

A banner for the AIC Toulouse 2022 conference. The background is split into two parts: a dark blue, stormy sky on the left and a cracked, reddish-brown wall on the right. A small white flower grows from a crack in the wall. A red flag with a yellow emblem is partially visible on the right. The text is overlaid on a semi-transparent dark blue rectangle.

# 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 2**

**Éditeurs scientifiques**

Jean-Michel SOUBEYROUX - *Météo-France*

Dominique SERÇA - *Université Toulouse III Paul Sabatier*



## SESSION CLIMAT URBAIN

### **L'ÎLOT DE FRAÎCHEUR URBAIN À STRASBOURG : MYTHE OU RÉALITÉ ?**

*Pierre KASTENDEUCH, Naïs MASSING, Nathalia PHILIPPS, Georges NAJJAR*

Page 9

### **ÉVALUATION DU RAFRAÎCHISSEMENT DES PARCS URBAINS À L'AIDE DU BILAN ÉNERGÉTIQUE DE MOTIFS ÉLÉMENTAIRES DU PARC**

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

Page 14

### **MODÉLISATION DE L'AMBIANCE CLIMATIQUE D'UNE ZONE URBAINE À DIFFÉRENTES ÉCHELLES : CAS DE LA VILLE DE STRASBOURG**

*Nathalia PHILIPPS, Marine GORET, Pierre KASTENDEUCH, Georges NAJJAR*

Page 20

### **EXPLORATION DES VARIATIONS THERMIQUES DIURNES DANS UNE AIRE URBAINE DE MILIEU TEMPÉRÉ SEMI-COTINENTAL À L'AIDE DES DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE SURFACE TERRESTRE ECOSTRESS**

*Sébastien LEBAUT, Nassima HASSANI, Gilles DROGUE*

Page 27

### **MODÉLISATION STATIQUE MULTICRITÈRE DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN EN CONTEXTE CANICULAIRE**

*N. HASSANI, D. FRANCOIS, G. DROGUE*

Page 34

### **LES PRINCIPAUX RISQUES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU MAROC : CAS DE LA PLAINE DU GHARB**

*Mohamed FATHI, Saïda AITEL ABASS*

Page 41

### **ÉVALUATION DE LA CANICULE ESTIVALE 2021 DANS LES VILLES MAROCAINES : REGARDS SUR LES MODIFICATIONS STATISTIQUES DES TEMPÉRATURES**

*Hind FATTAH*

Page 46

### **LES PREMIERS RÉSULTATS DE LA SURVEILLANCE DE L'ÎLOT DE CHALEUR À CLUJ-NAPOCA À L'AIDE DU RÉSEAU AUTOMATIQUE MICCRO (MONITORIZAREA INSULEI DE CALDURA IN CLUJ - ROMANIA)**

*I.H. HOLOBĂCĂ, M. ALEXE et K. TEMERDEK-IVAN*

Page 53

### **THE OPERATIONAL METAMATRIX OF THERMAL COMFORT FOR EUROPEAN AREAS, A GRAPHICAL METHODOLOGY FOR APPROPRIATE SELECTION OF OUTDOOR THERMAL COMFORT INDICES : APPLICATION TO AN URBAN PLANNING STUDY-CASE**

*Matteo MIGLIARI, Rémi BABUT, Camille DE GAULMYN, Loïc CHESNE, Olivier BAVEREL*

Page 59

**VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DE LA TEMPÉRATURE À GABÈS**

*Mounir BERRICHE*

Page 66

**SITUATIONS MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES AU MAROC SEPTENTRIONAL :  
CAS DES VAGUES DE CHALEUR SUR LA VILLE DE CASABLANCA**

*Aissam BOUAICHE, Nidal LOTFI, Mohamed Saïd KARROUK, Majda CHAIR, Mohamed YAZAMI*

Page 72

**HABITER EN PÉRIODES DE FORTES CHALEURS - VÉCUS ET INÉGALITÉS SOCIO-SPATIALES  
DES HABITANTS DE SAINT-PRIEST**

*Malou ALLAGNAT, Géraldine MOLINA*

Page 78

**IMPACT OF A MODERATE WATER STRESS ON THE CLIMATIC SERVICES PROVIDED  
BY STREET TREES : AN EXPERIMENTAL STUDY INSIDE AN OUTDOOR CANYON STREET  
SCALE MODEL**

*Julien THIERRY, Sophie HERPIN, Loli MATURANA, Sabine DEMOTES-MAINARD,  
Fabrice RODRIGUEZ, Patrice CANNAVO, Pierre-Emmanuel BOURNET.*

Page 85

**BRISES THERMIQUES À BIZERTE : APPROCHE MULTISCALEAIRE**

*Mounir SELLAMI, Salem DAHECH., Sami CHARFI.*

Page 93

**CARACTÉRISTIQUES DE LA BRISE LITTORALE À DJIBOUTI : ÉTUDE PRÉLIMINAIRE**

*Moumina IDRIS DAUD et Salem DAHECH*

Page 99

**ÉTUDE DES TEMPÉRATURES SIMULÉES AVEC MÉSO-NH: SENSIBILITÉ À  
L'ARTIFICIALISATION DES SOLS À GRENOBLE ET LYON**

*Julita DIALLO-DUDEK, Valéry Masson, Olivier Planchon, Jacques Comby, Christine Lac,  
Julien Pergaud, Nadège Allegri-Martiny, Benjamin Pohl, Yves Richard, Aude Lemonsu*

Page 105

**STRUCTURE FINE DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN PARISIEN À PARTIR D'UN  
RÉSEAU DE STATIONS NON CONVENTIONNELLES**

*Malika MADELIN, Vincent DUPUIS*

Page 112

**COMMENT ET POUR QUI CARTOGRAPHIER L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN (ICU) ?**

*Yves Richard, Julien Créat, Julita Dudek, Nadège Martiny, Julien Pergaud, Benjamin Pohl,  
Mélissa Poupelin, Mario Rega, Daniel Joly, Damien Roy, Thomas Thévenin, Justin Emery,  
Ludovic Granjon, Suzie Besset, Oanez Codet-Hache, Marie-Françoise Dodet, David Fau,  
Anne Volatier*

Page 119

**L'ADAPTATION CLIMATIQUE EN URBANISME, UNE OPPORTUNITÉ POUR LA  
JUSTICE ENVIRONNEMENTALE ET SOCIALE ?**

*Geneviève BRETAGNE*

Page 127



**RÉSEAU DE MESURES ET ANALYSES SPATIO-TEMPORELLES DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN GRENOBLOIS : L'ÉTÉ 2020**

*Xavier Foissard, Sandra Rome, Sylvain Bigot, Anne-Cécile fouvet*

Page 133

**IMPACTS D'UNE MEILLEURE DESCRIPTION DE LA VÉGÉTATION URBAINE SUR DES SIMULATIONS DU CLIMAT URBAIN AVEC SURFEX-TEB**

*Mélissa POUPELIN, Julien PERGAUD, Damien ROY, Julita DUDEK, Ludovic GRANJON, Nadège MARTINY, Julien CRÉTAT, Mario REGA, Yves RICHARD, Thomas THEVENIN*

Page 141

**BENEFITS OF WELL-WATERED TREES ON STREET MICROCLIMATE : WHAT IS THE INFLUENCE OF METEOROLOGICAL CONDITIONS ?**

*Sophie HERPIN, Souleymane MBALLO, Julien THIERRY, Dominique LEMESLE, Lydia BRIALIX, Fabrice RODRIGUEZ, Sabine DEMOTES-MAINARD, Pierre-Emmanuel BOURNET*

Page 148

**LES BRISES DE MER ET L'ÎLOT DE CHALEUR À FLORIANÓPOLIS – BRÉSIL**

*Geisa ROCHA, Vincent DUBREUIL, Francisco MENDONÇA*

Page 161

**ÉTUDE DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN À VITRÉ (35), APPROCHE PAR MODÉLISATION DE L'OCCUPATION DES SOLS ET MESURES DE TERRAIN**

*Marion DELIDAIS*

Page 168

**INFLUENCE DE LA TAILLE DE TACHE URBAINE SUR L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN : ÉTUDE SUR DES COMMUNES D'ILLE ET VILAINE**

*Charlotte BRABANT, Vincent DUBREUIL, Simon DUFOUR, Gabriel DELAUNAY, Jean NABUCET*

Page 175

**UN CHANGEMENT CLIMATIQUE SOUVENT OUBLIÉ : LES ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS EN AMAZONIE**

*Vincent DUBREUIL, Damien ARVOR, Vincent NEDELEC, Jean NABUCET, Charlotte BRABANT, Carlos Antonio DA SILVA JUNIOR, Laurimar VENDRUSCULO, Bruno CARDOSO, Marco ANTONIO Camillo de CARVALHO, Thiago RIZZI, Isabelle BONINI, Luis DE ARAUJO, Margarete AMORIM*

Page 181

**CARTOGRAPHIE DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN GRÂCE AUX THERMOMÈTRES EMBARQUÉS DANS LES VOITURES CONNECTÉES : CAS À TOULOUSE ET DIJON**

*Eva MARQUES*

Page 188

**CARTOGRAPHIER LE CLIMAT URBAIN POUR LA GESTION DU CONFORT D'ÉTÉ EN URBANISME : DE L'ANALYSE CLIMATIQUE ET LA SÉMIOLOGIE GRAPHIQUE AUX RECOMMANDATIONS**

*Julia HIDALGO, Najla TOUATI, Sinda HAOUES-JOUVE, Laurent JEGOU, Geneviève BRETAGNE, Erwan BOCHER, Valéry MASSON, Arnaud MAYIS, Renaud JOUGLA, Gwendall PETIT, Robert SCHOETTER, Collectif GEO-VISU*

Page 195

**VARIABILITÉ ET INTERCOMPARAISON DES TEMPÉRATURES DES ZONES D'ACTIVITÉS ET COMMERCIALES, SELON DIFFÉRENTES CONDITIONS CLIMATIQUES, À TOULOUSE.**

*Guillaume DUMAS*

Page 202

**CHARACTERISATION OF THE INDOOR MICROCLIMATE WITHIN THE HISTORIC ARCHIVES OF A CULTURAL INSTITUTION IN THE MEGACITY OF SÃO PAULO (BRAZIL) IN THE PERSPECTIVE OF PREVENTIVE CONSERVATION**

*Andrea CAVICCHIOLI, Anna Laura CANUTO ROCHA DE ANDRADE, Vincent DUBREUIL*

Page 209

**LA PLANIFICATION STRATÉGIQUE ET TERRITORIALE POUR L'INTÉGRATION DES SOLUTIONS D'ADAPTATION FONDÉES SUR LA NATURE ET LA LUTTE CONTRE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN : LE CAS DES PCAET**

*Elodie BRICHE, Baptiste SALMON, Aurélie TAILLEUR, Charlotte DA CUNHA*

Page 216

**MODÉLISATION DES GRADIENTS THERMIQUES EN MILIEU URBAIN : COMPARAISON DE TROIS RÉGRESSIONS SUR LYON**

*Florent RENARD, Lucille ALONSO*

Page 222

**RUISSELLEMENT PLUVIAL ET ÉROSION DES TERRES DANS L'ARRONDISSEMENT D'AKASSATO À ABOMEY-CALAVI AU BENIN**

*Cyr. Gervais ETENE, Ayédêguê Biaou Philippe CHABI*

Page 227

**COOLPARKS : OBSERVATION DU RAFRAÎCHISSEMENT D'UN PARC NANTAIS AU-DELÀ DE SON ENCEINTE**

*Jérémy BERNARD*

Page 233

**MODÉLISATION CLIMATIQUE RÉGIONALE À HAUTE RÉOLUTION POUR L'ÉTUDE DU CLIMAT URBAIN : ÉVALUATION DU MODÈLE CNRM-AROME SUR 12 VILLES FRANÇAISES**

*Yohanna MICHAU*

Page 240

**THE OPERATIONAL METAMATRIX OF THERMAL COMFORT FOR EUROPEAN AREAS, A GRAPHICAL METUODOLOGY FOR APPROPRIATE SELECTION OF OUTDOOR THERMAL COMFORT INDICES: APPLICATION TO AN URBAN PLANNING STUDY-CASE**

*Matéo MIGLIARI*

Page 247

**IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET STRTÉGIES D'ADAPTATION À GRAND-BASSAM (SUD-EST DE LA CÔTE D'IVOIRE)**

*Kalitia SEKONGO*

Page 253

## SESSION MONTAGNE et EAU

### **VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DES JOURS PROPICES AUX ÉVÉNEMENTS DE PLUIE VERGLAÇANTE/NEIGE COLLANTE EN EUROPE**

*Florian RAYMOND, Philippe DROBINSKI, Nicolas ROCHE*

Page 260

### **LES SIMULATIONS HYDRO-CLIMATIQUES DRIAS 2020 - SIM2**

*Fabienne ROUSSET, FLORE TOCQUER, Jean-Michel SOUBEYROUX*

Page 267

### **INTERPOLATION DES TEMPÉRATURES DE L'AIR À FINE RÉOLUTION EN ZONE DE MONTAGNE**

*Judith EECKMAN, Jean-Michel FALLOT*

Page 273

### **ESTIMATION DES SÉCHERESSES AU NOUVEAU-BRUNSWICK, CANADA (1971-2020).**

*Guillaume FORTIN, Charlotte POIRIER, Vincent DUBREUIL*

Page 279

### **HOW ABRUPT CHANGE IN SURFACE TEMPERATURE IMPACT WATER CYCLE OVER FRANCE ?**

*Léa LAURENT, Albin ULLMANN, Claude PERROT, Xavier AUBOUY, Thierry CASTEL*

Page 285

### **ANALYSIS OF TEMPERATURE CHANGES IN VALSESIA (NORTH WESTERN OF ITALY)**

*Alessandro POMPEO, Alice Baronetti, Fiorella Acquaotta,*

Page 292

### **CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE ET TEMPS NEIGEUX DANS LES ALPES DU SUD**

*Guillaume GUERIN, Nicolas Martin*

Page 298

### **ÉVALUATION DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DE L'ADAPTATION AVEC DES OUTILS DE MODÉLISATION HYDROLOGIQUES LIBRES**

