rise, Biskra, Deglet Nour.

### Introduction

Selon l'OMM (2021), la décennie 2011-2020 a été la plus chaude jamais constatée dans le monde depuis le début d'enregistrement des températures de l'air ; les six années les plus chaudes ont toutes été enregistrées depuis 2015, les années 2016, 2019 et 2020 arrivant en tête du classement. La température moyenne mondiale en 2020 a atteint environ 14,9 °C, soit 1,2 °C ( $\pm 0,1$  °C) de plus que sa valeur préindustrielle (période 1850-1900). Depuis les années 1980, chaque décennie est plus chaude que la précédente.

L'agriculture est considérée comme une activité économique qui devrait être vulnérable à la variabilité et au changement climatique. Elle implique des processus naturels qui nécessitent souvent des proportions fixes de nutriments, des températures, des précipitations et d'autres conditions (Kerveno, 2019).

L'importance socioéconomique et environnementale du palmier dattier en Algérie est une donnée connue et non discutable, que ce soit par la sédentarisation de la population, le marché d'emploi qu'elle offre dans les régions oasiennes ou par la part de devise générée par l'exportation des dattes (Benzouche, 2012).

Autrement dit, le palmier dattier constitue le pivot central du système oasien, où la vie est presque impossible en dehors de l'oasis ; c'est un écosystème très particulier, car il est fragile et complexe à la fois (Bouammar, 2007 ; Benzouche et Chehat, 2010).

Le patrimoine phœnicicole algérien englobe plus de 20 millions de palmiers, répartie sur 952 cultivars, dont plus de 62 % de pieds de Deglet Nour. La production a connu une augmentation depuis la deuxième moitié de la première décennie de ce millénaire, avec l'enregistrement de 9903770 quintaux en 2015. Le chiffre des exportations des dattes dépasse les 40 millions de dollars chaque année (Bouguedoura et *al.*, 2015 ; ONFAA, 2016 ; Moulai et Yahaya, 2019 ; FAOSTAT, 2020). Néanmoins, la Deglet Nour de Biskra est la seule variété détentrice d'un label d'Indexation Géographique Protégée (IGP).

L'analyse de données disponibles de la température de l'air à Biskra, afin de faire ressortir les tendances et la variabilité interannuelle, s'intègre dans un projet de recherche qui vise à comparer les besoins thermiques actuelles du palmier dattier par rapport à ceux enregistrés aux années 1970, afin de prévoir les impacts futurs d'une augmentation des températures sur le cycle phénologique du dattier.

## 1. Données et Méthodes

### 1.1. Région d'étude

Biskra se situe au Sud-Est de la partie nord de l'Algérie à environ 425 km d'Alger (Figure 1). La superficie de la wilaya (département) de Biskra est de 21509,8 km<sup>2</sup> (DPSB-Biskra, 2019).

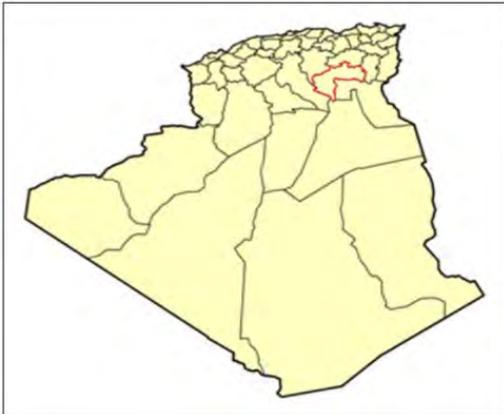


figure 1. Localisation de la wilaya de Biskra (en rouge).

### 1.2. Données climatiques

Pour le présent travail, nous avons utilisé les données météorologiques enregistrées dans la station météorologique de Biskra, qui dépend de l'Office National de Météorologie (ONM), située à environ 8 km de la ville de Biskra (ONM, 2019) ; ce sont des données homogènes et sans interruption. Nous avons analysé une série de données journalières de la température de l'air, d'une durée de 68 ans (1951-2018).

### 1.3. Test de tendance de Mann-Kendall

Dans le cas d'une série d'observations météorologiques, le test de tendance de Mann-Kendall est l'un des plus utilisés pour démontrer l'existence possible d'une tendance. Dans le cas d'existence d'une tendance linéaire (à la hausse ou à la baisse) basée sur des séries temporelles, ce test non paramétrique nous permettra de déterminer la période de rupture dans la série de données (McLeod et *al.*, 1990 ; Braud, 2011).

Selon Sneyers (1990), pour chaque élément  $x_i$  ou, ce qui est la même chose, pour chaque élément  $y_i$ , le nombre  $n_j$  d'éléments  $y_j$  le précédent ( $i > j$ ) est calculé tel que  $y_i > y_j$

La statistique de test  $t$  est alors donnée par l'équation :  $t = \sum_{i=1}^n n_{ii}$

Et sa fonction de distribution, sous l'hypothèse nulle, est asymptotiquement normale, avec comme moyenne et variance :

$$E(t) = \frac{n(n-1)}{4} \text{ et } \text{var } t = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72}$$

$$u(t) = \frac{[t - E(t)]}{\sqrt{\text{var}(t)}}$$

La statistique réduite du test est donnée par :

On cherche la probabilité  $\alpha_1$  à l'aide de la loi normale centrée réduite telle que  $\alpha_1 = \text{Prob}|u| > |u(t)|$ , l'hypothèse nulle est acceptée ou rejetée au niveau  $\alpha$  selon que l'on  $\alpha_1 > \alpha$  ou  $\alpha_1 < \alpha$ .

Lorsque les valeurs de  $u(t)$  sont significatives, on conclut à une tendance croissante ou décroissante selon que  $u(t) > 0$  ou  $u(t) < 0$ . Toutefois, lorsqu'on désire situer l'époque à partir de laquelle la tendance s'est manifestée, la statistique du test se prête mieux au calcul progressif et rétrograde nécessaire à cet effet. En inversant la direction du calcul, la variable  $u(t)$  obtenue est appelée série rétrograde. Le point d'intersection de  $u'(t)$  avec  $u(t)$  donne le début de la tendance (Oubadi et al., 2021).

Les résultats d'applications ont été représentés, en choisissant un seuil de signification de 5 %.

#### 1.4. Vagues de chaleur

D'après Faci et al. (2018a), pour désigner une journée de forte chaleur nous prenons en compte les températures maximales (Tmax) et les températures minimales (Tmin) de la journée, non pas on les considérant individuellement mais en faisant leur somme qui est assez représentative de la moyenne journalière de la température, parce qu'en période estivale, son évolution est proche d'une sinusoïde. Nous avons défini qu'une journée est chaude si la somme des Tmin et des Tmax dépasse un seuil considéré qui est égal à un dépassement d'au moins 10 °C de la somme moyenne (Tmax moyenne + Tmin moyenne).

$$\text{Seuil (Tmax + Tmin)} \geq (\text{Tmax moyenne} + \text{Tmin moyenne}) + 10 \text{ °C}$$

La moyenne des quatre mois les plus chauds de l'année (juin, juillet, août et septembre), sur les 60 années de données disponibles (1951-2010), est 60 °C. De ce fait, toute journée d'une somme (Tmax + Tmin) égale ou supérieur à 70 °C est considérée comme 'journée chaude' ou 'journée de forte chaleur' (Faci et al., 2016).

Pour la présente analyse, une vague de chaleur correspond à toute séquence de plus de deux journées consécutives de forte chaleur (Faci, 2018 ; Faci et al., 2018a ; Faci et al., 2018b).

## 2. Résultats

### 2.1. Test de tendance de Mann-Kendall

La température de l'air enregistrée à Biskra, pendant 68 années (1951-2018), montre une tendance vers la hausse des températures annuelles (ce sont les moyennes annuelles moyenné sur les 12 mois de l'année) ; elle a débutée dans les années 1980 pour les minimales et à partir des années 1990 pour les maximales (Figure 2).

Pour la même série de données, les températures minimales mensuelles varient entre 4,2 °C (enregistrée en janvier 2000) et 30,5 °C (juillet 2018) ; la moyenne des minimales du mois de janvier est

7,02 °C, alors que celle enregistrée en mois de juillet est 27,92 °C. De leur part, les températures maximales mensuelles basculent entre 14,8 °C (janvier 2006) et 43,5 °C (juillet 2018) ; la moyenne des maximales mensuelles les plus bas est enregistrée en mois de janvier (17,31 °C), par contre, la plus élevée été en mois de juillet (40,92 °C).

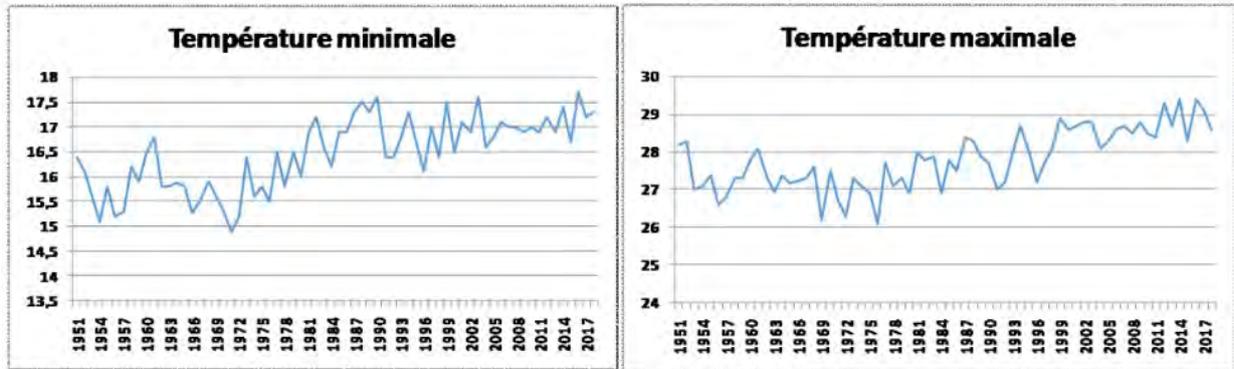


figure 2. Evolution de la température annuelle à Biskra durant la période 1951-2018 (en °C).

Au seuil de 5 %, l'application du test de Mann-Kendall a révélé une rupture significative à la hausse dans la série de températures moyennes annuelles ( $u(t)$  dépasse la valeur absolue de la valeur critique au niveau de 0,05, qui est de 1,96) ; la rupture a commencé en 1992 (Figure 3). L'identification de la rupture a permis de calculer l'augmentation de la température par la différence entre les deux périodes, après et avant cette rupture (Tableau 1). Cette hausse est de 1,03 °C.

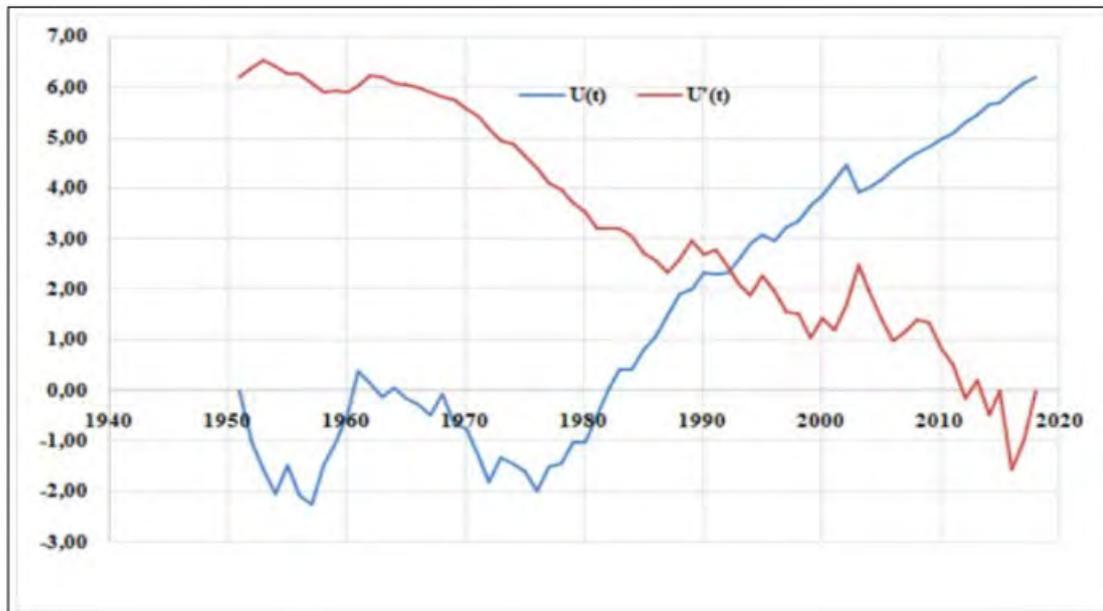


figure 3. Test de tendance de Mann-Kendall pour les températures moyennes annuelles à Biskra.

Tableau 1. Test de Mann Kendall, année de rupture et augmentation de la température pour la période d'étude 1951-2018 .

T	U(t)	Seuil de signification	Année de la rupture	Avant la rupture	Après la rupture	Augmentation (°C)
Température moyenne annuelle	6,18	1.96	1992	21,73	22,76	1,03

## 2.2. Evolution du nombre de journées chaudes

Le nombre de journées chaudes est, depuis quarante années, dans une tendance continue vers la hausse ; il est d'une moyenne de 26,78 journées par an durant la période 1991-2017 (Tableau 2).

**Tableau 2.** Evolution du nombre de journées chaudes par décennie à Biskra.

Période	Nombre	Moyenne par an
1951-1960	101	10,10
1961-1970	85	8,50
1971-1980	109	10,90
1981-1990	223	22,30
1991-2000	225	22,50
2001-2010	300	30,00
2011-2017	198	28,28

## 2.3. Evolution du nombre des vagues de chaleur

Le Tableau 3, illustre l'évolution par décennie du nombre de vagues de chaleur à Biskra. Une moyenne d'environ 3,5 vagues par année a été enregistrée durant la décennie 2001-2010, elle s'élève à 3,57 durant les sept (07) dernières années de la série des données (2011-2017).

**Tableau 3.** Evolution du nombre de vagues de chaleur par décennie à Biskra.

Période	Nombre	Moyenne par an
1951-1960	12	1,20
1961-1970	10	1,00
1971-1980	10	1,00
1981-1990	31	3,10
1991-2000	31	3,10
2001-2010	35	3,50
2011-2017	25	3,57

Jusqu'à la fin des années soixante-dix du siècle précédent, le nombre de vagues de chaleur varie entre zéro (0) et trois (3) vagues par an. A partir du début des années quatre-vingt, chaque année est caractérisée par l'enregistrement d'au moins une vague ; en général, le nombre varie entre deux et cinq (05) vagues. Alors que l'an 1982 était marqué par six vagues de chaleur. La moyenne annuelle de l'apparition des vagues de chaleur a grimpée de 1,2 vague par année durant la période 1951-1980 à 3,3 vagues/an durant la deuxième partie de la série analysée.

## Conclusion

L'analyse de la série des données de températures de l'air de la période 1951-2018, par le test de tendance de Mann-Kendall, indique une tendance vers la hausse des températures moyennes à partir de 1992. Depuis cette année de rupture, la température moyenne de l'air a connu une augmentation de 1 °C par rapport à la moyenne enregistrée avant cette date ; pareille pour les minimas et les maximas. Généralement, janvier est le mois le plus froid avec une température moyenne de 11,89 °C, alors que juillet est le plus chaud (34,66 °C).

Le nombre de journées chaudes a connu une tendance vers la hausse, passant d'un total de 101 journées durant la période 1951-1960 à 300 jours pendant la décennie 2001-2010 ; cet accroissement était accompagné par l'augmentation du nombre des vagues de chaleur, passant de 32 vagues (1951-1980) à 97 vagues (1981-2010).

Nous signalons que la durée des vagues de chaleur est devenue de plus en plus longue : nous avons enregistré, en 2012, deux vagues de 16 jours (27 juillet - 11 août) et de 14 jours (03-16 juillet). Alors que

la plus longue vague de la série était en 2015 : 17 jours consécutifs de forte chaleur, du 25 juillet au 10 août.

Ce changement n'a pas eu d'influences sur l'accroissement de la production et des rendements de Daglet Nour à Biskra. Cependant, un impact négatif a touché la qualité des dattes (calibre, couleur, consistance, goût, etc.) et le cycle phénologique de ce cultivar, à travers un avancement temporel des dates du début des différents stades.

De ce fait, le label d'IGP de ce fameux produit agricole algérien peut-être menacé, au cas où la qualité des dattes se dégraderait dans le futur, puisqu'elle est influencée par la variation de la température de l'air.

## Bibliographie

Benziouche S.E., 2012 : *Analyse de la filière dattes en Algérie ; constats et perspectives de développement, cas de la Daïra de Tolga*. Thèse de Doctorat, ENSA, El-Harrach – Alger, Algérie, 470 pages.

Benziouche S.E. et Chehat F., 2010 : La conduite du palmier dattier dans les palmerais des Ziban ; Quelques éléments d'analyse. *Européen Journal of Scientifique Recherche*, **42** (4), 644-660.

Bouammar B., 2007 : *Le développement agricole dans les régions sahariennes*. Document Multigraphié, Département des Sciences Economiques, Université d'Ouargla, Ouargla, Algérie, 64 pages.

Bouguedoura N., Bennaceur M., Babahani S. et Benziouche S.E., 2015 : Date Palm Status and Perspective in Algeria. In : *Date palm Genetic Resources, Cultivar Assessment, Cultivation Practices and Novel Products*. Springer, 125-168.

Braud I., 2011 : *Méthodologies d'analyse de tendances sur de longues séries hydrométéorologiques*. Fiche technique OTHU, **23**, 25-30.

Direction de la programmation et du suivi budgétaire de la wilaya de Biskra (DPSB-Biskra), 2019 : *Monographie de la wilaya de Biskra 2018*. DPSB, Biskra, Algérie, 203 pages.

Faci M., Matari A., Oubadi M. et Farhi Y., 2016 : Analyse des journées de forte chaleur en Algérie. In : Actes du 29<sup>e</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie, France, 261-266.

Faci M., 2018 : Evolution du nombre et de la durée de l'apparition des canicules en Algérie. In : Actes du 31<sup>e</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie, France, 80-85.

Faci M., Oubadi M., Matari A. et Farhi Y., 2018a : Analyse des journées caniculaires au Sahara algérien. *Revue des Régions Arides*, **41** (1), 37-42.

Faci M., Oubadi M., Matari A. et Farhi Y., 2018b : Heat waves in Algeria: A potential risk. *International Journal of Innovative Technical and Applied Sciences*, **2** (1), 13-21.

FAOSTAT., 2020 : Cultures. Consulté le 23/12/2020, <http://www.fao.org/faostat/fr/#data/QC>

Kerveno Y., 2019 : *Climat et agriculture : Il faudra toute une chaîne de transformations*. SESAME, **6**, 30-33.

McLeod A.I., Hipel K.W. et Bodo B.A., 1990 : Trend analysis methodology for water quality time series. *Environmetrics*, **2**, 169-200.

Moulai A. et Yahaya A., 2019 : *Note d'actualité sur les Oasis d'Algérie*. Rapport, RADD0, Montpellier, France, 12 pages.

Oubadi M., Hamou A. et Tedim F., 2021 : The rising temperature trend and elongation of the warm period in summer in the Algerian south-west, 1951–2010. *Acta Geographica Lodziensia*, **3**, 203-211.

Observatoire National des Filières Agricoles et Agroalimentaires (ONFAA), 2016 : *Suivi de campagne phœnicicole*. Note de conjoncture N° 2, ONFAA, Alger, Algérie, 7 pages.

Office National de la Météorologie (ONM), 2019 : *Résumés annuels du temps en Algérie*. ONM, Alger, Algérie, 112 pages.

Organisation Mondiale de Météorologie (OMM)., 2021 : *2020 est l'une des trois années les plus chaudes jamais enregistrées*. Consulté le 14/01/2021, <https://public.wmo.int/fr/medias/communiqu%C3%A9s-de-presse/2020-est-l%E2%80%99une-des-trois-ann%C3%A9es-les-plus-chaudes-jamais-enregistr%C3%A9es>

Sneyers R., 1990 : *On the statistical analysis of series of observations*. OMM, Genève, Suisse, 194 pages.

## NOUVELLE INCERTITUDE LIÉE AUX OCCURRENCES DE SÉQUENCES AVEC OU SANS PLUIE : IMPACT SUR LES RENDEMENTS AGRICOLES DANS LA RÉGION SUD-EST DE LA CÔTE D'IVOIRE

Dominique DUMAS <sup>1</sup>, Sylvain BIGOT <sup>2</sup>, Télésphore Y. BROU <sup>3</sup>, Jean-Emmanuel PATUREL <sup>4</sup>, Kouakou Bernard DJE <sup>5</sup>, Djibril D. NOUFE <sup>6</sup>, Pauline DIBI <sup>7</sup>, Dané BEUGRE <sup>5</sup>, Arona DIEDHIOU <sup>2</sup>, Christian CILAS <sup>8</sup>

<sup>1</sup> Université de Lyon - UMR Environnement Ville Société (EVS), France [dominique.dumas@univ-lyon3.fr](mailto:dominique.dumas@univ-lyon3.fr)

<sup>2</sup> Université Grenoble Alpes - Institut des Géosciences de l'Environnement (IGE), France [sylvain.bigot@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:sylvain.bigot@univ-grenoble-alpes.fr)

<sup>3</sup> Université de La Réunion - Laboratoire Océan Indien : Espaces et Sociétés (OIES), France

<sup>4</sup> IRD UMR Hydrosociétés Montpellier, France

<sup>5</sup> SODEXAM, Direction de la Météorologie Nationale, Abidjan 15, Côte d'Ivoire

<sup>6</sup> Université Nangui-Abrogoua - Laboratoire Géosciences et Environnement (LGE), Abidjan, Côte d'Ivoire

<sup>7</sup> Université Félix Houphouët-Boigny - Institut de Géographie Tropicale (IGT), Abidjan, Côte d'Ivoire

<sup>8</sup> CIRAD (UMR PHIM) Montpellier, France / CIRAD, DGDRS, Abidjan, Côte d'Ivoire

**Résumé :** Avec ses grandes plantations industrielles, le changement climatique actuel fragilise fortement les systèmes agro-écologiques de la Côte d'Ivoire. L'étude s'appuie sur des observations pluviométriques relevées à la station d'Abidjan, au pas de temps journalier et horaire. Elle cherche tout particulièrement à cerner comment les séquences sèches, ou pluvieuses, ont évolué sous la contrainte du changement climatique actuel. Les premiers résultats de ce travail montrent clairement une diminution des séquences sèches. A l'échelle mensuelle, il faut cependant nuancer cette érosion des durées selon les moments de l'année. Ces tendances, globalement à la baisse, viennent contrarier les pratiques culturelles de ces régions, qui impliquent de pouvoir conserver une partie du temps des moments suffisamment longs dépourvus d'humidité.

**Mots-clés:** Agroclimatologie tropicale, Côte d'Ivoire, durée des périodes pluvieuses, changement climatique récent.

**Abstract:** With its large industrial plantations, the current climate change is strongly weakening the agro-ecological systems of Côte d'Ivoire. The study is based on daily and hourly rainfall observations at the Abidjan station. In particular, it seeks to identify how dry or rainy sequences have evolved with current climate change. The first results of this study clearly show a decrease in dry spells. However, on a monthly time resolution, this decrease of durations must be qualified according to the season. These trends, which are globally decreasing, contradict the agricultural practices of these regions, which imply being able to keep sufficiently long periods without soil humidity.

**Keywords:** Tropical agroclimatology, Côte d'Ivoire, duration of dry spells, recent changes.

### Introduction

Dans la région du SE de la Côte d'Ivoire, les plantations d'hévéa et de palmiers à huile impliquent un contexte agroclimatique, notamment pluviométrique, favorable tant sur les quantités d'eau enregistrées que sur la répartition des pluies au cours de l'année, des mois, voire des journées (Bigot *et al.*, 2005 ; Schroth *et al.*, 2016 ; Cumunel, 2020). Si les quantités d'eau doivent être suffisantes, des périodes de sécheresse, plus ou moins longues, sont tout autant indispensables pour les cultivateurs, que ce soit pendant ou après les récoltes. Pour le développement, le séchage des régimes de fruits du palmier à huile, ou pour la récupération du latex (calendrier et planification des saignées), une forte occurrence de petites averses nuit aux récoltes et contribue à diminuer globalement les rendements. Cette diminution peut même être, sur certaines années humides, extrêmement marquée, comme le notent les planteurs

entretenus en 2021 et impliqués dans nos études de terrain de la région de la Comoé, située à la limite frontalière avec le Ghana.

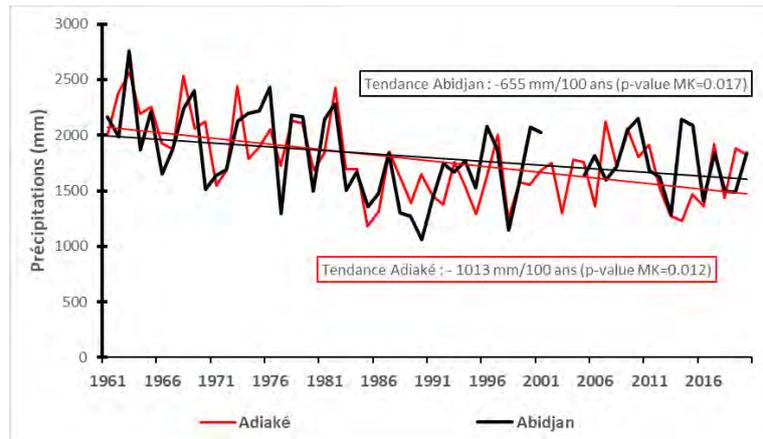
Les cultures et les récoltes sont-elles amenées à tenir compte des caractéristiques pluviométriques de plus en plus inattendues, imprévisibles ? Ces épisodes de pluie au cœur de la petite saison sèche, voire pendant la saison sèche, sont-ils réellement plus fréquents aujourd'hui ? A contrario, le système agraire, avec depuis les années 1970 ses nouvelles plantations monospécifiques, est-il devenu plus sensible à une nouvelle temporalité pluviométrique (comme les petits épisodes qui auparavant n'affectaient pas, ou très peu, la production agricole) ?

Ce travail, mené avec un financement de la Région Auvergne Rhône-Alpes (AURA), vise justement à mieux définir et caractériser cette incertitude pluviométrique et son évolution depuis ces dernières décennies. L'approche implique d'analyser les séquences pluviométriques à des échelles temporelles fines, journalières et infra-journalières. Plusieurs stations pluviométriques situées dans le sud-est de la Côte d'Ivoire sont utilisées. L'objectif de cette étude est ainsi de mieux définir les probabilités d'apparition de séquences sèches ou de séquences humides, notamment selon leur durée et leur intensité. De même, l'occurrence de pluie à des périodes de l'année normalement sèches est détaillée. Enfin, à partir de ces caractéristiques probabilistes et fréquentielles, l'étude aborde l'évolution tendancielle globale du risque d'apparition de séquences pluvieuses ou sèches, à différents moments de l'année pour contribuer à l'aide à la décision.

Le bouleversement des conditions climatiques actuelles (Bigot *et al.*, 1998 ; Klein Tank *et al.*, 2009 ; Goula *et al.*, 2012 ; Soro *et al.*, 2016) semble se caractériser par une recrudescence de phases pluvieuses, ou par l'apparition d'épisodes pluvieux lorsqu'ils étaient alors peu présents. La distribution temporelle des pluies a-t-elle été modifiée ? Les cumuls annuels montrent des tendances à la baisse (figure 1), mais cachent-ils une réalité plus complexe avec, par exemple, une multiplication des épisodes pluvieux, un accroissement de la segmentation de ces épisodes, ou encore une réduction des périodes sans pluie ? L'objectif de ce premier travail est justement de caractériser dans cette région le comportement pluviométrique et son évolution récente.

## **Méthodologie**

Afin de cerner et quantifier le comportement pluviométrique de la région sud-est de la Côte d'Ivoire, l'analyse du comportement pluviométrique s'est appuyée sur les données journalières relevées en continu depuis 1961 à la station pluviométrique située à l'aéroport d'Abidjan. L'année 2021, incomplète, a été écarté. Sur la période 1990 à 2020, les enregistrements journaliers de la station d'Abidjan sont complétés de relevés horaires à partir de carnets météorologiques spécifiques. La station littorale d'Adiaké, située à 80 km plus à l'est d'Abidjan, aurait pu également être utilisée dans cette étude, car elle était d'avantage centrée sur les espaces agricoles du SE de la Côte d'Ivoire. Cependant, dans la mesure où les pluies horaires étaient disponibles à la station d'Abidjan, et que les enregistrements entre les deux stations sont fortement corrélés (figure 1), l'analyse a été exclusivement centrée sur les données de la station d'Abidjan. Par la suite, il sera utile de compléter cette approche en intégrant les observations de la station d'Adiaké.



**figure 1.** Evolution des précipitations annuelles depuis 1961 aux stations d'Abidjan et d'Adiaké : tendances significatives à la baisse.

Afin d'analyser les caractéristiques des pluies, et des séquences pluvieuses ou non pluvieuses, il a été retenu de regarder mensuellement et annuellement :

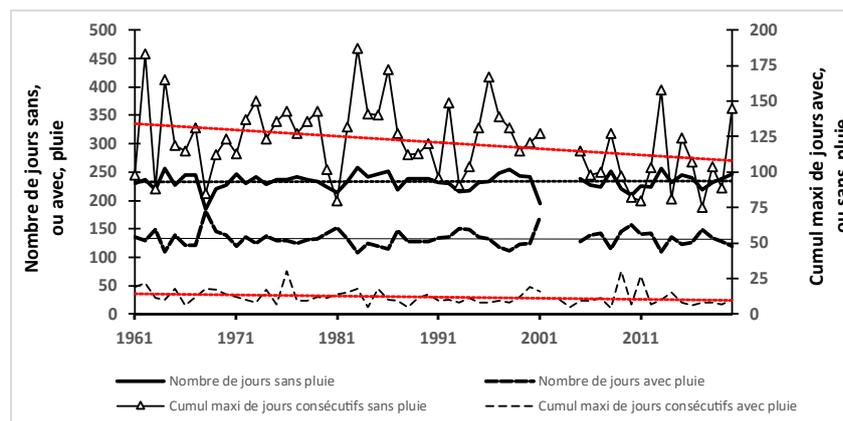
- le nombre de jours sans pluie, et le nombre de jours avec pluie ;
- le cumul de jours consécutifs sans pluie et avec pluie pour chaque mois : c'est justement sur ces phases que les agriculteurs peuvent, ou non, pratiquer des saignées ou profiter d'une période de séchage de leur récolte ;
- le cumul horaire avec de la pluie ;
- le cumul d'heures consécutives avec ou sans pluie.

La loi de Gumbel a été appliquée aux séries pour estimer les valeurs décennales ( $T=10$  ans), ou les valeurs avec des fréquences plus rares, plus pertinentes que les moyennes pour décrire les paramètres. Le test non-paramétrique de Mann-Kendall (Sneyers, 1975), au seuil de significativité de 5 %, valide ou non les tendances observées.

## Résultats et discussion

### Variations des pluies journalières à l'échelle annuelle

L'analyse des résultats permet de dégager certaines caractéristiques, de préciser les phases de pluie, les séquences sèches, et de saisir ou nuancer certaines évolutions. La figure 2 présente l'évolution depuis 1961 du nombre de jours annuel avec ou sans pluie. A l'échelle de l'année, le nombre de jours avec ou sans pluie n'évolue pas significativement depuis 1961, les tendances associées ne sont pas validées avec le test de Mann-Kendall (tableau 2). Sur la période étudiée, le nombre moyen de jours sans pluie dans l'année, avec 233 jours (à  $T=10$  ans, 252 jours), reste donc stable et ne montre pas une érosion particulière. Il en est -logiquement- de même pour le nombre de jours dans l'année enregistrant des précipitations, avec 133 jours en moyenne (à  $T=10$  ans, 155 jours).



**figure 2.** Evolution du nombre de jours avec ou sans pluie depuis 1961 à la station d'Abidjan.

Dès lors, on pourrait penser que la perception des cultivateurs n'est pas totalement fondée, puisqu'à cette échelle de lecture, le nombre de jours sans pluie n'est pas marqué par une tendance à la hausse, ou une recrudescence marquée du nombre de jours de pluie.

En revanche, l'observation mensuelle des journées consécutives sans pluie montre des évolutions plus marquées. Ces durées cumulées caractérisent d'ailleurs mieux la longueur des moments sans pluie que le simple nombre de jours sans pluie, dans un mois ou dans une année. Ce sont particulièrement ces phases durant lesquelles les agriculteurs peuvent compter sur une période durable sans humidité. Dépourvues de pluie, ces longues séquences sèches intéressent dès lors d'avantage les agriculteurs, puisqu'elles garantissent d'avoir une chance plus grande de faire coïncider les différentes opérations culturales (saignées des hévéas, séchage des fruits...) avec une période sans humidité.

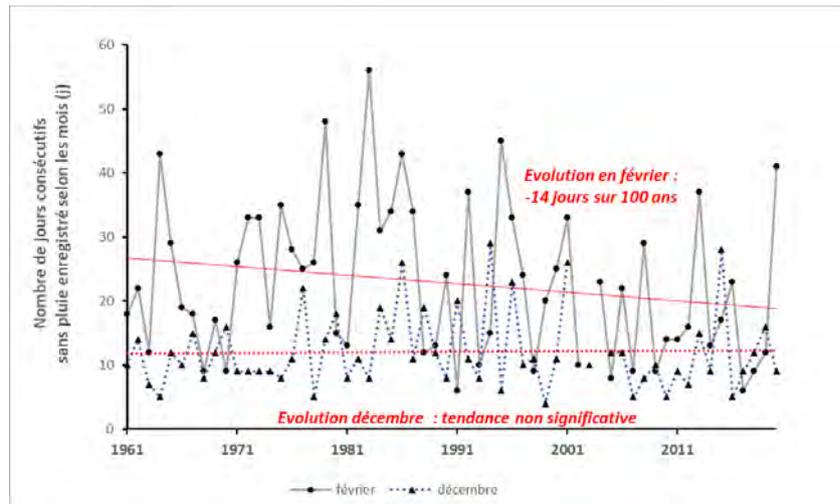
Ainsi, à l'échelle de l'année, on observe que ces durées cumulées sans pluie sont marquées par une diminution significative depuis le début des années 60 (figure 2 et tableau 1). En moyenne, la réduction montre une tendance significative avec une baisse annuelle de 43 jours consécutifs sans pluie sur un siècle. C'est cette caractéristique que perçoivent déjà les agriculteurs aujourd'hui, avec une difficulté plus grande d'avoir l'assurance de trouver des phases sèches au cours de l'année, ou de leurs différentes opérations culturales. On observe en revanche que les séquences longues avec pluie ne montrent pas une tendance significative depuis 1961 (figure 2 et tableau 1).