*Guillaume THIREL, David DORCHIES, Olivier DELAIGUE, Laura NUNEZ TORRES, Diyae ELMALKI*

Page 305

### **EXPLORING THE FUTURE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON THE WATER RESOURCES OF FRANCE**

*Miquel TOMAS-BURGUERA, Patrick LE MOIGNE, Aaron BOONE*

Page 312

### **ESTIMATION DES RÉSERVES EN EAU SOUTERRAINE RÉGULATRICES DANS LE HAUT BASSIN DE L'OUUM ER RBIA (MAROC)**

*Tarik EL ORFI, Mohamed El Ghahci, Sébastien LEBAUT, Emmanuel GILLE*

Page 318

### **IMPROVING THE ACCURACY OF HYDROLOGICAL MODELING USING SNOW WATER**

**EQUIVALENT (SWE) DURING SPRING FLOODING IN THE MOROCCAN HIGH ATLAS**

*Myriam BENKIRANE, Nour-Eddine LAFTOUHI, Simon GASCOIN, Laura SOURP, Said KHABBA,*

Page 324

**ASSIMILATION OF THERMAL AND MICROWAVE DATA TO IMPROVE FAO-56 METHOD FOR EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATES IN SEMI-ARID REGIONS**

*Abdelhakim AMAZIRH, Salah ER-RAKI, Olivier MERLIN, Abdelghani CHEHBOUNI*

Page 331

**CLIMSNOW, UN SERVICE CLIMATIQUE POUR ANTICIPER L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES CONDITIONS D'ENNEIGEMENT DES STATIONS DE SPORT D'HIVER**

*H. FRANÇOIS, S. MORIN, C. CARMAGNOLA, R. SAMACOÏTS, N. ANIORT, L. GUILY, J. SIMON, J.M. SOUBEYROUX, A. DROUIN*

Page 337

**PROJECTIONS CLIMATIQUES ET CONDITIONS D'ENNEIGEMENT DANS LES MASSIFS MONTAGNEUX FRANÇAIS**

*Raphaëlle SAMACOÏTS, Samuel MORIN, Jean-Michel SOUBEYROUX, Matthieu LAFAYASSE, Carlo CARMAGNOLA, Hugues FRANÇOIS*

Page 345

**DROUGHT CHARACTERISTICS OVER TWO LARGE BASINS IN MOROCCO (TENSIFT AND SEBOU)**

*Kaoutar OUKADDOUR, Younes FAKIR, Michel LE PAGE*

Page 351

**LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA RESSOURCE EN EAU EN BRETAGNE : LES RÉSULTATS DU PROGRAMME DEMOCLIM AIC 2022**

*Louis AMIOT, Vincent DUBREUIL, Josette LAUNAY, Florence MASSA, Enora KEROMNES, Elodie BARDON, Franck BARAER*

Page 357

**IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'ÉCOULEMENT DES RIVIÈRES EN ROUMANIE**

*Liliana ZAHARIA, Gabriela IOANA-TOROIMAC, Gabriela Adina MOROSANU*

Page 364

**ÉVOLUTION DU RÉGIME PLUVIOMÉTRIQUE SUR UN SIÈCLE DANS LA PROVINCE DE SETTAT, MAROC**

*Abdelali SEBBAR, Hassan FOUGRACH, Mohamed HSAINE, Wadi BADRI*

Page 371

**ÉTUDE DES VARIATIONS CLIMATIQUES AU SUD DU MAROC ET DES DÉBITS DE PROJET CAS DU "BASSIN D'OUED OUM LAACHAR"**

*Abdelali SEBBAR, Youssef DARARI, Mostafa BADILOU*

Page 377

**SIMULATION DE DÉBITS ET D'ÉVÈNEMENTS DE CRUE À PARTIR D'INFORMATIONS ATMOSPHÉRIQUES DE GRANDE ÉCHELLE : EXEMPLE DU BASSIN VERSANT DU RHÔNE AMONT (ALPES EUROPÉENNES)**

*Caroline LEGRAND, Bruno WILHELM, Benoît HINGRAY*

Page 383

**L'IMPACT DE LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE SUR L'APPORT DES BARRAGES ET L'APPROVISIONNEMENT DES VILLES EN EAU POTABLE EN TUNISIE**

*Afifa BEN HAMMOUDA, Salem SEBEI*

Page 389

## L'ÎLOT DE FRAÎCHEUR URBAIN À STRASBOURG : MYTHE OU RÉALITÉ ?

Pierre KASTENDEUCH<sup>1</sup>, Naïs MASSING<sup>2</sup>, Nathalia PHILIPPS<sup>3</sup>, Georges NAJJAR<sup>4</sup>

<sup>1</sup> ICube, 300 bd Sébastien Brant, 67412 Illkirch CEDEX, [kasten@unistra.fr](mailto:kasten@unistra.fr)

<sup>2</sup> Faculté de géographie, 3 rue de l'Argonne, 67083 Strasbourg CEDEX,

<sup>3</sup> ICube, 300 bd Sébastien Brant, 67412 Illkirch CEDEX, [nathalia.philipps@strasbourg.eu](mailto:nathalia.philipps@strasbourg.eu)

<sup>4</sup> ICube, 300 bd Sébastien Brant, 67412 Illkirch CEDEX, [georges.najjar@unistra.fr](mailto:georges.najjar@unistra.fr)

**Résumé :** l'îlot de fraîcheur urbain (IFU) est un phénomène qui se traduit par des températures plus faibles en ville qu'à la campagne en journée. La présence d'IFU a été démontrée pour un certain nombre de villes dans le monde, mais des interrogations subsistent pour savoir s'il se manifeste partout. Le mécanisme physique qui en est à l'origine est connu, de même que son lien avec la morphologie urbaine et les conditions météo. Les mesures dont nous disposons à Strasbourg tendent à prouver qu'il existe également dans cette ville, sous une forme plus ou moins intense selon les sites, les saisons et les conditions météo.

**Mots-Clés :** IFU, îlot de fraîcheur urbain, Strasbourg, températures.

**Abstract :** the urban cool island is a phenomenon that results in lower temperatures in the city than in the countryside during the day. The presence of IFU has been demonstrated for a number of cities around the world, but questions remain as to whether it is manifesting everywhere. The physical mechanism behind it is known, as well as its link with urban morphology and weather conditions. The measurements we have in Strasbourg tend to prove that it also exists in this city, in a more or less intense form depending on the sites, the seasons and the weather conditions.

**Keywords :** ICU ; urban cool island, Strasbourg, temperatures.

### Introduction

L'îlot de fraîcheur urbain (IFU) est un phénomène très peu étudié en comparaison de l'îlot de chaleur urbain (ICU) qui accapare toute l'attention des scientifiques. L'IFU est le phénomène opposé à l'ICU : il correspond à des températures de l'air plus faibles en ville qu'à la campagne et il se produit plutôt en journée dans des quartiers très urbanisés. Il ne doit pas être confondu avec les zones fraîches qui peuvent se former au cours de la nuit, comme dans les parcs urbains par exemple. Le phénomène a été mentionné dans des villes telles que Bragança (Gonçalves et al., 2018), Fès (Johansson, 2006), Hong-Kong (Yang et al., 2016), Adelaïde (Erell et Williamson, 2007), Okayama (Shigeta et al., 2009) mais aucun article n'a, à notre connaissance, jamais été publié sur le sujet pour une ville Française. Le but de cette étude est d'établir si un IFU est capable de se former dans une agglomération de taille moyenne comme Strasbourg qui est soumise à un climat tempéré de type continental. Nous en rappelons d'abord le mécanisme, puis nous comparons l'IFU de quelques sites très différents au plan de la morphologie urbaine, ensuite nous en étudions la saisonnalité, la fréquence et l'intensité pour un site de centre-ville. Nous mettrons également en évidence le rôle des conditions météorologiques et de la morphologie urbaine. Enfin, les résultats obtenus sont analysés par rapport aux incertitudes instrumentales dont il ne faut surtout pas sous-estimer l'importance.

### 1. Contexte et mécanisme physique

Le mécanisme physique à l'origine de l'IFU survient dans les quartiers densément urbanisés qui présentent des canyons profonds et étroits, où les bâtiments bloquent le rayonnement solaire en pleine journée, ce qui procure de l'ombre et permet de conserver des températures fraîches (Yang et al., 2016). Simultanément l'air se réchauffe rapidement dans la zone rurale ensoleillée (Gonçalves et

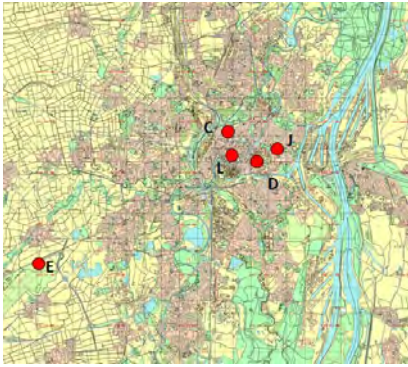
al., 2018). Ainsi, l'IFU dépend de la morphologie urbaine et du sky view factor<sup>1</sup> : plus ce dernier est faible, plus l'air est frais (Johansson, 2006). Dans leur étude, Gonçalves et al. (2018) obtiennent les IFU maximum dans des Local climate zone (LCZ) de type 2 (résidentiel) et 8 (commercial) et expliquent ces résultats par l'importance des ombres portées obtenues. Le phénomène survient donc essentiellement en matinée ou au cours de la journée dans les zones où l'ombre persiste (Polrolniczak et al., 2017), mais le début de matinée semble être la période la plus propice puisque le soleil est encore assez bas sur l'horizon et les ombres importantes. L'IFU ne dépend pas seulement des facteurs morphologiques. Il dépend aussi des conditions météorologiques, en particulier du vent et de l'ensoleillement. Ainsi Gonçalves et al. (2018) montrent clairement une diminution de l'intensité de l'IFU avec la vitesse du vent et notent aussi l'absence d'IFU intense au cours des situations précipitantes à fortes couvertures nuageuses. Erell et Williamson (2007) confirment ces observations et notent que les IFU les plus intenses sont obtenus pour des journées à ciel clair quand le rayonnement solaire direct prédomine, en association avec des vents faibles et des températures élevées. Polrolniczak et al. (2017) observent que les situations les plus propices à des IFU de forte intensité ( $IFU \leq -2^{\circ}C$ ) sont les situations anticycloniques générant un flux d'air chaud de sud sur la Pologne. Johansson (2006) observe dans la ville de Fès des différences pouvant atteindre 6 à 10°C durant les jours les plus chauds dans des ruelles très étroites. D'après Erell et Williamson (2007), l'IFU est un phénomène qui présente également une forte saisonnalité puisqu'il est plus fréquent et intense durant les mois chauds que pendant les mois froids.

## 2. Zone d'étude et données

La ville de Strasbourg se situe dans le département du Bas-Rhin au sein de la région Grand Est français. C'est une ville qui compte environ 300 000 habitants répartis sur 80 km<sup>2</sup>. Elle est implantée dans une plaine à proximité du Rhin qui marque la frontière entre l'Allemagne et la France. Elle est encadrée par les massifs de la Forêt Noire d'un côté et les Vosges de l'autre. C'est une ville où le climat est de type tempéré classé Cfb d'après Köppen-Geiger (fr.climate-data.org) avec une température moyenne annuelle de 11.1°C. Il peut parfois y faire très chaud en été tandis que les hivers sont plutôt frais (Kastendeuch et al., 2019, Philipps et al., 2020). Notre travail a été réalisé à partir des données de 5 stations météorologiques urbaines et d'une station météorologique rurale qui sert de référence (Figure 1). Pour tous ces sites nous possédons des mesures de température de l'air sous abri depuis 2013. Toutes ces données sont acquises par des thermo-hygromètres rigoureusement contrôlés et placés sous abris selon les normes météorologiques en vigueur (Abri SOCRIMA à coupelles). La station « rurale » de référence se situe à 15 kilomètres du centre de Strasbourg au niveau de l'aéroport d'Entzheim. Elle fait partie du réseau d'observation synoptique de Météo France et fournit aussi bien la température que la vitesse de vent et la fraction d'insolation. Les autres stations sont implantées sur des sites urbains variés : une clairière au sein d'un parc urbain (Jardin Botanique, Météo-France), un toit plat de bâtiment (DRIRE, ATMO Grand Est), une petite place (Clémenceau, ATMO Grand Est), un carrefour piétonnier (Lafayette, Université de Strasbourg). Notons cependant que la station Lafayette n'a fonctionné que durant les trois premières années seulement. Toutes les données de températures ont été contrôlées pour détecter d'éventuelles valeurs manquantes puis mises en forme pour être traitées. Tous les écarts de températures ( $\Delta T$ ) ont été calculés par rapport à Entzheim et les écarts hors normes ont été contrôlés.