### **Variations des pluies journalières à l'échelle mensuelle**

Au niveau mensuel ou saisonnier, la lecture implique des nuances selon les mois (figure 3, tableau 2). Le nombre de jours sans pluie n'évolue pas de la même manière au cœur des deux saisons des pluies. Il augmente significativement sur la fin de la première saison des pluies en juin et juillet, mais ne montre pas de tendance significative en avril et en mai. A l'inverse, ce nombre de jours sans pluie diminue nettement en octobre et novembre.

Le nombre de jours cumulé sans pluie, enregistré mensuellement, montre des évolutions significatives à la baisse au cours de sept mois dans l'année. Cette érosion des phases longues sans pluie s'observe à la fois au cours des deux saisons de pluie (en juin-juillet et puis en octobre-novembre), et également au début de l'année civile (janvier, février et mars). Ce moment du début de l'année, dans une moindre mesure en mars, il y a quelques années, était une période où justement les agriculteurs pouvaient compter avec une certaine assurance sur la présence de phases sèches relativement longues. Ce n'est plus totalement le cas aujourd'hui. C'est en février que la tendance significative à la baisse est la plus forte (13,5 jours consécutifs sans pluie en moins sur un siècle).

Cette réduction sensible de ces séquences sans pluie participe au désordre perçu par les cultivateurs et à leur incertitude à voir apparaître actuellement des phases de pluie à des moments où ils avaient alors une assurance de pouvoir compter sur des intervalles secs et sans surprise.



**figure 3.** Evolution du nombre de jours consécutifs sans pluie enregistré mensuellement depuis 1961 : exemple des mois de février et décembre.

**Tableau 1.** Caractéristiques mensuelles et annuelles des phases pluvieuses, ou non pluvieuses, à partir de données journalières mesurées à la station d'Abidjan entre 1961 et 2020

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
<b>Précipitations moyennes</b>	20	45	98	159	284	509	173	32	67	169	156	74	1738
<b>Nombre de jours sans pluie (1961 à 2020)</b>													
Moyenne	29	25	23	19	14	10	19	22	19	17	15	24	<b>233</b>
Evolution (nb jours/100 ans)	-0,7	0,5	0,0	-0,1	0,9	7,5	5,4	0,0	-3,3	-8,1	-2,6	0,1	1,0
Validation MK à 5% (*)	*					*	*			*	*		
Max pour T = 10 ans	31	28	26	23	18	15	25	28	24	23	20	27	<b>252</b>
<b>Cumul maxi de jours consécutifs sans pluie</b>													
Moyenne	20	23	9	7	5	4	9	11	9	7	5	12	<b>121</b>
Evolution (nb jours/100 ans)	-6,9	-13,5	-4,5	1,4	-0,6	4,0	-1,6	-0,6	-11,0	-8,5	-2,2	0,9	-43,5
Validation MK à 5% (*)	*	*	*			*	*			*	*		*
Max pour T = 10 ans	30	38	14	11	8	8	15	19	17	13	8	20	<b>155</b>
<b>Nombre de jours avec pluie</b>													
Moyenne	2	4	8	11	17	20	12	9	11	14	15	7	<b>133</b>
Evolution (nb jours/100 ans)	0,5	-0,5	0,0	-1,3	-0,9	-8,6	-5,4	0,0	3,3	8,1	2,6	-0,1	-1,0
Validation MK à 5% (*)						*	*			*	*		
Max pour T = 10 ans	5	8	12	16	22	26	18	15	16	21	19	11	<b>151</b>

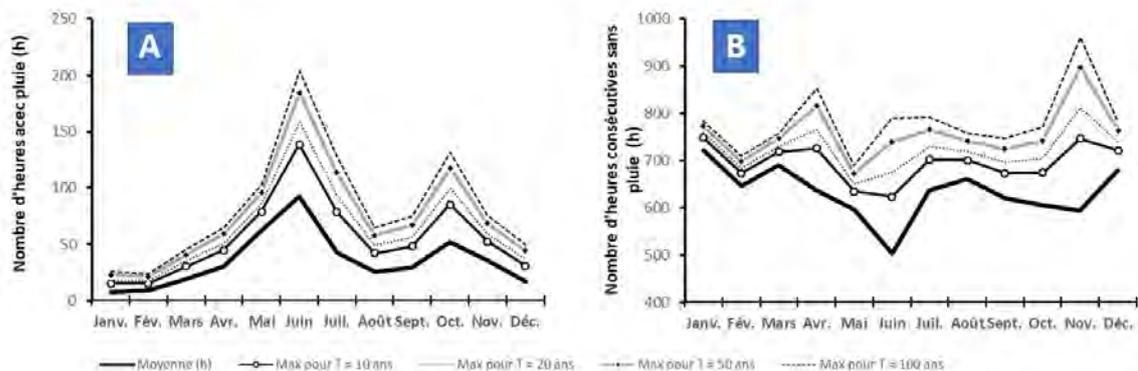
### Variations horaires des phases sans pluie

Sur une période plus courte, allant de 1990 à 2019, il est possible de saisir les phases de pluie intrajournalières, à partir d'enregistrements pluviométriques horaires relevés à la station d'Abidjan. A cette échelle plus fine de la journée, le cumul des heures consécutives sans pluie, montre également des évolutions significatives à l'échelle de l'année, et sur certains mois.

La répartition saisonnière du nombre d'heures de pluie est logiquement calée sur le régime pluviométrique, avec un nombre d'heures de pluie plus important sur les deux saisons de pluie (figure 4A, tableau 2). Sur les deux figures 4A et 4B, les périodes de retour des heures cumulées sans pluie consécutives sont détaillées, car elles caractérisent mieux ces séquences que les simples moyennes établies sur la période 1990-2019. En effet, la variabilité interannuelle de ces valeurs reste toujours très forte, et la moyenne n'est pas toujours pertinente pour décrire simplement la position de ces variables. Si les séquences avec pluie suivent de près le régime pluviométrique, les phases intrajournalières sans pluie, cumulées mensuellement, ne coïncident plus totalement avec le régime pluviométrique (figure 4B). Ces séquences sont ainsi susceptibles d'apparaître tout au long de l'année, en faiblissant légèrement en juin lorsque les précipitations mensuelles sont les plus marquées. On comprend dès lors encore un peu mieux le désarroi des cultivateurs puisque ces séquences sèches, sans pluie durable, étaient

observables tout au long de l'année. Dans le détail, même si les différences restent relativement modestes, une longue séquence sèche a une occurrence plus marquée en janvier, avec 748 h cumulées sans pluie consécutive pour T=10 ans, et en novembre, avec 747 h sans pluie pour T=10 ans (tableau 2).

Mais les durées des séquences sèches montrent des tendances depuis 1990. Sur l'ensemble de l'année, et sur 8 mois (tableau 2), la durée de ces phases sans pluie montre des évolutions significatives globalement à la baisse, d'une manière marquée encore en juin et septembre (tableau 2). Ainsi, on observe que la durée annuelle cumulée de ces moments secs montre une tendance à la diminution significative de 1356 heures sur un siècle.



**figure 4.** Nombre d'heures, avec pluie (A) et sans pluie consécutive (B), cumulées mensuellement : moyennes et différentes périodes de retour.

**Tableau 2.** Caractéristiques des phases horaires avec ou sans pluie.

	Janv.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Année
<b>Cumul mensuel d'heures consécutives sans pluie</b>													
Moyenne	722	647	692	637	596	504	638	661	621	606	595	680	7432
Evolution (heures/100 ans)	23	20	45	-45	-60	-207	-20	65	-166	-29	28	89	-1356
Validation MK à 5% (*)			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Max pour T = 10 ans	748	673	719	727	635	623	702	701	674	674	747	722	7910
<b>Cumul mensuel d'heures avec pluie</b>													
Moyenne	7	9	19	30	62	92	43	25	29	52	36	17	416
Evolution (heures/100 ans)	-21	3	-15	-44	-18	28	-19	-20	34	26	10	-21	-21
Validation MK à 5% (*)	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Max pour T = 10 ans	15	15	30	45	79	139	78	42	48	85	52	31	491

## Conclusion

Pour saisir l'impact des changements climatiques sur le monde agricole et ses pratiques, l'approche proposée met en évidence la nécessité de prendre en compte des paramètres qui ne sont pas toujours abordés dans les études, comme la longueur des phases sans pluie ou avec pluie. Des travaux antérieurs sur les pluies extrêmes journalières en Côte d'Ivoire avaient déjà montré des tendances significatives à la baisse, mais ne portaient pas totalement sur les durées et les longueurs des séquences pluvieuses ou sans pluie (Goula *et al.*, 2012).

Naturellement, des analyses ultérieures sur la répartition de ces phases pluvieuses et des durées des séquences sèches pourront permettre d'affiner les premiers résultats livrés par cette étude.

De nombreux travaux montrent déjà une diminution des quantités précipitées sur les régions africaines (Bigot *et al.*, 1998 ; Mahe et Paturel, 2009). Cette diminution des quantités précipitées dans les régions africaines, largement décrite dans la littérature, ne s'accompagne pas forcément pour autant d'une régression de la durée des séquences sèches. Au niveau d'Abidjan, sur le littoral de la Côte d'Ivoire, cette étude montre que ces séquences sèches présentent globalement à l'échelle annuelle une

décroissance de leur durée. A l'échelle mensuelle, il faut cependant nuancer ce constat, puisque certains mois ne présentent pas de diminution significative de la durée de ces séquences sèches.

L'évolution de ces séquences sèches, ou pluvieuses, est sans doute le témoignage supplémentaire des modifications climatiques qui s'opèrent actuellement sur l'ensemble de l'Afrique de l'Ouest. Cette diminution de ces phases sèches engendre aussi une plus grande incertitude plus les agriculteurs. Certes, cette variabilité des pluies est bien connue des agriculteurs dans le monde tropical. En restant généralement dans des limites maîtrisées, l'incertitude sur l'arrivée des pluies est désormais plus complexe à anticiper et gérer sur les plans agronomiques. Les adaptations des pratiques agricoles tentent de répondre au mieux à ces nouvelles caractéristiques pluviométriques, et à l'ensemble des variabilités pouvant être des nouveaux modes liés au changement climatique. Les fragiles repères pour définir les « bons moments agricoles » deviennent progressivement inopérants, et provoquent lassitude, désillusion, ou pour le moins, des difficultés socio-économiques nouvelles, sans compter une évolution des filières et politiques agricoles nationales.

**Remerciements** : les auteurs remercient la Région AURA (Auvergne-Rhône-Alpes) pour son soutien financier dans le cadre du projet incitatif Pack Ambition International 2020 (n° 20 006900 01-40892). Les auteurs remercient également la SODEXAM pour l'accès aux données pluviométriques d'Abidjan.

### **Bibliographie**

- Bigot S., Brou Y.T., Oszwald J. et Diedhiou A., 2005. Facteurs de la variabilité pluviométrique en Côte d'Ivoire et relations avec certaines modifications environnementales. *Sécheresse*, **16** (1), 5-13.
- Bigot, S., Moron, V., Melice, J. L., Servat, E. et Paturel, J. E., 1998. Fluctuations pluviométriques et analyse fréquentielle de la pluviosité en Afrique centrale. *IAHS*, 71-78.
- Cumunel M., 2020. La filière palmier à huile en Côte d'Ivoire, un condensé des enjeux du développement durable. Note 13, Fondation pour l'agriculture et la ruralité dans le monde (FARM), 23 pages.
- Goula B.T.A., Soro E.G., Kouassi W. et Srohourou B., 2012 : Tendances et ruptures au niveau des pluies journalières extrêmes en Côte d'Ivoire (Afrique de l'Ouest). *Hydrological Sciences Journal*, **57**, 1067-1080.
- Klein Tank A.M.G., Zwiers W.F et Zuang X., 2009 : Guidelines on Analysis of extreme in a changing climate in support of informed decision for adaptation. *Climate Data and Monitoring WCDMP - No. 72*, 55 pages.
- Mahé, G., Paturel, J. E., 2009. 1896–2006 Sahelian annual rainfall variability and runoff increase of Sahelian Rivers. *Comptes Rendus Géoscience*, **341**(7), 538-546.
- Schroth G., Läderach P., Martinez-Valle A. I., Bunn C., Jassogne L., 2016. Vulnerability to climate change of cocoa in West Africa: Patterns, opportunities and limits to adaptation. *Science of the Total Environment*, **556**, 231-241.
- Sneyers, R. 1975. On the statistical analysis of series of observations World Meteorological Organization (WMO), Technical note No. 143, Geneva: 192 pages.
- Soro G.E., Dao A., Fadika V., Goula Bi T.A. et Srohourou B., 2016. Estimation des pluies journalières extrêmes supérieures à un seuil en climat tropical : cas de la Côte d'Ivoire. *Revue Physio – Géo*, **10**, 211-227.

## **RISQUES AGROCLIMATIQUES ET SAVOIRS ENDOGÈNES DES EXPLOITANTS AGRICOLES DE LA CUVETTE DE GUIDIMOUNI (CENTRE-SUD ZINDER AU NIGER)**

**Amadou ABDOU BAGNA**

*Département de Géographie, Ecole Normale Supérieure, Université Abdou Moumouni, Niamey, Niger, Email : amadoubagna@gmail.com, BP 10963, Niamey, Niger*

**Résumé :** L'agriculture est l'un des secteurs les plus vulnérables aux effets des changements climatiques. La présente étude a pour objectif d'analyser les impacts de la variabilité pluviométrique sur les activités agricoles dans la cuvette de Guidimouni, les perceptions ainsi que les stratégies d'adaptation. La méthodologie utilisée s'est appuyée sur le traitement et l'analyse des données pluviométriques journalières (stations de Mirriah, Gouré de 1961 à 2019 pour le calcul des anomalies standardisées (SPI) suivant la méthode Lamb (1982) avec l'outil R. Elle est complétée par une enquête sur les perceptions des risques agroclimatiques, les impacts et les stratégies autour d'un échantillon de 150 exploitants répartis dans quatre villages. Les résultats montrent que producteurs ont une bonne lecture des risques climatiques (80%), perçoivent les risques et essaient d'apporter des palliatifs. Ils développent des stratégies de résilience telles l'intensification des cultures irriguées dans une proportion de 40% et l'exploitation du natron (58%). A ces réponses s'ajoutent la transformation des produits notamment le manioc (86%), le recours à d'autres activités génératrices de revenus (32%) et le départ en migration saisonnière vers le Nigeria (28%). Toutes ces pratiques ont contribué à renforcer le pouvoir d'achat des producteurs et au-delà la résilience à l'insécurité alimentaire.

**Mots clés :** Cuvette, risques, impacts, producteurs, adaptation.

**Abstract:** *Agriculture is one of the most vulnerable sectors to the effects of climate change. The objective of this study is to analyze the impacts of rainfall variability on agricultural activities in the Guidimouni basin, perceptions and adaptation strategies. The methodology used was based on the processing and analysis of daily rainfall data (Mirriah and Gouré stations from 1961 to 2019) for the calculation of standardized anomalies (SPI) using the Lamb method (1982) with the R tool. It was complemented by a survey on perceptions of agroclimatic risks, impacts and strategies among a sample of 150 farmers in four villages. The results show that farmers have a good understanding of climate risks (80%), perceive the risks and try to mitigate them. They are developing resilience strategies such as intensification of irrigated crops in a proportion of 40% and the use of natron (58%). In addition to these responses, they processed products, particularly cassava (86%), resorted to other income-generating activities (32%) and migrated seasonally to Nigeria (28%). All of these practices have contributed to strengthening the purchasing power of producers and, beyond that, resilience to food insecurity.*

**Key words:** *Cuvette, risks, impacts, producers, adaptation*

### **Introduction**

Au Sahel, l'activité agricole relève d'un véritable problème puisque le facteur déterminant, « la pluviométrie » subit une réelle modification (GIEC, 2007). Selon les travaux de Servat et al., (1999), en Afrique de l'ouest et centrale, ces perturbations du climat se manifestent par une diminution généralement assez importante de la pluviométrie annuelle avec des déficits pluviométriques de l'ordre de 20% à 30%. Cette variabilité de la pluviométrie induit des perturbations des paramètres agroclimatiques telle la baisse des cumuls pluviométriques (Ali et Lebel, 2008). Les conséquences sont une baisse régulière et effective de près de la moitié des productions ou rendements de l'agriculture pluviale aussi bien industrielles que vivrières (Gerald et al., 2009). Son impact sur les populations et leurs économies est dévastateur, entraînant ainsi une extrême vulnérabilité et de baisse de production (Jouve, 1991 ; Konseiga, 2007 ; Noufé, 2011 et Bagna, 2016). Face aux perturbations saisonnières, les producteurs agricoles adoptent une pluralité de stratégies en termes de réponses aux impacts. Alors, quel sont les risques résultants des perturbations des paramètres agroclimatiques pour les exploitants de la cuvette ? Et quels sont les facteurs de la résilience climatique ?

## 1. Localisation de la zone d'étude

Située à environ 70 Km de la ville de Zinder à l'Est, entre les latitudes 9°30 et 9°34 Nord et les longitudes 13°41 et 13°45 Est, la commune rurale de Guidimouni couvre une superficie de 160 Km<sup>2</sup>. Elle est limitée à l'Est par la commune rurale de Guidiguir, à l'Ouest par celles de Hamdara et Zermou, au Sud par Bouné, Gouchi et Wacha et au Nord par les communes rurales de Mazamni et Damagaram Takaya (figure 1).

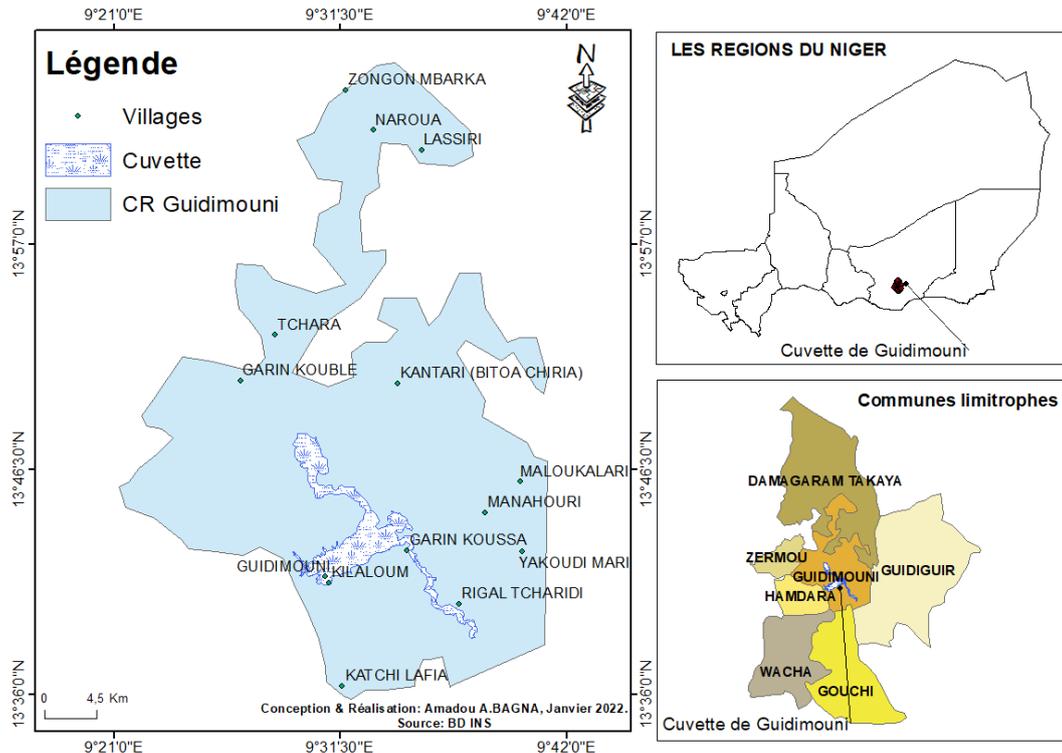


figure 1 : Localisation de la zone d'étude

## 2. Données et méthodes

### 2.1. Les données utilisées

Avec l'objectif d'analyser les plus longues séries pluviométriques possibles dans la zone d'étude, deux (02) stations synoptiques (Mirriah et Gouré) ont été retenues. Elles couvrent une période de 69 années de 1950 à 2019. Elles ne comportent pas de données manquantes, sont quotidiennes et obtenues auprès de la Direction Nationale de la Météorologie du Niger.

Aussi, le choix de ces séries tient compte d'une longue période avant et après le début de la sécheresse de 1972-1973 et 1984-1985 au Sahel et des normales 1961-1990 et 1991-2021. D'autre part des informations sur les perceptions et stratégies d'adaptation ont été recueillies auprès d'un échantillon de 150 exploitants. Les critères ayant guidé le choix des enquêtés sont une moyenne d'âge se situant entre 40 ans à plus, et avec un minimum de 10 à 20 ans d'expérience dans l'exploitation agricole. Ces enquêtés sont répartis dans les villages de *Guidimouni*, *Kilaloum*, *Chadika* et *Koussa*. Ainsi, 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  $\alpha$  égal à 0,05,  $p_i$  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

En vue d'apprécier l'évolution de la pluviométrie au cours des différentes années de la période d'étude, l'indice pluviométrique de Nicholson a été calculé. Cet indice se définit comme une variable centrée réduite exprimée par l'équation :

$$I = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sigma(x)} \quad (\text{Eq. 1})$$

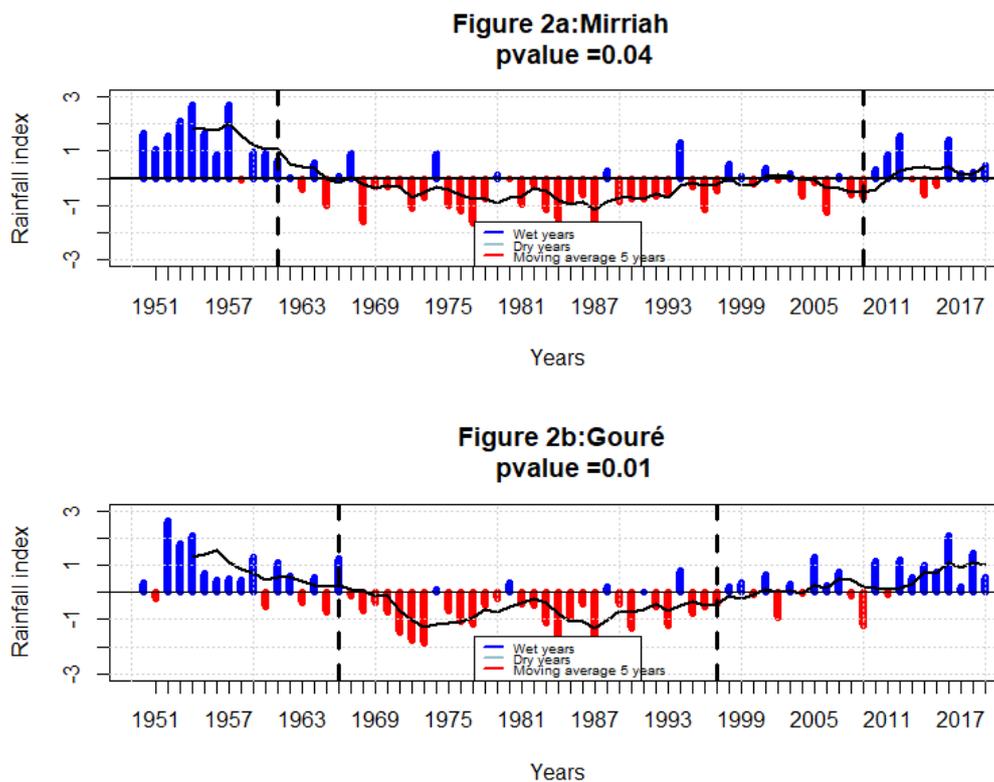
Avec  $x_i$  : pluviométrie de l'année  $i$  ;  $\bar{x}$  : pluviométrie moyenne interannuelle sur la période de référence ;  $\sigma(x)$  : écart-type de la pluviométrie interannuelle sur la période de référence. Par ailleurs, l'étude des changements de climat met en évidence la nécessité d'analyser la structure interne des séries chronologiques et leur éventuelle non-stationnarité (Test de PETTITT (1979) et le test de MANN-KENDALL (1945)). Enfin, Sphinx V5 a servi au traitement des données d'enquête.

## 3. Résultats et discussions

### 3.1. Evolution des cumuls pluviométriques : Alternance des années déficitaires et années excédentaires

L'indice pluviométrique 1950-2019, doublée de la courbe de tendance linéaire identifie le caractère fortement aléatoire de la pluie. La figure 2a traduit l'évolution interannuelle des indices pluviométriques de Mirriah basée sur les fluctuations entre les années sèches et celles humides. Il est également constaté que les périodes de baisse sont plus continues et soutenues que les périodes de hausse. En outre, la courbe de tendance linéaire représentant les cumuls annuels est décroissante: la hauteur moyenne annuelle des pluies passe de 652,1 mm en 1950 à 497,9 mm en 2019 en passant respectivement au cours des années de sécheresse de 1972-1973 et 1984-1985 à 339,39 mm et 280,79 mm. La comparaison des pluies interannuelles d'avant 1980 à celles de la période 1980-2019 traduit une différence de 18% à la station synoptique de Gouré (Figure 2b). La période 1950-2019 est marquée par deux années fortement déficitaires : 1976 et 1983. Après 1970 on observe une augmentation, non seulement de la fréquence des années sèches mais aussi de l'amplitude de la sécheresse climatique (Figure 2a et 2b). Les années 1980 sont particulièrement sèches avec le pic de sécheresse de 1983 et 1984. Les années 1990 semblent bien humides mais d'amplitudes plus faibles qu'au cours de la décennie 1950-1960. La dernière décennie entre dans une phase excédentaire (phase humide) car depuis 2000, en dehors des années 2003, 2004, 2005, qui sont sèches, toutes les autres années sont humides. Ces résultats sont confirmés par les travaux de L'Hote et *al.*, (2002). Au Sahel, la sécheresse des années 1970 se caractérise principalement par une extension géographique importante et par des successions d'assez nombreuses années déficitaires (Servat, 1999 ; Ozer et *al.*, 20003, Bagna, 2016)). L'analyse des indices des deux stations pour la période (1950-2019) est une traduction met en évidence plusieurs périodes de sécheresse ou d'excédent pluviométrique ayant persisté pendant au moins cinq années successives et plus : déficits de 1966 à 1996 (30 ans) de 1970 à 1974, des périodes humides 1961-2008, des excédents de 1950 à 1960 (10 ans) et 1998-2019 enfin une nouvelle période retour aux conditions plus humides à partir de 2008 pour la station de Mirriah, mais caractérisée par une forte variabilité interannuelle (Figure 2 a et 2b).

Ces résultats sont partagés par les travaux Ali et Lebel (2008) et Ozer et *al.*, (2003) qui ont montré des alternances en périodes sèches et humides dans plusieurs stations de la zone sahélienne après la grande sécheresse de 1972-1973. Ozer et *al.*, (2003).



**figure 2** : Evolution interannuelle des anomalies pluviométriques des stations de Mirriah et Gouré

### 3.2. Perceptions des risques agroclimatiques sur les activités de production

Les principales perceptions de la variabilité pluviométrique des paysans des quatre villages enquêtés se réfèrent à la mauvaise répartition des pluies (82%) et au raccourcissement de la saison des pluies. Par ailleurs, les impacts de la variabilité pluviométrique diffèrent selon les périodes. Les paramètres comme l'exode rural (75%) et la durée des saisons de pluie (48%) ont des intensités plus importantes durant la normale 1961-1990 comparativement aux 30 dernières années. Cependant les populations enquêtées estiment que les cultures irriguées, l'exploitation du natron, la dégradation des sols et la baisse des rendements agricoles, sont plus intenses durant la normales 1991-2020 que durant la première. Ces différents impacts sur les systèmes production sont révélateurs des crises climatiques dans cette zone au cours de ces trois dernières décennies. Aussi, les investigations auprès des exploitants révèlent d'autres impacts tels les pertes de semis (48%), l'ensablement progressif de la cuvette (34%) rétrécissant ainsi les zones des cultures de décrues et pouvant compromettre à long terme l'exploitation des salines.

### 3.3. Des stratégies d'adaptation diverses pour réduire les risques

Face aux incertitudes du climat et la bonne perception de la variabilité pluviométrique, les producteurs adoptent des stratégies et des attitudes conservatoires et régulatrices.

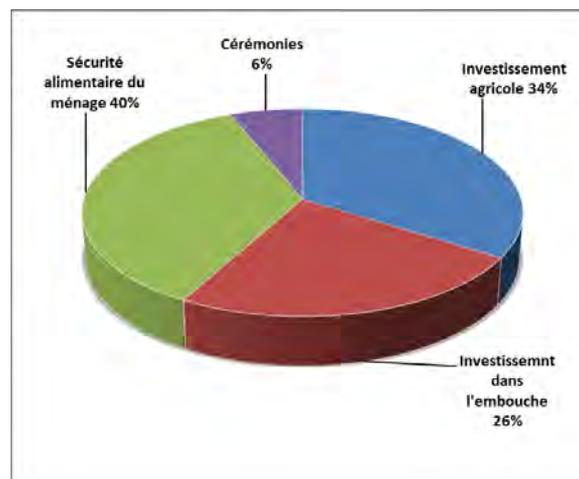
#### - Exploitation du natron en période de décrue

Dans la cuvette de Guidimouni, l'exploitation du natron a commencé vers 1900 selon Vooetlin (1950) cité par Souley (2017). Mais, avec les sécheresses des années 1970 seulement 28% de la cuvette est exploitée, en 1980 (58%) et en 2019, 72% des sites sont mises en valeur. Il faut noter que l'extraction du natron a pris une importante ampleur et la vente a permis aux populations de faire face à ces graves crises alimentaires. Les photos 1 et 2 traduisent les sites d'exploitation du natron dans la cuvette de Guidimouni. Ainsi, plusieurs acteurs sont impliqués dans l'exploitation dont les producteurs en cultures pluviales et irriguées.



Photo 1 et 2 : Sites d'exploitation du natron dans la cuvette de Guidimouni (Prises de vue : A A. BAGNA, décembre 2021).

De nos jours, l'exploitation joue un double rôle. Tout d'abord les revenus issus de la commercialisation de ce produit permettent de corriger les déficits céréaliers récurrents dus à la faible productivité des terres des cultures et à la péjoration climatique. Quant aux revenus tirés de la vente contribuent aux investissements. Il s'agit majoritairement du secteur agricole (achat du matériel et intrants) avec 34% et embouche ou achat du bétail sous une forme d'épargne pour la famille (26%), mais aussi et surtout la sécurité alimentaire à travers le renforcement du budget des ménages des producteurs (40%) et les cérémonies à 6% (figure 5).



**figure 5** : Utilisation des revenus issus de la vente du natron

Source : Données d'enquête de terrain, octobre 2021

#### - Migration saisonnière des jeunes vers le Nigeria

Au Niger, le déplacement des jeunes ruraux vers les grandes villes de l'intérieur du pays et même de la côte après les récoltes est une pratique très ancienne. Jusqu'aux débuts des années 2000, cette pratique ne concernait qu'une poignée des jeunes qui se rendent au Nigeria dès la fin de la récolte de chaque année. Mais, depuis 2005, ce mouvement semble s'intensifié et a pris de l'ampleur avec les mauvaises récoltes. Dans la commune rurale de Guidimouni, cette migration concerne 28% des jeunes. En effet, leurs destinations au Nigeria sont les villes de Kano, Daoura et Lagos (*Enquête terrain, octobre 2021*). Sur les lieux d'accueil, les principales activités auxquelles ils s'adonnent sont vente du thé, le salariat dans les boulangeries aux fours traditionnels, le métier de cordonnier-cireurs de chaussures. Les revenus tirés (rentes) de cette migration sont investis dans la préparation de la campagne agricole pluviale prochaine (achat de semences) et renforcement des moyens de subsistance. Ceux qui arrivent à réaliser un gain important se procurent des nouveaux kits d'irrigation pour les cultures de décrue. Aussi,

il faut noter que la migration comme stratégie d'adaptation face aux chocs climatiques a fait l'objet d'une abondante littérature dans les pays en développement et plus particulièrement dans ceux du Sahel. Dès lors, la sécurité des moyens d'existence des populations sahéniennes, la migration saisonnière apparaît comme une stratégie d'adaptation à la variabilité climatique. Ces résultats sont partagés par Jouve (1991) et Mounkaila (2002 et 2010) et Konseiga A. (2007) qui ont montré qu'au Sahel, relèvent justement des stratégies paysannes de gestion des chocs liés à la sécheresse et à l'insécurité alimentaire. Ces conclusions sont renforcées par les résultats de Cissé et *al.* (2010) qui ont permis de considérer la migration comme une mesure d'adaptation à la variabilité climatique, et d'expliquer l'accélération du phénomène migratoire au Sahel par la dégradation environnementale et les conditions climatiques défavorables.

#### - Cultures irriguées et transformation des produits agricoles

Dans la cuvette de Guidimouni, on note un regain en termes de pratique des cultures irriguées. Cela état de fait est consécutif aux déficits pluviométriques ayant caractérisé ces dernières années. Ces différentes spéculations permettent de soutenir la sécurité alimentaire des ménages et au-delà procurent des revenus supplémentaires aux producteurs (Photos 3 et 4). Ces cultures de décrue ou irriguées concernent environ 40% des ménages. Les terres dévolues à cette activité sont des terrains familiaux, c'est-à-dire hérités depuis des générations.



Photo 3 et 4 : Culture du maïs en irriguée et Champ de manioc de Guidimouni (Prises de vue : A. A. BAGNA, décembre 2021).

Aussi, certaines spéculations comme le manioc sont cédées aux femmes qui à travers l'appui de l'ONG OXFAM procèdent à sa transformation en farine (32%). Ainsi, cette transformation vise à améliorer les capacités des organisations des femmes afin de disposer de sous-produits de qualité et à longue durée de conservation mais également de renforcer la sécurité alimentaire et leur autonomisation financière. Au-delà, les revenus tirées de la vente des produits permettent à celles-ci l'accès aux moyens de production pour une agriculture résiliente au changement climatique (*Enquête terrain, octobre 2021*).

### Conclusion

Les présents travaux ont révélé une forte variabilité pluviométrique dans les stations de la zone d'étude. On observe des années des alternances entre années déficitaires et excédentaires. Ces perturbations ont pour conséquences la désorganisation des activités agricoles, notamment les ressemis induisant des faibles productions avec des incidences sur sécurité alimentaire et les moyens de subsistance. Les perceptions des paysans de la variabilité pluviométrique sont en accord avec les tendances des données issues des données climatiques observées. Dès lors les paysans, grâce à l'utilisation de leurs savoirs locaux, développent des stratégies.

### Bibliographie

Bagna A. A., 2016 : Impacts de variabilité climatique sur les systèmes de production agricole de la Korama (Sud-Zinder) au Niger, thèse de doctorat unique, Géographie, université Abdou Moumouni, Niamey, Niger, 272 p.