---

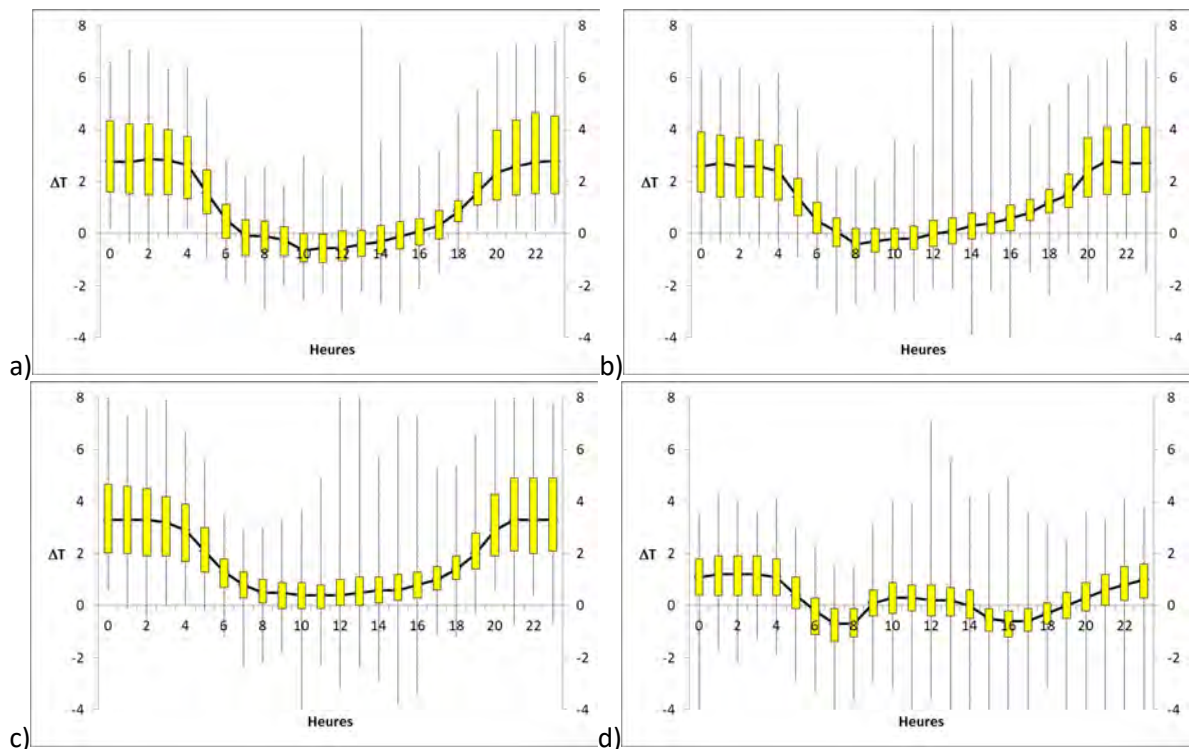
<sup>1</sup> Facteur qui indique le pourcentage de ciel visible en un endroit.



**Figure 1.** Localisation des stations de mesures : E = Entzheim, J = Botanique, D = DRIRE, L = Lafayette, C = Clémenceau.

### 3. Comparaison de l'IFU par sites

Les  $\Delta T$  calculés pour les quatre sites urbains mentionnés ci-dessus sont présentés pour la saison d'été uniquement (Figure 2). Le comportement diurne des IFU (lorsque le  $\Delta T$  est négatif) est nettement différent selon les sites car la configuration géométrique provoque un masque particulier à chaque fois. Lafayette est le site où l'îlot de fraîcheur dure le plus longtemps au cours de la journée puisqu'il s'étale de 8 h à 16 h, avec un minimum entre 10 h et 12 h. C'est le site qui se situe dans le canyon urbain le plus encaissé : le rapport hauteur/largeur  $\gamma$  est de l'ordre de 1.1. Le site de Clémenceau est beaucoup moins favorable à l'IFU : cette placette est beaucoup plus ouverte au sud-ouest ce qui fait qu'elle connaît surtout un IFU le matin entre 8h et 11h lorsque le soleil est masqué par les bâtiments, puis la zone finit par se réchauffer et l'IFU disparaît l'après-midi. Le site de la DRIRE, qui se situe sur une toiture plate voit le soleil toute la journée et c'est celui qui échappe le plus à l'IFU : notons cependant que l'IFU n'y est pas totalement absent puisqu'il survient pendant 25% du temps à 12 h TU par exemple. Le site Botanique se situe au milieu d'une clairière au sein d'un parc densément végétalisé. C'est un site qui subit un IFU faible la nuit et un double IFU diurne : le premier entre 6 h et 9 h du matin et le second entre 14 h et 19 h de l'après-midi. Ces IFU correspondent aux deux moments de la journée où les arbres des alentours étendent leurs ombres sur le site, ce qui n'est plus le cas autour de midi, lorsque le soleil est suffisamment haut dans le ciel.



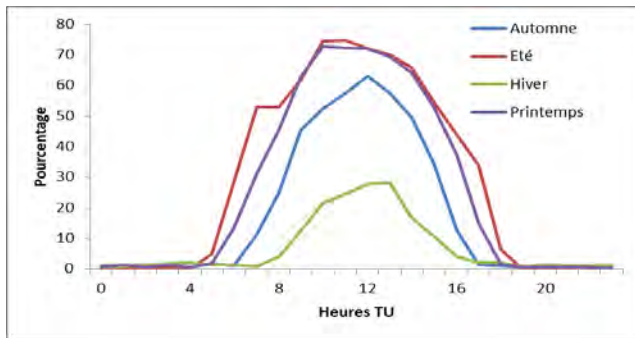
**figure 2.** Ecart de températures entre trois sites urbains et Entzheim (a = Lafayette, b = Clémenceau, c = DRIRE, d = Botanique). Médiane, quartiles, extrêmes. Journées d'été pour la période 2013-2016. Les heures sont en TU.

Ce qui est remarquable, c'est que cette station de parc urbain connaît les valeurs d'IFU les plus importantes, quelle que soit l'heure de la journée. Gonçalves et al. (2018) ont observé le même phénomène dans des parcs à Bragança au printemps et en été (IFU  $\leq -3^{\circ}\text{C}$ ) et l'expliquent par la présence d'arbres à feuilles caduques qui accentuent l'IFU à la fois par l'effet d'ombre et par l'évapotranspiration. Ces graphiques montrent bien que l'IFU n'est pas clairement un phénomène nocturne : les  $\Delta T$  de certaines stations ont du mal à descendre en-dessous de zéro la nuit surtout pour celles qui sont les plus urbanisées.

#### 4. Saisonnalité, fréquence et intensité

L'IFU à Strasbourg est un phénomène qui présente une saisonnalité marquée comme le démontre la figure 3a établie pour le site Lafayette. Il est assez peu présent en Hiver (DJF) tandis qu'il est très marqué au printemps et en été (JJA). Durant l'hiver et le printemps, il atteint une intensité médiane autour de midi de près de  $-0.5^{\circ}\text{C}$ . Seule la durée du phénomène est un peu plus courte au printemps (MAM). La disparition de l'IFU en hiver pourrait s'expliquer par l'activation du système de chauffage qui rendrait la ville plus chaude.

a)



b)

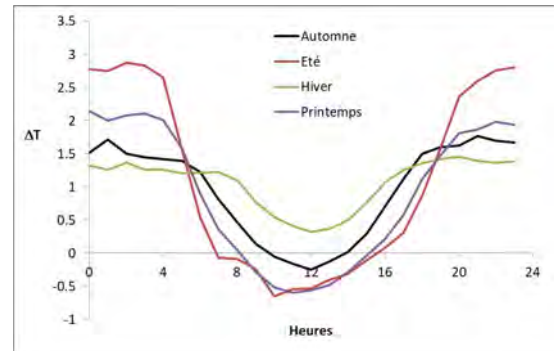


Figure 3 a) Ecart saisonniers des températures à Lafayette-Entzheim. Valeur de la médiane, toutes journées, période 2013-2016. Les heures sont en TU. b) Fréquence des IFU ( $\Delta T < 0$ ) selon l'heure de la journée et les saisons.

La fréquence d'occurrence des IFU est élevée en été puisqu'elle atteint les 75% à 11 h (Figure 3b). Le printemps connaît des fréquences assez similaires. En revanche le phénomène est beaucoup moins fréquent en hiver à la même heure ( $\approx 25\%$ ). D'autre part, l'IFU est très peu présent la nuit quelle que soit la saison. Bien que l'IFU se produise avec les mêmes fréquences en été et au printemps, son intensité IFU est la plus forte en été à la station Lafayette entre 10 h et 12 h : la valeur minimale du  $\Delta T$  est de  $-3.01^{\circ}\text{C}$  et les quartiles sont respectivement de  $-1.07^{\circ}\text{C}$ ,  $-0.58^{\circ}\text{C}$ ,  $0.03^{\circ}\text{C}$  dans ce créneau horaire (Figure 4). L'îlot de fraîcheur reste donc modeste la plupart du temps.

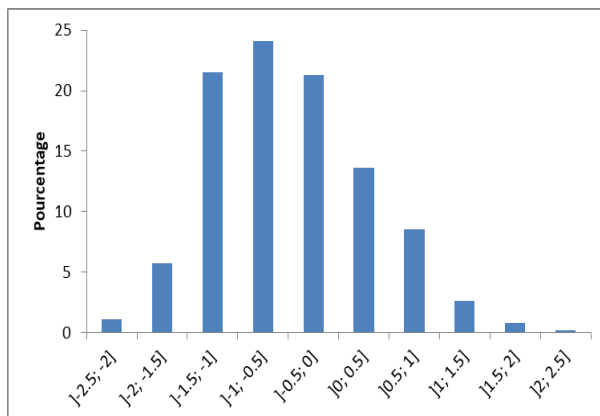
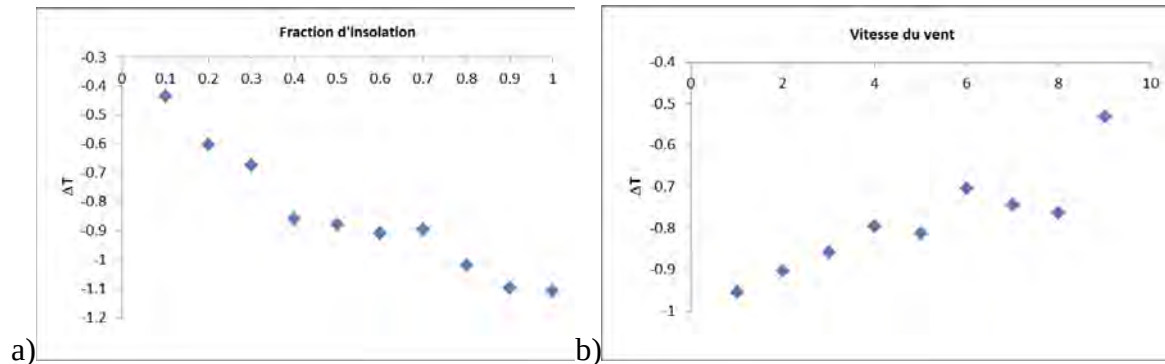


figure 4. Fréquences (fréquence moyenne ? période ??)selon les écarts de températures calculés entre Lafayette et Entzheim entre 10 h et 12 h pour la saison d'été, toutes journées.



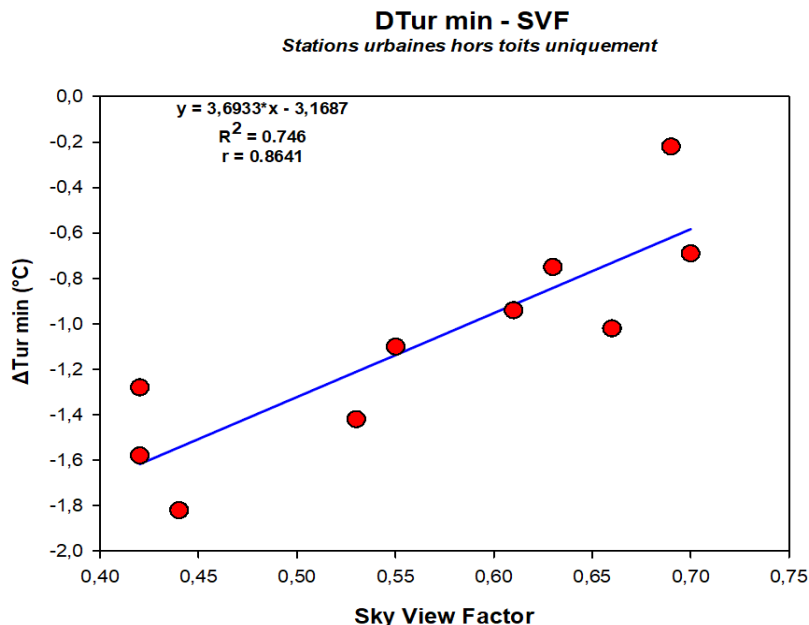
## 5. Le rôle des conditions météorologiques et de la morphologie urbaine

Nous avons cherché à identifier les relations entre l'IFU et les conditions météo, à l'image de ce qu'ont fait Johansson, 2006 et Erell et Williamson, 2007. L'IFU à Strasbourg semble influencé par la fraction d'insolation journalière. Plus la journée est ensoleillée, plus l'IFU est intense (Figure 5a). Il semble également qu'il y ait une certaine relation avec la vitesse du vent. Plus celle-ci est forte, plus l'IFU perd en intensité (Figure 5b).



**figure 5.** Intensité moyenne de l'IFU à 11 h pour la station Lafayette, en fonction de la fraction d'insolation (a) et de la vitesse du vent (b). Toutes saisons et toutes journées pour la période d'observation 2013-2016.

Durant l'année 2015 l'Université de Strasbourg avait mis en place un réseau de mesures temporaire d'une quinzaine de sites dans différents quartiers de Strasbourg afin d'étudier l'ICU nocturne (Philipps et al., 2020). Le sky view factor a été déterminé pour chacun des sites et l'information a été mise en relation avec l'IFU. Il apparaît que l'intensité de l'IFU maximum est directement proportionnelle à la valeur de cet indicateur (Figure 6). Plus le sky view factor est faible, plus le site est frais par rapport à la station de référence rurale, ce qui va dans le sens des observations de Johansson (2006).



**figure 6.** Intensité de l'IFU pour un certain nombre de stations urbaines en fonction du sky view factor.

## 4. Discussion

Nous avons vu que le mécanisme d'IFU peut se justifier au plan physique et les résultats que nous avons obtenus démontrent l'existence d'un IFU à Strasbourg, au même titre que dans d'autres villes dans le monde. Son intensité apparaît cependant assez faible en comparaison avec les observations faites par Johansson (2006) à Fès dans des canyons très étroits et par des températures très élevées.

Les intensités observées à Strasbourg restent néanmoins conformes à celles notées par d'autres auteurs, car elles sont limitées par les caractéristiques du climat local et par la morphologie urbaine autour des points de mesures. La question qui reste en suspens reste le rôle joué par le matériel de mesure et des abris météo qui accueillent les capteurs. Même s'il s'agit d'abris aux normes internationales (SOCRIMA à coupelles) qui sont sensés éliminer le rôle du rayonnement solaire, ils ne sont pas exempts de phénomènes de surchauffe lorsqu'ils sont éclairés et mal ventilés. Ainsi, certaines études montrent des écarts qui peuvent atteindre jusqu'à 1.5°C entre des abris de marques différentes dans ces conditions (Météo-France, 1999), tandis que l'OMM précise et explique dans le Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologique (2010) que: « *Les plus grands écarts [de températures] sont causés par les surfaces artificielles et par les ombres portées* » qui modifient complètement l'équilibre radiatif des abris. L'OMM note des différences pouvant atteindre jusqu'à 2.5°C d'écart dans ces conditions. Sur la base de ce constat, il est légitime de se demander si les IFU que nous avons mis en évidence ne résultent pas uniquement d'un artefact dû aux effets du rayonnement sur les abris eux-mêmes ? Comment conclure alors définitivement à la réalité de l'IFU à Strasbourg dont l'intensité se situe justement dans les mêmes marges ?

### Conclusion

Au terme de cette étude les mesures démontrent l'existence d'un IFU dans les zones densément urbanisées qui possèdent un sky view factor faible à Strasbourg, puisque les mesures y révèlent des températures plus fraîches lors des journées de la saison chaude et par temps ensoleillé à vent faible par rapport à la zone rurale. Cependant, il convient de rester prudent, car les incertitudes de mesures liées aux abris météorologiques jettent le trouble sur la réalité du phénomène constaté, qui pourrait simplement être la résultante d'un biais lié aux mesures elles-mêmes.

**Remerciement** : à Météo-France et Atmo Grand Est pour nous avoir facilité l'accès aux données.

### Bibliographie

- Erell E., Williamson T., 2007: Intra-urban differences in canopy layer air temperature at a mid-latitude city. *International Journal of Climatology*, **27**, 1243-1255.
- Gonçalves A., Ornellas G., Castro Ribeiro A., Maia F., Rocha A., Feliciano M., 2018 : Urban cold and heat island in the city of Bragança (Portugal). *Climate*, **6**, 14p.
- Johansson E., 2006: Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate : a study in Fez, Morocco. *Building and Environment*, **41**, 1326-1338.
- Kastendeuch P., Najjar G., Philipps N., 2019 : îlot de sécheresse et d'humidité à Strasbourg (France). *Climatologie*, **16**, 72-90.
- Météo-France, 1999 : comparaison d'abris météorologiques, abri CIMEL à coupelles. *Rapport d'essai*, 17 p.
- OMM, 2010 : Partie I Mesure de variables météorologiques. *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques*, 742 p.
- Philipps N., Kastendeuch P.P., Najjar G., 2020 : Analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg (France). *Climatologie*, **17**, 11 p.
- Polrończak M. Kolendowicz L., Majkowska A, Czernecki B., 2017: The influence of atmospheric circulation on the intensity of urban heat island and urban cold island in Poznan, Poland. *Theoretical and Applied Climatology*, **127**, 611-625
- Shigeta Y., Ohashi Y., Tsukamoto O., 2009 : Urban Cool Island in Daytime — Analysis by Using Thermal Image and Air Temperature Measurements. *The seventh International Conference on Urban Climate*, Yokohama, Japan, 4 p.
- Yang X. Li Y., Luo Z., Chan P.W., 2017 : The urban cool island phenomenon in a high-rise high-density city and its mechanisms. *International Journal of Climatology*, **37**, 890-904.

## ÉVALUATION DU RAFFRAÎCHISSEMENT DES PARCS URBAINS À L'AIDE DU BILAN ÉNERGÉTIQUE DE MOTIFS ÉLÉMENTAIRES DU PARC

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

<sup>1</sup> Soleneos et Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, 1 rue de la Noé – 44300 Nantes, [adrien.gros@soleneos.fr](mailto:adrien.gros@soleneos.fr)

<sup>2</sup> Cerema Ouest, Équipe 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> Soleneos et Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, 1 rue de la Noé – 44300 Nantes, [benjamin.morille@soleneos.fr](mailto:benjamin.morille@soleneos.fr)

<sup>5</sup> Cerema Ouest, Équipe 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>6</sup> Cerema Ouest, Équipe 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)

**Résumé:** Dans un contexte de réchauffement climatique, le rafraîchissement des villes grâce aux parcs urbains représente une solution intéressante. Dans le cadre du projet Coolparks, nous proposons de développer un modèle simplifié de parc urbain pour déterminer le rafraîchissement qu'il produit. En représentant un parc comme un ensemble de motifs élémentaires, les résultats de simulation microclimatique de chaque motif sont utilisés pour calculer le rafraîchissement total du parc.

**Mots-Clés:** Parc urbain, rafraîchissement, modélisation microclimatique, motif élémentaire

**Abstract** With the global warming growth, cities cooling thanks to urban parks is an useful solution. As a part of the Coolparks project, the goal is to build a simplified model of the cooling from urban park. In this model, the park is represented from structural units. Numerical micro-climatic simulations are used to characterize the cooling effect of each unit to get the global cooling park effect.

**Keywords:** Urban park, microclimatic modelisation, structural unit, urban cooling

### Introduction

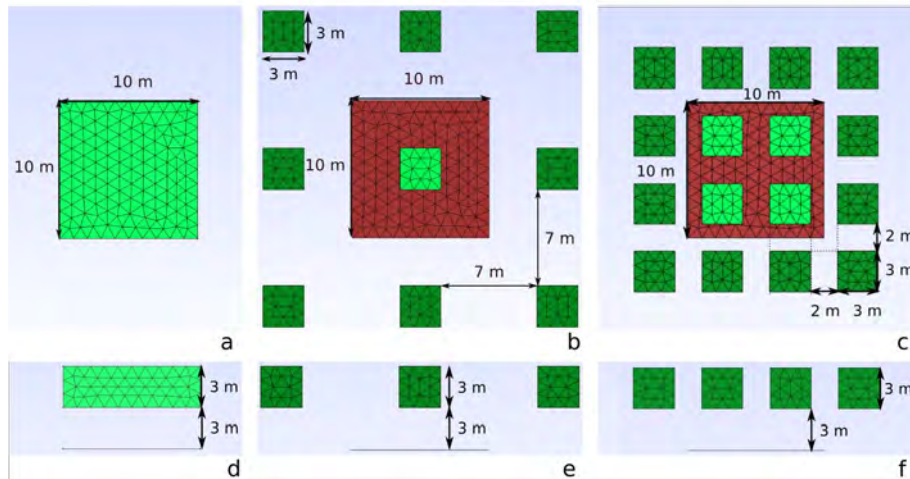
Les infrastructures vertes sont reconnues pour leur capacité à participer au rafraîchissement urbain (Lewis, 2016). Dans un contexte d'intensification des vagues de chaleur, il est nécessaire de développer des stratégies de rafraîchissement urbain. Les modèles numériques microclimatiques peuvent être utilisés pour évaluer l'impact des espaces verts sur les températures d'un quartier (Morille 2017, Yang 2021). Cependant ces modèles nécessitent des temps de calculs excessifs. L'objectif du projet Coolparks est de développer un modèle simplifié de parc urbain permettant de quantifier rapidement le rafraîchissement induit. Ainsi, des simulations numériques microclimatiques sont utilisées pour calculer le pouvoir rafraîchissant de motifs élémentaires de 100m<sup>2</sup>. En représentant un parc comme un assemblage de ces motifs élémentaires, le bilan énergétique de chaque motif est utilisé pour calculer le rafraîchissement total du parc. Ces motifs élémentaires sont présentés dans un premier temps. Puis les résultats issus des bilans énergétiques sont exposés. Enfin, la méthode de développement d'un modèle simplifié de parc urbain à partir des résultats obtenus est détaillée.

### 1. Modélisation micro-climatique de motifs élémentaires

#### 1.1. Descriptions des motifs élémentaires

Les travaux de caractérisation des parcs nantais (Bodenan, 2021) ont permis de définir 12 motifs élémentaires pour représenter un parc urbain. Chaque motif est représenté par un carré de 10 m de côté et est composé d'une strate basse (terre, asphalte ou pelouse) et d'une strate haute (« absence d'arbre », « arbres isolés », « couvert boisé » ou « couvert boisé dense »). La strate basse

« terre » est composé d'un mètre de terre tandis que les strates basses « asphalte » et « pelouse » sont composées d'une couche d'un mètre de terre superposée respectivement par une couche de 10 cm d'asphalte et 12 cm de pelouse. La strate haute « boisé dense » est composée d'une canopée d'arbres dont les houppiers sont haut de trois mètres et situés à trois mètres de haut. La surface projetée au sol recouvre 100% de la surface du motif (Figure 1a). Cette strate vise à représenter le comportement physique d'un milieu arboré dense dont le sol est constamment ombragé et sans aucune ouverture au ciel. Ainsi les facteurs de vue du ciel et le rayonnement solaire reçu au centre de la strate basse sont appliqués à l'ensemble de la strate basse. La strate haute « arbre isolé » est représentée par un arbre cubique centré sur le sol du motif (Figure 1b, en vert clair). Sa surface projetée au sol représente alors 9% de la surface au sol du motif.



**figure 1.** Dimensions des strates hautes « boisé dense » (a : vue de dessus, d : vue latéral), « arbre seul » (b : vue de dessus, e : vue latérale) et « boisée » (c : vue de dessus, f : vue latérale). Seul l'ombrage des arbres en vert foncé sont considérés, les arbres en vert clair sont modélisés thermo-aérauliquement.

Pour la strate « boisée dense », quatre arbres cubiques sont équirépartis sur le sol (Figure 1c, en vert clair). La surface projetée au sol de la strate haute représente 36% de la surface au sol. Pour ces deux types de strate haute, afin que l'ombre produite par ces arbres soit considérée quelle que soit l'heure du jour, des arbres identiques ont été ajoutés autour des arbres centraux (cf. les arbres en vert foncé sur Figure 1). La position de ces arbres périphériques a été choisie pour que, par effet de symétrie, lorsque l'ombre des arbres centraux sortent de la surface au sol de 100m<sup>2</sup>, l'ombre des voisins y apparaissent. Cependant, pour ces arbres supplémentaires seuls les processus radiatifs sont considérés dans la simulation, ainsi tous les processus thermo-aérauliques (vent et évapotranspiration) ne sont pas pris en compte.

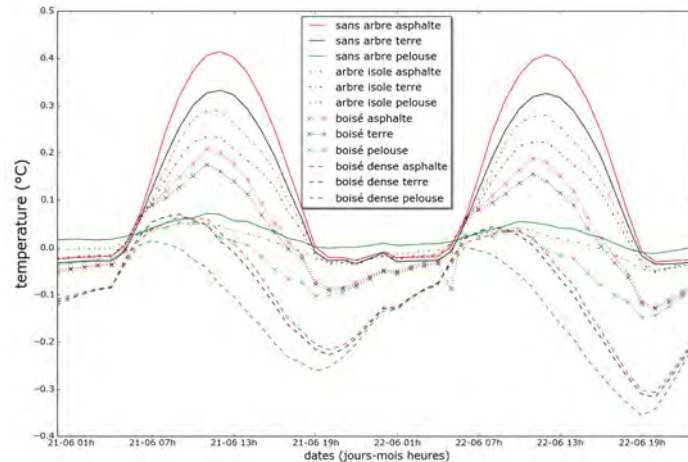
## 1.2. Modèle utilisé

Le modèle microclimatique SOLENE-microclimat (Malys 2012) réalise le couplage entre le modèle thermo-radiatif SOLENE et le modèle CFD Code\_Saturne. Il est utilisé pour modéliser explicitement les champs de température, de vitesse et d'humidité au sein de chacun des motifs. Afin de modéliser l'écoulement du vent, chacun des motifs est centré dans une veine numérique parallélépipédique de 50 m de haut, 100 m de long et de 100 m de large. La taille des mailles est de un mètre au centre de la veine et de dix mètres sur les bords. Les simulations de chacun des motifs sont réalisées pour le 21 et 22 juin avec un pas de temps horaire. Pour initialiser les champs de température dans le sol, des calculs thermo-radiatifs (sans couplage avec Code\_Saturne) sont réalisés pour les 2 jours précédents. La température et l'humidité de l'air imposées en entrée de la veine numériques sont issues des relevés de l'année 2010 de la station Météo-France de l'aéroport de Bouguenais. Une loi puissance représentant la rugosité du milieu urbain autour du parc, est utilisé pour définir le profil de vitesse du vent en entrée de la veine. La vitesse et l'orientation du vent sont fixé arbitrairement à

1,5m/s et Nord-Est (le rafraîchissement produit par le motif est considéré identique quel que soit la direction du vent incident).