- Ali A. et Lebel T. 2008. The Sahelian standardized rainfall index revisited, *Int. J. Climatol.*, DOI: 10.1002/joc, 1832, 13-18.
- Arifa M. A. S., 2005. Analyse d'un espace humide sud-sahélien : Cas de la cuvette de Guidimouni (Département Mirriah), Maîtrise de Géographie, Université de Abdou Moumouni, Niamey, 65 pages.
- Dugué M. J., · 2012 : caractérisation des stratégies d'adaptation au changement climatique en agriculture paysanne, Rapport d'étude de capitalisation réalisée sur les terrains de coopération d'AVSF, 50 pages.
- Gerald C. Nelson, Mark W. Rosegrant, Jawoo Koo, Richard D. Robertson, Timothy Sulser, Tingju Zhu, Claudia Ringler, Siwa Msangi, Amanda Palazzo, Miroslav Batka, Marilia Magalhaes, Rowena Valmonte-Santos, Mandy Ewing and David R. Lee : 2009, Climate change: Impact on agriculture and costs of adaptation : 19 pages, DOI : <http://dx.doi.org/10.2499/0896295362>.
- Jouve, P., 1991 : Sécheresse au Sahel et stratégies paysannes, *Sécheresse*, 2 (1), pp. 61-69.
- Mohamed Bello, Ibrahim., 2016, Les stratégies de gestion de risques agricoles au Niger : évidence empirique et implication pour les ménages agricoles, *Economie Rurale*, n° 351, pp. 67-78.
- Konseiga A., 2007 : Household migration decisions as survival strategy: the case of Burkina Faso, *Journal of African Economies*, vol. 16, 2, pp. 198-233.
- L'Hôte Y., G. Mahé, B. Somé et J.-P. Triboulet, 2002 : Analysis of a Sahelian annual rainfall index from 1896 to 2000; the drought continues. *Hydrological Sciences Journal*, 47, 4, 563-572.
- Mounkaïla H., 2002, De la migration circulaire à l'abandon du territoire local dans le Zarmaganda (Niger), *Revue Européenne des Migrations Internationales*, vol. 18, n° 2, pp. 161-187.
- Mounkaila H., 2010, Circulations migratoires et envoi de fonds dans la région de Tahoua (Niger), In Hocine, L., Eddine, H. N., Chantel, C-J. et Sassi, S. (Eds), *Les migrations africaines : Economie, Société et Développement*, pp. 125-148.
- Noufé D., 2011 : Changements hydroclimatiques et transformations de l'agriculture : l'exemple des paysanneries de l'Est de la Côte d'Ivoire. Paris : Université de Paris 1 Panthéon-Sorbonne, 375 p. multigr. Th. Géogr., Univ. de Paris 1. 2011/06/14.
- Ozer P., M. Ercicum, G. Demarée et M. Vandiepenbeeck, 2003 : The Sahelian drought may have ended during the 1990s. *Hydrological Sciences Journal*, 48, 3, 489-492.
- Servat E., Paturel JE., Lubès-Niel H., Kouamé B., Masson JM., Travaglio M., Marieu B., 1999 : De différents aspects de la variabilité de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest et Centrale non sahélienne. *Revue des sciences de l'eau*, 12(2), 363-367.

## VARIABILITÉ DE LA PRODUCTION OLÉICOLE EN FONCTION DES PARAMÈTRES CLIMATIQUES DANS LA DÉLÉGATION DE MENZEL CHAKER (SFAX, TUNISIE CENTRALE)

M. MZOUGHJI<sup>1et2</sup>, M. FEKI<sup>1</sup>, S. DAHECH<sup>1et2</sup>

<sup>1</sup>Université de Sfax, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Laboratoire SYFACTE

<sup>2</sup>Université Paris Cité, UMRPRDIG ([mzoughimohamed23@gmail.com](mailto:mzoughimohamed23@gmail.com)) ([salem.dahech@gmail.com](mailto:salem.dahech@gmail.com))

**Résumé :** La production oléicole dans la délégation de Menzel Chaker est très variable d'une année à une autre en raison de la variabilité de la pluviométrie, et du phénomène de l'alternance biologique de l'olivier. Nous avons procédé à une série de corrélations deux à deux (au seuil de 5%) entre la production oléicole et les précipitations aux différents pas de temps. Les meilleures corrélations coïncident avec des phases phénologiques clés auxquelles l'olivier a besoin de l'eau. Ces phases sont les deuxièmes décades des mois de novembre, janvier et mars, la troisième décade du mois du mai et la première décade du mois de juin de la précédente année agricole, ainsi que la deuxième décade de septembre de l'année agricole en cours. Les résultats ont confirmé que la production oléicole dépend de la répartition temporelle des pluies que des totaux annuels.

**Mots-clés :** Production oléicole, Paramètres climatiques, corrélation, Menzel Chaker.

**Abstract :** The olive production in the delegation of Menzel Chaker is very variable from one year to another because of the variability of rainfall, and the phenomenon of biological alternation of the olive tree. We proceeded to a series of correlations two by two (at the threshold of 5%) between the olive production and the precipitations at the different time steps. The best correlations coincide with key phenological phases at which the olive tree requires water. These phases are the second dekad of November, January and March, the third dekad of May and the first dekad of June of the previous agricultural year, and the second dekad of September of the current agricultural year. The results confirmed that the olive production depends on the temporal distribution of rainfall than on the annual totals.

**Keywords:** Olive production, climatic parameters, correlation, Menzel Chaker

### Introduction

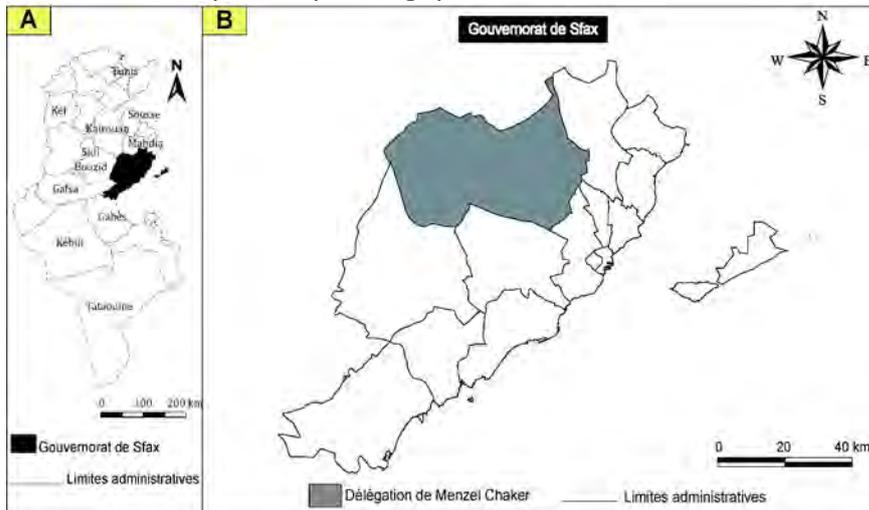
L'olivier, un arbre emblématique de la Méditerranée, constitue un élément inséparable des paysages méditerranéens (Angles, 2012). En Tunisie, l'oléiculture est considérée comme une activité agricole ayant un rôle économique important (Jellali et al, 2021). Elle produit en moyenne 6% de la production mondiale entre 2003 et 2013, ce qui place la Tunisie au deuxième rang après l'Union Européenne (COI, 2017). L'olivier se caractérise par la variabilité de la production suite à l'irrégularité des pluies et au mode altéré de la production (Poli, 1979; Trigui et Msallem, 2002). C'est un arbre réputé par sa rusticité et son adaptation au stress abiotique (Bague, 2016). De ce fait, 85% des oliveraies se situent dans des régions plus sèches du centre et du sud (FAO, 2015).

Dans la région de Sfax, l'olivier est soumis à l'effet du stress hydrique suite aux températures excessives et à la sécheresse de l'air (Daoud et Dahech, 2012). Cette région est connue par la dominance de la culture de l'olivier de type *Chemlali*, réputé par son adaptation aux conditions climatiques sévères comme celles qui caractérisent le climat de la région de Sfax (Trigui et

Msallem, 2002 ; Ben Rouina, 2007). Cet arbre se caractérise par une alternance biologique (Poli, 1979 ; Monsellis et Golschmidt, 1982 ; Ben Amar et *al.*, 2019). Son cycle biologique se déroule théoriquement sur deux années : une première végétative suivie par une deuxième reproductive (Michlakis, 2002 ; Ben Rouina, 2007). Cette deuxième peut être retardée d'une année en cas de conditions climatiques défavorables. La productivité et la qualité d'huile de cet arbre sont conditionnées par divers paramètres climatiques notamment la pluviométrie (Hénia, 1993 ; Ben Rhouma et *al.*, 1998 ; Ben Rouina et *al.*, 2007, Ben Ahmed et *al.*, 2007 ; Hlaoui, 2007).

Dans le présent travail, nous étudions l'impact de la variabilité des précipitations sur les variations de la production oléicole cultivée en sec dans la délégation de Menzel Chaker. Elle est située à l'Ouest du gouvernorat de Sfax (environ 1650 km<sup>2</sup>) (Fig1) ; et contribue à une part importante de la production oléicole régionale. La majorité des oliveries est conduite en pluvial, cependant une extension d'une nouvelle culture conduite en irrigué est apparue depuis quelques années.

Nous nous sommes donc intéressés à la relation entre les précipitations et la production oléicole qui représente le meilleur indicateur des interactions entre les techniques culturales, les qualités pédologiques et les éléments du climat.



**figure 1** : (A) localisation du gouvernorat de Sfax, au centre-est de la Tunisie. (B) localisation de la délégation de Menzel Chaker au nord-ouest du gouvernorat de Sfax.

### Données et méthodes :

L'étude de la variation interannuelle de la production oléicole en fonction de la variabilité temporelle de la pluviométrie dans la délégation de Menzel Chaker s'appuie sur deux types de données :

- Les données pluviométriques de la station de Menzel Chaker. Ces données proviennent de l'Institut National de la Météorologie. Il s'agit des séries journalières des précipitations entre 1993 et 2019.
- Les données de la production oléicole de la délégation de Menzel Chaker entre 1994/1995 et 2019/2020 soit 25 ans. L'année considérée ici est l'année agricole allant du premier septembre au 31 Aout.

Pour déterminer la relation existante entre les variations interannuelles de la production oléicole et la variabilité des précipitations, nous avons procédé à une série de corrélations deux à deux entre la production annuelle de la région de Menzel Chaker de 1994-95 à 2019-20 et les précipitations de la station météorologique pour la même période. Avec une marge d'erreur de

5%, le coefficient de corrélation est significatif s'il est supérieur ou égal à 0.38 (d'après le test de Bravais Pearson).

Des régressions multiples pas à pas entre la production oléicole et les pluies de la région de Menzel Chaker ont été calculées au pas de temps décadaire pour déterminer les pluies décadaires décisives qui assurent une grande production. Les décades sélectionnées par les régressions pas à pas ont été ensuite cumulées et utilisés comme prédicteurs de production dans des régressions linéaires simples.

Étant donné que l'olivier se caractérise par une alternance biologique et que son cycle biologique se déroule sur deux années : une première année végétative suivie d'une deuxième reproductive (Poli, 1979 ; Monsellis et Golschmidt, 1982 ; Boukaissi, 1987 ; Michlakis, 2002), les corrélations et les régressions ont été établies entre la production et les pluies de la précédente année agricole (dite végétative) et celles de septembre et octobre de l'année en cours (dite de production). Ce choix est justifié par le fait que la maturation des fruits coïncide avec le début de l'automne et les fruits profitent des pluies automnales. Rappelons que le total moyen des précipitations enregistrées entre septembre et décembre est de 97.35 mm soit 45 % du total annuel.

### Résultats :

#### **Corrélation entre la production oléicole et les précipitations à différents pas de temps : (annuelle, saisonnière, bimestrielle, mensuelle et décadaire)**

Le tableau n°1 met en relief une forte relation ( $r > 0,5 - 0,8 <$ ) entre la production oléicole et les pluies (années végétatives) dans la région de Menzel Chaker :

À l'échelle annuelle, le coefficient de corrélation est significatif, de l'ordre de 0.55, en raison de phénomène de l'alternance qui marque l'olivier dont l'indice d'alternance est à 0.55, considéré moyen ( $> 0,3 - 0,6 <$ ). Cela confirme que la production biannuelle est parfois interrompue (une année de récolte et plusieurs années de repos). Cependant, à l'échelle saisonnière le coefficient de corrélation n'est significatif que pour la saison automnale (0.58). Également, au niveau mensuel, la corrélation n'est significative que pour les deux mois septembre et juin. Au niveau décadaire, nous avons observé des corrélations plus fortes au niveau de plusieurs décades, répartis comme suit : la deuxième et la troisième décade du mois d'octobre, la deuxième décade du mois de janvier, la deuxième décade de février et la première décade de juin (0.46, 0.39, 0.49 et 0.61 respectivement). Ces derniers résultats permettent de déterminer les périodes critiques où l'olivier a besoin de l'eau. Cela nous amène à faire une prédiction de la production avec la régression linéaire pas à pas.

Tableau1 : Corrélation entre production et pluviométries dans la région de Menzel Chaker (1994/1995 et 2019/2020), en gras : Significatif.

r mensuel	r décadaire				r saisonnier		r annuel
	D1	D2	D3	D4			
Septembre	0.29	0.13	0.30	0.10	Automne	<b>0.58</b>	<b>0.55</b>
Octobre	<b>0.54</b>	0.21	<b>0.46</b>	<b>0.46</b>			
Novembre	0.32	0.03	0.30	0.25			
Decembre	0.18	-0.12	0.07	0.23	Hiver	0.33	
Janvier	0.16	-0.09	<b>0.39</b>	-0.10			
Fevrier	0.27	0.01	<b>0.49</b>	0.07			
Mars	0.30	0.16	0.33	0.11	Printemps	0.18	
Avril	0.12	0.11	-0.15	0.16			
Mai	-0.20	-0.27	-0.14	0.25			
Juin	<b>0.60</b>	<b>0.61</b>	0.36	0.30	Eté	0.19	
Juillet	0.10	0.10	0.37	-0.25			
Aout	-0.32	-0.24	-0.21	-0.20			

### Prédiction de la production avec la régression pas à pas :

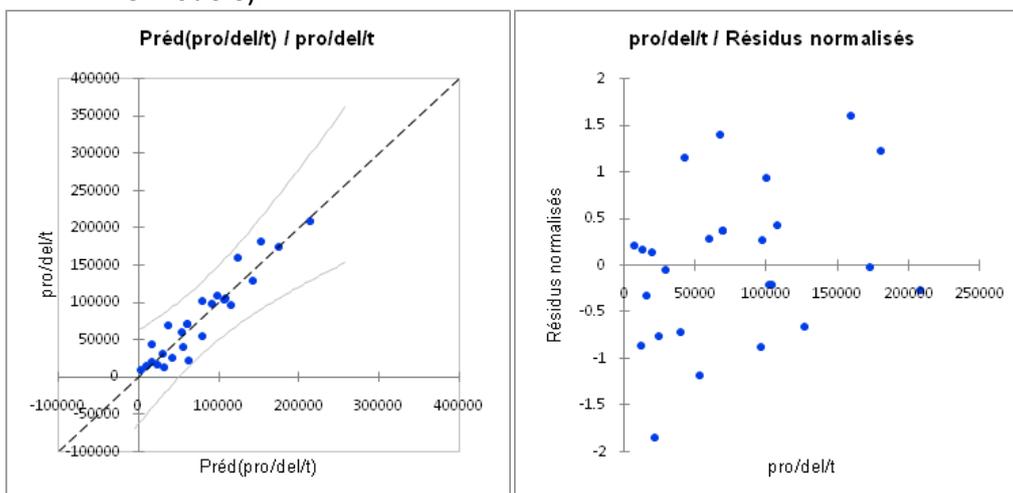
Une régression linéaire multiple pas à pas a été appliquée en prenant comme prédicteurs les totaux décadaires des pluies, nous donne l'équation suivante :

Production/Tonne = 12686.6 + 3234.8\*novembre2 (N-1)+1180\*janvier2 (N-1)+1152.9\*mars2(N-1)- 1826\*avril2 (N-1)+4494.1\*mai3 (N-1)+ 2042\*J1 (N-1)+1570.5\*septembre2(N) ; avec R = 0.95 et R<sup>2</sup>= 0.90

Les prédicteurs retenues par le modèle de régression représentent les décades décisives durant les quelles la variabilité spatiotemporelle des pluies a une grande influence sur la production oléicole. Il s'agit de sept décades ayant des coefficients de corrélation partielle significatives qui montrent la dépendance de la production oléicole aux quantités de pluies tombées notamment :

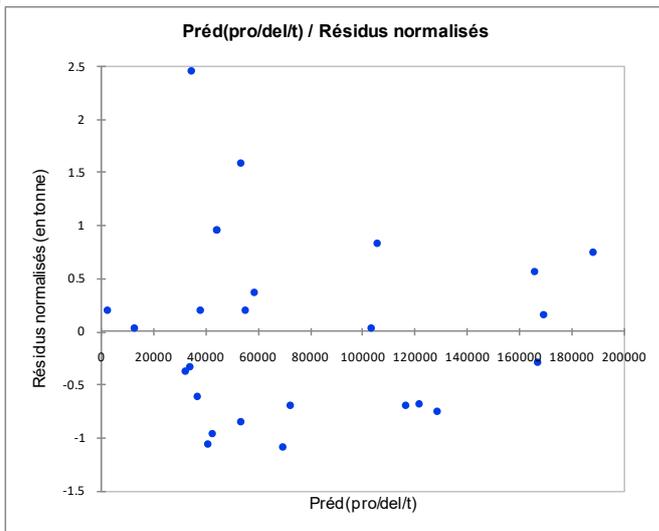
- En premier lieu, pendant la 1<sup>ère</sup> décade de juin (0.81) et la 2<sup>ème</sup> décade de janvier et celle de septembre (0.73) ;
- En second lieu, pendant la 2<sup>ème</sup> décade de novembre et la 3<sup>ème</sup> décade de mai (0.68 et 0.69, respectivement) ;
- et dans un degré de moindre importance durant la 2<sup>ème</sup> décade de mars et avril (0.53 et -0.47, respectivement).

Les écarts entre productions oléicoles calculées et observées sont très variables d'une année à l'autre. Ils oscillent entre 3 et 38% notamment durant les années végétatives et témoignent d'une grande variation selon les années où d'autres paramètres climatiques (10% non prises par le modèle).



**figure 2** : Régression linéaire avec R**figure 3** : Droite de régression simple

D'autres paramètres climatiques peuvent influencer la production : la température conditionne le déroulement des processus de croissance et de développement chez l'olivier (Louar et Dasilva, 1981). De ce fait, les hautes températures sont néfastes pour l'olivier pendant la phase de maturation (Tombessi et al, 2007). De même, le froid hivernal prolongé et l'hiver doux peuvent perturber le cycle de l'olivier (Trigui, 1987 ; COI, 1997). Egalement, le brouillard prolongé pendant la floraison peut engendrer les chutes des fleurs (Loussert et Brousse., 1978). En outre, les vent désechant provenant du sud (sirocco) peuvent provoquer des dommages (Daoud et Dahech, 2012). Ils induisent l'arrêt végétatif et le désechement des extrémités les plus exposées.



**figure 4** : écarts entre productions observée et calculées dans la délégation de Menzel Chaker (résidus standardisés)

### Conclusion :

Les corrélations de la production oléicole et les pluviométries à divers pas du temps nous a montré la fiabilité des corrélations décennales dans l'étude de la variabilité de la production oléicole à Menzel Chaker. Cette étude nous permet d'avoir les périodes critiques pendant les quelles l'olivier a besoin de l'eau. De même, elle nous donne une idée sur la production oléicole en fonction des quantités de pluie et de sa répartition temporelle (Ben Rouina et Trigui, 2002). En effet, l'olivier préfère une bonne répartition des pluies même avec des quantités moyennes que de grandes quantités mal réparties. De ce fait, ces résultats peuvent être utilisés comme un calendrier pour l'irrigation déficitaire en cas de déficit pluviométrique durant les périodes critiques. Les conclusions de cette étude sont transposables à d'autres terrains en Tunisie centrale comme les délégations de Hencha et Djebeniana.

### Bibliographie :

Daoud A et Dahech S., 2012. Résilience de l'agglomération de Sfax (Tunisie Méridionale) face au changement climatique. Essai d'évaluation. *Climatologie* Volume 9, 2012. Numéro spécial « climats et changements climatiques dans les villes.

Bagues. M., 2016 : *Comportements écophysiological et biochimique de l'olivier variété "Chemlali Sfax" cultivé en plein champ en relation avec les conditions hydriques Et édaphiques*. Mémoire de mastère en biodiversité et dynamique des écosystèmes, faculté des sciences de Sfax. 78p.

- Ben Ahmed, Ch., Ben Rouina, B. and Boukhris, M., 2007. Effects of water deficit on olive trees cv. Chemlali under field conditions in arid region in Tunisia. *Scientia Horticulture*, 113: 267-277.
- Ben Amar, F.; Elloumi, O; Yengui, A; Belguith, H et Kharroubi, M, 2019 Potentialités productives des variétés et ecotypes d'olivier (*Olea europea L*) dans la collection de Boughrara (Sfax, Tunisie) *Revue Ezzaitouna* 15 (1 et 2)
- Poli. M., 1979 : Etude bibliographique de la physiologie de l'alternance de production chez l'olivier (*Olea europaea L.*). *Fruits*, nov. 1979, vol. **34**, no 11, p. 687-695.
- Ben Rhouma, B. 1998 (a) : *contribution à l'étude de l'effet du climat et du sol sur la croissance et la production de l'olivier « Chemlali de Sfax » planté en milieu aride*. Mémoire de DEA en Ecologie générale, faculté des sciences de Sfax. 76p.
- Ben Rouina, B., 2007 : *Etude des relations sol-eau- plante et de l'effet du stress hydrique sur la croissance de la fructification de l'olivier (Olea europea L.)* Thèse de doctorat en science biologique, faculté des sciences de Sfax, 229p.
- Ben rouina et Trigui A, 2002. Les exigences d'une oléiculture pluviale performante : Climat, sol et façons culturales, *Seminaire Internationale sur l'olivier, Acquis de recherches et contraintes du secteur oléicole. Maroc*, pp- 220—239.
- Ben Rouina, B., Trigui, A., Andria R., Boukhris, M., and Chaib M., 2007. Effects of water stress and soil type on photosynthesis, leaf water potential and yield of olive trees (*Olea europea L.* Cv Chemlali Sfax). *Australian journal of Experimental Agriculture*. Volume **47(12)**: 1484-1490
- COI, 1997. *Encyclopédie mondiale de l'olivier* Ed, Plaza et Jans, Espagne, (1997), 479 p.
- COI, 2017. *Journal officiel du conseil oléicole internationale* N° 124 Éd. française novembre 2017
- Hénia L., 1993 : Climat et bilans de l'eau en Tunisie, Essai de régionalisation climatique par les bilans hydriques, publication de l'université de Tunis I, 391 p
- Hlaoui Z., 2006. Bilans hydriques agro-climatiques de l'olivier en Tunisie ; *RTG* n° 37 (pp 43-74)
- Jellali, A.; Hachicha, W.; Aljuaid, A. M. Sustainable Configuration of the Tunisian Olive Oil Supply Chain Using a Fuzzy TOPSIS-Based Approach. *Sustainability* **2021**, *13*, 722. <https://doi.org/10.3390/su13020722>
- Louar. S, 1977 : *Caractéristiques écophysiological et aspects de l'économie de l'eau de l'olivier (olea europea. L) et de l'orange (citrus sinensis L. Osbeck)*. Thèse de doctorat d'Etat science Université de Paris 7.
- Monselisse S. P et Golschmidt E. E. Alternate bearing of fruit trees *Horticultural review*, vol **4**, Ed. The AVIPublishingInc, (1992), pp 128-173
- S. Angles, 2012. L'olivier et les territoires méditerranéens. in BRETON C., BERVILLE A. (coord.), 2012. L'histoire de l'olivier. Versailles, Quæ, pp. 195-211.
- Tombesi, A., Proietti, P. and Nottiani, G 1986. Effect of water stress on photosynthesis transpiration, stomata resistance and cowpea in two contrasting soil types in the semi-arid tropics. *Soil tillage Res.* 40: 89-106.
- Trigui. A, 1993. *Le secteur oléicole, potentiel production et évolution* Eds Institut de l'olivier. Seris, Etudes1/93-48p.
- Trigui A. et Msallem M., 2002. *Oliviers de Tunisie* (Volume 1). Ministère de l'Agriculture, Ed: IRESA, République Tunisienne. 159 p illustrées.

## CEREAL YIELD FORECASTING WITH SATELLITE DROUGHT-BASED INDICES, WEATHER DATA AND REGIONAL CLIMATE INDICES USING MACHINE LEARNING IN MOROCCO

El Houssaine BOURAS <sup>1 2 †</sup>, Lionel JARLAN <sup>2</sup>, Salah ER-RAKI <sup>1 3</sup>, Clément ALBERGEL <sup>4</sup>, Riad BALAGHI <sup>5</sup> and Saïd KHABBA <sup>3 6</sup>

<sup>1</sup> ProcEDE, Cadi Ayyad University, Morocco ([bouras.elhoussaine@gmail.com](mailto:bouras.elhoussaine@gmail.com))

<sup>2</sup> CESBIO, University of Toulouse, France ([lionel.jarlan@ird.fr](mailto:lionel.jarlan@ird.fr))

<sup>3</sup> CRSA, University Mohammed VI Polytechnic, Morocco ([s.erraki@uca.ma](mailto:s.erraki@uca.ma))

<sup>4</sup> CNRM, France ([clement.albergel@esa.int](mailto:clement.albergel@esa.int))

<sup>5</sup> INRA, Rabat, Morocco ([riad.balaghi@gmail.com](mailto:riad.balaghi@gmail.com))

<sup>6</sup> LMFE, Cadi Ayyad University, Morocco ([khabba@uca.ma](mailto:khabba@uca.ma))

<sup>†</sup> Now at Department of Physical Geography and Ecosystem Science, Lund University, Sweden

**Abstract:** The aim of this work was to develop early prediction models for cereal yields in Morocco, based on previous works that showed high linkage between cereal yields and various datasets including weather data (rainfall and air temperature), regional climate indices (North Atlantic Oscillation), and drought indices derived from remote sensing observation. The prediction models were developed using several machine learning algorithms. The results show that combining data from multiple sources outperformed models based on one dataset only. In addition, the remote sensing drought indices are a major source of information for cereal prediction when the forecasting is carried out close to harvest (2 months before), while weather data and, to a lesser extent, climate indices, are key variables for earlier predictions. The best models can accurately predict yield in January (4 months before harvest) with an  $R^2 = 0.88$  and RMSE around  $0.22 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

**Keywords:** Crop yield forecasting; Machine learning; Remote sensing drought indices; Climate indices.

**Résumé :** L'objectif de ce travail est de développer des modèles de prévision précoce de rendement des céréales au Maroc, sur la base de travaux antérieurs qui ont montré un lien élevé entre le rendement des céréales et divers ensembles de données, y compris les données météorologiques (précipitations et température de l'air), les indices climatiques régionaux (Oscillation Nord-Atlantique), et les indices de sécheresse dérivés de l'observation par télédétection. Les modèles de prédiction ont été développés en utilisant plusieurs algorithmes d'apprentissage automatique. Les résultats montrent que la combinaison de données provenant de plusieurs sources a fourni de meilleurs résultats que les modèles basés sur un seul ensemble de données. En outre, les indices de sécheresse issus de la télédétection constituent une source d'information majeure pour la prévision des céréales lorsque la prévision est effectuée pas longtemps avant la récolte (2 mois avant), tandis que les données météorologiques et, dans une moindre mesure, les indices climatiques, sont des variables clés pour les prévisions antérieures. Les meilleurs modèles peuvent prédire avec précision le rendement en janvier (4 mois avant la récolte) avec un  $R^2 = 0,88$  et un RMSE d'environ  $0,22 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

**Mots-clés :** Prévision du rendement des cultures ; Machine learning ; Indices de sécheresse par télédétection ; Indices climatiques.

### Introduction

Climate change will affect global agricultural production in the future (Asseng *et al.*, 2015) and it will threaten food security in several regions of the world including the Mediterranean areas, which have long been identified as a hotspot of climate change (Lionello and Scarascia, 2018). In addition to the

change expected in average climate characteristics, including temperature and precipitation, the increased frequency of extreme events may further reduce agricultural production. Indeed, drought can be responsible for a loss in agricultural production of 10-35% depending on its intensity, duration, and spatial extent (Kogan, 2019). The frequency and intensity of drought periods will increase in the future (Vicente-Serrano *et al.*, 2020). In this context, accurate seasonal forecasting of crop yields is an important decision support tool to predict import needs as early as possible. In addition, it provides critical and timely information to enable farmers to make quick decisions to increase yields through improving agricultural practices during the growing season. Also, it allows to model global and local market prices (Peng *et al.*, 2016).

Crop growth models forced by seasonal weather forecasts and empirical regression-based models are the main widely applied methods to forecast crop yield (Basso and Liu, 2019). Crop growth models are able to describe crop growth and yield response to weather condition, soil, and management practices (Jones *et al.*, 2017). Thus, these models provide a good estimation of final crop yield, when the input variables and parameters are available throughout the growing season. The uncertainty of weather forcing data during, the period between the forecast date and end of the crop growing season is one of the main limitations when using these models to forecast the crop yield (Lawless and Semenov, 2005). On the other hand, a further challenge, is to provide the model with an accurate description of the crop, soil and the management practices through the numerous input parameters (pedology, information on crop type and variety, land use, sowing date, etc.). Given these main limitations, the majority of the national agriculture department use empirical regression-based models to forecast yield over large areas. These models rely on the use of some selected variables or indicators of environmental conditions (agrometeorological, and/or remotely sensed data) as independent variables to forecast crop yield (Balaghi *et al.*, 2008; Kogan *et al.*, 2013). The performance of the empirical models on forecasting crop yield is related to the availability of datasets (Martinez *et al.*, 2009). Generally, the empirical models are simple and need fewer parameter settings compared to crop growth models. In addition, as the quantity and the quality of observed data have increased in recent years, these models forecast crop yield with reasonable accuracy (Kogan *et al.*, 2013).

In this context, the objective of this work is to develop early forecasting models for cereals yield in Morocco at the provincial scale using different data source and machine learning approaches.

## 1. Materials and methods

### 1.1. Study area

In this study, we focus on the main cereal cropping region of Morocco (Figure 1a). Morocco is located at the southern edge of the mid-latitude storm track with a semi-arid climate (Driouech *et al.*, 2010). The climate is influenced by the Atlantic Ocean, the Mediterranean Sea and the Sahara, together with very steep orography in the Atlas region. Most of the precipitation falls during winter and spring from the beginning of November until the end of April (Driouech *et al.*, 2010). Cereals are one of the country's main crops. It is cultivated both in rainfed and irrigated fields, depending on access to water supply and climate conditions. Cereals can be sown as early as November 1<sup>st</sup> if significant rainfall occurs. Nevertheless, a persistent drought at the beginning of the growing season can delay sowing until January 15<sup>th</sup> often leading to a production loss through a decrease of the wheat cropped areas as many farmers are used to wait for regular rainfall events to seed at the beginning of the season. Harvesting usually takes place around the end of May (Balaghi *et al.*, 2008). Cereal production in Morocco exhibits high inter-annual variability due to uncertain rainfall and recurrent drought periods, and this variability is expected to increase in the future due to the impact of climate change (Bouras *et al.*, 2019).

### 1.2. Methodology

The data on cereal yield for 15 provinces were acquired from the Economic Services of the Ministry of Agriculture, 4 groups of provinces with similar cereal yield interannual variability are identified through a

classification using the kmeans based on the correlative distance. The target variable is cereal yield and the potential predictors are satellite-based drought indices, weather data (rainfall and temperature) and climate indices derived from atmospheric and oceanic variables. Table 1 lists all the raw used datasets with their sources. For the satellite-based drought indices, the three widely used indices were selected, which are: the Vegetation Condition Index (VCI), the Temperature Condition Index (TCI) (Kogan, 1995) and the Soil Moisture Condition Index (SMCI) (Zhang and Jia, 2013). The VCI, TCI and SMCI are the normalized anomalies of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Land Surface Temperature (LST) and soil moisture (SM). Regarding the climate indices we have selected the North Atlantic Oscillation (NAO), the Scandinavian Pattern (SCA) and the tow leading modes of Sea Surface Temperature (SST), which are correlated with wheat yield in Morrocco (Jarlan *et al.*, 2014). All these indices were computed at monthly scale during the study periode from 2000 to 2017.

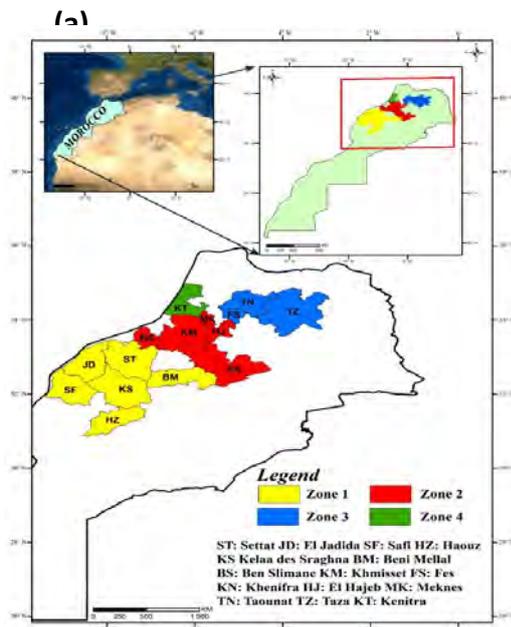
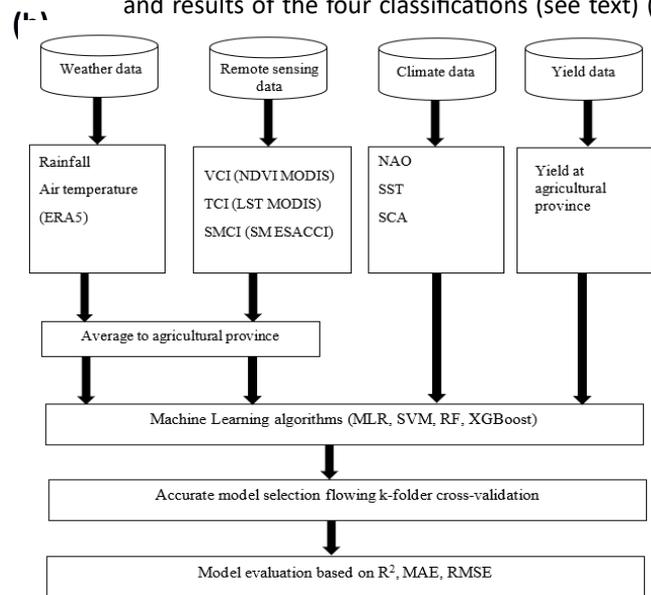


figure 1: The study areas with the 15 provinces and results of the four classifications (see text) (a)



and the main inputs data and methodology used in this study (b).

In order to build the seasonal forecasting models, we relied on Multiple Linear Regression, and three non-linear machine learning algorithms extensively used for crop yield prediction (van Klompenburg *et al.*, 2020) which are: Support Vector Machine (SVM), Random Forest (RF) and eXtreme Gradient Boost (XGBoost). An overview of the methodology is represented in the flowchart of Figure 1b.

Table 1. Summary of the raw characteristics of the data sets used for cereal yield prediction.

Category	Product	Variable	Spatial Resolution	Temporal Resolution	Source
Crop Yield		Crop yield	Province level	Yearly	Ministry of agriculture of Morocco
Remote sensing	MOD13A2	NDVI	1 km	16-Day	<a href="https://lpdaac.usgs.gov">https://lpdaac.usgs.gov</a>
	MOD11A1	LST	1 km	Daily	
	ESA CCI SM	SM	25 km	Daily	<a href="https://www.esa-soilmoisture-cci.org/">https://www.esa-soilmoisture-cci.org/</a>
Weather	ERA5	Temperature, Rainfall	30 km	Daily	<a href="https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset">https://www.ecmwf.int/en/forecasts/dataset</a>
Climate		NAO, SCA, SST		Monthly	<a href="https://psl.noaa.gov/">https://psl.noaa.gov/</a>

## 2. Results

## 2.1. Choose of inputs data sets

In order to identify the best combination of input data among the satellite-based drought indices, the weather data and the climate indices, the forecasting models of cereal yields were developed using the different combinations of inputs data from October to April (about 1 month prior to harvest) in April. The statistical metrics for the different combination of input dataset and for the different methods are reported at Table 2. On average, the more input datasets are considered, the better prediction performances are achieved. In addition, all statistical metrics are improved when adding a dataset and this is also true for all the tested methods. The results showed that the yield variability is reasonably explained with satellite-based drought indices only with  $R^2$  values ranging from 0.67 (for MLR) to 0.81 (for XGBoost), and RMSE from 0.66 t.ha<sup>-1</sup> (for MLR) to 0.44 t.ha<sup>-1</sup> (for XGBoost). By combining satellite-based drought indices and weather data the performances of all models are improved by 2-7% for  $R^2$  and by 25-30% for RMSE. The best statistical metrics are obtained by combining the three data sets with a further improvement of the statistical metrics by about 11-45% for RMSE and 4-10% for  $R^2$  depending on the used method.

**Table 2.** Statistical metrics (RMSE, MAE and  $R^2$ ) of the forecasting models for the three combination of input data from October to April (all correlation coefficients are significant at the 99% level).

Inputs data	Models	RMSE (t. ha <sup>-1</sup> )	MAE (t. ha <sup>-1</sup> )	$R^2$
Satellite-based drought indices only	MLR	0.66	0.57	0.67
	SVM	0.54	0.43	0.78
	RF	0.46	0.35	0.80
	XGBoost	0.45	0.34	0.81
Satellite-based drought indices and weather data	MLR	0.46	0.39	0.72
	SVM	0.40	0.31	0.80
	RF	0.34	0.24	0.84
	XGBoost	0.37	0.25	0.86
Satellite-based drought indices, weather data and climate indices	MLR	0.41	0.31	0.75
	SVM	0.25	0.21	0.88
	RF	0.22	0.19	0.92
	XGBoost	0.20	0.16	0.95

## 2.2. Model performance as a function of lead time before harvest

The performance of the forecasting models using the three datasets are evaluated as a function of the leading time prior to harvest from January to March (from 4 to 2 months before harvest). The RMSEs and  $R^2$  of the models are plotted as a function of the lead time at figure 2 to investigate the prediction accuracy. In addition, the relative importance of each data set is reported in Table 2.

The closer to harvest the forecast is carried out, the better the performance metrics as shown by the increase of the correlation coefficient and the drop of RMSE when going from January to March (Figure 2). The best method whatever the lead time is XGBoost as already shown followed closely by RF based approaches. The models based on XGBoost explain 88, 92 and 96% of yield variability (RMSE of 0.41, 0.34 and 0.22 t.ha<sup>-1</sup>) for a forecasting from January, February and March, respectively. By contrast, the poorest results are obtained with MLR with a strong gap of metrics with regards to the non-linear machine learning approaches ( $R^2$  is below to 0.75 for MLR while the correlations for the non-linear methods are above 0.90). While a slight improvement of the model metrics is observed when going from January to February, considering predictors in March leads to a significant jump in the metrics with RMSE close to the international standard of 0.20 t. ha<sup>-1</sup> for the XGBoost method and, to a lesser extent for RF model. This is probably related to the very high correlation between NDVI around the crop development peak in March and wheat yields that was already shown by various authors (Belaqziz *et al.*, 2014; Jarlan *et al.*, 2014) giving a large weight to VCI at this time. The dominating importance of the satellite drought indices in March for the model based on XGBoost support this assumption (Table 3).

**Table 3.** The importance of different inputs variables for cereal yield prediction using XGBoost model at the national scale in January, February and March.

Inputs data	January	February	March
Satellite-based drought indices only	20%	35%	73%
weather data	60%	53%	16%
climate indices	20%	12%	11%

**figure 2:** The temporal progression (between January to March) of the model performance at the national scale, expressed by  $R^2$  (lines) and RMSE (bars), based on the four methods (MLR, SVM, RF and XGBoost) and all inputs data.

Other striking comments can be drawn by analyzing the importance of the three data sets: (1) the weather data dominates largely in January and, to a lesser extent, in February while a strong shift is observed in March when satellite drought indices take the lead over the two other data sets. This is in agreement with the already observed high correlation between yields and precipitation around emergence in October and November, and between yields and temperature in December during the tillering stage (Jarlan *et al.*, 2014); (2) likewise, the importance of climate indices decreases with the lead time and their contribution is the lowest of the three data sets apart in January when it contributes to 20% like the satellite drought indices. Indeed, the highest correlation with yields was found in December and January for NAO and SCA, respectively while the correlations with the SST leading modes peak in October and February for “Atlantic Niño” and Atlantic Tripole modes, respectively. In addition, linkages between climate indices, in particular based on SST, and yields occur through teleconnection meaning that the relationships are indirect. This means that when good quality precipitation and temperature data are available, they should be preferred to climate indices as they provide more direct information on growing conditions; (3) satellite drought indices play a dominating role for an early prediction in March only when they contribute up to 73% on the prediction accuracy. Nevertheless, significant contribution is observed in February (35%) and in January (20%). This is because VCI and TCI was found to be significantly correlated to final yields in January and February, and because SMCI is significantly related to yields as early as October around the emergence stage (Bouras *et al.*, 2020). Indeed, high moisture at the upper soil layers at this time facilitate and favorites the emergence and significant rainfall event during October-December promotes the farmer to seed leading to an increase of yields production (Balaghi *et al.*, 2013).

## Conclusion

The results presented in this study clearly showed that combining satellite-based drought indices, weather data and climate indices is better predictors of cereal yield, and integrate these data into machine learning algorithms can provide useful tools to early forecast of cereal yield in Morocco. And it can be used as source of timely information needed to decision making during the growing season.

However cereal yields may be related to other factors that were not considered in our study, such as sowing date, soil properties, and other management aspects. In particular, the sowing dates can shift the growing season with regards to the average growing period from November to May considered in this study. Finally, it is necessary to combine the empirical models developed in this study with a crop growth model in order to include climate change impacts on crop yield forecasting.

**Acknowledgement:** This work was carried out within the framework of the Joint International Laboratory TREMA (<https://www.lmi-trema.ma/>). This work was funded by the ERANETMED03–62 CHAAMS project, the ACCWA project (grant agreement no: 823965). The H2020 PRIMA ALTOS project, MISTRALS/SICMED2, PHC Toubkal #39064WG/2018 and PRIMA-IDEWA project are also acknowledged for additional funding.

## Bibliography

- Asseng, S., Ewert, F., Martre, P., Rötter, R.P., et al., 2015: Rising temperatures reduce global wheat production. *Nature Climate Change*, **5**, 143-147.
- Balaghi, R., Tychon, B., Eerens, H., Jlibene, M., 2008: Empirical regression models using NDVI, rainfall and temperature data for the early prediction of wheat grain yields in Morocco. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **10** (4), 438-452.
- Basso, B., Liu, L., 2019: Seasonal crop yield forecast: Methods, applications, and accuracies. *Advances in Agronomy*, **154**, 201-255.
- Belaqziz, S., Mangiarotti, S., Le Page, M., Khabba, S., Er-Raki, S., Agouti, T., Drapeau, L., Kharrou, M.H., El Adnani, M., Jarlan, L., 2014: Irrigation scheduling of a classical gravity network based on the Covariance Matrix Adaptation - Evolutionary Strategy algorithm. *Computers and Electronics in Agriculture*, **102**, 64-72.
- Bouras, E.H., Jarlan, L., Er-Raki, S., Albergel, C., Richard, B., Balaghi, R., Khabba, S., 2020: Linkages between rainfed cereal production and agricultural drought through remote sensing indices and a land data assimilation system: A case study in Morocco. *Remote Sensing*, **12**, 1-35.
- Bouras, E., Jarlan, L., Khabba, S., Er-raki, S., Dezetter, A., Sghir, F., & Trambly, Y. 2019: Assessing the impact of global climate changes on irrigated wheat yields and water requirements in a semi-arid environment of Morocco. *Scientific Reports*, **9**, 1-15.
- Driouech, F., Déqué, M., Sánchez-Gómez, E., 2010: Weather regimes-Moroccan precipitation link in a regional climate change simulation. *Global Planet Change*, **72** (1-2).
- Jarlan, L., Driouech, F., Tourre, Y., Duchemin, B., Bouyssié, M., Abaoui, J., Ouldbba, A., Mokssit, A., Chehbouni, G., 2014: Spatio-temporal variability of vegetation cover over Morocco (1982-2008): Linkages with large scale climate and predictability. *International Journal of Climatology*, **34**, 1245-1261.
- Jones, J.W., Antle, J.M., Basso, B., Boote, K.J., Conant, R.T., Foster, I., Godfray, H.C.J., Herrero, M., Howitt, R.E., Janssen, S., Keating, B.A., Munoz-Carpena, R., Porter, C.H., Rosenzweig, C., Wheeler, T.R., 2017: Toward a new generation of agricultural system data, models, and knowledge products: State of agricultural systems science. *Agricultural Systems*, **155**, 269-288.
- Kogan, F., 2019: Vegetation health for insuring drought-related yield losses and food security enhancement. In: *Remote Sensing for Food Security. Sustainable Development Goals Series*. Springer, Cham, 163-173.
- Kogan, F., Kussul, N., Adamenko, T., Skakun, S., Kravchenko, O., Kryvobok, O., Shelestov, A., Kolotii, A., Kussul, O., Lavrenyuk, A., 2013: Winter wheat yield forecasting in Ukraine based on Earth observation, meteorological data and biophysical models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, **23**, 192-203.
- Kogan, F., 1995: Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, **15** (11), 91-100.
- Lawless, C., Semenov, M.A., 2005: Assessing lead-time for predicting wheat growth using a crop simulation model. *Agric. For. Meteorol.*, **135** (1-4), 302-313.
- Lionello, P., Scarascia, L., 2018: The relation between climate change in the Mediterranean region and global warming. *Regional Environmental Change*, **18** (5) .

- Martinez, C.J., Baigorria, G.A., Jones, J.W., 2009: Use of climate indices to predict corn yields in southeast USA. *International Journal of Climatology*, **29** (11), 1680-1691.
- Peng, Y.H., Hsu, C.S., Huang, P.C., 2016: Developing crop price forecasting service using open data from Taiwan markets, in: TAAI 2015 - Conference on Technologies and Applications of Artificial Intelligence.
- Van Klompenburg, T., Kassahun, A., Catal, C., 2020: Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review. *Computers and Electronics in Agriculture*, **177**, 105709.
- Vicente-Serrano, S.M., Quiring, S.M., Peña-Gallardo, M., Yuan, S., Domínguez-Castro, F., 2020: A review of environmental droughts: Increased risk under global warming? *Earth-Science Reviews*, **201**, 102953.
- Zhang, A., Jia, G., 2013: Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, **134**, 12-23.

## MODÉLISATION DU POTENTIEL DES VIGNOBLES LITTORAUX ET INSULAIRES DANS LE CADRE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Jeanne THIBAUT<sup>1</sup>, Hervé QUENOL<sup>2</sup>, Cyril TISSOT<sup>1</sup>

<sup>1</sup> LETG Brest - UMR 6554 CNRS, Université Bretagne Occidentale, [jeanne.thibault@univ-brest.fr](mailto:jeanne.thibault@univ-brest.fr)

<sup>2</sup> LETG Rennes – UMR 6554 CNRS, Université Rennes 2

**Résumé** : Les modifications engendrées par le changement climatique affectent les climats régionaux et locaux, et ont une incidence directe sur les régions viticoles à échelle mondiale. Dans un contexte d'une hausse des températures et du fait de leurs conditions climatiques particulières, les espaces littoraux et insulaires pourraient devenir des espaces refuges pour la viticulture. Pourtant, ces espaces sont déjà soumis à des pressions importantes qui peuvent complexifier l'implantation des vignobles. Afin d'évaluer les potentialités de ces espaces, cette contribution présentera un modèle d'optimisation spatiale et multiobjectifs qui vise à identifier les zones les plus propices aux vignobles en fonction de différents scénarios préétablis.

**Mots-Clés** : modélisation, multiobjectifs, viticulture, changement climatique

**Abstract** : **Modelling the potential of coastal and insular vineyards in the context of climate change**

Modifications caused by climate change hold implications for wine regions worldwide. In the context of increasing temperatures and due to their particular climatic conditions, coastal and island areas could become « refuge areas » for wine growing. However, these areas are already subject to significant pressures that can complicate the establishment of vineyards. In order to evaluate the potential of these areas, this contribution will present a spatial and multi-objective optimization model that aims to identify the most suitable areas for vineyards according to different scenarios.

**Keywords** : modelling, multiobjectives, viticulture, climate change

### Introduction

Le changement climatique a des répercussions sur les climats régionaux et locaux, ce qui affecte également les régions viticoles à l'échelle mondiale (Hannah *et al.*, 2013; Mosedale *et al.*, 2016). L'adaptation au changement climatique représente alors un défi majeur pour la viticulture tant dans un avenir proche que plus lointain (Keller, 2010). Ainsi, les espaces littoraux et insulaires pourraient devenir des espaces convoités : dans des régions chaudes soumises à une augmentation des températures, la proximité de la mer tend à modérer les températures extrêmes, ce qui constituerait un avantage non négligeable pour la culture de la vigne. Pour autant, ces espaces côtiers et insulaires sont soumis à de multiples pressions qui rendent complexe l'implantation ou l'extension de vignobles. Dans ce contexte, il semble pertinent d'évaluer les potentialités ces espaces pour la viticulture. Ainsi, l'objectif de cette contribution est de présenter un modèle d'optimisation spatiale sous contraintes et objectifs multiples, destiné à identifier des zones propices pour l'implantation d'une activité viticole en fonction de différents scénarios du changement climatique.

Basé sur une approche par scénario, le modèle proposé permet de tester différentes hypothèses afin de répondre à des questions diverses telles que l'adaptation des régions viticoles traditionnelles ou encore l'identification de nouvelles zones d'implantation. Outre la multiplicité des scénarios, ce type de modèle présente plusieurs avantages telle que la multiplicité et la diversité des critères potentiellement mobilisables, la non-supériorité d'un critère par rapport à un autre ou encore la multiplicité des solutions proposées. L'intégration d'une composante spatiale permet d'intégrer des relations de voisinage entre les mailles/parcelles, et la dimension temporelle autorise la variation ou l'ajout de contraintes en cours de simulation.

## 1. Matériel et méthode

L'approche proposée comprend deux étapes distinctes. Il s'agit tout d'abord d'identifier des critères pertinents permettant de rendre compte des caractéristiques agroclimatiques et des contraintes biophysiques des vignobles littoraux et insulaires. Ces critères sont ensuite mobilisés dans le processus d'optimisation et peuvent intervenir en tant que contraintes ou objectifs à optimiser.

### 1.1. Typologie des vignobles littoraux et insulaires

Afin de mieux appréhender les caractéristiques des vignobles littoraux et insulaires, une première approche bibliographique a permis d'établir un inventaire global de ces vignobles. Réalisée à échelle mondiale, cette recherche a aidé à documenter les différentes configurations climatiques et les pratiques agronomiques des régions viticoles insulaires et littorales dans le monde. Si les configurations rencontrées s'avèrent très diverses, il est tout de même possible d'identifier des critères suffisamment pertinents pour décrire et catégoriser ces espaces viticoles (Thibault *et al.*, 2020b; 2020a). Cette typologie peut être divisée en trois grandes catégories, associées à des caractéristiques agronomiques, biophysiques et à la structure économique du vignoble (Tab. 1).

**Tableau 1.** Typologie pour la caractérisation des vignobles littoraux et insulaires

Caractéristiques biophysiques		Caractéristiques agronomiques		Structure économique du vignoble
<b>Sols</b>		<b>Matériel végétal</b>		Configuration spatiale
Composition	<b>Topographie</b>	Cépages	Porte greffe	Superficie
Profondeur	Altitude			
Réserve utile	Pente	<b>Mode de conduite</b>		Volume de production
Mat. organique	Distance à l'océan	Mode de traitements	Entretien du sol	Marché visé
<b>Climat</b>		Système de conduite	Mécanisation	Appellations
Températures annuelles		Irrigation		
Températures saisonnières				
Précipitations				
Vents				

### 1.2. Structure et fonctionnement du modèle

La démarche d'identification des espaces les plus propices à la culture de la vigne sur les îles et le littoral s'inscrit dans un processus d'optimisation spatiale. L'optimisation spatiale peut se traduire comme « *l'aménagement spatial optimal qui implique [...] l'identification des meilleurs emplacements pour les activités et les ressources par rapport aux objectifs et aux contraintes* » (Yao *et al.*, 2018). Le modèle développé est basé sur un principe multi-objectifs permettant de calculer des solutions optimales en fonction de différents objectifs et contraintes. Le fonctionnement du modèle peut être divisé en deux grandes étapes : la création d'un scénario incluant la définition des contraintes et des objectifs (Fig. 1, sections 1a et 1b) et le processus de simulation (Fig. 1, section 2). La démarche proposée se fonde sur une approche multiobjectifs élitiste qui permet de ne conserver que les solutions les plus adaptées aux objectifs fixés en amont (Francisci, 2002).

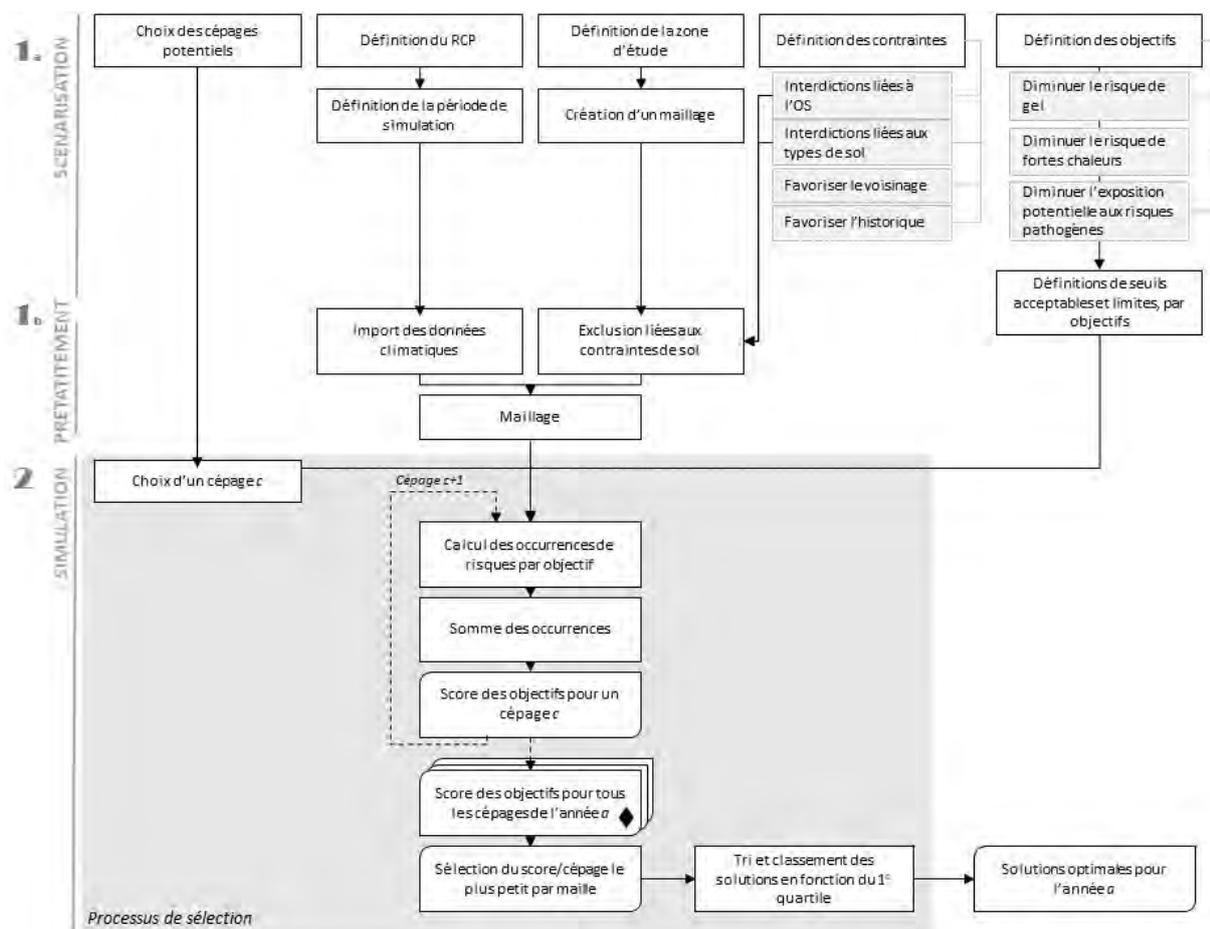
#### 1.2.1. Construction d'un scénario

La construction d'un scénario permet de définir plusieurs paramètres comme la zone d'étude, la période de simulation, le scénario climatique, le ou les cépages privilégiés, ainsi que le mode de

production souhaité pour l'ensemble de la zone d'étude. C'est aussi lors de cette étape que les objectifs et les contraintes limitantes ou excluantes pour l'implantation de la vigne vont être spécifiés. Ainsi, une contrainte peut être définie comme une condition qui limite voire interdit certaines solutions. Actuellement, les contraintes interdisant une quelconque implantation sont relatives à l'occupation du sol et aux caractéristiques des sols. Ces interdictions excluent les zones jugées « non adaptées » en amont du processus de simulation. D'autres contraintes relatives aux aspects de voisinage et d'historique d'implantation sont prises en compte tout au long du processus d'optimisation. Elles peuvent limiter ou favoriser l'implantation de la vigne. Quant aux objectifs, ils correspondent à un but à atteindre en maximisant un critère (environnemental et/ou agronomique) ou en minimisant un risque (climatique et/ou économique). Pour le moment, trois objectifs visant à minimiser des occurrences annuelles sont implémentés dans le modèle (Fig. 1, section 1a). Le premier et le second objectif tendent, respectivement, à minimiser le nombre de jours de gel et de fortes chaleurs. Le troisième objectif s'attache à minimiser l'exposition potentielle au risque pathogène.

Les objectifs sont calculés à partir d'un système d'occurrences journalières globalisées annuellement. Ce cumul annuel regroupe le nombre de jours répondant aux objectifs. Ainsi, le modèle prend en compte le nombre de jours où la température minimale est inférieure à 0°C (Webb *et al.*, 2017, Gavrilescu *et al.*, 2019), où la température maximale est supérieure à 35°C (Gambetta *et al.*, 2021) et où les conditions climatiques sont favorables au développement du risque pathogène (Tissot *et al.*, 2020). Pour chacun des objectifs, des bornes acceptables et limites sont définies. Les bornes acceptables font référence à des seuils où l'on considère que le risque est présent mais faible, alors que les bornes limites indiquent un risque élevé. Au-delà des valeurs limites, le scénario implémenté écarte les zones concernées. Lors de l'initialisation du modèle les objectifs à atteindre, les seuils et valeurs associées sont choisis en fonction du scénario retenu.

## 1.2.2. Le processus de simulation



**figure 1.** Processus de scénarisation et de simulation pour l'identification des espaces propices à la viticulture

Plusieurs études ont démontré que les principaux stades phénologiques de la vigne concordent avec une accumulation des températures (Duchêne et Schneider, 2005, van Leeuwen *et al.* 2008, Parker *et al.* 2013). La classification de Baggiolini (Baggiolini 1952) a permis de modéliser la croissance de la vigne pour les différents stades phénologiques (Tissot *et al.* 2020). Dans le modèle développé, pour un cépage et une année, les dates de débourrement sont calculées grâce à l'indice de Degré-jour de Winkler (Winkler *et al.* 1974, van Leeuwen *et al.* 2008), et les dates de véraison et de maturité technique grâce aux modèles Grapevine Flowering Véraison (GFV) et Grapevine Sugar Ripeness (GSR) (Parker *et al.* 2013, Parker *et al.* 2020). La résolution du maillage est fixée par l'échelle de sortie du modèle climatique choisi à l'initialisation (maille de 8 km<sup>2</sup> dans la cas présent). Les périodes comprises entre ces stades phénologiques représentent des phases de sensibilités accrues de la plante aux extrêmes climatiques (Cantat *et al.* 2019, Gavrilescu *et al.* 2020, Gambetta *et al.* 2021). C'est donc sur cette période que les occurrences relatives aux objectifs sont calculées et cumulées chaque année. Grâce aux seuils définis en amont, si le cumul d'occurrences pour l'un ou l'autre des objectifs est dépassé, la maille est automatiquement écartée du processus d'optimisation. Ce cumul d'occurrences est répété pour l'ensemble des cépages potentiels, pour une année  $\alpha$ . A l'issue de cette étape, chaque maille possède, pour chaque cépage choisi à l'initialisation, un score global cumulant les scores pour chaque objectif (Fig. 1 - section 2, étape  $\blacklozenge$ ). Les mailles qui n'atteignent pas la maturité technique associée à un cépage (seuil fixé par l'indice GSR) sont exclues du processus d'optimisation. Puis, des phases de sélection vont s'opérer afin de déterminer les mailles et les cépages les plus adaptés aux objectifs.

Une première phase s'opère maille par maille. Cette étape permet de sélectionner le cépage le plus adapté pour chaque maille de la zone d'étude : le score global de chaque cépage est comparé, et seul le couple cépage/score le plus petit est retenu. Puisque les objectifs actuels tendent à minimiser les risques climatiques, plus les scores sont petits, plus les solutions s'approchent des buts à atteindre. En sortie de cette étape, le modèle met en avant le cépage le plus adapté pour chacune des mailles. La seconde étape opère une sélection sur les couples cépage/score obtenus précédemment pour l'ensemble des mailles. Les couples sont triés par ordre croissant en fonction de leur score. Seuls les couples cépages/scores contenus dans le 1er quartile de l'échantillon sont considérés comme les solutions les plus optimales. Cette seconde phase de sélection permet d'obtenir les mailles avec les cépages les plus adaptés pour une année déterminée. Une fois qu'une maille a été classée comme une solution optimale, le cépage est implanté pour une durée déterminée (choisie à l'initialisation) et la maille est exclue du processus de sélection durant la période d'exploitation (30 ans dans le cas présent). L'ensemble du processus de sélection est alors répété pour chaque année de la période de la simulation avec l'ajout de contraintes de voisinage : les solutions optimales sont avant tout recherchées dans le voisinage de chaque maille « viticole ». L'antériorité de la présence d'une vigne est également prise en compte : si une maille a eu une activité viticole mais n'a plus de cépage implanté, elle est privilégiée dans la recherche de solutions optimales.

## **2. Premiers résultats à l'échelle de la région Bretagne**

### **2.1. Définition du scénario**

La vigne était présente en Bretagne, jusqu'à la crise du phylloxéra à la fin du XIXe siècle. Plusieurs études portant sur les impacts du changement climatique en viticulture, ont identifié la Bretagne comme un espace émergent propice à la culture de la vigne (Hannah *et al.* 2013, Bonnardot et Quénel 2020). Dans ce contexte, une expérimentation pour déterminer des zones viticoles potentielles à l'échelle de la région a été développée. Dans cette expérimentation, les données climatiques proviennent des simulations du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) pour le RCP 8.5 et couvrent les années de 2006 à 2100. Les cépages potentiellement autorisés sont le Pinot noir et le Sauvignon. Une fois une maille jugée optimale à l'implantation d'un cépage, celle-ci est considérée comme exploitée pour une durée de 30 ans. La simulation a été réalisée avec un mode de production de type conventionnel pour l'ensemble de la zone d'étude.

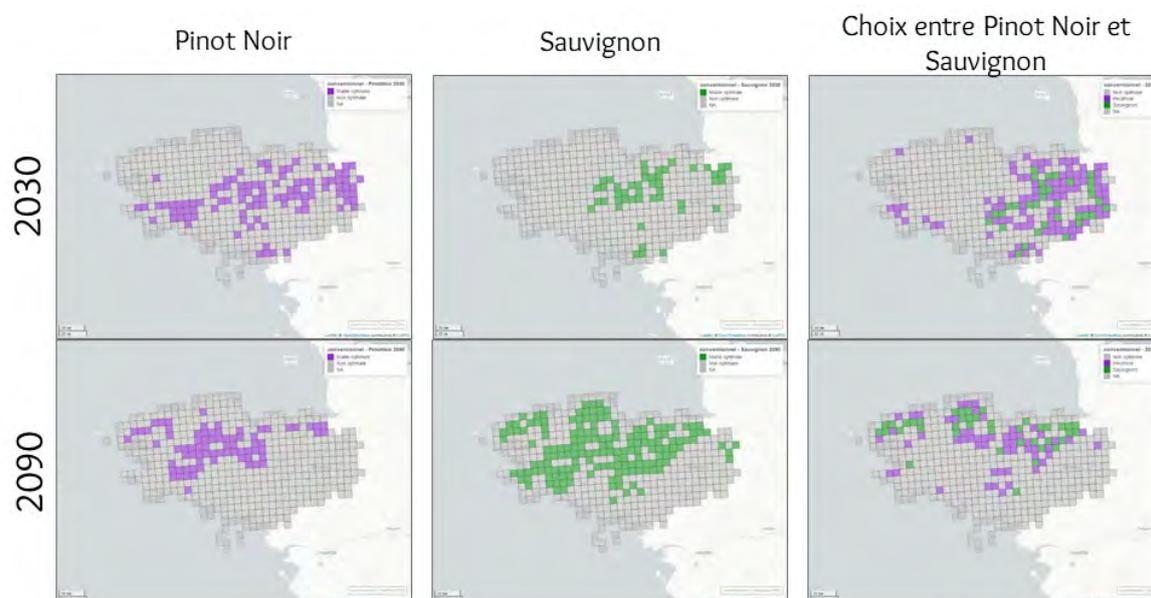
En termes de contraintes, l'implantation n'est possible que sur des mailles couvertes à 80% minimum de surfaces agricoles calculées à l'aide des données d'occupation du sol Corine Land Cover de 2018. Afin de limiter un éventuel effet de morcellement, le voisinage d'une maille déjà implantée en vigne est privilégié pour l'implantation d'une nouvelle maille viticole. L'antériorité d'une mise en culture est également considérée. Actuellement, les objectifs sont au nombre de trois et concernent la limitation du risque de gel, la limitation des fortes chaleurs, et la limitation du nombre de traitements phytosanitaires. Le premier objectif comptabilise annuellement le nombre de jours inférieurs à 0°C ; les mailles jugées avec un seuil acceptable ne dépassent pas 3 jours de gel, la limite maximale étant située à 5. Concernant la limitation des fortes chaleurs, les occurrences supérieures à 35°C sont retenues avec un seuil acceptable jusqu'à 4 jours, et une limite de 10 jours maximum. Enfin, la prise en compte du risque pathogène se traduit un nombre minimum de traitement systémique à atteindre.

### **2.2. Résultats des simulations à l'échelle de la Bretagne**

La Figure 2 présente les résultats obtenus en fonction du scénario implémenté à l'échelle de la Bretagne. Ces résultats mettent en avant des mailles optimales pour la culture de la vigne. Les mailles optimales représentent les meilleures combinaisons entre les différents objectifs et selon les seuils définis dans le scénario. Ainsi, une maille définie comme « non optimale » ne signifie pas qu'elle est

défavorable à la culture de la vigne, mais simplement que la combinaison entre facteurs favorables et contraintes est moins bonne que pour une maille optimale.

Pour les trois simulations, les données climatiques proviennent du CNRM pour le scénario 8.5 et couvrent les années de 2006 à 2100. Pour les deux premières simulations, respectivement pour le Pinot Noir puis le Sauvignon, chaque cépage a été traité individuellement par le modèle afin de déterminer les mailles les plus adaptées pour chacun à horizon 2030 et 2090. Pour la troisième simulation, les deux cépages autorisés ont été traités de façon simultanée dans le processus d'optimisation. Le processus de sélection entre les deux cépages autorisés (cf. 1.2.2.) permet de mettre en avant les mailles ainsi que les cépages les plus optimaux au regard des objectifs et contraintes fixées. De manière générale, sur l'une ou l'autre des simulations, on constate une migration des espaces optimums du sud, sud-est à horizon 2030 vers le nord, nord-ouest à l'horizon 2090.



**figure 2.** Identification d'espaces viticoles potentiels (Pinot noir et Sauvignon) en Bretagne, à horizon 2030 et 2090

## Conclusion

Ainsi, l'approche proposée permet d'aborder des questions relatives à l'adaptation des régions viticoles traditionnelles ou à l'identification de nouveaux espaces pour la viticulture. Le modèle permet également de tester différentes hypothèses et contraintes (agronomiques, anthropique, économique, etc.). Bien que l'approche et les résultats proposés soit à l'échelle d'une région (ici la Bretagne), le modèle peut également être mobilisé à des échelles plus fines, en fonction de la résolution des données disponibles (en particulier les données climatiques). De nombreuses perspectives de développement et d'amélioration sont envisagées notamment pour le calcul des objectifs. Actuellement, les occurrences de risque sont comptabilisées sur la quasi-totalité des cycles phénologiques. Or, certains critères comme le risque de gelées tardives sont plus importants en début du débournement. De même, le risque d'échaudage est plus accru en période de maturation des baies. Le calcul d'occurrences de ces risques nécessiterait ainsi de prendre en compte l'intensité et la durée de l'évènement. Dans cette perspective, de nouveaux indicateurs sont en cours d'élaboration afin d'intégrer au mieux ces notions d'intensité et de durée (Petitjean *et al.*, in prep).