## 2. Résultats de simulation des motifs élémentaires

On définit  $\Delta T_{meteo}$ , la différence entre la température moyenne de l'air d'un motif (entre 0 et 6m) par rapport à la température météorologique utilisée en entrée ( Figure 2).



**figure 2.** Différence entre la température de l'air issue du fichier météo et la température moyenne simulée du motif (entre 0 et 6 m d'altitude).

Cette variable permet d'identifier lorsqu'un motif réchauffe l'air ( $\Delta T_{meteo} > 0$ ) et lorsqu'il le refroidit ( $\Delta T_{meteo} < 0$ ). Le motif «boisé dense pelouse» est le seul à être constamment en mode rafraîchissement, les autres motifs ayant un couvert «boisé dense» subissant un léger réchauffement (jusqu'à 0.05°C de 7h à 12h). Seuls les motifs avec des strates hautes «boisée dense» et «boisée» ont des rafraîchissements significativement supérieurs à 0.05°C. Tous les motifs avec pelouse ne chauffent pas plus de 0.05°C. L'utilisation de pelouses seule ne permet pas un réel rafraîchissement. Elle tend donc plutôt à minimiser le réchauffement de l'air, tandis que la présence des arbres permet de réellement rafraîchir l'air.

## 3. Modélisation simplifiée d'un parc urbain

### 3.1. Taux de rafraîchissement d'un motif élémentaire

L'objectif de notre travail est de mettre une place une méthodologie pour caractériser le rafraîchissement induit par un parc en considérant qu'il est constitué d'un ensemble de motifs élémentaires. La diminution de température induite par un parc ne pouvant être considérée comme la somme des modifications de température induites par chaque motif le composant, l'hypothèse faite est que l'air traversant un parc infiniment grand composé d'un seul et même motif tend à se rafraîchir jusqu'à une valeur seuil propre à ce motif (Rodler 2020). Les surfaces étant le lieu des échanges de chaleur avec l'atmosphère, l'air ne peut s'y rafraîchir (ou s'y réchauffer) au-delà de la température de surface du motif. On définit alors le taux de rafraîchissement  $Ra_i$  de la manière suivante :

$$Ra_i = \frac{T_{in_i} - T_{out_i}}{T_{in_i} - T_{s_i}} \quad \text{Équation 1}$$

où  $T_{in_i}$  et  $T_{out_i}$  sont respectivement les températures moyennes de l'air entrant et sortant du motif  $i$ , et  $T_{s_i}$  la température moyenne des surfaces du sol dans ce motif.

### 3.2. Taux de rafraîchissement de n motifs élémentaires identiques

Les résultats des simulations microclimatiques nous ont permis de calculer les taux de rafraîchissement et températures de surfaces de chaque motif pour chaque pas de temps. Pour un enchaînement de  $n$  motifs élémentaires identiques alignés les uns à la suite des autres dans la direction du vent (Figure 3), on considère que  $T_{s_i}$  et  $Ra_i$  sont les mêmes pour l'ensemble des motifs.

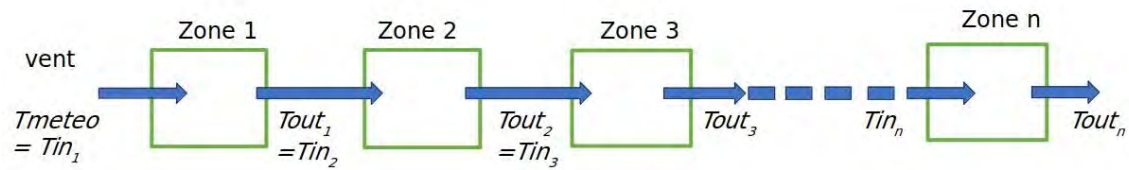


figure 3. Représentation de n motifs élémentaires parcourus successivement par une masse d'air

La température de l'air entrant dans le motif  $n$  est égale à la température de l'air sortant du motif  $n-1$ . On peut alors exprimer ces deux températures grâce à l'équation 2. Par récurrence, la température de l'air sortant du motif  $n$  est exprimée en fonction de la température de l'air entrant dans le premier motif, soit la température mesurée par la station météo (Équation 3).

$$Tout_n = Tin_{n-1}(1 - Ra) + RaTs \quad \text{Équation 2}$$

$$Tout_n = Tmeteo(1 - Ra)^n + (1 - (1 - Ra)^n)Ts \quad \text{Équation 3}$$

En considérant un parc de composition homogène large de 10m, on peut déterminer la température d'air de sortie du parc en fonction de sa longueur et de sa composition pour une heure donnée et une vitesse de vent donnée (Figure 4). Avec un tel méta-modèle, une masse d'air en contact d'une surface de parc entièrement composé d'un parc d'1 km de long entièrement composé de motif « boisé dense pelouse » induirait une diminution de la température de l'air de 12°C.

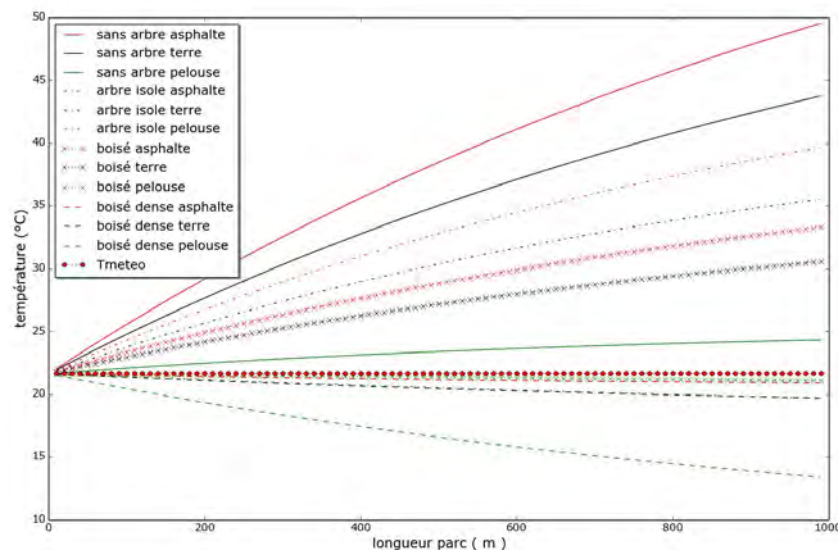


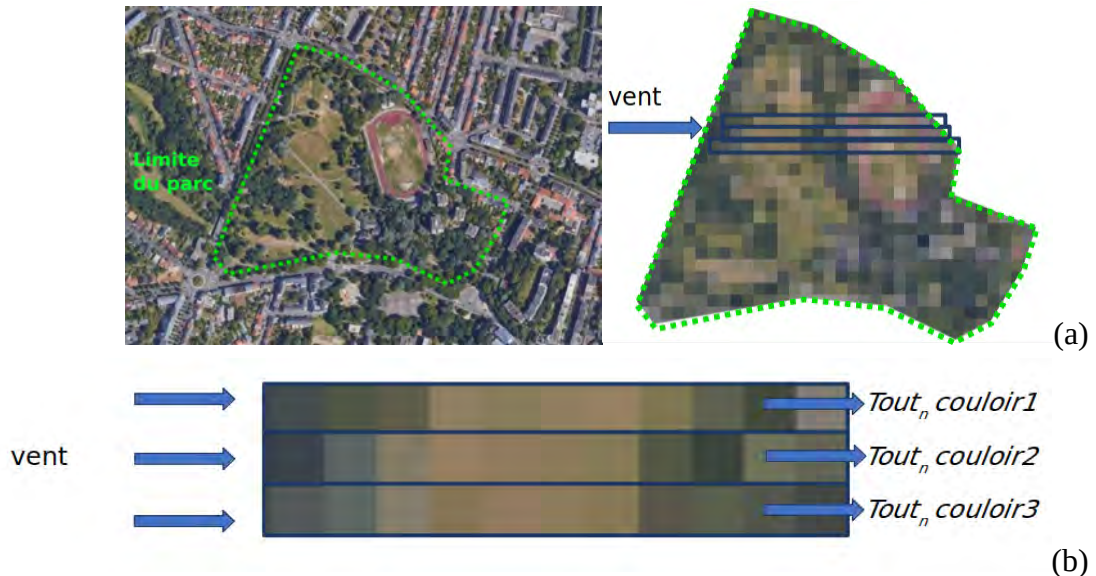
figure 4. Évolution de la température moyenne de l'air (entre 0 et 6 m) sortant d'un parc en fonction de sa longueur pour les différents motifs élémentaires à 12h le 21 juin avec une vitesse de vent de 1,5m/s

## Conclusion et perspectives

Le taux de rafraîchissement pour chaque motif élémentaire a été évalué à partir des résultats de simulations microclimatiques. Ces valeurs sont valables pour des conditions météorologiques qui correspondent à celles du 21 Juin, et une vitesse de vent 1.5 m/s. La suite de ce travail consiste à réaliser des simulations en faisant varier les conditions météorologiques (vitesse de vent, température...) pour construire un abaque de valeurs de taux de rafraîchissement et températures de surface valable pour toutes conditions. Ensuite le travail portera sur la détermination des températures d'air en sortie d'un parc de forme et de composition hétérogène. Nous imaginons le décomposer en couloir de vent de 10m de large pour une direction de vent donnée (cf. Figure 5). Chaque couloir étant composé de n motifs élémentaires, les abaques permettront de calculer un taux de rafraîchissement



moyen et une température de surface moyenne de chaque couloir pour calculer une température d'air sortant du parc en fonction de la direction du vent. Ces considérations impliquent donc que les transferts thermiques et de masse entre couloirs de vent sont négligés, que la modification de vitesse de vent n'est pas considérée dans l'enchaînement des motifs et que le rafraîchissement du motif est identique quelle que soit la direction du vent le traversant.



**figure 5.** (a) Exemple de décomposition d'un parc (parc de Procé à Nantes) en motifs élémentaires et groupement de ces motifs en « couloir de vent » dans la direction du vent et (b) température d'air moyenne sortant de chacun de ces couloirs

### Remerciement :

Nous remercions l'ADEME pour le support financier du projet Coolparks dans le cadre de l'appel à projets MODEVAL URBA 2019. Nous remercions Adrien Vanel, stagiaire ingénieur en simulation, pour sa contribution à l'amélioration des modèles utilisés dans ce projet.

### Bibliographie

- Bodenan P., Bernard J., Morille B., Rodler A., Guernouti S., Gros A.. 2021. *Définition d'une méthodologie permettant la cartographie des parcs et leur classification*. p 55.
- Lewis D., 2016. *Cities leading the way to a better future. State of European Cities Report*. European commission.
- Malys, L. 2012 « Évaluation des impacts directs et indirects des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments ». PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes (France).
- Morille, B., et Musy, M ..2017. « Comparison of the Impact of Three Climate Adaptation Strategies on Summer Thermal Comfort – Cases Study in Lyon, France». *Procedia Environmental Sciences, Sustainable synergies from Buildings to the Urban Scale*, **38** 619-26.
- Rodler, A., Bernard J., Morille B., Bodenan P., Guernouti S. et Musy M.. 2020« CoolParks : aide à la conception de parcs et de formes urbaines pour optimiser le rafraîchissement urbain ». In *33ème colloque de l'association internationale de climatologie*, édité par Université Rennes 2, 595-600. Actes colloque AIC Rennes 2020. Rennes, France.
- Yang, J.,Hu X., Feng, H., et Marvin, S.. 2021 «Verifying an ENVI-Met Simulation of the Thermal Environment of Yanzhong Square Park in Shanghai». *Urban Forestry & Urban Greening* **66**.

## MODÉLISATION DE L'AMBIANCE CLIMATIQUE D'UNE ZONE URBAINE À DIFFÉRENTES ÉCHELLES : CAS DE LA VILLE DE STRASBOURG

Nathalia PHILIPPS<sup>1,3</sup>, Marine GORET<sup>2</sup>, Pierre KASTENDEUCH<sup>1</sup>, Georges NAJJAR<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Icube (UMR 7357), Université de Strasbourg, France (nathalia.philipps@etu.unistra.fr)

<sup>2</sup> Direction des Services Météorologiques, Météo France, France

<sup>3</sup> Eurométropole de Strasbourg, France

**Résumé :** Selon les échelles, différents modèles météorologiques sont régulièrement utilisés pour simuler le climat urbain, sans forcément établir de connexion entre eux. C'est notamment le cas entre les modèles de méso-échelle et de micro-échelle. Une démarche visant à mettre en place une chaîne de simulation reliant la méso-échelle à la micro-échelle est ici proposée. Deux modèles microclimatiques (ENVI-Met et LASER/F) et un système méso-climatique (Méso-NH et SURFEX) sont utilisés en ce sens. Chacun des modèles a bénéficié préalablement d'une phase de validation basée sur les données d'une campagne de mesures. Les premiers résultats confirment la faisabilité et l'intérêt de la démarche tout en soulignant l'apport des différents modèles.