## Bibliographie

- Baggiolini M., 1952 : Les stades repères dans le développement annuel de la vigne et leur utilisation pratique. *Revue romande d'agriculture et de viticulture*, **8**
- Bonnardot V., et Quénel H., 2020 : Viticulture en Bretagne : challenge ou opportunité ? Quelques indices bioclimatiques régionaux. *Actes du 33ième colloque de l'Association Internationale de Climatologie*
- Cantat O, Planchon O, Quénel H, Savouret H, Bois B, Beauvais F, et Brunel-Muguet S. 2019 : Gelées tardives et viticulture en basse et moyenne Vallée de la Loire (France): Approche géoclimatique d'un aléa météorologique majeur pour la vigne. *Climatologie*, **16**, 91-128.
- Duchêne E, et Schneider C. 2005 : Grapevine and Climatic Changes: A Glance at the Situation in Alsace. *Agronomy for Sustainable Development*, **25**, 93-99.
- Francisci D., 2002. : Algorithmes Evolutionnaires et Optimisation Multi-objectifs en Data Mining, *Rapport de recherche Laboratoire I3S*.
- Gambetta J, Holzapfel B, Stoll M, et Friedel M, 2021 : Sunburn in Grapes: A Review. *Frontiers in Plant Science*, **11**
- Gavrilescu C., Bois B., Castel T, Larmure A, Ouvrié M, et Richard Y., 2019 : Analyse spatiale de l'évolution du risque de gel sur la vigne en Bourgogne-Franche-Comté, *32ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*
- Hannah L, Roehrdanz P, Ikegami M, Shepard A.V., Shaw M.R, Tabor G, Zhi L, Marquet P.A., et Hijmans R.J. 2013 : Climate Change, Wine, and Conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **110**
- Keller M., 2010 : Managing Grapevines to Optimise Fruit Development in a Challenging Environment: A Climate Change Primer for Viticulturists, *Australian Journal of Grape and Wine Research*, **16** (s1): 56-69.
- Mosedale J.R., Abernethy K.E., Smart R.E., Wilson R.J., et Maclean I.M.D. 2016 : Climate Change Impacts and Adaptive Strategies: Lessons from the Grapevine, *Global Change Biology*, **22** (11): 3814-28.
- Petitjean T, Tissot C, Thibault J, Bonnardot V, Rouan M. et Quénel H, *in prep* 2022, Evaluation spatio-temporelle de l'exposition aux risques climatiques en régions viticoles traditionnelle (Pays de la Loire) et émergente (Bretagne)
- Parker A. K., Garcia de Cortázar-Atauri I, Chuine I, Barbeau G, Bois B, Boursiquot J-M, Cahurel J-Y., 2013 : Classification of Varieties for Their Timing of Flowering and Veraison Using a Modelling Approach: A Case Study for the Grapevine Species *Vitis Vinifera* L., *Agricultural and Forest Meteorology*, **180**, 249-64.
- Parker A.K., García de Cortázar-Atauri I, Gény L, Spring J-L, Destrac A., Schultz H., Molitor D., 2020 : Temperature-Based Grapevine Sugar Ripeness Modelling for a Wide Range of *Vitis Vinifera* L. Cultivars., *Agricultural and Forest Meteorology*, **285-286**
- Thibault J., Tissot C, et Quénel H. 2020a : Island vineyards in the context of climate change, *Proceedings of the XIIIth International Terroir Congress*
- Thibault J, Tissot C., et Quénel H. 2020b : La viticulture littorale et insulaire dans le contexte du changement climatique, *Actes du 33ième colloque de l'Association Internationale de Climatologie*.
- Tissot C, Quénel H, et Rouan M., 2020 : Adaptation de la viticulture argentine à la variabilité climatique : une approche par simulation dans la région de Mendoza , *Norois*, **254**, 91-108.
- Van Leeuwen C., Garnier C, Agut C, Baculat B, Besnard E, Bois B, Boursiquot J-M, et Chuine I, 2008 : Heat Requirements for Grapevine Varieties Is Essential Information to Adapt Plant Material in a Changing Climate, *Congrès International des Terroirs Viticoles*, **7**.
- Webb M., Pirie A., Kidd D., et Minasy B., 2017 : Spatial analysis of frost risk to determine viticulture suitability in Tasmania, Australia: Analysis of frost risk for viticulture in Tasmania, *Australian Journal of Grape and Wine Research*, **24**
- Winkler A., Cook J.A., Kliewer W.M., Lider L.A., 1974 : General Viticulture. 4Th ed. University of California Press.

Yao J., Zhang X., et Murray A.T., 2018 : Spatial Optimization for Land Use Allocation: Accounting for Sustainability Concerns, *International Regional Science*, **41**.

## MESOCIMATE IMPACT ON ALBARIÑO CV. (VITIS VINIFERA L.) BERRY COMPOSITION IN THE EMERGING ATLANTIC WINEGROWING REGION OF URUGUAY IN THE CONTEXT OF CLIMATE CHANGE

Mercedes FOURMENT <sup>1\*</sup>, Ramiro TACHINI <sup>1</sup>, Milka FERRER <sup>1</sup> and Valérie BONNARDOT <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Agronomía, Av. E. Garzón 780, CP 11400 Montevideo, Uruguay, mfourment@fagro.edu.uy, rtachini@fagro.edu.uy, mferrer@fagro.edu.uy

<sup>2</sup> Laboratoire LETG-Rennes UMR 6554 CNRS. Université de Rennes II. Place du Recteur Henri Le Moal, 35043, Rennes, France, valerie.bonnardot@univ-rennes2.fr

**Abstract:** Albariño is Uruguay's new encouraged white grapevine cultivar because of its final berry quality even under adverse climate conditions during the ripening period. This work aims to assess the effect of meso-climate on Albariño behavior. For this purpose, we installed a network of 10 temperature sensors in plots of a commercial vineyard in contrasting topographic situations. Bioindicators for grapevine were calculated, and relationships between site topography and plant response were analyzed using climatic and agronomic data for three growing seasons (2019, 2020, and 2021). Temporal climate variability between these three growing seasons was explained by rainfall, and spatial temperature variability was associated with plots topography. Plots in steeper slopes (8.8 to 11.6°) favored grapes with a higher acid content, while plots at lower elevations provided berries with higher amounts of secondary metabolites (phenols). This cultivar showed less difference in berry composition associated with climate than other cultivars such as Tannat (red cultivar).

**Keywords:** Climate variability, Oceanic wine region, Albariño, Topography, Uruguay.

**Résumé :** Impact du méso-climat sur la composition des baies d'Albariño cv. (*Vitis vinifera* L.) dans la région viticole atlantique émergente d'Uruguay dans un contexte du changement climatique.

L'Albariño est le nouveau cépage blanc encouragé en Uruguay en vertu de la qualité finale de ses baies, même dans des conditions climatiques défavorables pendant la période de maturation. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'effet du méso-climat sur le comportement de l'Albariño. À cette fin, un réseau de 10 capteurs de température a été installé dans des parcelles d'un vignoble commercial dans des situations topographiques contrastées. Des bioindicateurs pour la vigne ont été calculés et les relations entre la topographie du site et la réponse des plantes ont été analysées à l'aide de données climatiques et agronomiques pour trois saisons (2019, 2020 et 2021). La variabilité climatique temporelle entre ces trois cycles végétatifs a été expliquée par les précipitations et la variabilité spatiale des températures a été associée à la topographie des parcelles. Les parcelles situées dans des pentes plus fortes (8,8 à 11,6) ont favorisé une teneur plus élevée en acide dans les baies, tandis que les parcelles les plus basses ont fourni des baies avec des quantités plus élevées de métabolites secondaires (phénols). Ce cultivar a montré moins de différence dans la composition des baies associée au climat par rapport à d'autres cultivars comme le Tannat (cultivar rouge).

**Mots clés :** Variabilité climatique, Région viticole océanique, Albariño, Topographie, Uruguay.

### Introduction

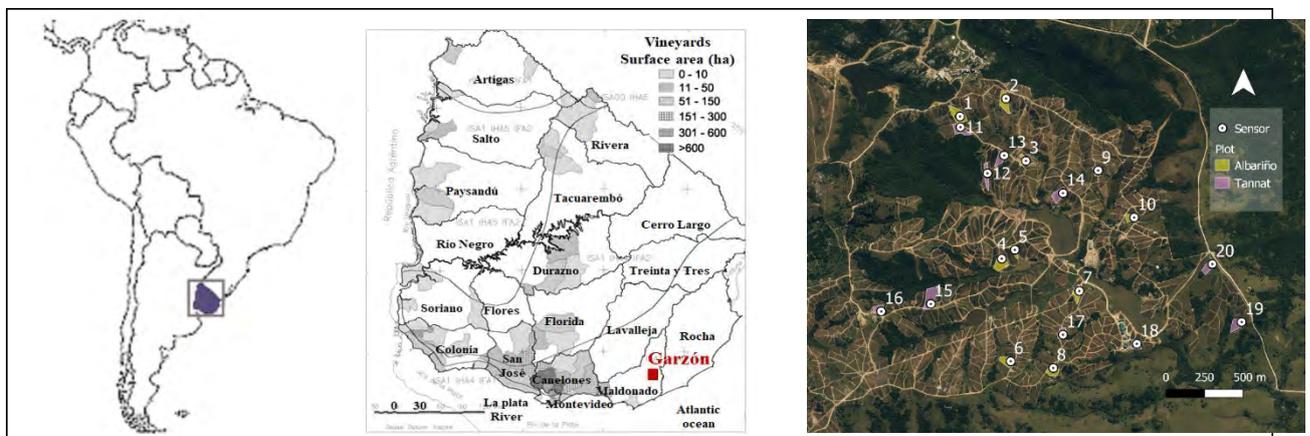
Albariño is Uruguay's new encouraged white grapevine cultivar because of its final berry good quality even under adverse climate conditions during the ripening period. This is important, considering that one of the impacts of climate change in the region is the increase in rainfall during the summer and autumn when the grapes ripen and are harvested. However, Albariño's adaptability to Uruguay climate conditions is unknown and needs investigation.

The objective of this work is to assess the effect of meso-climate (topography and distance to the Atlantic Ocean) on Albariño behavior in the emerging Atlantic wine region in Uruguay.

## 1. Study site, Data and Method

### 1.1 Study region and climate network in vineyards plots

The study was developed in a commercial vineyard in an emerging wine region on the Atlantic side of southeastern Uruguay (Garzón, located in the Maldonado Department) (Figure 1). The climate of the region was classified as temperate, with temperate nights and moderated drought, corresponding to the ISA<sub>1</sub>IHA<sub>3</sub>IFA<sub>2</sub>, climatic group according to the “Multicriteria Climatic Classification” method for vineyards (Ferrer, 2007). The grape ripening period in southeastern Uruguay is characterized by temperate-high temperatures with an average temperature during the growing season of 18.9°C (Fourment *et al.*, 2020).



**figure 1.** Latin America (left) and Surface under vineyards in Uruguay with the location of the site in red (middle), the network of 10 Albariño plots in the commercial vineyard under different topography situations (described in Table 1) (right).

A network of 10 temperature sensors (Tinytag data loggers, Gemini, UK) were installed in plots of Albariño in contrasting topographic situations (Figure 1, right). For each geographical variable (altitude, slope, and aspect), a categorization was made based on the minimum and maximum reached by each parameter. The classes obtained for each plot according to these variables can be seen in table 1. We define aspect as the exposure of the plots.

**Table 1.** Geography features for the ten Albariño plots (Altitude, Slope and Aspect) and their categories.

Plot	Altitude (m)	Slope (°)	Aspect (°)	Altitude Category	Aspect Category	Slope Category
1	135	9,4	110	High	E	3
2	140	11,2	187	High	S	3
3	108	9,3	43	Medium	N	3
4	92	11	122	Low	E	3
5	92	11,6	160	Low	S	3
6	110	7,5	323	Medium	N	2
7	77	5,7	345	Low	N	1
8	106	5,5	135	Medium	S	1
9	96	7,9	128	Medium	E	2
10	88	4,4	172	Low	S	1

## 1.2 Climate analysis

Daily data were calculated from hourly data of temperature measured by temperature sensors (Tinytag data loggers, Gemini, UK) (Figure 1). Spatial and seasonal variability of temperatures were evaluated during the growing season (running from the 1st of September to the 15th of March) over 3 vintages (2018-2019, 2019-2020 and 2020-2021). The following bioclimatic indices for viticulture were calculated for each plot: Growing Degree Days (Winkler et al., 1974), Heliothermic Index (Huglin, 1978), Cool Night Index (Tonietto and Carbonneau, 2004), thermal amplitude during the ripening period (January and February) as well as the growing season average temperature.

The growing season climatic variables were used to study the grapevine response to seasonal climate variability. The climatic variables reached for each plot were used to evaluate spatial variability of temperature over the vintage.

## 1.3 Berry composition

Berry samples of Albariño grapes were collected at harvest following the recommendations of Carbonneau et al. (1991). For each plot, two double samples of 250 berries were collected. Grape berry composition was analyzed: sugar concentration (g/l) by refractometry, titratable acidity (g H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/l) by titration, pH by potentiometry, according to the O.I.V. protocol (1990). To analyze phenolic potential, such as phenolic richness of grapes, Glories and Agustin (1993) protocol was followed. All the measurements of phenolic potentials were carried out by duplication with a Shimadzu UV-1240 Mini (Shimadzu, Japan) spectrophotometer. Those variables are important to provide enology valorization of grape and improve vinification management (González-Néves et al., 2010).

## 1.4 Statistical analysis

A univariate procedure (ANOVA) was used to determine significant differences in climate and berry composition between plots (Tukey grouping;  $\alpha = 5\%$ ), and a multivariate method (PCA) was performed to determine significant correlations between temperature and berry composition. The F value in the ANOVA procedure indicates the ratio between two means squares. The higher the F value, the more statistical significance or differences between samples are.

## 2. Results

### 2.1 Spatial variability of temperature

Within the analyzed temperature indices over the three growing seasons (2018-2019, 2019-2020 and 2020-2021) pooled together, the mean value of the CNI index was the only one to show significant statistical differences between plots (Table 2). However, correlations were founded when we analyzed differences in temperature grouping plots by altitude, slope, or aspect.

**Table 2.** Mean values of temperature of the growing season (T avg), Growing Degree Days (GDD), Thermal amplitude (TA), Cool Night Index (CNI) and Huglin Index (IH) from each plot, on average for the three studied growing seasons (2018-2019, 2019-2020 and 2020-2021).

Plot	Altitude	Aspect	Slope	T avg	GDD	TA*	CNI*	IH
	Category	Category	Category					
1	High	E	3	19,17	1683,4	11,9	16,7	217 6
2	High	S	3	19,26	1679,7	11,7	16,6	217 3
3	Medium	N	3	19,33	1705,2	12,1	16,7	220 3
4	Low	E	3	19,33	1700,8	12,8	16,3	219 9
5	Low	S	3	19,32	1710,8	13,1	16,2	221 3
6	Medium	N	2	19,44	1710,9	12,5	16,6	222 0
7	Low	N	1	19,07	1632,8	13,7	15,4	218 8
8	Medium	S	1	19,21	1679,4	12,0	16,5	217 3
9	Medium	E	2	19,21	1689,5	12,2	16,4	219 7
10	Low	S	1	19,02	1625,1	12,7	15,8	215 9
<b>Average</b>				<b>19,24</b>	<b>1681,8</b>	<b>12,5</b>	<b>16,3</b>	<b>2190</b>

\* Statistical significance between plots (*p value* <0.05).

Altitude was the main feature that statistically differentiated the temperature of the different plots. The effect was observed on thermal amplitude (F value 3.92; *p* 0.03) and the Cool Night Index (F value 26.57; *p* <0.0001). Plots situated at the highest altitude (140 masl) reached 11.8 of TA, while plots situated mid-slope and at lower altitude (70 masl) reached the highest values (12.3 and 13.1, respectively). During summer, plots at lower positions showed the lowest CNI (15.94<sup>o</sup> minimal temperature in February) while the other plots (at medium and higher positions) showed CNI up to 16.57 °C. The main factor conditioning this result was the slope exposure to sea breeze air circulation.

Aspect did not show statistical differences in temperature between plots, while slope showed significance only in minimal temperatures (CNI). Plots on slopes under 5.7<sup>o</sup> showed the minimum values of CNI compared with those at slopes up to 6<sup>o</sup> (15.91 and 16.51 °C respectively).

## 2.2 Albariño berry composition at harvest and its relation to meso-climate

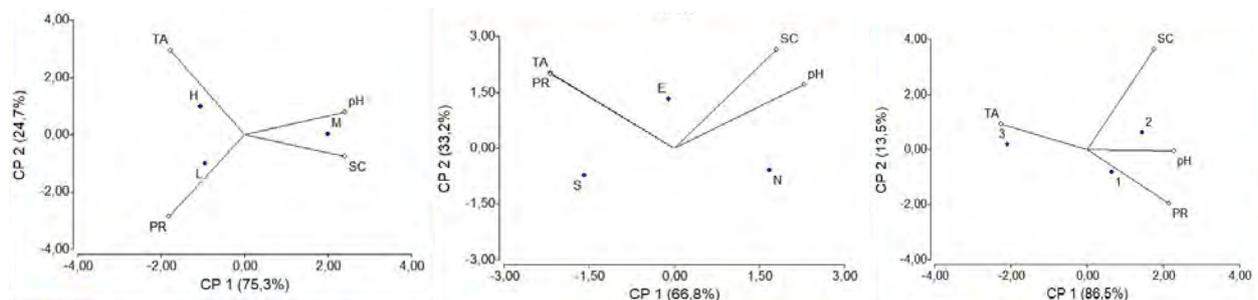
Albariño berry composition at harvest showed statistical differences in total acidity between plots, where plots 9 and 10 showed the lowest values (4.41 g/l) and plot 4 the highest (6.08 g/l) on average when the three 2019, 2020 and 2021 growing seasons are analyzed together. For the three studied seasons, the dates of harvest were 19<sup>th</sup> February in 2019, 14<sup>th</sup> February in 2020 and 16<sup>th</sup> February in 2021. Despite the difference in days due to climate variability between years, it was observed that the grapes ripen 5 to 8 days later than in the southern region of Uruguay (data not shown).

For the Uruguayan conditions, the final acidity of white cultivars such as Albariño is essential to obtain balanced wines. Compared to the origin region of this cultivar (Galicia, Spain), southeastern uruguayan Albariño is harvested with lower values of this content (5.2 on average compared with 6.2) (Cancela *et al.*, 2016).

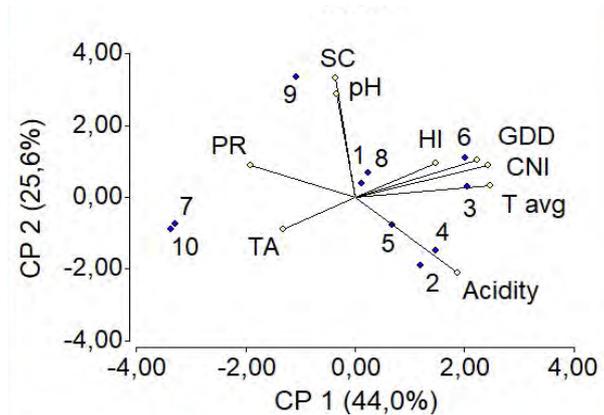
**Table 3.** Mean values of Total Acidity (TA; g/l), Sugar content (SC; g/l), pH and Phenol Richness (PR) from each plot, on average for the three studied growing seasons (2018-2019, 2019-2020 and 2020-2021).

Plot	TA	SC	pH	PR
1	5.2	216	3.2	30.6
2	5.9	209	3.1	29.8
3	5.3	216	3.2	27.3
4	6.1	213	3.1	29.3
5	5.6	213	3.1	32.3
6	5.2	220	3.2	29.0
7	4.9	215	3.2	32.4
8	5.4	215	3.2	29.2
9	4.4	228	3.2	33.9
10	4.4	214	3.1	31.8
<b>Average</b>	<b>5.2</b>	<b>216</b>	<b>3.2</b>	<b>30.6</b>

Principal components analysis showed that elevation and slope were the variables that could influence final berry composition at harvest (Figure 2). Plots situated on greater slopes (8.8 to 11.6°) favored grapes with higher acid content (5.62 g/l), while those situated at lower elevations provided berries with higher amounts of secondary metabolites (phenols) (29.8 PR).



**figure 2.** Principal Components Analysis (PCA) of Albariño berry composition (Total acidity - TA, pH, Sugar content - SC and Phenol Richness - PR) and geographic features (altitude in the left, exposition at the middle and slope at the right).



**figure 3.** Principal Components Analysis (PCA) of Albariño berry composition (Total acidity – Acidity, pH, Sugar content - SC and Phenol Richness - PR) and temperature indices (Huglin index – HI, Growing Degree Days – GDD, Cool Night Index – CNI, Temperature during the growing season – T avg and Thermal Amplitude – TA).

The correlations between climate and berry composition between plots represent 69.6% of the total variability. From Figure 3, it can be concluded that Plots 2 and 4 were associated with the acidity factor and plot 9 with pH and Sugar content, while other plots, especially 6 and 3, were strongly associated with temperature. This cultivar showed less difference in berry composition associated with climate than a red cultivar such as Tannat (Tachini et al., 2022).

## Conclusion

Spatial climate variability experienced in this region is strongly influenced by altitude as well as the slope aspect of the plots. Berry composition of Albariño is affected by plots altitude and slope as seen for differences found in acidity and phenols at harvest.

These results quantify the cultivar sensitivity to climate and, therefore, its adaptability to local growing conditions. Albariño shows good agronomic performance and grape quality for making fine wines in the eastern region of Uruguay. However, further research is needed to provide sustainable Albariño management measures for Uruguay.

## Acknowledgement

We especially thank Eduardo Félix and Juan De Mori from Bodega Garzón for providing their vineyards for the study.

## Bibliography

Cancela JJ, Trigo-Córdoba E, Martínez EM, Rey BJ, Bouzas-Cid Y, Fandiño M. 2016. Effects of climate variability on irrigation scheduling in white varieties of *Vitis vinifera* (L.) of NW Spain. *Agricultural Water Management*, 170 (2016) : 99 - 109.

Carbonneau A., Moueix A., Leclair N., Renoux J. 1991. Proposition d'une méthode de prélèvement de raisin à partir de l'analyse de l'hétérogénéité de maturation sur un cep. *Bull. OIV*, **64**, 679-690.

Glories Y., Augustin M., 1993. Maturité phénolique du raisin, conséquences technologiques : application aux millésimes 1991 et 1992. *Compte Rendu Colloque Journée Techn. CIVB*, Bordeaux. p. 56-61.

González-Néves G., Ferrer M., Gil G., Charamelo D., Balado J., Barreiro L., Bochicchio R., Gatto G., Tessore A., 2010. Estudio plurianual del potencial polifenólico de uvas Tannat. *Agrociencia*, **14**, Nº 2, 10-21.

Ferrer M., 2007. *Étude du climat des régions viticoles de l'Uruguay, des variations climatiques et de l'interaction apportée par le microclimat et l'écophysologie des systèmes de conduite Espalier et Lyre sur Merlot*. 360 p. Thèse Doctorat École Nationale Supérieure Agronomique – Université de Montpellier II. France.

Fourment M., Tachini R., Bonnardot V. and Ferrer, M. 2020. Phenology responses of grapevine cultivars to climate variability in a coastal region of Uruguay. Proceeding of the XXXIIIrd AIC Congress. July 2020, Rennes, France.

Huglin P., 1978 : Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture*, 1117-1126.

O.I.V., 1990. *Recueil des méthodes internationales d'analyse des vins et des moûts*. 368 p. Office International de la Vigne et du Vin. Paris.

Tachini R, Fourment M, Bonnardot V, Fanzone M, Ferrer M. 2022. Mesoclimate impact on Tannat in the atlantic terroir of Uruguay. XIVth International Terroir Congress and 2nd ClimWine Symposium. Bordeaux, France. July 3-8, 2022.

Tonietto J, Carbonneau A., 2004: A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agr Forest Meteorol* 124:81-97.

Winkler A.J., Cook J.A., Kliewer W.M., Lider L.A., 1975: *General viticulture*. 4th Edition, University of California Press, Berkley, pp.462. <http://dx.doi.org/10.1097/00010694-197512000-00012>.

## IMPACT DE LA SÉCHERESSE ET DE LA VAGUE DE CHALEUR ESTIVALE DE 2021 SUR L'OLIVERAIE PLUVIALE À SKHIRA (SFAX -TUNISIE CENTRALE)

Ismail CHIAB<sup>1</sup>, Salem DAHECH<sup>2</sup>, Najiba CHKIR<sup>3</sup>, Riadh BOUAZIZ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Lab. SYFACTE - Fac. des Lettres et Sciences Humaines - Univ. de Sfax - email : ismailchiab@gmail.com

<sup>2</sup> Univ. Paris Cité, UMR 8586 PRODIG - email : salem.dahech@gmail.com

<sup>3</sup>Lab. LRAE - Fac. des Lettres et Sciences Humaines - Univ. de Sfax - email : najiba\_chkir@yahoo.fr

<sup>4</sup>Lab. SYFACTE - Fac. des Lettres et Sciences Humaines - Univ. de Sfax – email : riadhbouaziz2014@gmail.com

**Résumé :** Ce travail présente l'impact d'un épisode sec sur l'oléiculture pluviale, survenu dans la zone de Skhira (Tunisie centrale) à partir de 2019 et qui a été accentué par une vague de chaleur exceptionnelle durant l'été 2021. En effet, la température maximale journalière a dépassé 40°C pendant 24 jours. Le diagnostic des pertes, à partir d'une enquête de terrain menée auprès de 85 agriculteurs, montre des impacts néfastes marqués par le dessèchement total ou partiel de centaines d'arbres. Certains oléiculteurs ont réagi pour améliorer la résilience des oliviers face aux extrêmes climatiques.

**Mots clés :** Oléiculture pluviale, sécheresse, vague de chaleur, Skhira

**Abstract :** This work presents the impact on rainfed olive cultivation of a dry episode, which occurred in the Skhira area (central Tunisia) from 2019 and which was accentuated by an exceptional heat wave during the summer of 2021. Indeed, the maximum daily temperature exceeded 40°C for 24 days. The diagnosis of losses through a field survey conducted among 85 farmers shows adverse impacts marked by the total or partial desiccation of hundreds of trees. Some olive growers have reacted to improve the resilience of olive trees to climatic extremes.

**Keywords:** Rainfed olive growing, drought, heat wave, Skhira

### Introduction

Les sécheresses sont un aléa climatique fréquent en Tunisie centrale caractérisé par un climat semi-aride à aride et qui risque de s'accroître dans un contexte de changement climatique (Henia, 1992 ; Grossman, 2019). Depuis les années 1980, les températures annuelles moyennes ne cessent pas d'augmenter dans la région de Sfax (Dahech et Ghribi, 2017). Quant aux vagues de chaleur, elles sont définies comme « *un réchauffement important de l'air, ou une invasion d'air très chaud sur un vaste territoire, généralement de quelques jours à quelques semaines* » (Cantat, 2005 in Boubaker, 2012). Durant l'été 2021 (du 28 juin au 19 septembre), une vague de chaleur exceptionnelle par son intensité et sa durée a touché la Méditerranée notamment la région de Skhira en Tunisie. Ces événements extrêmes ont probablement des impacts directs sur l'agriculture, particulièrement l'oléiculture pluviale qui s'étend sur 14731ha soit 31% des terres cultivables de Skhira ce qui représente plus que 250000 oliviers (Commissariat Régional au Développement Agricole de Sfax, 2021). Ce travail vise à étudier l'impact de la vague de chaleur exceptionnelle de l'été 2021 sur l'oléiculture pluviale à Skhira puis d'évaluer les mesures d'adaptation des oléiculteurs face à ces aléas climatiques.

### 1. Zone d'étude, données et méthodes

La région de Skhira se situe dans la partie centrale du Golfe de Gabès (fig. 1). Localisée dans une zone transitaire entre les plaines littorales steppiques et les zones désertiques, la région de Skhira est caractérisée par un climat aride inférieur tempéré. Selon l'Institut National de la Statistique (INS), la population a été estimée en 2014 à 34673 habitants dont les 2/3 appartiennent au milieu rural. C'est ainsi que l'agriculture, basée essentiellement sur l'oléiculture, occupe une place importante dans l'économie locale malgré les contraintes climatiques. Cette importance s'est accrue depuis les années

1980 avec l'extension des surfaces agricoles et surtout depuis les années 2000 par l'introduction des périmètres irrigués (Chiab, 2019 ; CRDA de Sfax, 2021).



**figure 1** : Localisation de la zone d'étude

Ce travail a été réalisé à partir des données suivantes :

- Les séries pluviométriques de la station de Skhira pour la période 1970- 2021. Ces données ont été recueillies auprès de l'Institut National de la Météorologie (INM) et du Commissariat Régional au Développement Agricole (CRDA) de Sfax.

- Les séries de températures mensuelles et annuelles issue de l'INM et d'une station météorologique Davis installée depuis avril 2021 à 20km du trait de côte dans la région d'étude. L'analyse statistique des données climatiques a permis de comprendre les caractéristiques pluviométriques et thermiques de la région de Skhira. Les données fournies par la station Davis ont permis d'étudier précisément la vague de chaleur de 2021 dans la partie continentale de la zone d'étude.

- Les campagnes de terrain ont permis d'identifier 85 parcelles (couvrant 628 ha) qui ont été touchées par la sécheresse (2019/2021) et la vague de chaleur estivale de 2021 (Fig.3).

- Une enquête exhaustive a été menée d'octobre à décembre 2021 auprès des 85 propriétaires des parcelles concernées afin d'estimer l'impact de la vague de chaleur sur le dessèchement du feuillage et l'état sanitaire des oliviers. Le questionnaire, composé de questions ouvertes et fermées, vise dans sa première partie à recueillir des informations sur la situation socio-économique des enquêtés et les données concernant les oliveraies telles que l'âge, le site, le sol, la production et les dégâts enregistrés, ... etc. La seconde partie du questionnaire est orientée vers la perception et le comportement des oléiculteurs face aux événements climatiques extrêmes (sécheresse et vague de chaleur) et les techniques d'adaptation pour améliorer la résilience des plantations d'oliviers face à ces risques climatiques.

## 2. Particularités de la sécheresse 2019-2021 et de l'été 2021 à Skhira.

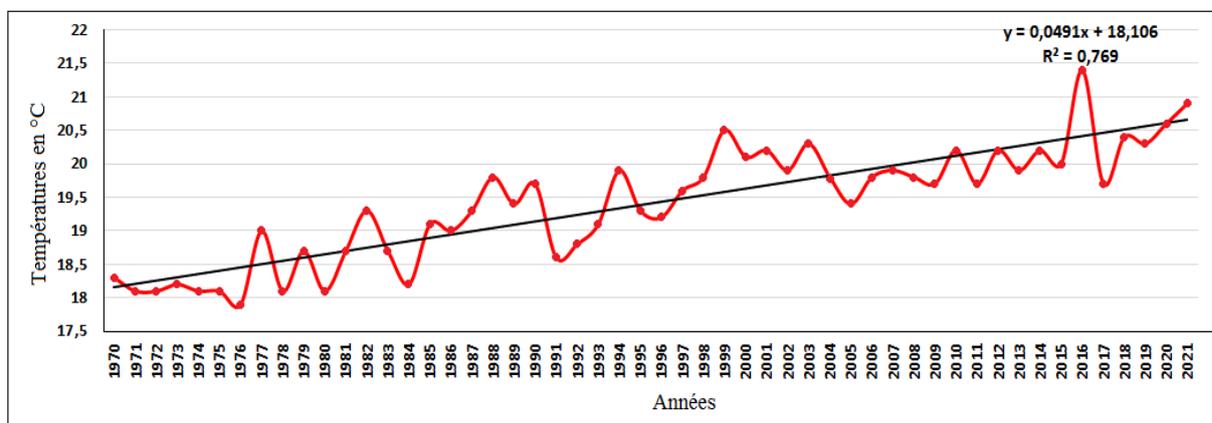
Afin de caractériser les spécificités des événements de sécheresses lors de l'été 2021, l'étude s'est basée sur l'analyse des précipitations et des températures qui représentent deux facteurs climatiques structurant en oléiculture pluviale et influencent de manière directe le rendement des oliviers (Sghaier et Ouassar, 2013 ; Arfaoui et al., 2021). En effet, en 2017, suite à une année sèche (96 mm), la production des olives a été estimée à 2400 tonnes, soit une régression de 3147 tonnes (-56.7%) par rapport à la moyenne de production entre 2009 et 2020 (5547 tonnes). Cette valeur a été multipliée par 6 pour atteindre environ 14900 tonnes en 2018 à la suite d'une quantité moyenne de pluie de 138.1 mm en 2017 (Tab. 1). En 2019, la sécheresse qui a touché la région de Skhira a été à l'origine d'une baisse importante de 71.81% du rendement des oliviers par rapport à la bonne récolte de 2018 et de 24.28% par rapport à la moyenne des 12 dernières années. (CRDA de Sfax, 2021) avant de chuter encore plus en 2021.

La décennie 2010-2021 a enregistré un déficit de 43 mm/an en moyenne (-25.3%) par rapport à la normale climatique (170 mm). Les sept dernières années (2015-2021) sont considérées parmi les années les plus sèches avec une moyenne de 123.65 mm/an soit un déficit de 46 mm (-27%) par rapport à la normale climatique. L'année 2021 a été très critique avec 39.6mm, c'est-à-dire un déficit de 76.5% par rapport à la normale climatique (tableau 1). Ainsi, en appliquant la règle initiée par Gaussien (Charre, 1997), nous remarquons que tous les mois de l'année 2021 sont secs ( $P < 2T$ ) (Tab.1).

**Tableau 1** : Données pluviométriques annuelles de la station de Skhira entre 2015 et 2021.

Année	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Précipitations en mm	162	96	138.1	112.1	133	184.8	39.6

L'analyse des températures enregistrées à l'aéroport Sfax-Thyna entre 1970 et 2021 montre une tendance générale à la hausse des températures annuelles moyennes validée par le test de Man Kendall. Une augmentation de 1.9°C a été enregistrée entre les décennies 1970-1979 et 2010-2019 qui ont enregistré respectivement des températures moyennes de 18.3°C et 20.2°C. A l'échelle annuelle, les années 2016 et 2021 correspondent aux années les plus chaudes depuis 1970 (fig.2) avec des moyennes annuelles de 21.4°C et 20.9°C. Ces deux années ont coïncidé avec des années sèches.



**figure 2** : Moyenne annuelle des températures entre 1970 et 2021 à Sfax (Données INM,2022)

A Skhira, entre juin et septembre 2021, le nombre de jours avec des températures maximales  $>37^{\circ}\text{C}$ , correspondant ainsi à des journées caniculaires (Henia et Alouane, 2009), est de 47 jours ce qui a provoqué des dégâts importants sur l'oléiculture de la région.

### 3. L'oliveraie de Skhira est sévèrement menacée par la sécheresse et la vague de chaleur de 2021

#### 3. 1. Des impacts importants dans le paysage oléicole

Les travaux de terrain et l'enquête exhaustive ont eu pour objectif d'évaluer les pertes provoquées par la sécheresse et la vague de chaleur estivale de 2021 dans la région de Skhira. Les résultats préliminaires montrent que les facteurs intervenant dans l'aggravation des impacts de la sécheresse et la vague de chaleur sont d'ordre naturel à savoir la position par rapport au littoral, au sebkha d'Ouadrane ou Bousaid (Fig.3 ; Photo 3) à la dépression fermée et au relief montagneux ainsi que la nature du sol (Fig.3 ; Photo 1) et aussi d'ordre anthropique. En effet, le rôle de l'homme est déterminant pour aggraver ou limiter les conséquences de la sécheresse et la forte chaleur. Dans tous les secteurs de Skhira, la plupart des agriculteurs (surtout ceux qui n'ont pas les moyens financiers) ont eu des difficultés pour protéger leurs oliviers et limiter l'ampleur des dégâts d'une sécheresse qui a débuté depuis 2019 et s'est accentuée depuis le mois de juin 2021 par une vague de chaleur accompagnée par l'absence totale des pluies pendant 113 jours (du 05 avril au 28 juillet) surtout durant la période de l'activité végétative des plantes. L'impact des aléas climatiques est amplifié par la pollution atmosphérique issue de l'industrie chimiques, notamment le traitement des phosphates (SIAPE et TIFERT) ce qui a accentué la vulnérabilité des oliveraies surtout celles situées à proximité de la zone industrielle à l'est d'Ouled Haj Moussa (Fig.3 ; Photo 2). L'émission énorme de différents polluants tel que le CO<sub>2</sub> et l'oxyde de soufre ne manquent pas d'un puissant impact sur l'olivier en manque de pluie. En effet, les travaux de terrain ont montré que ces oliveraies sont les plus touchées par la vague de chaleur. L'oliveraie de Skhira a enregistré un dessèchement total de 2120 pieds d'arbres (Fig.3) qui occupent une superficie de 124.7 ha soit 19.85 % du total de la superficie des 85 parcelles touchés par les aléas climatiques précités. Cependant 2697 pieds d'arbres occupant une superficie de 158.64 ha (soit 25.26% de la superficie totale) ont été affectés par un dessèchement partiel. Il est à signaler ici que 86.7% des arbres menacés sont en pleine production étant donné que leur âge est compris entre 20 et 70 ans.

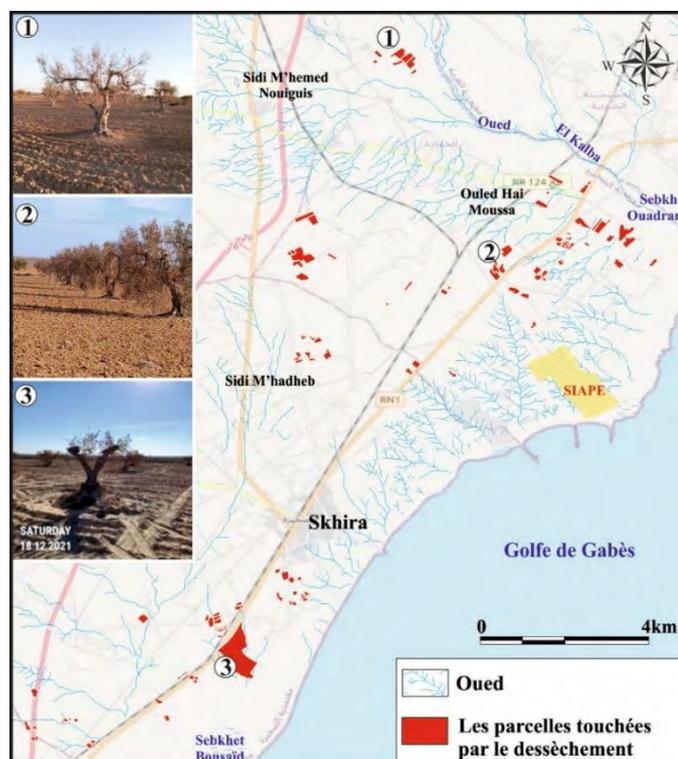


figure 3 : Localisation des parcelles des oliviers touchés par dessèchement. Clichés personnels 2021

Dans ce contexte climatique assez particulier, nous avons remarqué que ce sont les petits exploitants, faute de moyens financiers et matériels, qui ont été sévèrement affectés par la sécheresse et la vague de chaleur. Ce constat est important puisque 88.6 % des exploitations (77 sur 85) ayant une superficie inférieure à 5 ha et/ou comprise de 5 à 10 ha couvrant 53.1% de la superficie totale (tableau 2). En revanche, une bonne connaissance des besoins de l'olivier en eau durant sa période végétative qui s'étend de mars à novembre (Loussert et Brousse, 1978 ; Allen et al,1998 ; Masmoudi et al, 2004 ; Arfaoui et al, 2021), bien répartie dans le temps pourrait limiter les effets de la sécheresse et minimiser l'effet de stress hydrique du climat méditerranéen.

**Tableau 2** : Répartition des oliveraies selon le nombre et la superficie en 2021 à Skhira.

47	55.3	147	23.4
30	35.3	186.5	29.7
7	8.2	165	26.2
1	1.2	129.5	20.7
85	100	628	100

Source : Enquête, Chiab I ,2021

### 3.2. Perception de la sécheresse par les agriculteurs

Les résultats de l'enquête ont montré que 49.9% des enquêtés ont plus que 60 ans. Ils ont une mémoire des sécheresses plus anciennes dont les plus proches se sont produites en 2001, 2008, 2012 et 2016. La totalité des enquêtés affirment que la dernière sécheresse 2019/2021 a été la plus catastrophique pour les oliviers. Ils expliquent le dessèchement par la succession des années sèches aggravées par la vague de chaleur estivale. Pour cette raison, 25.88% des enquêtés considèrent que l'irrigation déficitaire et de sauvetage ou de surface (Ben Rouina, 2016), n'aura aucune efficacité pour un olivier totalement desséché. 46 enquêtés, soit 54.1%, considèrent que l'état de leur oliveraie exige une irrigation continue ou localisée dans le but de corriger le déficit pluviométrique.

### 3.3. Les techniques culturales et les mesures d'atténuation : le défi pour se protéger contre la sécheresse

Seulement 27 exploitants, soit 31.76 % des enquêtés, ont essayé de protéger leur plantation avec l'irrigation de surface dès qu'ils ont remarqué le début du dessèchement (jaunissement et flétrissement des feuilles d'olivier). Seuls les jeunes oliviers (moins 20 ans) ont donné des résultats relativement satisfaisants. Le reste des enquêtés ont sous-estimé les impacts de la vague de chaleur ou alors, n'ont pas eu la possibilité de protéger leurs exploitations. Rappelons toutefois, que l'irrigation de sauvetage a pour objectif d'améliorer la résilience des oliviers. Elle est pratiquée en utilisant des citernes de 5000 litres par arbre (Fig.4A) avec une fréquence d'irrigation de 2 à 3 fois par mois. Elle varie aussi suivant l'âge de l'olivier. Ce type d'irrigation qui a commencé au début de juillet n'a pas donné de bons résultats. Cependant, certains exploitants ont expérimenté des systèmes d'irrigation selon les normes conseillées, c'est à dire 4 à 5 fois par an bien réparties pendant les phases phénologiques les plus sensibles (Masmoudi,2012 ; BERD et FAO,2017) : l'irrigation par rigoles ou par des sillons creusés par un tracteur parallèlement aux lignes d'oliviers (fig.4B). 34 parcelles ont bénéficié de l'extension récente de l'oléiculture irriguée sous forme de système de plantation intermédiaire basée sur une irrigation localisée ont, d'une part, été soumises à un niveau d'assèchement limité et d'autre part, ont réussi à assurer une production d'olives, parmi elles, 27 soit 79.41% du total dépassent une superficie de 10 ha.



**figure 4** : Deux méthodes d'irrigation : A : Irrigation de surface (par rigole). B : Irrigation par sillons creusés parallèlement aux lignes d'oliviers

### **Conclusion :**

Evaluer les impacts des sécheresses sur l'oléiculture est primordial pour la profession agricole. Cette étude préliminaire a permis d'analyser les facteurs (notamment caractéristiques des parcelles) qui ont entraînés des dommages sur les oliviers. Pour dégager des bonnes pratiques d'adaptation au changement climatique et évaluer les techniques utilisées, une deuxième enquête sera réalisée auprès des exploitants des parcelles ayant été épargnées par le dessèchement total ou partiel. Les résultats seront ensuite partagés avec l'Institut de l'Olivier afin de mener un projet pilote de valorisation des techniques d'adaptation des oliveraies aux risques climatiques extrêmes tels que les sécheresses et les vagues de chaleur.

### **Bibliographie :**

- Arfaoui F, Cohen M, Oudin L et Ronchail J., 2021 : Évolution, modélisation et cartographie des rendements de l'oléiculture dans la province de Jaen en Espagne (1959-2018). *Climatologie*, 18, 4.
- Allen G., Pereira S., Raes D., Smith M., 1998 : *Crop evapotranspiration, guideline for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and drainage paper 56. FAO. Rome, 300p.
- Banque Mondiale., 2012 : *La Tunisie face au changement climatique*. 52 p.
- Ben Boubaker H., 2012 : [www.institut-numerique.org/i1-quest-ce-quune-vague-de-chaleur-502a317254c9a](http://www.institut-numerique.org/i1-quest-ce-quune-vague-de-chaleur-502a317254c9a)
- Ben Boubaker H., 2015 : *les vagues de chaleurs en Tunisie. Contribution à l'étude des aléas et risques climatiques en Tunisie*. 133-165. Pub. Université de Tunis.
- BERD et FAO., 2017 : <https://www.webmanagercenter.com>
- Ben Rouina B., 2016 : *Rapport sur dessèchement des oliviers au complexe agro-industriel du Châal après la sécheresse 2015-2016*. Institut d'olivier Sfax. 11p.
- Chiab I., 2019 : *L'oléiculture irriguée dans l'arrière pays de Sfax : dynamique spatiale et vulnérabilité des ressources en eau et en sol : le cas de Skhira*.145p. Mémoire de mastère en Géographie. Faculté des Lettres et Sciences Humaines Sfax, Tunisie.
- CRDA de Sfax, 2021 : *Statistiques du secteur agricole selon les délégations 2002, 2008, 2016 à 2020*
- Crossman N., 2019 : Cadre de politique de résilience, d'adaptation et de gestion de la sécheresse. Directives techniques à l'appui. CNULCD. 37p.
- Dahech S et Ghribi M., 2017 : Réchauffement climatique en ville et ses répercussions énergétiques Cas de l'agglomération de Sfax (centre-est de la Tunisie), *Revue Méditerranée*, 128. 2738.
- Henia L., 1992. Sécheresse climatique et comportement humain dans la Tunisie centrale. Actes du 5ième colloque de l'AIC. Dijon. Publication de l'association internationale de climatologie, 5, 241-248.
- Institut National de Météorologie Sfax, 2022 : *Données pluviométriques et de température*.
- Loussert R. et Brousse G., 1978 : L'olivier. Technique Méditerranéenne et production agricole. Maisonneuve et Larose, Paris. Tome1.

Charfi C., 2012 *Manuel d'irrigation de l'olivier : Techniques Applications Résultats de Recherches*. Ministère de l'Agriculture Institution de la Recherche et de l'Enseignement Supérieurs Agricoles Institut de l'Olivier, 206p.

OMM., 2016 : *Manuel des indicateurs et indices de sécheresse*. N°1173. 45p.

OMM., 2021 : *Directives de l'OMM sur les services de prévision et d'alerte multi danger axées sur les impacts*. N° 1150. 70p.

Sghaier M et Ouassar M ., 2013 : *L'oliveraie tunisienne face au changement climatique : méthode d'analyse et étude de cas pour le gouvernorat de Médenine*.40p . Pub. GIZ.

## ESTIMATION DE LA VITESSE DE PROPAGATION DU FEU DANS LA FÔRET DOMANIALE DE TAKROUNA (NORD OUEST DE LA TUNISIE) PAR LE MODÈLE BEHAVE

Salem SEBEI <sup>1</sup> & Youssef AMMARI <sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Laboratoire d'Ecologie Forestière, Institut national de recherche en génie rurale eaux et forêts, Tunisie, [sebei\\_salem@yahoo.fr](mailto:sebei_salem@yahoo.fr)*

**Résumé :** La forêt de Takrouna est située entre l'étage semi-aride supérieur et subhumide. Elle est dominée par des pinèdes mixtes et pures. Pour estimer la vitesse de propagation du feu nous avons adopté le modèle Behave. Les entrées de ce modèle sont multiples et renferment des données concernant la végétation, le climat et la topographie. Les sorties sont essentiellement la vitesse du feu, la puissance du front du feu et la longueur de la flamme. La maximale du feu simulée par le modèle BEHAVE dans la forêt de Takrouna a atteint 5,2 km/h et la hauteur maximale de flamme s'élève à 7,30 mètres.

**Mots-clés :** modèle Behave, vitesse du feu, pinèdes mixte, puissance du front du feu

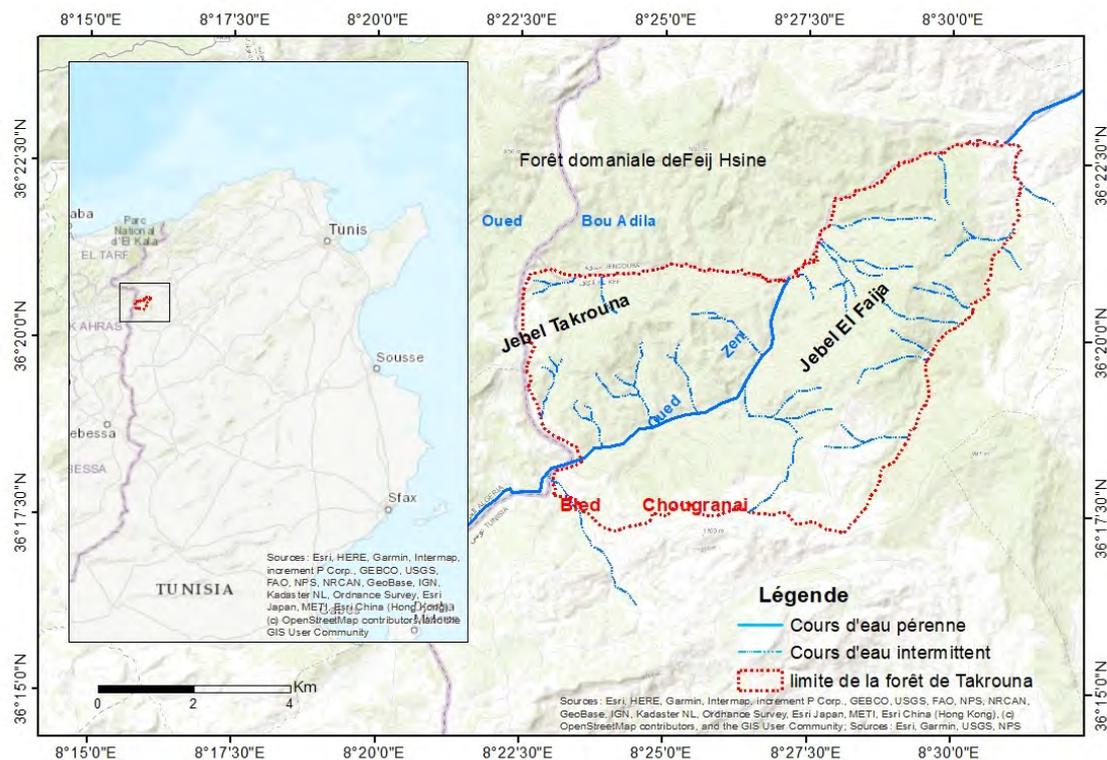
**Abstract:** Takrouna Forest is located between the upper and lower semi-arid sub humid. To estimate the fire propagation speed we adopted the Behave model. The entries of this model are multiple, they contain data concerning the vegetation, the climate and the topography. The outputs are essentially the speed of fire, the power of the fire front and the length of the flame. The maximum speed simulated by the BEHAVE model in the Takrouna Forest reached 5.2 km / h and the maximum flame height is 7.30 meters.

**Key words:** Behave model, fire speed, mixed pine forests, fire front power.

### Introduction

La forêt de Takrouna, terrain de notre étude, se situe au Nord-Ouest de la Tunisie (figure 1). Elle appartient à la région du Haut Tell. Au plan climatique, la majeure partie de la série de Takrouna appartient à l'étage bioclimatique humide inférieure et à l'étage subhumide. La région montagneuse d'Ouergha, dont Takrouna fait partie, est la plus arrosée dans la région du haut Tell. Elle reçoit, par endroit, plus de 800 mm/an de précipitation. Nous avons recensé 130 incendies dans cette forêt entre 1940 et 2019, 13% représentent de grands incendies (superficie > 100 ha). Les petits incendies (dont la surface inférieure à 1 ha) représentent 45.3% du nombre total des incendies (Sebei, 2017). Cette forêt présente un grand risque d'incendie en comparaison avec d'autres séries forestières dans la région du nord-ouest.

Pour simuler le feu de forêt nous avons adopté le modèle Behave. C'est l'un des modèles semi-empiriques largement utilisé depuis trois décennies dans la simulation du feu dans les pays du bassin méditerranéen. Ce modèle intègre plusieurs paramètres d'entrées tels que le combustible végétal, le degré de pente et la vitesse du vent. Le modèle Behave est fondé sur le modèle de Rothermel inventé en 1972 (Andrews, 1986).



**figure1.** Situation de la forêt domaniale de Takrouna.

Le modèle Behave de prédiction de comportement de feu de forêt avec ses deux sous- systèmes Fuel et Burn sont des outils interactifs de programme informatique.

Il a été utilisé depuis 1984 par les aménageurs des espaces à risque d'incendie aux Etats-Unis d'Amérique. L'utilisateur du modèle peut adapter les prédictions à ces besoins spécifiques en se basant sur la résolution des données d'entrée et l'interpolation des données de sortie.

## 1. Données et Méthodes

### 1.1. Paramètres caractérisant le combustible végétal

Nous prenons comme exemple de ces paramètres la charge du combustible mort d'une heure (tableau1). Les paramètres pris en considération dans le calcul de la charge de ce type de combustible sont : la masse volumique des aiguilles de pin d'Alep ( $\rho$ ) - puisqu'elle constitue la composante essentielle de la litière - la fraction volumique ( $\beta$ ) et l'épaisseur de la couche de la litière et herbes sèches mesurés sur terrain ( $\sigma$ ). La formule de la charge de litière est la suivante :

$$W$$

La masse volumique des aiguilles de pin d'Alep ( $\rho$ ) = 800 kg/m<sup>3</sup> et la fraction volumique de la litière ( $\beta$ ) = 0,03, ces deux paramètres sont constants (Alexandrian *et al.*, 1982). La charge de la litière ne dépend que de son épaisseur ( $\sigma$ ) mesurée sur la placette d'où :

$$W$$

**Tableau 1.** Les paramètres d'entrée caractérisant le combustible végétal.

Paramètres	Unités
Charge du combustible mort d'1 h	Tonne/ha
Charge du combustible mort d'10 h	Tonne/ha
Charge du combustible mort d'100 h	Tonne/ha
Charge des herbes vivantes	Tonne/ha
Charge du bois vivant	Tonne/ha
Rapport surface /volume du combustible d'1 h	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Rapport surface /volume des herbes vivantes	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Rapport surface /volume du bois vivant	m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Epaisseur du lit du combustible	mètre
Pouvoir calorifique du combustible vivant	KJ/kg
Pouvoir calorifique du combustible mort	KJ/kg

### 1.2. Humidité du combustible végétal

Les combustibles végétaux d'1 heure de dimension comprise entre 0 et 6mm sont composés d'aiguilles, de feuilles et brindilles qui sont définis comme des combustibles fins. Les combustibles de 10 heures de dimensions comprises entre 6 et 25 mm constitués de ramilles, rameaux et morceaux d'écorce sont qualifiés de moyens (tableau 2). La teneur en eau de la litière et des végétaux morts dépend uniquement des phénomènes physiques : échanges par capillarité avec le sol et équilibre avec la vapeur d'eau dans l'atmosphère (Trabaud, 1989).

**Tableau 2.** Les paramètres d'entrée caractérisant l'humidité du combustible végétal (en %).

Paramètres
Humidité d'extinction du combustible mort
Humidité du combustible d'1h
Humidité du combustible de 10 h
Humidité du combustible de 100 h
Humidité des herbes vivantes
Humidité du bois vivant

Pour certaines espèces comme le ciste de Montpellier ou le romarin, le feuillage subit un dessèchement partiel ou total pendant les périodes particulièrement sèches. Leur teneur en eau rapportée à la masse sèche peut descendre sous les 30% selon Valette (2007).

### 1.3. Climat et topographie

Dans le modèle Behave la vitesse du vent est corrigée par un coefficient qui varie entre 0,1 et 0,6 selon les situations topographiques et le degré de fermeture du peuplement. Avec un peuplement fermé le coefficient de réduction est fort. L'écoulement du vent au-dessus des formations végétales est fonction de leur rugosité. Dans les groupements stratifiés, l'amoindrissement de la vitesse d'écoulement de l'air conduit à un confinement relatif, donnée essentielle du climat interne (Braque, 1988).

La structure de la végétation peut jouer le rôle de brise-vent. Ce mécanisme est complexe, et ses effets diffèrent selon la hauteur, l'épaisseur et la perméabilité de l'abri. La réduction de la vitesse du vent se produit à la fois en avant de l'écran, où se forme un « coussin d'air » en surpression, sur lequel glisse le courant, et à l'aval sur une largeur et une épaisseur variable (coussin d'air en sous-pression). A cette diminution de la vitesse, sont associés des effets microclimatiques et une action sur le climat régional (Braque, 1988). Pesson (1974), indique que les bois augmentent la rugosité du paysage et diminuent ainsi d'une façon générale la vitesse du vent et que le rideau boisé freine efficacement le vent sur une distance égale à 20 fois sa hauteur. Sous-bois, la vitesse du vent est freinée et c'est au niveau des

couronnes que la réduction est la plus forte. Khader (2009) a adopté cette classification avec une description de la propagation du feu que nous avons résumé dans le tableau 3.

**Tableau 3.** Classes de pente et leur impact sur la propagation des feux de forêts.

Pente	Description de la pente	Impact sur la propagation du feu
$P < 15\%$	Pente faible	Sans incidence sur la propagation
$15 < p < 30\%$	Pente moyenne	Accélération modérée du front du feu
$30 < p < 60$	Pente forte	Accélération importante du front du feu
$p > 60$	Pente très forte	Risque de turbulence, saute de feu embrasement

Source : Khader (2009).

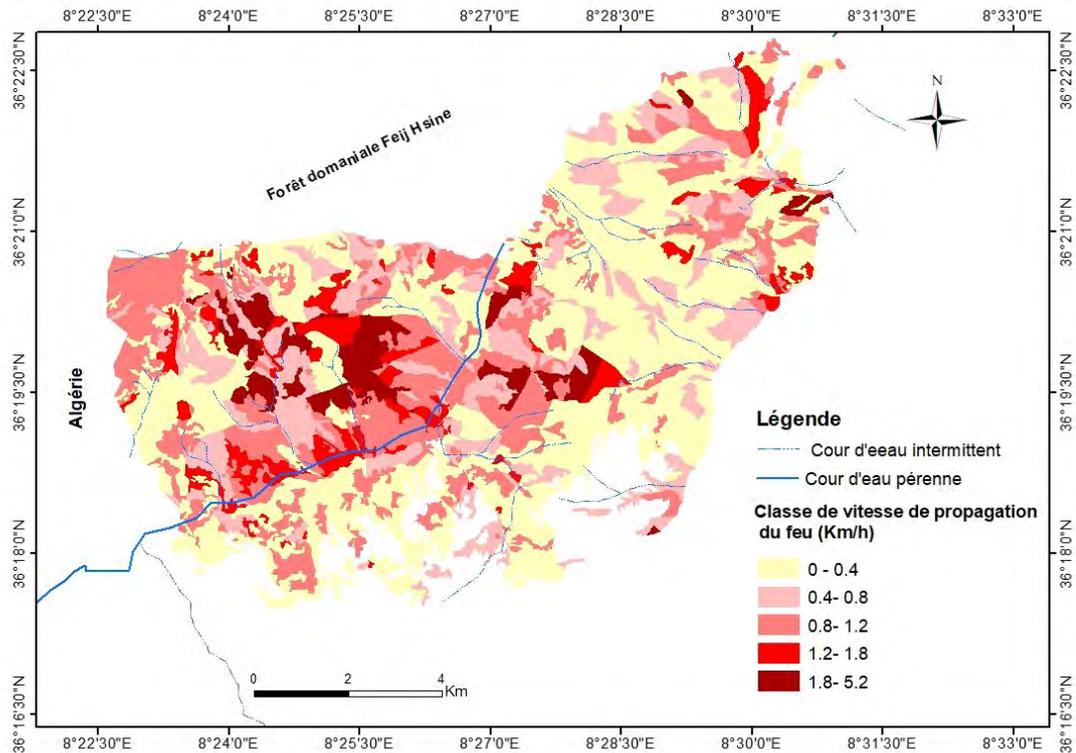
Dans la forêt domaniale de Takrouna, 44, 34% de la surface est dominée par des pentes fortes à très fortes susceptibles d'engendrer une accélération importante du front du feu, il y a aussi le risque de turbulence, saute du feu et embrasement. Khader (2009) utilise le concept de pente positive, « lorsque l'exposition fait face au vent ». Dans cette situation le feu sera amplifié. La pente est qualifiée comme négative « lorsque l'exposition est opposée au vent ».

La simulation réalisée par le modèle Behave concerne seulement la propagation du front du feu. Elle n'envisage pas l'éclosion qui représente un autre créneau de recherche prometteur. La logique des simulations est fondée sur le choix de scénario reposant sur le changement des paramètres d'entrée connaissant une variabilité importante en relations avec le type de temps : il s'agit de la vitesse et la direction du vent en plus de l'état hydrique de la végétation. Dans notre étude nous avons choisi un scénario dans lequel la vitesse du vent est la moyenne des vitesses au cours des incendies ravageant la forêt de Takrouna. La direction du vent est celle du vent le plus fréquent au cours des sinistres. La simulation concerne toutes les unités cartographiques comme si le feu incendiera l'ensemble de la série forestière.

Le modèle Behave fournit trois paramètres de sortie indispensables pour la lutte active, c'est à dire au cours du sinistre, et pour la lutte passive qui concerne les travaux de prévention. Les trois paramètres sont : la vitesse de propagation du feu, la puissance du front du feu et la longueur de la flamme.

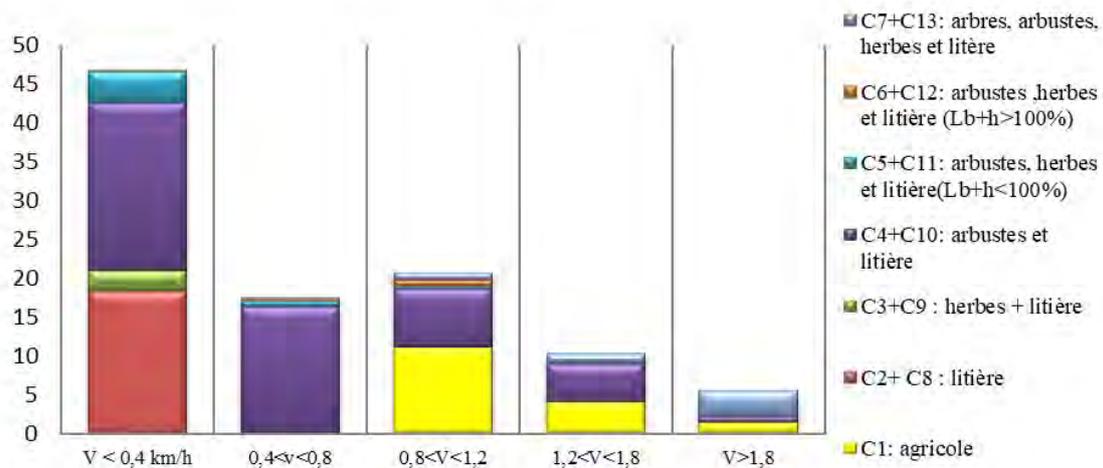
## 2. Résultats

La vitesse du front du feu est de valeur capitale pour les forces de lutte et pour les organismes responsables de l'organisation et la répartition des équipements et des engins d'extinction du feu pendant la saison à risque, de mai à octobre (figure 2). Nous avons adopté l'échelle d'intensité pour le phénomène incendie de forêt développe par Lampin *et al.* (2003). Cette échelle est déterminée soit à partir des paramètres physiques du phénomène soit en prenant compte des endommagements observés sur des enjeux standards. La classe de vitesse du feu caractérisée comme très faible représente 45 % de la surface de la série. La classe de vitesse très élevée couvre la surface la plus faible ; soit 360 ha. Cette classe concerne les unités cartographiques qui constituent des matorrals moyens à élever qui n'ont pas subi des travaux d'éclaircie et d'élagage avec un recouvrement global de la strate ligneuse haute supérieur à 50 % et qui atteint même 85% (figure 3).



**figure 2.** Vitesse de propagation du feu (km/h) au sein des unités cartographiques de la forêt domaniale de Takrouna.

Au sein de ces unités cartographiques issues des incendies de 1993 et 1994, le nombre moyen de pieds de pin dénombrés dans 48 placettes de 4 m<sup>2</sup> est de 52000 pieds / hectare. Le nombre de pieds de pin atteints par endroit est de 95000 pieds / hectare. La vitesse du feu est la résultante de plusieurs facteurs qui influencent directement ou indirectement ce paramètre tels que les transferts thermiques de la combustion, la vitesse du vent, la biomasse aérienne, la pente, la teneur en eau et la porosité de la couche de combustible.



**figure 3.** Pourcentage des surfaces des unités cartographiques de la série forestière de Takrouna en fonction de la vitesse de propagation du feu (Km/h) et les types de complexes de combustibles.

## Discussion et conclusions

La vitesse de propagation du front du feu qui est le paramètre le plus important pour les aménageurs et les combattants du feu, varie dans les unités cartographiques de la série forestière de Takrouna entre 0 (vitesse nulle) et 5,2 km/h. En Tunisie, l'étude réalisée par Abdelmoula (2005), sur la série forestière de Djebel Mansour dans le Nord Est de la Dorsale a abouti à des résultats que l'auteur a considérés comme fortement surestimés ; les vitesses de propagation du feu sont comprises entre 4 et 13 km/h. Sur les vitesses du front de feu observées dans des feux expérimentaux dans les forêts méditerranéennes, nous avons pris comme exemple l'incendie de la forêt de Nohèdes (Pyrénées –Orientales) en date du 15 septembre 1999 qui sont de l'ordre de 1,1 à 1,2 km/h dans des peuplements fermés. Sur des peuplements ouverts sans obstacle elle est de 1,3 à 1,5 km/h.

Lors de l'incendie de Lambec, en août 1995, la vitesse du front de feu est variable selon la nature de l'occupation du sol ou la nature du peuplement. Elle varie entre 1,08 et 2,5 km/h sur le versant exposé au vent et entre 0,7 km/h et 1,08 dans le versant sous le vent.

**Remerciements :** Nous remercions les responsables au niveau du Direction générale des forêts (DGF) et les techniciens du laboratoire d'Ecologie Forestière à l'INRGREF, Tunisie, qui ont aimablement accepté de participer aux travaux de terrain.

## Bibliographie

- Abdelmoula, K., 2005. *Evaluations de l'efficacité de réseaux de coupures de combustible sur la réduction du risque d'incendie à l'échelle du massif forestier*. Thèse, Université de Provence, Aix-Marseille, 199p.
- Alexandrian, D., 1982. Estimation de l'inflammabilité et de la combustibilité de la végétation ; *bulletin d'information CEMAGREF* N° 228.
- Andrews, P. L. (1986). *Behave: fire behaviour prediction and fuel modelling system; Burn subsystem, part I*. USDA Forest Service General Technical Report. (INT-194), 130p.
- Braque, R., 1988. *Biogéographie des continents*. Paris. Masson. 470p.
- Khader, M., Benabdeli, K., Mederbal, K., Fekir, Y., Gueddime, R. et Mekrou, B., 2009. *Etude du risque incendie à l'aide de la géomatique, cas de la forêt de Nesmoth (Algérie)*. *Mediterranea. Serie de Estudios Biológicos. Epoca II, n. 20 (2009)*. ISSN 1130-6203.
- Lampin, C., Jappiot M., Alibert N. et Marley R., 2003. *Une échelle d'intensité pour le phénomène incendie de forêts*. SIRNAT-JPRN. Orléans, 9p.
- Pesson, P. (ouvrage collectif), 1974. *Ecologie forestière, la forêt : son climat, son sol, ses arbres, sa faune*. Paris. Gautier. Villars éditeur.
- Sebei S., 2017. *Etude des facteurs de risque d'incendie dans la forêt Domaniale de Takrouna (Sakiet Sidi Youssef)*. Thèse, Faculté des Sciences Humaines et Sociales de Tunis, 352p.
- Trabaud L., 1989. *Les feux de forêts : mécanismes, comportement et environnement*. France-sélection, Aubervilliers.
- Valette, JC., 2007. *Présentation du système Behave et du modèle de Rothermel*. I.N.R.A. Document PIF9324 I.N.R.A. Département de Recherches forestières, 27p.

## APPORT D'UN NOUVEAU PROTOCOLE DE RÉGIONALISATION DYNAMIQUE DU CLIMAT POUR L'ESTIMATION DU BILAN HYDRIQUE DE DOUGLASAIES

Valentin BLANCHET<sup>1</sup>, Philippe AMIOTTE-SUCHET<sup>1</sup>, Nathalie BRÉDA<sup>3</sup>, Vincent BADEAU<sup>3</sup>,  
Thierry CASTEL<sup>1.2</sup>

<sup>1</sup>Université de Bourgogne, Faculté des Sciences de la Terre, Unité Mixte de Recherche (UMR) —Biogéosciences, 21000 Dijon, France ([valentin\\_blanchet@etu.u-bourgogne.fr](mailto:valentin_blanchet@etu.u-bourgogne.fr))

<sup>2</sup>Département Agronomie-Environnement, AgroSup, 21000 Dijon, France.