**Mots-Clés :** chaîne de simulation climatique, changement d'échelle, géométrie urbaine, résolution spatiale.

**Abstract :** several meteorological models at multiple spatial scales are commonly used in urban climate studies. However, it doesn't necessarily involve a combination of such models, in particular meso and microscale models. A methodology aiming to acquire a climatic simulation sequence coupling meso and microscale modeling is proposed here. Two microclimatic models (ENVI-Met and LASER/F) and a mesoclimatic system (Méso-NH with SURFEX) are used. Each of these models has been previously validated using meteorological measurements. The first results confirm the interest and workability of the developed procedure and highlight the specific contribution of the different models.

**Keywords :** climatic simulation sequence, scale change, urban geometry, spatial resolution.

### Introduction

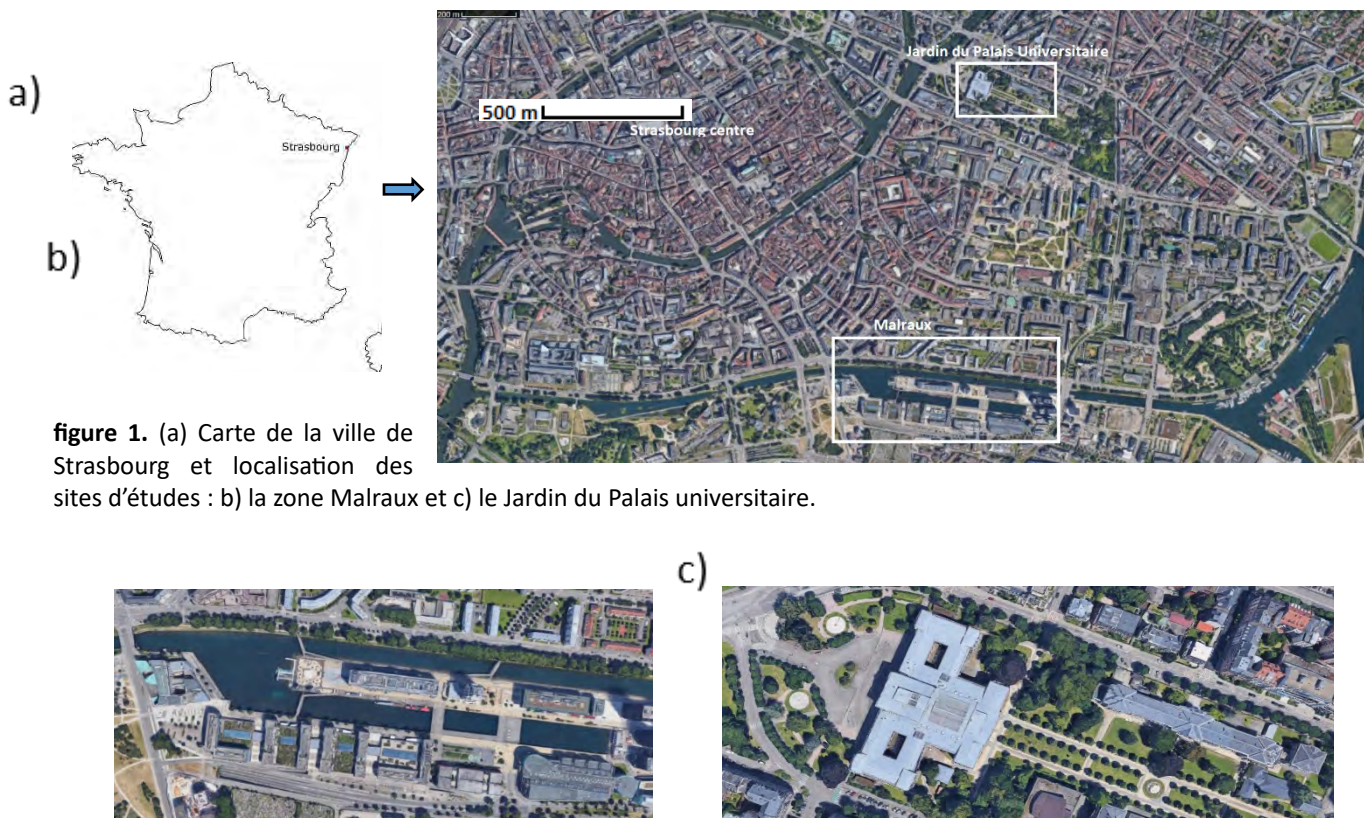
L'augmentation prévue des vagues de chaleur en termes de fréquence, de durée et d'intensité dans les décennies à venir sera associée à de lourdes conséquences environnementales et sanitaires, en particulier en milieu urbain du fait du couplage entre le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) nocturne et l'occurrence d'un important stress thermique diurne (Fenner *et al.*, 2019). Dans ce contexte, les leviers d'action des villes dans la prise en compte de ces problématiques au sein des projets urbains relèvent principalement de la forme urbaine, la végétalisation et l'aménagement. La modélisation climatique présente ainsi un atout considérable pour les urbanistes et aménageurs puisqu'elle permet de quantifier l'impact d'aménagements urbains sur l'ICU et le confort thermique. L'utilisation de nombreux modèles à diverses échelles a permis de démontrer la pertinence des différentes méthodologies employées (Lemonsu *et al.*, 2012 ; Wang *et al.*, 2013 ; Hénon *et al.*, 2012 ; Kastendeuch *et al.*, 2017). Les modèles méso-climatiques sont ainsi très plébiscités, notamment du fait qu'ils parviennent à simuler la ville dans son entièreté, ainsi que les zones rurales à proximité. Or un tel domaine de simulation impliquant nécessairement une résolution spatiale limitée, la ville ne peut y être simulée dans toute sa complexité sous-jacente. Les modèles microclimatiques parviennent quant à eux à un niveau de détails élevé, mais au prix d'une réduction considérable de la taille de la zone modélisée. Une combinaison des atouts respectifs de chacune de ces échelles à travers une chaîne de simulation permettrait de modéliser l'ensemble d'une ville tout en ayant la possibilité d'obtenir des informations détaillées sur les processus opérant à l'échelle d'un quartier ou d'une rue donnée. Cette étude vient compléter les travaux de Kastendeuch *et al.* (2015), son objectif étant de démontrer non seulement la faisabilité, mais aussi l'intérêt d'une telle chaîne de simulation. La présentation des données et outils numériques utilisés pour la mise en place de la procédure est suivie de celle d'une phase de validation des trois modèles utilisés, à savoir le couple Méso NH -



SURFEX (Masson, 2000), ENVI-Met (Bruse et Fler, 1998) et LASER/F (Kastendeuch et Najjar, 2009). Quelques-uns de leurs résultats sont ensuite comparés afin de souligner à la fois la cohérence inter-échelles et surtout l'apport d'informations permis par une chaîne de simulation solide et cohérente.

## 1. Zone d'étude et données

Composée de 33 communes regroupant plus de 500 000 habitants sur une surface de 339,6 km<sup>2</sup>, l'Eurométropole de Strasbourg (EMS) présente un urbanisme concentrique typique des villes européennes de taille moyenne, avec un centre-ville dense et compact entouré de zones moins densément bâties. Située à proximité de l'hypercentre strasbourgeois, la zone Malraux affiche une importante diversité morphologique, son aménagement très minéral coexistant avec une importante surface en eau et quelques espaces davantage végétalisés (Figure 1b). Très fréquentée de par ses nombreuses activités commerciales et culturelles, son choix en tant que site d'études a été décidé conjointement avec les services d'urbanisme de l'EMS qui veulent adapter leurs projets d'aménagement concernant cette zone aux enjeux d'amélioration du confort thermique et de mitigation de l'ICU.



**figure 1.** (a) Carte de la ville de Strasbourg et localisation des sites d'études : b) la zone Malraux et c) le Jardin du Palais universitaire.

Les données d'occupation du sol nécessaires aux modèles microclimatiques sont issues de la chaîne Geoclimate, produites à partir de la BD Topo® V2, ainsi que de la base de données en open data des services géomatiques de l'EMS ([www.data.strasbourg.eu](http://www.data.strasbourg.eu)), qui a également fourni l'ensemble des données de géométrie 3D. Le forçage atmosphérique fourni à Mésoscale est obtenu via le modèle de prévision numérique du temps IFS, du Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT).

Les données d'observation servant à la validation des différents modèles proviennent d'un réseau de stations météorologiques composé d'une vingtaine de sites urbains répartis sur l'ensemble du territoire, ainsi que d'une station rurale de référence située à proximité de l'aéroport d'Entzheim (Philipps *et al.*, 2020).

## 2. Présentation des modèles numériques

Trois modèles différents représentant deux échelles de modélisation distinctes sont utilisés au sein de notre étude. Les simulations à méso-échelle sont ainsi réalisées avec le système de modélisation constitué du couplage entre Méso-NH et SURFEX, pour simuler les échanges entre la surface et l'atmosphère de toute la ville, y compris la zone Malraux. ENVI-Met et LASER/F sont quant à eux des modèles numériques de micro-échelle qui simulent uniquement la zone Malraux, mais qui fonctionnent sur des logiques de calcul différentes. Le premier est non hydrostatique et intègre de ce fait les équations de la mécanique des fluides afin de simuler les écoulements de l'air autour du bâti. Le second est un modèle thermo-radiatif qui recourt à des algorithmes simplifiés afin d'obtenir une approximation des variables climatiques dans les rues, ce qui permet une forte diminution des temps de calcul. Toutes les surfaces du domaine simulé peuvent être fragmentées en triangles (appelés également meshes) dont la superficie peut être choisie. Le bilan d'énergie est calculé en détails pour chacun d'entre eux. (Kastendeuch *et al.*, 2015).

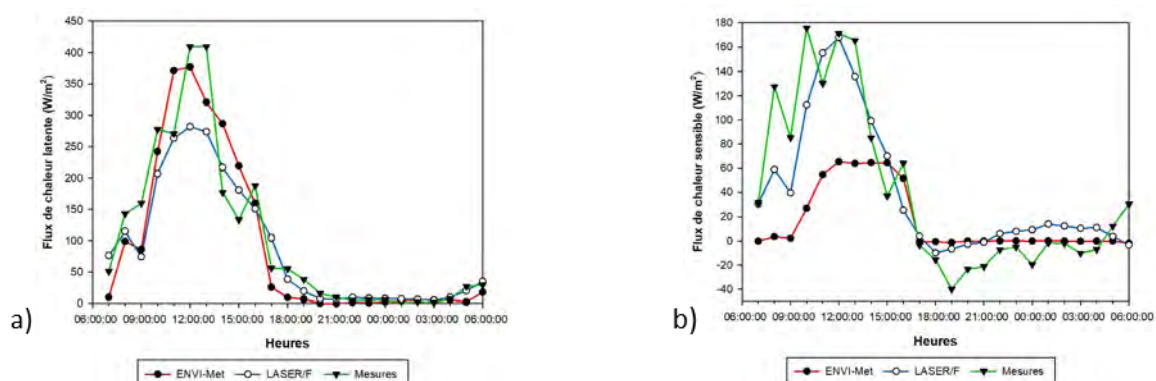


**figure 2.** La zone d'étude strasbourgeoise Malraux modélisée par LASER/F (a) et ENVI-Met (b). Les bâtiments sont en rouge (pour LASER/F) et beige (pour ENVI-Met), les routes en gris foncé (pour LASER/F) et noir (pour ENVI-Met), la végétation en vert et

Le système Méso-NH et SURFEX fonctionne très bien jusqu'à l'échelle hectométrique, mais atteint ses limites lorsqu'on cherche à simuler des résolutions plus fines, la ville y étant représentée de manière trop simplifiée pour permettre d'accéder aux détails de la rue ou du quartier. La chaîne de simulation proposée repose sur une connexion entre méso-échelle et micro-échelle via l'utilisation des résultats de Méso-NH comme conditions aux limites de LASER/F et ENVI-Met. D'une résolution de l'ordre de 10 km, le premier modèle Méso-NH (le modèle-père) fonctionnant à l'échelle synoptique est forcé toutes les six heures par les champs météorologiques d'IFS. Le deuxième modèle Méso NH prend alors le relais à l'échelle mésoclimatique, aboutissant à une résolution atteignant 1 km toutes les cinq minutes. SURFEX, LASER/F et ENVI-Met sont ainsi tous trois directement forcés par les sorties de Méso-NH.