<sup>3</sup>Université de Lorraine, AgroParisTech, INRAE, UMR Silva, 54000 Nancy, France  
[nathalie.breda@inrae.fr](mailto:nathalie.breda@inrae.fr), [vincent.badeau@inrae.fr](mailto:vincent.badeau@inrae.fr)

**Résumé** – La quantification des impacts régionalisés du changement climatique sur les forêts est un enjeu majeur, tant écologique que socio-économique. Le dépérissement des douglasiaies (*Pseudotsuga menziesii*) est observé depuis une vingtaine d'années et pourrait s'accélérer. Des travaux récents montrent que l'estimation régionalisée du bilan hydrique sous couvert forestier se heurte à la capacité des modèles climatiques régionaux à simuler correctement la quantité et le cycle saisonnier des précipitations. Nous évaluons ici la capacité d'un nouveau protocole de régionalisation du climat à simuler un régime de précipitations réaliste nécessaire au calcul de bilan hydrique forestier.

**Mots-clés** : Bilan Hydrique, Climat, Désagrégation dynamique, Quantile-mapping

**Summary** – Quantifying the regionalized impacts of climate change on forests is a major ecological and socio-economic issue. The decline of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) has been observed for about 20 years and should be accelerated. Recent work shows that regionalized estimation of water balance under forest canopy is hampered by the ability of regional climate models to correctly simulate precipitation amount and seasonal cycle. Here we evaluate the ability of a new climate regionalization protocol to simulate a realistic precipitation regime required for the calculation of forest soil water balance.

**Key words**: Water-balance, Climate, Dynamical Downscaling, Quantile-mapping

### Introduction

Depuis le début du 21<sup>ème</sup> siècle, la productivité des douglasiaies (*Pseudotsuga menziesii*) de Bourgogne-Franche-Comté (3<sup>ème</sup> région nationale de production) est affectée par l'accélération du changement climatique, en particulier par la fréquence et la récurrence d'épisodes de sécheresse intense. L'assèchement des sols forestiers dégrade la productivité et l'état sanitaire des peuplements. La quantification des impacts régionalisés du changement climatique sur ces forêts revêt donc pour la région Bourgogne-Franche-Comté des enjeux écologiques et socio-économiques majeurs pour la filière forêt-bois. Des études récentes soulignent que l'estimation régionalisée des bilans hydriques sous couvert forestier en moyenne montagne est contrainte par la capacité des modèles climatiques régionaux à simuler correctement les quantités et la saisonnalité des précipitations (Boulard et al. 2016, 2017). Nous évaluons ici l'apport d'un nouveau protocole de régionalisation dynamique du

climat prenant en compte des rétroactions entre les schémas radiatif et convectif, introduites dans les versions récentes du modèle climatique régional ARW/WRF (Skamarock et al. 2021). Ce protocole utilise un guidage entre les données de forçage large échelle ERA-INTERIM (Dee et al. 2011) et le premier des deux domaines emboîtés définis pour la descente d'échelle. La simulation ERAINT/WRF produit un climat au pas de temps journalier et à une résolution cible de 8 km. Ce climat ainsi simulé sur la région Bourgogne-Franche Comté a, dans un premier temps, été comparé au climat reconstitué par les données de référence Safran-Isba-Modcou (SIM, Habets et al. 2008). Ensuite, les données SIM et ERAINT/WRF ont servi à alimenter le modèle de bilan hydrique forestier BILJOU© (Granier et al. 1999) sur 30 peuplements de douglas (Sergent et al. 2014). Les métriques des contraintes hydriques ont enfin été comparées et analysées afin d'évaluer la performance du nouveau protocole de régionalisation pour la quantification des contraintes hydriques. L'objectif de ce travail est (i) d'apprécier la capacité du protocole de régionalisation à produire un régime de précipitation cohérent, (ii) d'évaluer la robustesse du climat régionalisé à partir des sorties d'un modèle de bilan hydrique sous couvert forestier et (iii) de mesurer l'apport d'une post-correction des précipitations.

## 1. Matériel et méthode

### 1.1 Protocole de régionalisation climatique

La désagrégation numérique du climat (Cavan et al. 2020) s'appuie sur le modèle climatique régional ARW/WRF et sur les données de forçage ERA-INTERIM. Les données SIM de Météo-France constituent la référence climatique pour la période commune 1980-2005 (Quintana-Seguí et al. 2008). La descente d'échelle numérique est basée sur l'utilisation de deux domaines emboîtés : un premier domaine de 48 km de résolution et un deuxième domaine situé à l'intérieur de ce premier domaine à 12 km centré sur la France. Cette résolution a ensuite été rééchantillonnée linéairement à 8 km sur la grille SIM.

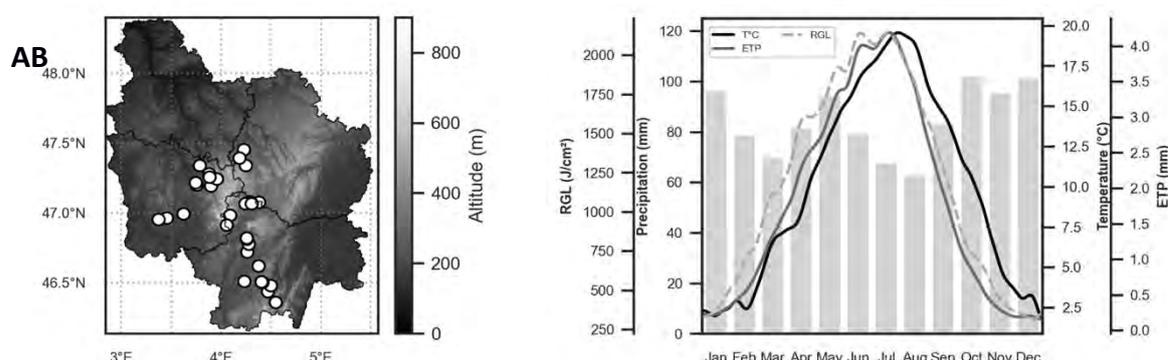
Deux modifications majeures ont été apportées comparativement au protocole proposé par Boulard et al. (2016). La première modification concerne la prise en compte des rétroactions entre les schémas radiatif et convectif (Alapaty et al. 2012). La seconde est l'application d'un guidage spectral au-dessus de la couche limite planétaire (Liu et al. 2012) afin que la dynamique climatique du premier domaine se cale sur celle des ré-analyses. Le climat a été simulé en continu sur la période 1979-2005. Notons que l'année 1979 est utilisée comme spin-up du modèle et n'est pas utilisée dans les analyses.

### 1.2 Calcul du bilan hydrique sous-peuplement de douglas

Le modèle de bilan hydrique forestier [BILJOU©](#) (Granier et al. 1999) requiert des variables climatiques quotidiennes (précipitation, température, rayonnement global (RGL), vent, humidité relative), des paramètres édaphiques (par couche de sol : profondeur, texture, densité apparente, pourcentage de racines fines, humidité pondérale au point de flétrissement permanent) et relatif au peuplement forestier (type fonctionnel, indice foliaire, date de débournement/chute de feuille du peuplement). Les flux d'eau élémentaires entrants et sortants de l'écosystème sont calculés puis le contenu en eau du sol sous couvert forestier est simulé. À partir de la réserve relative en eau du sol modélisée, BILJOU© détermine les caractéristiques des épisodes de sécheresse : durée, précocité, intensité, définis lorsque le contenu en eau du sol chute en dessous de 0,4 (i.e. 40%). En dessous de ce seuil, les échanges gazeux (transpiration et photosynthèse) sont réduits par régulation stomatique et la croissance radiale des troncs s'arrête. Ce fonctionnement générique à effet de seuil en fait un

outil pertinent pour évaluer la robustesse du nouveau protocole de régionalisation à l'échelle journalière.

Les données pédoforestières utilisées dans ce travail proviennent de 30 peuplements de douglas sélectionnés sur différentes stations forestières (Sergent 2011). Ces dernières sont majoritairement situées au centre (Morvan) et au sud (Mâconnais) de la Bourgogne (figure 1A). À chacun de ces peuplements est associé le point de maille SIM et WRF/ERAINT le plus proche. La figure 1B montre un régime de précipitation assez homogène sur l'année avec des cumuls mensuels de pluie un peu plus faible de février à avril et pour juillet-août. Pour ces deux derniers mois, les températures moyennes journalières sont les plus élevées et sont accompagnées par un fort rayonnement global, ce qui a pour conséquence une ETP élevée (figure 1B).



**figure 1** : Localisation des 30 peuplements de Douglas mobilisés ; fond de carte modèle numérique de terrain (MNT) BD Alti, IGN(A), Cumul mensuel interplacette moyen de précipitation et courbes de température, évapotranspiration potentielle Penman (ETP) et rayonnement global (RGL) journaliers moyens inter-placette pour la période 1980-2005 (B)

## 2. Résultats

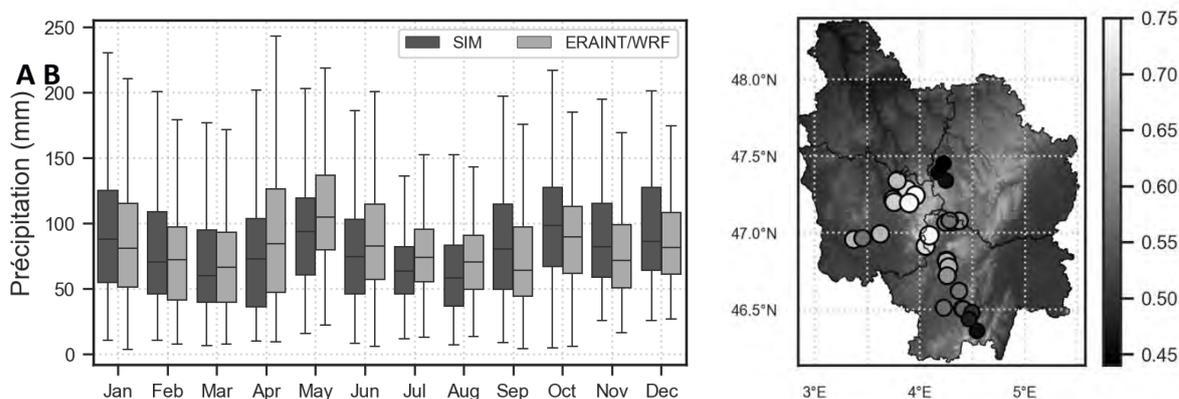
### 2.1 Évaluation de la régionalisation

Les résultats pour les 30 points de mailles les plus proches des 30 peuplements de douglas montrent que les températures sont très bien reproduites, tant leur cycle annuel ( $R^2$  de 0.997 et RMSE de 0.4), que leur évolution interannuelle ( $R^2 = 0.82$ , RMSE = 0.33). Le rayonnement global journalier moyen est également bien reproduit ( $R^2 = 0.98$ , RMSE = 251) avec néanmoins un biais de surestimation par WRF/ERAINT pour les mois les plus chauds. Enfin, l'humidité relative et le vent moyen mensuel interannuel sont moins bien reproduits avec respectivement un léger biais d'air sec de ERAINT/WRF ( $R^2 = 0.74$ , RMSE = 4.07) et une vitesse de vent systématiquement plus élevée dans les simulations ( $R^2 = 0.31$ , RMSE = 0.5). Le modèle reproduit dans l'ensemble, tant en interannuel qu'au niveau du cycle annuel et au niveau du point de grille de la station, correctement la quantité et la variabilité ces variables climatiques.

### 2.2 Reproduction de la variabilité et du cumul interannuel des pluies

La reproduction des pluies est un des points faibles des simulations climatiques et un verrou majeur pour le calcul du bilan hydrique. L'analyse des cumuls de précipitation interannuels et inter-peuplement montre une amélioration significative des simulations de la pluie avec la disparition de la surestimation systématique des cumuls annuels et une très bonne reproduction de la variabilité interannuelle ( $R^2=0.76$ , RMSE=67). Toutefois, les cumuls WRF/ERAINT présentent un biais sec régulier sur leur 3<sup>ème</sup> quartile. Les résultats de l'analyse des cumuls interannuels inter-peuplement sont

satisfaisants ( $R^2$  Pearson=0.42, RMSE = 166). Le cycle annuel est également bien reproduit dans sa structure globale (figure A). On observe néanmoins un biais humide significatif des précipitations moyennes mensuelles de mars à août, suivi d'un biais sec de septembre à février. Nos résultats montrent que ces biais secs et humides se compensent à l'échelle annuelle. Il est attendu que la présence de ces biais affecte le bilan hydrique et la capacité à reproduire correctement les contraintes hydriques des douglasaies. L'analyse spatiale indique que la géographie des précipitations est bien reproduite ( $R^2=0.58$ , RMSE=32). On constate un biais localisé dans les zones à relief plus marqué (nord Morvan et sud Bourgogne) où les précipitations sont moins bien reproduites (figure 2B). En effet, le Morvan avec son orientation nord-sud entraîne un forçage orographique du flux dominant ouest/sud-ouest qui conduit à une dynamique plus complexe (e.g. onde de gravité) et des précipitations plus importantes que les schémas convectifs paramétrés ont du mal à modéliser (Erreur : source de la référence non trouvéeB). Ces résultats démontrent cependant la capacité du nouveau protocole de régionalisation à reproduire des précipitations plus réalistes que celui utilisé par Boulard et al. (2016). Se pose alors la question de savoir si ces améliorations sont suffisantes pour simuler correctement le bilan hydrique des douglasaies.



**figure 2** : Boxplot des précipitations moyennes mensuelles sur la période 1980-2005 pour les 30 placettes de douglas (A), Carte du R2 des précipitations mensuelles WRF/ERAINT par rapport à SAFRAN sur la période 1980-2005 ; fond de carte MNT BD Alti, IGN, voir légende figure 1A (B)

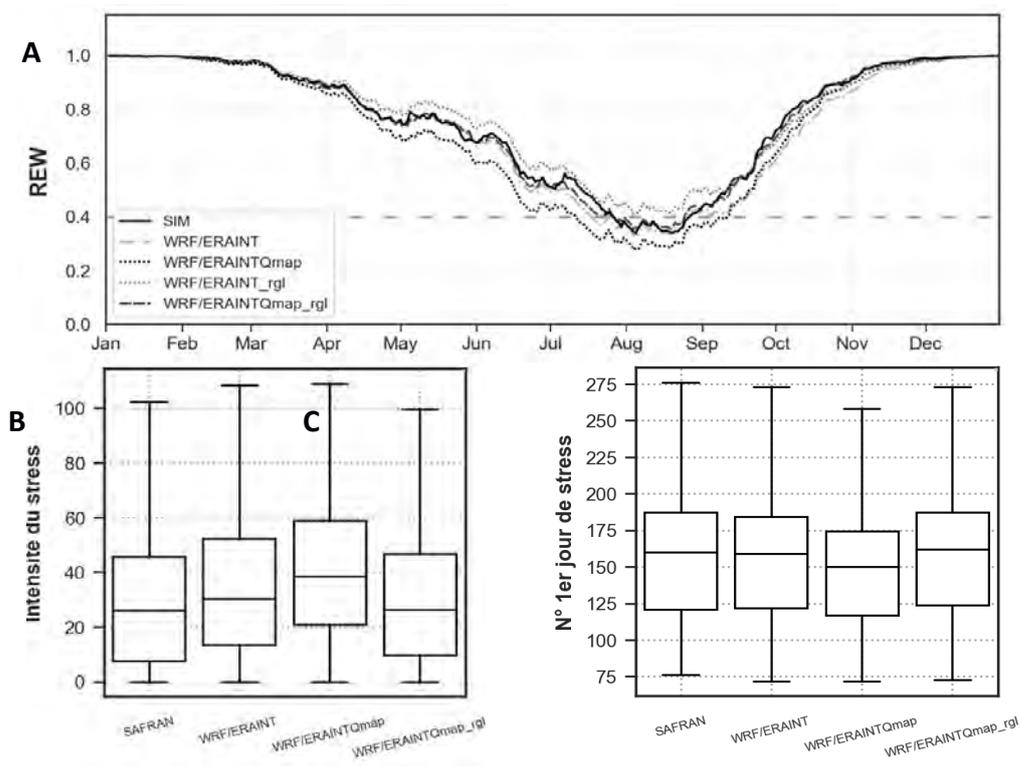
### 2.3 Reproduction du bilan hydrique des peuplements de douglas

Les réserves relatives journalières en eau du sol (REW) ont été modélisées par BILJOU© pour chaque peuplement puis moyennées pour les 30 peuplements de douglas. La figure 3A compare les profils pour les deux jeux de données climatiques. L'évolution de la REW obtenue à partir des données ERAINT/WRF non post-corrigées est bien corrélée au profil de REW obtenu avec les données SIM ( $R^2 = 0.98$ , RMSE = 0.04). On observe également des corrélations significatives en interpeuplement ( $R^2=0.95$ , RMSE = 0.05). La REW calculée à partir des données simulées présente un biais sec en juillet et sur la période septembre-décembre. La présence d'un biais en juillet est surprenante en raison d'un biais humide sur les précipitations à la même période (cf. figure 2A). La plus lente recharge de la REW de septembre à décembre par ERAINT/WRF peut être expliquée par le biais sec du jeu de données simulé sur la même période (figure 2A et 3A). Malgré ces résultats encourageant sur les profils de REW, les distributions du nombre de jours de déficit hydrique issu des bilans hydriques « WRF/ERAINT » et « SIM » sont significativement différentes (test de Wilcoxon, p-value = 2.5e-16). D'autre part, WRF/ERAINT produit en moyenne plus de jours de déficit hydrique que SIM

(figure 3B). Ceux-ci restent tout de même bien corrélés ( $R^2 = 0.66$ , RMSE=25). L'intensité du déficit hydrique suit la même évolution que le nombre de jours de sécheresse (donnée non-montrée), ( $R^2 = 0.58$ , RMSE=18). Enfin, la date de 1er jour de déficit hydrique est bien reproduite et semble ici peu affectée (figure 3C).

Bien que ces résultats soient encourageants, nous avons cherché à voir si l'application d'une post-correction des pluies et des températures par quantile-mapping était susceptible d'améliorer ces scores. Bien que les données de précipitations post-corrigées soient très proches de SIM, le profil de REW produit (WRF/ERAINTqmap) s'écarte significativement du profil SIM avec un biais sec systématique et très précoce sur la quasi-totalité de l'année (figure 3A). Cela induit mécaniquement des sécheresses plus longues, plus intenses et plus précoces. Le fait que la correction du cycle annuel des pluies dégrade de façon inattendue la reproduction du cycle hydrique des sols par BILJOU© suggère que les résultats initiaux encourageants sont la conséquence d'une compensation de biais qui masque les faiblesses persistantes de la régionalisation climatique tant pour les pluies que pour les autres variables. Dans le cas présent, la post-correction des pluies dégrade les résultats en augmentant le déficit hydrique.

Une analyse de la sensibilité des métriques de sécheresse aux biais des variables climatiques d'entrées du modèle BILJOU© a montré l'impact de la surestimation systématique du rayonnement en été dans le modèle régional WRF (Ruiz-Arias et al. 2016). L'application d'une post-correction seulement sur le rayonnement (WRF/ERAINT\_rgl, figure 3A) engendre une sur estimation systématique des valeurs de REW concordant avec le biais humide mesuré sur les pluies WRF/ERAINT de mars à septembre. La correction du rayonnement permet de mettre en évidence l'effet de la mauvaise reproduction du cycle annuel de pluies, qui était initialement compensé par la surestimation du rayonnement et donc de l'évapotranspiration potentielle. Enfin, l'application d'une post-correction à la fois sur le rayonnement et sur les pluies (WRF/ERAINTQmap\_rgl, figure 3A) produit un profil de REW proche de la référence. Cette amélioration des résultats par la post-correction est également constatée dans les métriques de sécheresse, puisque la distribution du nombre de jours de déficit hydrique SIM n'est pas significativement différente de celle de ERAINT/WRF (test de Wilcoxon, p-value = 0.24).



**figure 3 :** Pour la période 1980 – 2005 interplacette ; proportion d'eau extractible du sol journalière moyenne (A), boxplot interannuel de la durée du stress hydrique (nombre de jours (B)), boxplot interannuel de la précocité de sécheresse (jour julien du franchissement du seuil REW = 0.4 (C))

## Conclusion

Ces résultats décrivent un nouveau protocole de désagrégation numérique du climat et confirment sa capacité à reproduire à l'échelle régionale et de façon plus robuste la variabilité climatique interannuelle. Ces améliorations masquent pour la pluie, et par un effet de compensation les biais persistant à l'échelle du cycle annuel. Ces biais sont doublés d'un biais positif sur le rayonnement pour les mois chauds. Nous avons pu montrer qu'une deuxième compensation impacte le calcul du bilan hydrique et conduit à une amélioration « artificielle » des métriques de déficits hydriques des peuplements de douglas. L'application d'une post-correction sur les pluies par quantile-mapping qui a paradoxalement produit une dégradation des résultats, a permis de révéler cette deuxième compensation d'erreurs. Le biais sur les pluies est attribuable aux schémas convectifs utilisés dans le protocole de régionalisation dont la paramétrisation sous maille est une source d'incertitude majeure. Conséquemment, une mauvaise représentation des nuages est par le jeu des rétroactions avec le schéma radiatif une source d'erreur sur le rayonnement simulé. Même s'il a été montré que WRF réduisait les biais sur le rayonnement comparativement aux modèles forceurs, cela reste insuffisant. Si les données SIM peuvent être considérées comme la référence pour les données de pluie et de température, ce n'est pas aussi documenté pour le rayonnement. Pour ce dernier, les données SIM n'utilisent pas de données d'observation et ne prennent pas suffisamment en compte la nébulosité sur les reliefs comme le Morvan. Il en ressort que pour obtenir des résultats cohérents, l'usage d'une post-correction statistique, semble être nécessaire pour réduire les biais et corriger les

compensations d'erreurs. Cependant, l'usage d'une correction statistique indépendante est discutable, en particulier sous l'hypothèse de la stationnarité du biais pour un climat projeté (Ehret et al. 2012).

## Bibliographie

Alapaty K, Herwehe JA, Otte TL, et al (2012) Introducing subgrid-scale cloud feedbacks to radiation for regional meteorological and climate modeling. *Geophys Res Lett* 39: <https://doi.org/10.1029/2012GL054031>

Boulard D, Castel T, Camberlin P, et al (2016) Capability of a regional climate model to simulate climate variables requested for water balance computation: a case study over northeastern France. *Clim Dyn* 46:2689–2716. <https://doi.org/10.1007/s00382-015-2724-9>

Boulard D, Castel T, Camberlin P, et al (2017) Bias correction of dynamically downscaled precipitation to compute soil water deficit for explaining year-to-year variation of tree growth over northeastern France. *Agric For Meteorol* 232:247–264. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.08.021>

Cavan N, Castel T, Pergaud J, et al (2020) Et demain? Robustesse des stratégies innovantes de gestion des adventices face au changement climatique. *Innov Agron* 81:209–225

Dee DP, Uppala SM, Simmons AJ, et al (2011) The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Q J R Meteorol Soc* 137:553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>

Ehret U, Zehe E, Wulfmeyer V, et al (2012) HESS Opinions “Should we apply bias correction to global and regional climate model data?” *Hydrol Earth Syst Sci* 16:3391–3404. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3391-2012>

Granier A, Bréda N, Biron P, Villette S (1999) A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecol Model* 116:269–283. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(98\)00205-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(98)00205-1)

Habets F, Boone A, Champeaux JL, et al (2008) The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *J Geophys Res Atmospheres* 113. <https://doi.org/10.1029/2007JD008548>

Liu P, Tsimpidi AP, Hu Y, et al (2012) Differences between downscaling with spectral and grid nudging using WRF. *Atmospheric Chem Phys* 12:3601–3610. <https://doi.org/10.5194/acp-12-3601-2012>

Quintana-Seguí P, Moigne PL, Durand Y, et al (2008) Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables: Validation of the SAFRAN Analysis over France. *J Appl Meteorol Climatol* 47:92–107. <https://doi.org/10.1175/2007JAMC1636.1>

Ruiz-Arias JA, Arbizu-Barrena C, Santos-Alamillos FJ, et al (2016) Assessing the Surface Solar Radiation Budget in the WRF Model: A Spatiotemporal Analysis of the Bias and Its Causes. *Mon Weather Rev* 144:703–711. <https://doi.org/10.1175/MWR-D-15-0262.1>

Sergent A-S (2011) Diversité de la réponse au déficit hydrique et vulnérabilité au dépérissement du douglas. Phdthesis, Université d'Orléans

Sergent A-S, Rozenberg P, Bréda N (2014) Douglas-fir is vulnerable to exceptional and recurrent drought episodes and recovers less well on less fertile sites. *Ann For Sci* 71:697–708. <https://doi.org/10.1007/s13595-012-0220-5>

Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, et al (2021) A Description of the Advanced Research WRF Model Version 4.3. UCAR/NCAR

## ÉVALUATION SPATIO-TEMPORELLE DE L'EXPOSITION AU GEL EN RÉGIONS VITICOLES TRADITIONNELLE (PAYS DE LA LOIRE) ET ÉMERGENTE (BRETAGNE)

**Théo PETITJEAN<sup>1</sup>, Cyril TISSOT<sup>2</sup>, Jeanne THIBAUT<sup>2</sup>, Mathias ROUAN<sup>2</sup>, Hervé QUENOL<sup>1</sup> et Valérie BONNARDOT<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>LETG-Rennes UMR 6554 CNRS, Université Rennes 2, Place du recteur Henri Le Moal, 35043, Rennes, France  
[theo.petitjean@univ-rennes2.fr](mailto:theo.petitjean@univ-rennes2.fr); [valerie.bonnardot@univ-rennes2.fr](mailto:valerie.bonnardot@univ-rennes2.fr); [herve.quenol@univ-rennes2.fr](mailto:herve.quenol@univ-rennes2.fr)

<sup>2</sup>LETG-Brest UMR 6554 CNRS, Université Bretagne occidentale, IUEM, Rue Dumont d'Urville, 29280 Plouzané, France. [cyril.tissot@univ-brest.fr](mailto:cyril.tissot@univ-brest.fr); [jeanne.thibault@univ-brest.fr](mailto:jeanne.thibault@univ-brest.fr) ; [mathias.rouan@univ-brest.fr](mailto:mathias.rouan@univ-brest.fr)

**Résumé :** La vigne est soumise à différents risques climatiques affectant son développement et son rendement. Dans un contexte de changement climatique, ces risques sont modifiés en fréquence et en intensité et fragilisent plus la plante en raison de la précocité. Afin d'évaluer l'exposition au risque de gel, cette étude propose une analyse spatio-temporelle sur une région viticole traditionnelle, les Pays de la Loire, et une région viticole émergente, la Bretagne. Pour cela, des indicateurs ont été calculés selon 2 scénarii du changement climatique et sur 2 périodes futures. Le risque de gel printanier a été étudié en calculant la fréquence d'année avec au moins un épisode gélif après le débourrement et le nombre de jours de gel. Ce risque déjà présent dans les Pays de la Loire, tend à s'étendre vers l'ouest et la Bretagne.

**Mots-Clés :** Risque et changement climatique, gel printanier, viticulture, ouest de la France

### Introduction

Les conditions climatiques locales, composantes du système terroir, ont une influence très importante sur la croissance végétative de la vigne et la qualité du vin (van Leeuwen, 2004). La variabilité climatique impacte à court terme la quantité et la qualité des productions, tandis qu'à long terme, elle est un facteur déterminant pour la typicité des vins et la durabilité économique des régions viticoles. Plusieurs études ont montré un lien entre l'augmentation des températures et l'avancée des stades phénologiques entraînant des dates de vendanges plus précoces et une variation dans la composition des vins (van Leeuwen, 2016).

Dans un contexte de changement climatique, l'augmentation des températures ainsi que la modification de l'intensité, la fréquence et la durée des événements climatiques extrêmes comme le gel et les fortes chaleurs vont affecter les régions viticoles du monde entier (van Leeuwen, 2016) et soulever de nombreux défis pour la filière. Pour les cépages précoces, l'avancée du stade de débourrement peut exposer plus fréquemment la vigne à des épisodes climatiques gélifs printaniers, menaçant ainsi les premiers bourgeons éclos (Santos, 2020). Bien que les tendances générales montrent une augmentation des températures et donc une diminution des épisodes de gel, le risque pour la vigne reste incertain pour l'avenir (Gavrilescu, 2019). Ces évolutions climatiques et leurs impacts déjà observés sur la vigne sont toutefois très variables selon les régions (IPCC, 2021). En France, ces dernières années ont notamment montré un maintien ou une augmentation de l'occurrence du risque de gel printanier (Cantat, 2019). C'est par exemple le cas dans le vignoble septentrional des Pays de la Loire souvent touché par des épisodes de gel ces dernières années (2016, 2017, 2019 et 2021).

Dans ce contexte, l'adaptation des pratiques viticoles et œnologiques aux variations climatiques actuelles et futures sont donc indispensables afin de préserver la qualité et la typicité des vins et de maintenir la viabilité socio-économique du secteur viticole (Neethling, 2016). L'évolution des vignobles vers le nord questionne donc aussi sur la potentialité de futures régions viticoles émergentes et leur vulnérabilité face aux différents aléas climatiques.

Cette étude, réalisée dans le cadre du projet CLIMATVEG porté par Vegepolys Valley (<https://www.vegepolys-valley.eu/projet-climatveg/>), propose une analyse spatio-temporelle de l'évolution de l'exposition au risque de gel sur deux régions administratives englobant un territoire viticole existant, les Pays de la Loire et un territoire viticole émergent, la Bretagne. Cette approche s'inscrit dans la continuité des analyses du potentiel climatique pour la viticulture des deux régions aux enjeux différents face au changement climatique réalisées dans le cadre des projets LIFE-ADVCLIM pour le Val de Loire (Neethling, 2016) et ACCAF-LACCAVE pour la Bretagne (Zavlyanova, 2020). L'objectif est d'une part, d'identifier des secteurs plus ou moins exposés aux risques climatiques à l'échelle régionale et, d'autre part, de caractériser leurs occurrences temporelles dans les 2 régions.

## **1. Matériel et méthode**

### **1.1. Données climatiques et évaluation du modèle**

La température minimale journalière issue des projections climatiques régionalisées à 8km du modèle CNRM-CERFACS-CNRM-CM5/CNRM-ALADIN63 (GCM/RCM), disponibles sur le portail Drias (jeu 2020, <http://www.drias-climat.fr/>) a été utilisée pour étudier la variabilité spatiale du gel printanier sur les régions Pays de Loire et Bretagne. Les données ont été extraites en distinguant deux périodes de futur proche (2020-2050) et lointain (2070-2100) et deux scénarii correspondant à une augmentation de 1.1°C à 2.6 °C (RCP 4.5) et de 2.6°C à 4.8°C (RCP 8.5) de la température moyenne terrestre d'ici 2100. Afin d'évaluer les potentiels biais du modèle CNRM sur cet espace, les données modélisées de la période historique (1976-2005) ont été comparées aux données observées sur cinq stations issues du réseau synoptique de Météo-France (Angers, Dinard, Nantes, Quimper, Rennes) en considérant les variables suivantes : le pourcentage d'années gélives ainsi que leur nombre de jour de gel moyen et maximum.

### **1.2. Modélisation de la phénologie du cépage Chenin**

Cette première analyse du risque de gel prendra en compte l'évolution de la date du débourrement du cépage Chenin, un cépage blanc historique du vignoble du Val de Loire qui représente 14,1% de la surface viticole en Val de Loire (Gillet, 2016) et qui est largement planté également en Bretagne (ARVB <https://vigneronsbretons.bzh/>). Pour modéliser la date de débourrement, l'indice GDD a été calculé (van Leeuwen, 2008). Cet indice correspond à un cumul de degrés jours, c'est-à-dire à la somme des températures moyennes supérieures à 10°C à partir du 1<sup>er</sup> janvier. D'après cet article, le cépage Chenin exigerait un minimum de 45 degrés jours pour atteindre le stade de débourrement (BBCH07). Ce seuil a donc été calculé annuellement afin d'obtenir les dates de débourrement à l'horizon 2100 pour chaque scénario du changement climatique.

### **1.3. Méthodologie pour la modélisation et la spatialisation du risque de gel printanier**

A partir des données climatiques et des données phénologiques spatialisées à l'échelle de ces deux régions, des indices ont été créés pour caractériser le risque futur de gel pour l'activité viticole. Ce risque apparaît pour la vigne lorsqu'une ou plusieurs journées gélives surviennent après la date du débourrement, fragilisant ainsi la plante. Cependant, il existe différents seuils de gel dans la littérature scientifique. Météorologiquement, le gel est défini par des températures minimales de l'air inférieures à 0°C. Le seuil des températures minimales inférieures à -1°C représente le gel agronomique impactant la vigne (Gavrilescu, 2019). Afin de prendre en compte le maximum de journées gélives pour faciliter la spatialisation de ce risque, le seuil de 0°C a été choisi pour représenter l'aléa gélif.

Le risque de dégâts de gel est ici déterminé par plusieurs paramètres. Il prend en compte à la fois la probabilité de gel après le débourrement, mais aussi la fréquence des épisodes gélifs. Il est calculé en combinant le modèle phénologique GDD qui détermine la date de débourrement du Chenin avec

les projections climatiques DRIAS sur les 2 régions, l'ensemble des périodes futures étudiées et sous les conditions climatiques des 2 scénarii.

Une première analyse de la combinaison entre la date du dernier gel printanier et la date du débourrement à partir des données du point de grille correspondant à la localisation de la commune de Saint-Aubin-de-Luigné située au cœur du vignoble du Layon dans le Val de Loire permettra une première compréhension de l'évolution future de ces 2 facteurs à partir du scénario RCP 8.5. Pour définir le risque de gelée printanière, deux variables sont présentées dans ce travail. On s'intéresse tout d'abord à la fréquence des épisodes de gel printanier en calculant le nombre d'années enregistrant au moins 1 épisode gélif sur les périodes futures étudiées. A partir de ces années, on calcule ensuite le nombre de jours de gel printanier moyen sur les différentes périodes afin de déterminer la fréquence annuelle de ces épisodes.

## 2. Résultats

### 2.1. Une sous-estimation moyenne du risque de gel par le modèle CNRM

Les températures minimales sont en moyenne sous-estimées par le modèle CNRM. De ce fait, le pourcentage d'années enregistrant au moins un épisode de gel printanier est plus faible de 10% (Rennes et Nantes) à 26 % (Dinard) selon les régions par rapport aux données observées, tout comme le nombre moyen de jours de gel par année gélive, avec un écart moyen atteignant jusqu'à 1,4 jours à Rennes (Tableau 1). Le nombre maximal de jours de gel par année gélive modélisé est variable selon les stations, atteignant jusqu'à 13 jours de gel à Rennes. Il est plus ou moins bien reproduit par le modèle, avec des écarts entre les données modélisées et les données observées allant de 0 jour pour Angers et Rennes à 4 jours de plus sur les données modélisées pour Nantes.

**Tableau 1** : Comparaison des données modélisées par rapport aux données observées sur la période historique (1976-2005) sur les paramètres climatiques étudiés pour 5 stations météorologiques.

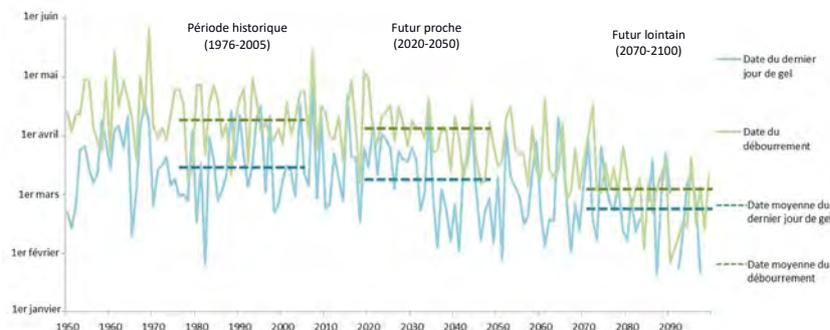
Paramètres climatiques	Nature de la série de données	Angers	Dinard	Nantes	Quimper	Rennes
Nombre d'années gélives (en %)	Modélisées	73	67	83	77	80
	Observées	87	93	93	70	90
	Écarts	-14	-26	-10	7	-10
Nombre moyen de jours de gel par année gélive	Modélisées	3,9	3,1	3,3	2,6	4,1
	Observées	4,6	4	4,25	2,8	5,5
	Écarts	-0,7	-0,9	-0,9	-0,2	-1,4
Nombre maximal de jours de gel par année gélive	Modélisées	11	8	12	7	13
	Observées	11	10	8	6	13
	Écarts	0	-2	4	1	0

### 2.2. Vulnérabilité de la vigne au risque de gelées printanières

En utilisant les données du point de grille de Saint-Aubin-de-Luigné (vignoble du Layon en Val de Loire) selon les projections du scénario RCP 8.5 (Figure 1), on observe que la date moyenne du débourrement du Chenin et celle du dernier jour de gel sont avancées de 5 jours sur la période du futur proche par rapport à la période historique mais l'écart entre ces deux dates est relativement similaire (25 jours) sur les 2 périodes. Quelques années enregistrant des gelées tardives sont également à noter, en particulier sur la période historique avec 14% d'années gélives.

L'évolution dans le futur lointain pour ces 2 indicateurs est différente. Sur la période historique, on retrouve des dates de débourrement du Chenin entre fin mars et fin avril similaires aux observations effectuées dans le vignoble du Layon. Dans le futur, une importante avancée de la date de débourrement est perçue dans un premier temps après 2030, puis de manière encore plus marquée après 2070, jusqu'à obtenir des dates de débourrement début février (moyenne au 2 mars sur le futur lointain). L'évolution de la date du dernier de gel est légèrement différente, avec une avancée plus importante après 2030 mais moins marquée dans le futur lointain. Les moyennes de ces deux indicateurs sont plus rapprochées sur la période 2070-2100 avec un écart d'une semaine, augmentant la vulnérabilité de la plante et le risque de gel.

Selon ces projections, la fréquence des années enregistrant un épisode de gel printanier sera similaire ou légèrement plus élevée sur la période historique que sur le futur proche. Toutefois, la plante sera plus vulnérable à ce risque dans un futur lointain à cause de forte précocité du débourrement.



**figure 1** : Comparaison entre la date du dernier jour de gel et la date du débourrement du cépage Chenin entre 1950 et 2100 sur le scénario RCP 8.5 pour le point de grille de Saint Aubin-de-Luigné (vignoble du Layon - Val de Loire).

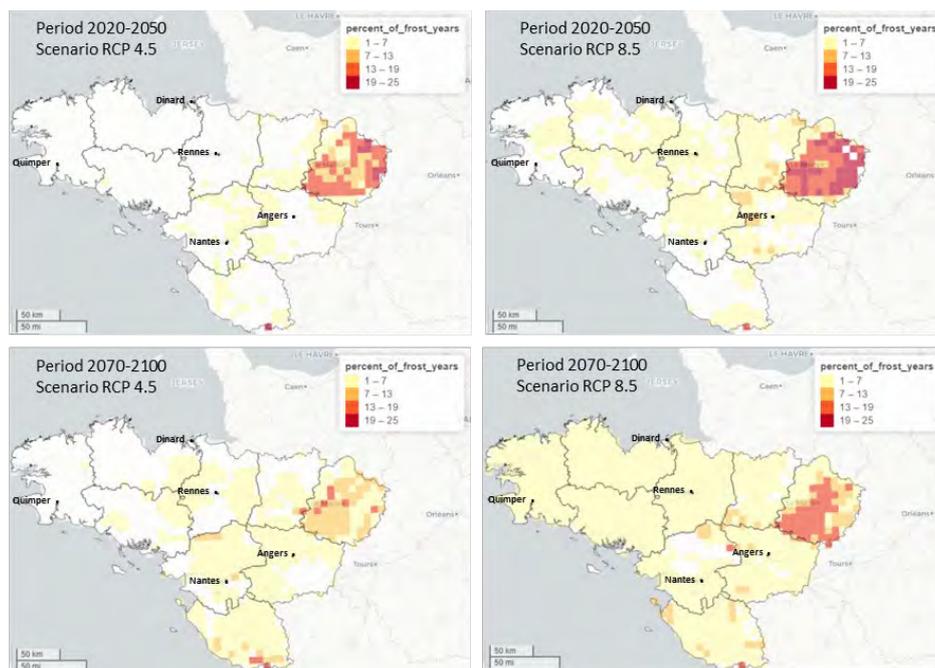
Les dates moyennes du dernier jour de gel et du débourrement du Chenin sur la période historique et le futur proche étant très similaires, seules les 2 périodes futures seront présentées dans l'analyse de la spatialisation du risque de gel.

### 2.3. Spatialisation du risque de gelées printanières future

Sur l'ensemble des scénarios et des périodes futures, l'occurrence des années gélives pour le Chenin est inégale sur les régions Pays de la Loire et Bretagne (Figure 2). La fréquence varie de 0% à 25 % selon les zones et les périodes étudiées. La structure spatiale reste toutefois sensiblement la même, avec un risque de gel printanier après débourrement plus fréquent sur le Nord Est des Pays de la Loire (Le Mans), de 7 à 25%, quel que soit le scénario et la période choisie. La fréquence de ce risque tend à s'étendre spatialement dans le futur pour le scénario RCP 8.5.

Avec le scénario RCP 4.5, le risque de gel printanier pour le Chenin est inexistant dans un futur proche sur l'espace de la Bretagne. On note toutefois quelques années enregistrant un jour de gel printanier au centre des Pays de la Loire (1 à 7 %), touchant entre autres les vignobles ligériens déjà existants entre Angers et Nantes. A plus long terme, ce risque s'étend à l'ensemble de la région Pays de Loire et progressivement sur le sud de l'Île et Vilaine (Rennes) en région Bretagne. Pour le scénario RCP 8.5, le gel printanier commence à apparaître dans le centre de la Bretagne dans un futur proche, puis sur la totalité de la région dans un futur lointain. Toutefois la fréquence de ces épisodes reste faible. Pour la région Pays de la Loire, la fréquence des épisodes de gel s'étend sur la quasi-totalité de la région dans un futur lointain (1 à 7 %), tout en continuant d'enregistrer une occurrence d'années enregistrant un gel printanier plus importante au nord-est.

Quel que soit le scénario et la période future, le nombre d'années avec des épisodes de gel printanier pour le Chenin tendrait donc à augmenter et s'étendre sur des régions actuellement exemptes de risque gélif printanier. Toutefois, la fréquence de ces épisodes semble diminuer entre le futur proche et le futur lointain sur le nord-est des Pays de la Loire, région la plus vulnérable aux risques de gel printanier. A long terme, la fréquence du risque gélif printanier tend donc à s'homogénéiser sur l'ensemble de ce territoire.

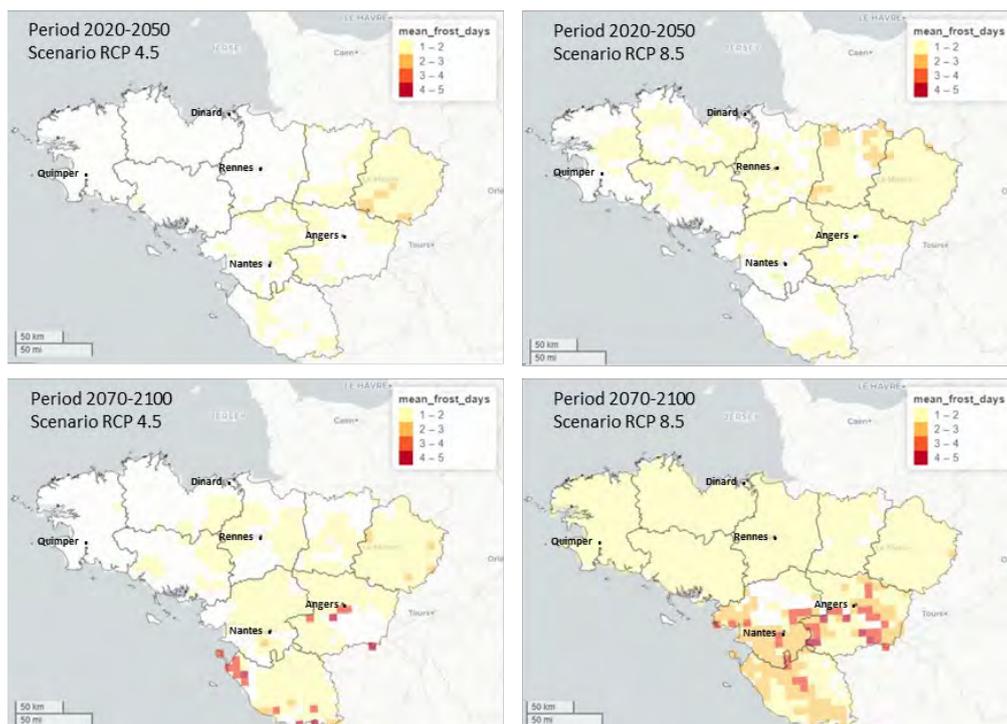


**figure 2 :** Fréquence de gel (% d'années enregistrant un épisode de gel printanier après débournement) selon 2 scénarii futurs et 2 périodes futures sur les régions des Pays de la Loire et de la Bretagne.

Le nombre de jours de gel moyen par année présentant au moins 1 épisode de gel printanier sur les périodes futures proches et lointaines et sur les deux scénarios du changement climatique a également été spatialisé sur les régions de la Bretagne et des Pays de la Loire, pour le Chenin (Figure 3). L'étendue spatiale de cet indicateur est identique à celle de la fréquence des années enregistrant au moins un épisode de gel printanier (Figure 2), avec un risque qui s'étend à l'ouest à long terme pour le scénario RCP 8.5.

Avec le scénario RCP 4.5, le nombre de jours moyen d'épisodes gélifs par année est relativement faible sur l'ensemble de la zone vulnérable, avec en moyenne 1 à 2 jours de gel printanier par années gélives. Sur la période du futur lointain, seules quelques zones ponctuelles entre la Loire et la partie sud de la région des Pays de la Loire présentent un nombre de jours moyen plus important, pouvant aller jusqu'à 5 jours de gel en moyenne par années gélives.

Pour le scénario RCP 8.5, le nombre de jours de gel moyen sera également relativement faible sur le futur proche avec en moyenne 1 à 2 jours de jours de gel printanier par années gélives. Dans le futur lointain, la zone ligérienne ainsi que le sud de la région des Pays de la Loire, correspondant aux régions viticoles actuelles, montrent une augmentation du nombre moyen de jours gélifs. En moyenne, les années gélives enregistreront 1 à 5 jours de gel printanier.



**figure 3** : Nombre de jours de gel moyen calculé sur les années enregistrant au moins 1 épisode de gel printanier selon 2 scénarii futurs et 2 périodes futurs sur les régions des Pays de la Loire et de la Bretagne.

En combinant ces 2 indicateurs du risque de gel printanier, plusieurs conclusions peuvent être faites. Le nord-est des Pays de la Loire, qui présente les fréquences d'années gélives les plus importantes, enregistre toutefois un nombre réduit de jours moyens d'épisodes de gel (1 à 2 jours) sur l'ensemble des périodes. A l'inverse, avec le scénario RCP 8.5 dans un futur lointain, la zone ligérienne ainsi que le sud des Pays de la Loire montre une occurrence d'années gélives plutôt faible (1 à 7 %) mais avec un nombre de jours gélifs moyen élevé (4 à 5 jours). La Bretagne, grâce à son climat océanique, resterait épargnée par les épisodes de gelées tardives quel que soit le scénario utilisé et/ou la période future considérée. Un réchauffement important sur le long terme entraînerait toutefois une augmentation progressive de ce risque.

## Conclusion

Bien que ces résultats se limitent à l'étude des épisodes de gel printanier prédéfini par une température minimale à 0°C, les indicateurs présentés ont permis d'identifier des secteurs plus ou moins exposés à ce risque agro-climatique à l'échelle régionale des Pays de la Loire et de la Bretagne et de caractériser leurs occurrences. A partir des données projetées du changement climatique et de la modélisation de la date de débourrement du Chenin, ce risque a été projeté selon deux scénarios (RCP 4.5 et RCP 8.5 – Modèle CNRM) et sur deux périodes futures (2020-2050 et 2070-2100). La répartition du risque de gelée printanière est très hétérogène sur ces deux régions. La région des Pays de la Loire, en particulier le nord-est, apparaît comme sujette au risque de gel printanier avec une occurrence plus importante d'années enregistrant des gelées printanières pour les deux périodes futures et les deux scénarios. Des années avec un nombre de jour de gel printanier élevés pourront également toucher la région viticole ligérienne et du sud des Pays de la Loire dans un futur lointain (scenario RCP 8.5). La Bretagne, caractérisée par son climat océanique, ne semble pas ou peu vulnérable à ces épisodes climatiques extrêmes dans un futur proche. Sur ces deux régions, le nombre d'années présentant un épisode gélif printanier se maintient ou augmente légèrement dans le futur lointain et avec le scénario RCP 8.5. Cela peut s'expliquer par un débourrement très précoce de la vigne, ouvrant ainsi une fenêtre plus large aux évènements gélifs. Seul le nord-est des Pays de la

Loire, présentant la plus forte occurrence d'années avec un gel printanier, enregistre une stagnation voire une diminution de la fréquence d'années gélives dans le futur lointain.

L'interprétation de ces résultats est toutefois à nuancer. Il est en effet important de prendre en compte les incertitudes liées aux projections climatiques ainsi qu'à la modélisation de la date du débourrement. On s'aperçoit par exemple que la fréquence d'années de gel printanier sur la période historique est sous-estimée par rapport aux observations de terrain. Les données modélisées présentées dans cette étude permettent donc de donner une tendance d'évolution spatio-temporelle des risques climatiques plus que des valeurs chiffrées précises. Plusieurs perspectives sont envisagées pour compléter ces premiers résultats. L'étude du risque de gel sera élargie en étudiant l'intensité, en intégrant des paramètres comme l'humidité et la sensibilité de la plante, ou encore en comparant son évolution à une période historique. Une analyse spatio-temporelle similaire des risques de vague de chaleur et de stress hydrique est également envisagée, afin d'obtenir des cartes d'exposition aux risques pour plusieurs cépages sur ces régions.

**Remerciements** : Nous tenons à remercier les Régions Pays de la Loire et Bretagne ainsi que l'ADEME pour le financement du projet CLIMATVEG, ainsi que tous les partenaires de la tâche 1.5 dans laquelle s'inscrivent ces travaux.

## Bibliographie

Cantat O., Planchon O., Quénot H., Savouret E., Bois B., Beauvais F. et Brunel-Muguet S., 2019 : Gelées tardives et viticulture en basse et moyenne vallée de la Loire (France). Approche géoclimatique d'un aléa météorologique majeur pour la vigne, *Climatologie* **16**, 91-128

Duchêne, E.; Schneider, C., 2005 : Grapevine and climatic change: A glance at the situation in Alsace. *Agron. Sustain. Dev.* **25**, 93–99

Gavrilescu C., Bois B., Castel T., Larmure A., Ouvrié M., Richard Y., 2019. Analyse spatiale de l'évolution du risque de gel sur la vigne en Bourgogne-Franche-Comté. 32ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Thessalonique, Grèce. pp.181-186.

Gillet F., Carvalho P., 2016 : Approche économique des AOP de chenin du Val de Loire et des autres productions mondiales. *Territoires du vin*, **7**, 3p

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press, doi:10.1017/9781009157896.

Neethling E., 2016 : Adaptation de la viticulture au changement climatique : vers des stratégies à haute résolution. Thèse de Géographie. Université Rennes 2. 195p

Santos, J.A., Fraga, H., Malheiro, A.C., Moutinho-Pereira, J., Dinis, L.-T., Correia, C., Moriondo, M., Leolini, L., Dibari, C., Costafreda-Aumedes, S., Kartschall, T., Menz, C., Molitor, D., Junk, J., Beyer, M., Schultz, H.R. 2020 : A Review of the Potential Climate Change Impacts and Adaptation Options for European Viticulture. *Appl. Sci.* **10**, 3092.

van Leeuwen C., Garnier C., Agut C., Baculat B., Barbeau G., et al. 2008 : Heat requirements for grapevine varieties is essential information to adapt plant material in a changing climate. Actes du VIIème Congrès International des Terroirs Viticoles (Eds Murisier, F.), pp. 222–227. Nyon, Switzerland: Agroscope Changins-Wädenswil ACW.

van Leeuwen, C.; Darriet, P. 2016 : The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality. *J. Wine Econ.* **11**, 150–167.

Zavlyanova M., 2020 : *Faisabilité climatique de la viticulture en Bretagne dans le contexte du changement climatique : identification des régions viticoles potentielles*. Mémoire de fin d'études. Bordeaux Sciences Agro. 50p.

## DETERMINATION OF WATER CONSUMPTION FOR WINTER WHEAT IN SOUTHERN ROMANIA. CASE STUDY: CARACAL PLAIN, AGRICULTURAL YEAR 2017-2018

Dana Maria (OPREA) CONSTANTIN<sup>1</sup>, Florentina Iuliana (STAN) MINCU<sup>2</sup>,  
Adrian Amadeus TIȘCOVSCHI<sup>1</sup>, Elena GRIGORE<sup>1</sup>, Victor Viorel VĂTĂMANU<sup>3</sup>,  
Raul Gabriel ILEA<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>University of Bucharest, Faculty of Geography, 1 N. Bălcescu Boulevard, 010041, Bucharest, Romania, oprea.constantin@geo.unibuc.ro; adrian.tiscovschi@unibuc.ro, grigore.elena@geo.unibuc.ro;

<sup>2</sup>National Institute of Hydrology and Water Management, 97 București-Ploiești Street, 013686, Bucharest, Romania, stanflorentinaiuliana@yahoo.com

<sup>3</sup>Regional Meteorological Center Oltenia, 3A St. Brestei, 200581, Craiova, Romania, victor.vatamanu@gmail.com

<sup>4</sup>National Meteorological Administration, 97 București-Ploiești Street, 013686, Bucharest, Romania, raul11\_bv@yahoo.com

**Abstract:** The main purpose of this study is to analyse the water requirements for the winter wheat crop in relation to the annual precipitation regime. The analysis is performed for the Caracal Plain, a division of the Romanian Plain. The Cropwat 8.0 software was used in order to determine the water requirements. This study uses the series of daily climate data from the Caracal meteorological station (MS), for the agricultural year 2017-2018. The analyzed output data are: the crop evapotranspiration, the effective precipitation and irrigation requirements. The results of the analysis show that although the agricultural year is a rainy year, it is necessary to complete the soil moisture deficit in the months when the optimal precipitation requirements for the winter wheat is not ensured.

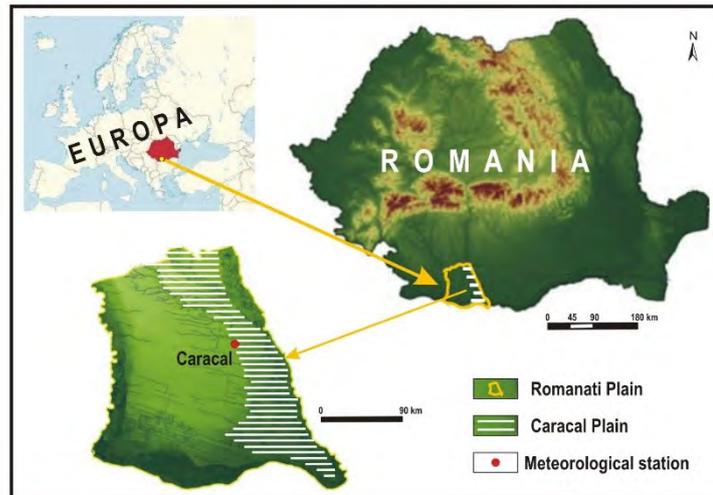
**Keywords:** water consumption, winter wheat, Cropwat 8.0 software, Caracal Plain.

### Introduction

The winter wheat, both due to its socio-economic value and to its extensive crop areas, is the most important agricultural commodity in Romania. The winter wheat is more productive than the spring wheat in Romania and that is why it occupies 99% of the total arable land (Roman and Epure, 2013). The main climatic factors with an important role in the growth, development and productivity of the winter wheat are: the temperature, the precipitation and the light (Povară, 2000). Precipitation is the main natural source of water supply for the soil, and consequently, the water consumption of the crop becomes a very important element for the establishment and correct application of any irrigation scheme. The water resources offered by the continental temperate climate of Romania to the winter wheat are generally favorable, in most crop areas and throughout the growing season (Povară, 2000). However, the variability of the monthly and annual precipitation amounts and their uneven distribution in time and space determine the water risk situations with serious effects on the vegetation and yields in agriculture. Thus, measures are needed to prevent and reduce these effects, regardless of the crop situation, in non-irrigated or irrigated regime (Mateescu, 2004).

The purpose of this study is to analyze the water requirements, according to the annual regime of monthly precipitation, for the winter wheat crop, at the level of the agricultural year 2017-2018, in the area of the Caracal Plain.

The study area is part of the Romanian Plain, the most important agricultural region of Romania. The Caracal Plain is located in the Southern Romania, being a subdivision of the Romanița Plain, which is characterized by a homogeneous landscape, altitudes between 45-190 m and fertile chernozems with high bioenergetic potential and good production capacity (Constantin and Vătămanu, 2015). The study area represents 7% of the surface of the Romanian Plain (Institutul de Geografie, 2005) (Figure 1).



**figure 1.** The location of the study area and the meteorological station in Romania.

## 1. Data and methods

In order to determine the water requirements, the Cropwat 8.0 software, developed by the FAO's Land and Water Development Division for irrigation planning and management has been used. All the information regarding the calculation and the method used by this software are described over the papers published by FAO, namely No. 33 "Yield response to water" (Doorenbos and Kassam, 1979) and No. 56 "Crop Evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements" (Allen *et al.*, 1989). In Romania, the model was applied by Stăncălie *et al.* (2010) and Stan *et al.* (2014 and 2017) for estimating the evapotranspiration for different agricultural crops (maize, peas).

The daily climate input data for the Cropwat 8.0 software comes from the Caracal meteorological station (MS), which belongs to the National Meteorological Administration (NMA), for the agricultural year 01.09.2017-31.08.2018. The meteorological-climatic parameters used are the maximum and minimum air temperature, the relative humidity, the duration of sunshine, the precipitation and wind speed for the period 01.09.2017-31.08.2018. To these climatic data are added the phenological data of the winter wheat and the pedospheric characteristics of the study area (Table 1).

**Table 1.** The planting and harvesting dates for winter wheat and the Cropwat soil input data in Caracal Plain, for the agricultural year 2017-2018.

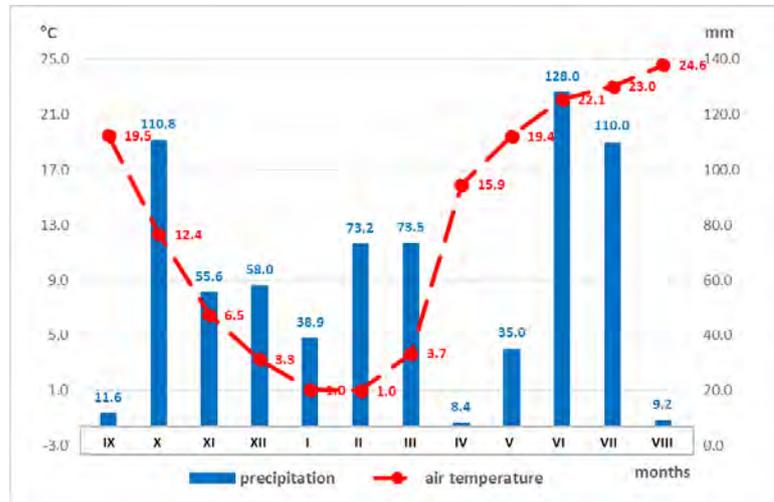
Planting date	Harvesting date	Soil texture	Total available soil moisture (mm/m)	Rooting depth (cm)	Initial available soil moisture (mm/m)
05.X.2017	01.VII.2018	sandy loam	240.0	40	168.0

An important result of this software is the crop water requirements (CWR) defined as the amount of water needed in order to compensate the amount of water lost by plants through evapotranspiration (ETc.), from planting to harvesting, depending on the specific climate of the region where they are grown (Steduto *et al.*, 2012). The parameters resulted and analyzed after running the Cropwat 8.0 software, for CWR are: the crop evapotranspiration – ETc. (mm); the effective rain which represents the amount of water that enters into soil – Eff. rain (mm) and the irrigation requirements – Irr. req. (mm).

## 2. Results and discussions

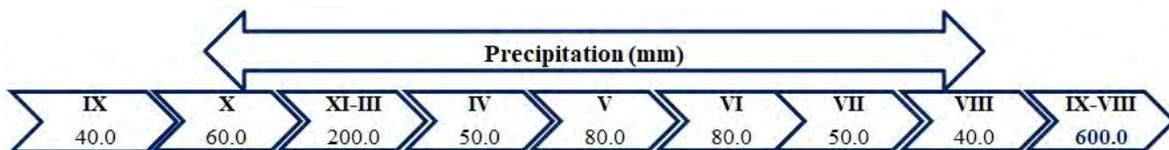
The study area, for the analyzed agricultural year, was characterized by an annual average air temperature of 12.7°C and an annual amount of precipitation of 712.2 mm. In the multiannual regime

(1901-1990), the Caracal MS is characterized by an annual temperature of 10.9°C and an annual amount of precipitation of 541.7 mm (Constantin et al, 2018). Over the months of the agriculture year 2017-2018, the air temperature and precipitation values ranged from 1.0°C in January and February to 24.6°C in August and from 8.4 mm in April to 128.0 mm in June, respectively (figure 2). Small precipitation amounts, below 40 mm, were recorded in the study area in September, January, May and August (figure 2).



**figure 2.** The annual regime of the monthly averages of air temperature and of the monthly precipitation amounts at the Caracal meteorological station, for the agricultural year 2017-2018 (Source: NMA archive for temperature and precipitation values).

In Romania, according to the latest experimental results, the precipitation amounts, exemplified in figure 3, are estimated to be optimal for the winter wheat (Sandu et al., 2010). The critical period, for the winter wheat, in terms of water requirements, is the monthly interval May-June.



**figure 3.** The optimal requirement of the winter wheat for the precipitation (mm) – reference thresholds (Source: after Sandu et al., 2010).

Correlating the information in figures 2 and 3, the great fluctuation of the precipitation quantities from one month to another is highlighted, thus, some months being with precipitation deficit, while others being with surplus of precipitation, during the same agricultural year. This variability in precipitation is a limiting factor, acting as a risk factor for the crop.

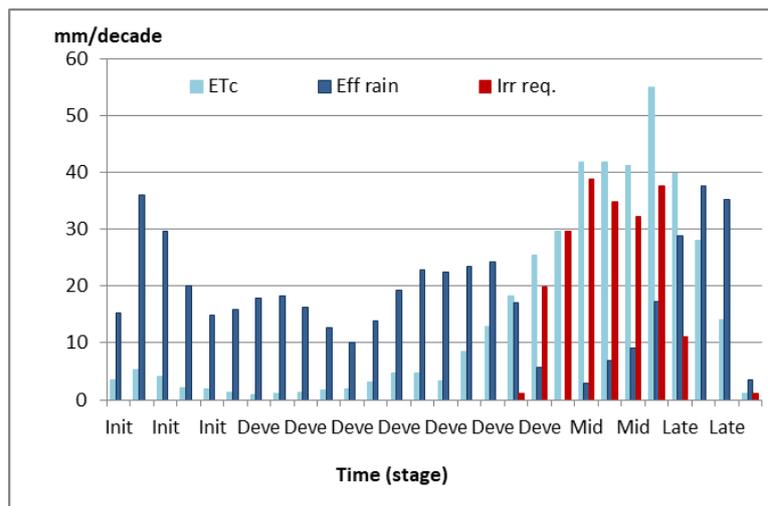
The results obtained with the Cropwat software for the crop evapotranspiration (ET<sub>c</sub>) oscillate for the study area between 1.1 mm for the first decade of July, due to the harvest of winter wheat on 01.07.2018, to 137.9 mm in May, a month with precipitation deficit (Table 2). ET<sub>c</sub> is dependent on both the climatic and the pedological conditions of the study area.

The model has also calculated the effective rain (Eff. rain) which records values between 3.4 mm in July and 101.7 mm in June (Table 2). This parameter is dependent on the amount and intensity of precipitation, but also on the phenological phase of the agricultural crop. Also, the higher the value of this parameter is, the lower the irrigation requirements are (Irr. req.) For the winter wheat, Irr. req. varies between 0.0 mm for the monthly interval October-February to 104.8 mm in May, one of the months with the highest water consumption for this crop (Table 2).

**Table 2.** Cropwat results regarding crop evapotranspiration (ETc.), effective rain (Eff. rain) and irrigation requirements (Irr. req.) in Caracal Plain, for the agricultural year 2017-2018 (Source: Cropwat 8.0 software).

MS	Data Output	X	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	Total
Caracal	ETc. (mm)	12.9	5.6	3.5	6.8	12.6	39.6	96.9	137.9	81.9	1.1	398.8
	Eff. rain (mm)	81.0	50.8	52.5	36.6	64.5	64.8	8.4	33.2	101.7	3.4	496.9
	Irr. req. (mm)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.2	88.5	104.8	11	1.1	206.6
meaning of colors		minimum value					maximum value					

Analyzing the results at the development stage scale, one may observe that the precipitations have a good distribution especially in the initial and development stage, when the Etc. values do not exceed 10-20 mm/decade. With the intensification of the ETC. in the middle and late stage (values of over 40-50 mm/decade), the water demand increases direct proportion, so the Irr. req. has values between 30-40 mm/decade (figure 4). It can also be seen from figure 4, that the highest demand for crop irrigation water is in the middle stage, in April and May. May recorded the highest crop irrigation water requirements of 104.8 mm, while monthly precipitation was only 35 mm. This crop irrigation water requirement in May was distributed by decades such as: 34.9 mm (1<sup>st</sup> decade), 32.3 mm (2<sup>nd</sup> decade) and 37.6 mm (3<sup>rd</sup> decade) (figure 4).

**figure 4.** CRW – Cropwat results regarding the crop evapotranspiration (ETc.), the effective rain (Eff. rain) and irrigation requirements (Irr. req.) at Caracal MS for the agricultural year 2017-2018 (Stages of the crop: initial – Init, development – Deve, middle – Mid and late) (Source: Cropwat 8.0 software).

## Conclusions

The amount of precipitation and their distribution by months and the critical vegetation intervals are variable in time and space, compared to the optimal limits specific to each month, season or agricultural year as a whole. Significant deviations in both the negative and positive directions from the optimal limits cause unfavorable conditions for the growth and development of plants, during the vegetation. Although the water resources in the study area are generally favorable, due to the great variability of the monthly and annual amounts of precipitation, they become a limiting factor.

In the analysis of the water requirement for the winter wheat cultivation in the Caracal Plain, although the amount of rainwater for the agricultural year 2017-2018 is optimal, framing the year as rainy, the variation of the precipitation amount from one month to another determines irrigation requirements. In the climatic conditions specific to the Caracal Plain, the application of irrigation to the

winter wheat, in natural conditions, for the analyzed agricultural year, is required from the last decade of March to the first decade of June.

The use of such software programs, such as Cropwat, helps to establish the irrigation norm and the moment of its application, in order to ensure a better management of irrigations, in order to optimize the yields of the agricultural crops.

## Bibliography

Allen R., Pereira L., Raes D., Smith M., 1998: *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and drainage, 56, 301 pages.

Constantin (Oprea) D.M., Vătămanu V.V., 2015: *Considerations upon the dryness and drought phenomena in the Caracal Plain, Romania*. Scientific Papers Series „Management, Economic Engineering in Agriculture and Rural Development”, **15** (1), 119-122.

Constantin (Oprea) D.M., Marinică A.F., Marinică I., Zaharia L., Grigore E., Ioana-Toroimac G., 2018: Les mois d'août de 2000 à 2017: records thermiques et pluviométriques dans le sud-ouest de la Roumanie. *Actes du XXXI<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 207-212.

Doorenbos J., Kassam A.H., 1979: *Yield response to water*. FAO Irrigation and drainage, 3, 193 pages.

Institutul de Geografie, 2005: *Geografia României*, vol V. Editura Academiei Române, București, 967 p.

Mateescu, E., Tanislav N., Vătămanu V.V., 2004: *Impactul condițiilor de secetă din Câmpia Caracalului asupra culturilor de grâu și porumb*. Editura Sitech, Craiova, 163 pages.

Povară R., 2000: *Riscul meteorologic în agricultură. Grâul de toamnă*, Editura Economică, București. 248 pages.

Roman G.V., Epure L.I., 2013: *Fitotehnie – cereale și leguminoase pentru boabe –*. DIFRED-FA, USAMV, București. 323 pages.

Sandu I., Mateescu E., Vătămanu V.V., 2010: *Schimbări climatice în România și efectele asupra agriculturii*, Editura Sitech. Craiova, 406 pages.

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 XXVII<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 92-97.

Stan F., Carmello V., Zaharia L., Ioana-Toroimac G., 2017: Estimation de l'évapotranspiration pour différents types de cultures agricoles, par le modèle Cropwat. Etudes de cas en Roumanie et au Brésil. *Actes du XXX<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 485-490.

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.

Steduto P., Hsiao T., Fereres E., Raes D., 2012: *Crop yield response to water*. FAO Irrigation and drainage, 66, 505 pages.