## 3. Phase de validation des modèles

Avant d'être employés sur la zone Malraux, chacun des modèles microclimatiques est passé par une phase de validation. Celle-ci a été réalisée au sein de la zone du Jardin du Palais Universitaire, site dont la configuration se rapproche de celle d'un parc urbain et pour lequel des données issues d'une



campagne de mesures réalisée entre 2013 et 2017 sont disponibles (Najjar *et al.*, 2015). L'originalité de cette phase de validation réside dans le fait qu'elle ne repose pas uniquement sur les variables traditionnelles d'évaluation de la performance des modèles numériques que sont la température de l'air et l'humidité relative. Elle s'étend en effet aux données de flux, notamment aux flux de chaleur sensible et latente, ce qui permet d'évaluer pleinement la fiabilité des modèles à travers certaines de leurs variables de sortie et non via une variable de base présente dans les fichiers de forçage comme la température de l'air. Les résultats de la phase de validation sont présentés pour les flux de chaleur sensible et latente lors de la journée du 7 juillet 2016 (Figure 2), choisie car étant une journée estivale de beau temps (vent faible couplé à un fort ensoleillement).

**figure 3.** Comparaison entre les sorties de LASER/F et ENVI-Met avec les mesures de terrain effectuées au Jardin du Palais U du 7 juillet 2016 à 7h au 8 juillet 2016 à 6h (TU) pour a) le flux de chaleur latente et b) le flux de chaleur sensible.

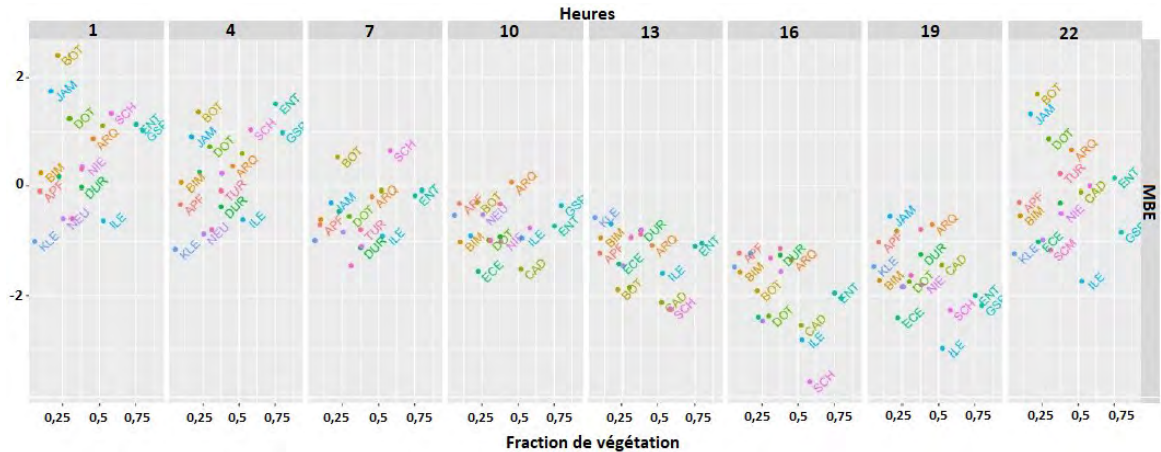
Les résultats soulignent de nettes différences entre les deux modèles microclimatiques. Les courbes du flux de chaleur latente (Figure 3a), ainsi que les indicateurs statistiques (Tableau 1), mettent en évidence une bonne corrélation avec les mesures, aussi bien pour LASER/F que pour ENVI-Met. En revanche, ce dernier a davantage de difficultés à simuler le flux de chaleur sensible (Figure 3b). La courbe ENVI-Met diffère aussi bien de celle des mesures que de celle de LASER/F, et les indicateurs statistiques ne font que confirmer ce manque de précision notable. Au vu de l'importance des variables du bilan d'énergie dans la mise en place de l'ICU, la difficulté d'un modèle à réussir à les modéliser incite à la prudence quant à l'interprétation de ses sorties. LASER/F quant à lui présente des résultats nettement plus convaincants, tant sur le comportement des variables de flux (Figure 3) que sur leurs valeurs (Tableau 1).

**Tableau 1.** Indicateurs statistiques évaluant la validation du flux de chaleur sensible (FS) et du flux de chaleur latente (FLE). Les variables utilisées correspondent au coefficient de corrélation ( $R^2$ ), à l'erreur quadratique moyenne (RMSE), à l'erreur absolue moyenne (MAE), à l'erreur de biais moyenne (MBE) et au degré de liberté (dr).

	$R^2$		RMSE		MAE		MBE		dr	
	FLE	FS	FLE	FS	FLE	FS	FLE	FS	FLE	FS
<b>ENVI-Met</b>	0,87	0,49	47,82	57,21	34,73	38,73	-9,05	-23,7	0,84	0,57
<b>LASER/F</b>	0,89	0,82	48,71	29,42	30,74	23,99	-14,71	-0,4	0,84	0,76

Dans le cadre d'une étude menée conjointement par l'Agence Régionale de Santé, l'EMS et Météo France (Goret, 2021), le système Mésos-NH/SURFEX a été validé sur l'EMS à l'aide des données d'observation décrites en section 1 pour la période allant du 28 juin 2015 au 3 juillet 2015 (Figure 4). Le biais moyen du modèle par tranche de trois heures est généralement compris entre  $-2^{\circ}\text{C}$  et  $+2^{\circ}\text{C}$ . Une partie de ces différences entre modèle et observations s'explique par le fait que la température moyenne simulée par Mésos-NH/SURFEX concerne une zone de  $1000\text{ m}^2$ , tandis que les mesures sont représentatives de l'environnement immédiat de la station (Goret, 2021). Une validation de Mésos-NH/SURFEX avait déjà été menée à Strasbourg à l'aide de données acquises en 2002 lors d'une campagne de mesures menée dans le cadre du projet RECLUS. Les résultats ont été comparés aux mesures pour un grand nombre de variables au sol et en altitude, et étaient pour la plupart concordants avec les mesures (Kastendeuch et Najjar, 2009).

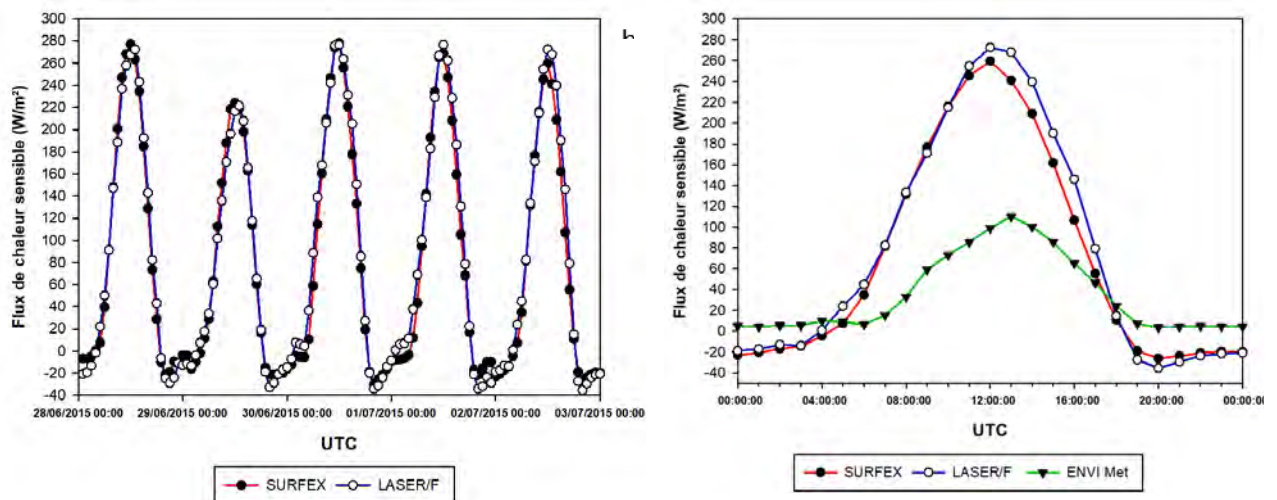




**figure 4.** Erreur moyenne de biais (MBE) de température entre le modèle Meso-NH/SURFEX et les observations issues des stations du réseau météorologique (Philippis *et al.*, 2020), par tranche horaire de trois heures, du 28 juin au 3 juillet 2015 en fonction de la fraction de végétation de chaque station. A chaque point et/ou acronyme est associée une station. Un biais positif signifie que la température modélisée est plus élevée que celle observée (Goret, 2021).

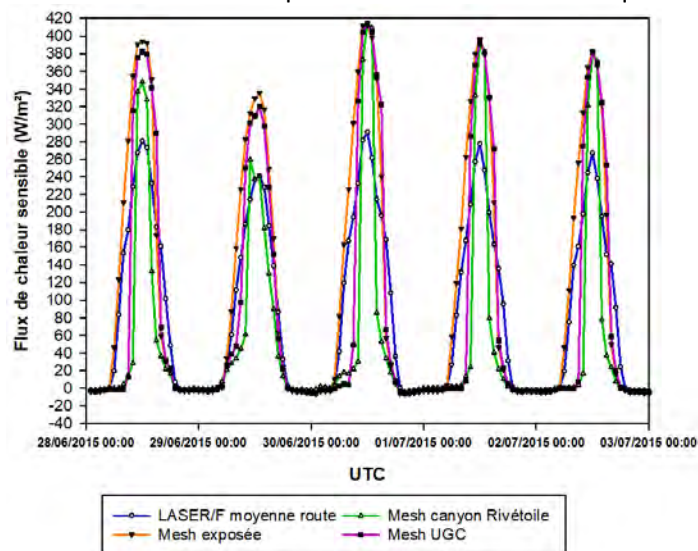
#### 4. Résultats

Les résultats sont divisés en deux parties : les premiers, à l'échelle de la maille (Figure 5), ont pour objectif de vérifier la cohérence entre les modèles microclimatiques et le modèle mésoclimatique. Une fois cela acquis, il s'agit d'illustrer le véritable intérêt de la chaîne de simulation, à savoir la possibilité d'obtenir un focus sur n'importe quel site de la maille simulée et, de ce fait, obtenir des informations qui auraient été inaccessibles à la résolution hectométrique. Le flux de chaleur sensible de SURFEX est ainsi comparé avec celui de LASER/F sur toute la période de simulation choisie (du 28 juin 2015 minuit au 3 juillet 2015 minuit) et avec celui d'ENVI-Met seulement lors de la dernière journée (du 2 juillet 2015 minuit au 3 juillet 2015 minuit) du fait de temps de calcul colossaux lorsqu'on simule plus de deux journées d'affilée sur une zone de taille importante. Les résultats confirment la tendance déjà observée lors de la phase de validation : les sorties de LASER/F sont plutôt en accord avec celles de SURFEX, les courbes des deux modèles étant presque confondues (Figure 5a). À l'opposé, ENVI-Met ne parvient pas à reproduire correctement la variable (Figure 5b), même si le motif de la courbe est légèrement plus cohérent par rapport aux autres que celui observé lors de la phase de validation.



**figure 5.** (a) Flux de chaleur sensible modélisé par SURFEX et LASER/F sur la période du 28 juin 2015 à 00h au 3 juillet 2015 à 00h (TU) pour la zone Malraux. (b) Flux de chaleur sensible modélisé par SURFEX, LASER/F et ENVI-Met du 2 juillet 2015 à 00h au 3 juillet 2015 à 00h (TU) pour la zone Malraux.

La zone Malraux présente une forte hétérogénéité en termes de géométrie urbaine, ce qui la rend idéale pour mettre en évidence l'intérêt d'une chaîne de simulation puisqu'une telle diversité du tissu urbain ne peut être reproduite à méso-échelle. L'ajout d'un modèle fonctionnant à micro-échelle apporte ainsi un degré de précision supplémentaire, nécessaire lors de l'analyse des variations d'un paramètre à une échelle plus fine que celle du quartier. Afin d'illustrer la diversité comportementale d'une variable à l'échelle microclimatique, plusieurs triangles individuels LASER/F de type « route » et issus de divers sites de Malraux (bord de la Presqu'île, intérieur d'un canyon situé entre deux bâtiments du centre commercial Rivétoile, proximité du bâtiment de l'UGC) voient leur flux de chaleur sensible respectif comparé avec le flux de chaleur sensible moyen de l'ensemble de la route (Figure 6). La courbe bleue, pourtant supposée être représentative de la route sur la totalité de la zone Malraux, se distingue nettement des trois autres, celles-ci exposant des valeurs diurnes beaucoup plus élevées. Les courbes issues des sites particuliers de Malraux (en orange, vert et mauve) présentent des disparités notables au niveau de leur motif, notamment en période matinale, même si une homogénéisation des maxima survient à partir de la troisième journée simulée. Ces résultats s'expliquent essentiellement par la diversité de la géométrie des bâtiments, qui entraîne des alternances complexes de zones ensoleillées et de zones d'ombre. Impossibles à obtenir à méso-échelle, ils mettent en évidence l'apport d'informations inédites fourni par un modèle microclimatique.



**figure 6.** Flux de chaleur sensible LASER/F « route » issu de plusieurs sites de la zone Malraux sur la période du 28 juin 2015 à 00h au 3 juillet 2015 à 00h (TU).

## Conclusion

Au terme de cette étude, il y a lieu de retenir la faisabilité et l'intérêt de la mise en place d'une chaîne de simulation reliant les échelles mésoclimatique et microclimatique. Cette dernière, testée sur une zone urbaine à enjeux de Strasbourg, a souligné pour la variable du flux de chaleur sensible à la fois la cohérence entre SURFEX et LASER/F à l'échelle de la maille et l'existence d'importantes variations au sein de cette dernière par rapport à la moyenne, justifiant l'intérêt d'un focus ne pouvant être apporté que par les modèles microclimatiques. Les résultats apparaissent pertinents et encourageants pour LASER/F, mais ne sont guère convaincants concernant ENVI-Met. Dès la phase de validation, les difficultés du modèle à simuler la variable considérée au sein de cette analyse ont été mises en évidence. Les résultats n'étant guère restreints au seul flux de chaleur sensible, il conviendra de poursuivre ces analyses avec d'autres variables de manière plus approfondie, afin de se prononcer définitivement sur la pertinence de l'utilisation d'ENVI-Met au sein de cette étude, mais aussi et surtout de continuer à exploiter tout le potentiel de cette chaîne de simulation.

**Remerciements** : les auteurs tiennent à remercier Météo France et ATMO Grand Est, ainsi que le service géomatique de l'Eurométropole de Strasbourg pour l'accès aux diverses données ayant servi à la réalisation de cette étude.

## **Bibliographie**

- Bruse M., Fleer H., 1998 : Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model. *Environmental Modelling & Software*, **13**, 3-4, 373-384.
- Fenner D., Holtmann A., Meier F., Langer I., Scherer D., 2019. Contrasting changes of urban heat island intensity during hot weather episodes. *Environmental Research Letters*, **14**, 12p.
- Goret M., 2021. Diagnostic de surchauffe Eurométropole de Strasbourg. Rapport d'étude, Météo France, 37p.
- Hénon A., Mestayer P., Lagouarde J.-P., Voogt J., 2012 : An urban neighborhood temperature and energy study from the CAPITOU experiment with the SOLENE model – Part 1 : analysis of flux contributions. *Theoretical and Applied Climatology*, **110**, 177-196.
- Kastendeuch P.P., Najjar G., 2009 : Simulation and validation of radiative transfers in urbanised areas. *Solar Energy*, **83**, 333-341.
- Kastendeuch P.P., Najjar G., 2015 : Une simulation des interactions ville-atmosphère à différentes échelles : application sur Strasbourg. *Climatologie*, **12**, 44-64.
- Kastendeuch P.P., Najjar G., Colin J., 2017 : Thermo-radiative simulation of an urban district with LASER/F. *Urban Climate*, **21**, 43-65.
- Lemonsu A., Masson V., Shashua-Bar L., Erell E., Pearlmutter D., 2012 : Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geoscientific Model Development*, **5**, 1377-1393.
- Masson V., 2000 : A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-layer Meteorology*, **118**, 477-501.
- Najjar G., Colin J., Kastendeuch P., Ngao J., Saudreau M., Landes T., Ameglio T., Luhahe R., Guillemin S., Schreiner G., Kleinpeter J., Nerry F., 2015. *A three years long fieldwork experiment to monitor the role of vegetation on the urban climate of the city of Strasbourg, France*. International conference on urban climate, 12<sup>th</sup> symposium, Toulouse, France, 6p.
- Philipps N., Kastendeuch P.P., Najjar G., 2020. Analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'ICU à Strasbourg. *Climatologie*, **17**, 11p.
- Richard Y.,
- Wang Z.-H., Bou-Zeid E., Smith J.A., 2013 : A coupled energy transport and hydrological model for urban canopies evaluated using a wireless sensor network. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **139**, 675, 1643-1657.

## EXPLORATION DES VARIATIONS THERMIQUES DIURNES DANS UNE AIRE URBAINE DE MILIEU TEMPÉRÉ SEMI-COTINENTAL À L'AIDE DES DONNÉES DE TEMPÉRATURE DE SURFACE TERRESTRE ECOSTRESS

Sébastien LEBAUT<sup>1</sup>, Nassima HASSANI<sup>1</sup>, Gilles DROGUE<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LOTERR, UFR SHS-Metz, Île du Saulcy, 57045 METZ cedex01, [sebastien.lebaut@univ-lorraine.fr](mailto:sebastien.lebaut@univ-lorraine.fr), [nassima.hassani@univ-lorraine.fr](mailto:nassima.hassani@univ-lorraine.fr), [gilles.drogue@univ-lorraine.fr](mailto:gilles.drogue@univ-lorraine.fr)

**Résumé :** L'étude porte sur l'observation et la caractérisation quantitative des îlots de chaleur de l'aire urbaine de Metz Métropole à partir des données de température de surface (Ts) provenant du capteur infrarouge thermique ECOSTRESS. Ce capteur placé sur l'ISS a la capacité d'imager les températures de surface au fil du cycle diurne à une résolution spatiale de 70 m. L'étude se focalise sur des épisodes de mai à septembre enregistrés de 2018 à 2021. Les valeurs de Ts sont confrontées aux données de température de l'air enregistrées par un réseau de 28 stations météorologiques, puis les cartographies de température de surface sont analysées au regard des classes de LCZ. Les résultats obtenus participent à la compréhension des effets des paysages urbains sur l'hétérogénéité spatiale des températures de surface.

**Mots-Clés :** ICU ; ECOSTRESS ; température de surface ; Metz Métropole

**Abstract :** The study concerns the observation and quantitative characterisation of heat islands in the Metz Métropole urban area using surface temperature (Ts) data from the ECOSTRESS thermal infrared sensor. This sensor placed on the ISS has the capacity to image surface temperatures over the diurnal cycle at a spatial resolution of 70 m. The study focuses on May-September episodes recorded from 2018 to 2021. The Ts values are compared with air temperature data recorded by a network of 28 meteorological stations, and then the surface temperature maps are analysed with respect to LCZ classes. The results obtained contribute to the understanding of the effects of urban landscapes on the spatial heterogeneity of surface temperatures.

**Keywords :** ICU ; ECOSTRESS ; surface temperature ; Metz Metropole

### Introduction

L'urbanisation a pour conséquence la transformation des paysages naturels en surfaces imperméables ce qui conduit à une modification importante de l'albédo, des propriétés thermiques des surfaces et de l'humidité des aires urbaines (Mackey *et al.*, 2012). Cela induit une température plus élevée des villes par rapport à leur environnement. Ce phénomène, connu sous la notion d'îlot de chaleur urbain (ICU) (Oke, 1982) est observé dans de nombreuses villes à travers le monde (Jones *et al.*, 2008) et peut altérer le climat régional, augmenter la consommation d'énergie et d'eau et accroître la mortalité lors de vagues de chaleur (Larsen, 2015). La compréhension de l'ICU est donc à la fois un enjeu environnemental et de santé public pour lequel l'élaboration de mesures d'atténuation nécessite une investigation poussée dans le cadre d'une démarche scientifique. L'intensité de l'ICU, habituellement quantifiée par la différence entre la température d'une aire urbaine et celle de son environnement rural, peut être répartie en un ICU de la canopée urbaine caractérisé par la température de l'air (Ta) enregistrée par des stations météorologiques et un ICU de surface déterminé à partir des températures de surface (Ts) dérivées des mesures faites par des capteurs embarqués à bord de satellites (Chang *et al.*, 2021). Les mesures de la Ta ne peuvent s'appuyer que sur un faible nombre de stations si bien que les Ts, observées à l'échelle régionale voire globale et de façon répétitive sont des données largement utilisées. Cependant, elles étaient jusqu'à récemment enregistrées par des satellites d'orbite polaire n'autorisant qu'une ou deux acquisitions par jour. Il était donc impossible de reconstituer l'ICU de surface sur un cycle diurne ou par des satellites géostationnaires dont la résolution spatiale d'ordre kilométrique n'est pas adaptée à une application sur une aire urbaine. Le

capteur ECOSTRESS embarqué à bord de l'ISS en 2018, dont l'orbite est basse (400 km) et non polaire, rend possible l'acquisition de données de bonne résolution spatiale à n'importe quelle heure du jour et de la nuit et permet ainsi d'échantillonner le cycle diurne des Ts et ses contrastes spatiaux. Dans cette communication, sur la base des températures issues de l'instrument ECOSTRESS, nous identifions le modèle spatial et l'évolution temporelle de la gamme de températures diurnes sur la métropole de Metz située en région Grand-Est, dans le quart nord-est de la France (49° 07' N, 6° 40' E). Elle compte environ 220 000 habitants (Insee, 2016) répartis dans 44 communes et s'étend sur 306 km<sup>2</sup>. La période scrutée est de mai à septembre car elle est la plus susceptible de présenter de fortes chaleurs et ainsi de mettre en contraste tant les variations spatiales que temporelles.

## 1. Données et méthodes

### 1.1. Les données ECOSTRESS

Dans le cadre de cette étude, les données ECOSTRESS, issues d'une mission récente de la NASA-JPL dont l'objectif est de mesurer la température des plantes et comprendre leur stress lié à l'évaporation (Silvestri *et al.*, 2020), sont mobilisées. Lancée en juin 2018 à bord de l'ISS et devenu opérationnel en juillet 2018, le capteur thermique comporte 5 bandes spectrales entre 8,29 et 12,09  $\mu\text{m}$ . ECOSTRESS a une résolution native de 69 m x 38 m au nadir mais ses produits sont rééchantillonnés à 70 m x 70 m. La précision et l'incertitude des produits de température de surface (LST 2) rapportée est respectivement de 0,15 K et 0,5 K à 300 K (Hook *et al.*, 2020).

Les requêtes relatives à la période et l'aire géographique ont été faites dans l'interface "*Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples*" (AppEARS) du "*Land Processes Distributed Active Archive Center*" (LP DAAC). Sur les plusieurs centaines d'images remontées par la requête, après un travail de filtrage tenant compte de la qualité et de la couverture nuageuse, nous avons retenu 47 images sur la période de mai à septembre pour les années de 2018 à 2021 (tab.1).

**Tableau 1.** Images ECOSTRESS retenues, classées selon le moment de la journée.

lever soleil	2h après lever soleil	4h après lever soleil	soleil Zénith	3h après zénith	fin après-midi	coucher soleil	nuit
2019_06_26 à 06h21'54"	2018_09_01 à 08h41'58"	2019_08_26 à 10h06'34"	2018_08_22 à 12h31'54"	2020_06_02 à 15h37'38"	2018_07_30 à 17h58'26"	2019_07_19 à 21h53'56"	2018_09_18 à 02h00'25"
2019_06_28 à 06h19'29"	2019_06_30 à 07h53'34"	2020_06_22 à 10h58'26"	2019_06_19 à 12h08'41"	2020_05_30 à 16h24'18"	2019_07_25 à 18h34'55"	2018_09_17 à 22h47'10"	2019_07_02 à 04h38'01"
2019_07_04 à 06h12'57"	2019_07_02 à 07h51'41"	2020_06_23 à 10h10'23"	2020_08_20 à 11h25'24"	2020_07_31 à 15h59'05"	2020_05_25 à 18h46'27"	2020_07_20 à 23h08'15"	2019_07_03 à 03h47'49"
2020_06_23 à 06h56'26"	2019_08_22 à 08h30'57"	2021_06_13 à 10h05'11"	2020_08_09 à 12h04'26"	2020_08_05 à 16h51'46"	2020_05_25 à 17h58'43"		2020_07_05 à 05h26'13"
2019_08_26 à 06h52'41"	2019_08_23 à 07h41'55"	2020_06_24 à 09h22'01"	2020_08_07 à 13h39'38"	2021_05_30 à 16h18'42"	2020_07_27 à 17h33'17"		2020_09_12 à 02h50'14"
	2019_08_31 à 07h39'26"	2020_06_26 à 09h23'46"	2021_06_01 à 14h43'56"		2020_05_29 à 17h12'06"		
	2020_08_20 à 08h11'26"	2019_08_27 à 09h17'41"			2021_05_31 à 18h45'13"		
					2021_07_20 à 20h16'08"		
					2021_07_21 à 19h29'24"		

### 1.2. Les données de température

Comme phénomène physique à la base du diagnostic de l'ICU, la température de l'air, caractéristique de l'ambiance climatique de la couche de canopée urbaine, est mesurée dans de nombreux protocoles de recherches sur le phénomène ICU (Dubreuil *et al.*, 2021). Dans Metz Métropole celle-ci est mesurée par les stations du Réseau de Mesures Thermo-Hygométriques de l'agglomération de Metz (REMTAM) constitué de 28 stations météorologiques légères (abri Davis + sondes connectées de type HOBO) (Hassani et Drogue, 2020).

### 1.3. Les "Local Climate Zone"

*Local Climate Zone* (LCZ) est une classification internationale mise au point par Stewart et Oke (2012) visant à construire une typologie climatique urbaine à l'échelle du quartier. Cette typologie s'appuie sur une division logique du territoire selon une classification utilisant plusieurs paramètres influençant le climat (indicateurs quantitatifs concernant l'exposition, la rugosité, la couverture du sol, la hauteur des bâtiments, la densité, la typologie urbaine, etc.). La classification LCZ retenue repose sur



une description du paysage urbain en 17 classes (10 classes “bâties” ou “LCZ construites”, numérotées de 1 à 10 et 7 classes “naturelles” ou “LCZ non construites” nommées de A à G).

La carte LCZ ci-après (fig. 1) a été réalisée en suivant la méthode WUDAPT (World Urban Database and Portal Tool) initiée en 2012. Cette méthode s'appuie sur la classification semi-automatique des irradiances d'images satellitaires pour identifier les LCZ, sur la base de zones d'entraînement définies par l'utilisateur et numérisées avec le logiciel Google Earth. Chaque zone d'entraînement correspond à une classe LCZ d'un type particulier (Bechtel et Daneke, 2012 ; Brousse *et al.*, 2016). La carte a été générée à l'aide du logiciel SAGA GIS (System for Automated Geoscientific Analyses) en utilisant une image Landsat 8 (09/04/2020) et les données de zones d'entraînement.

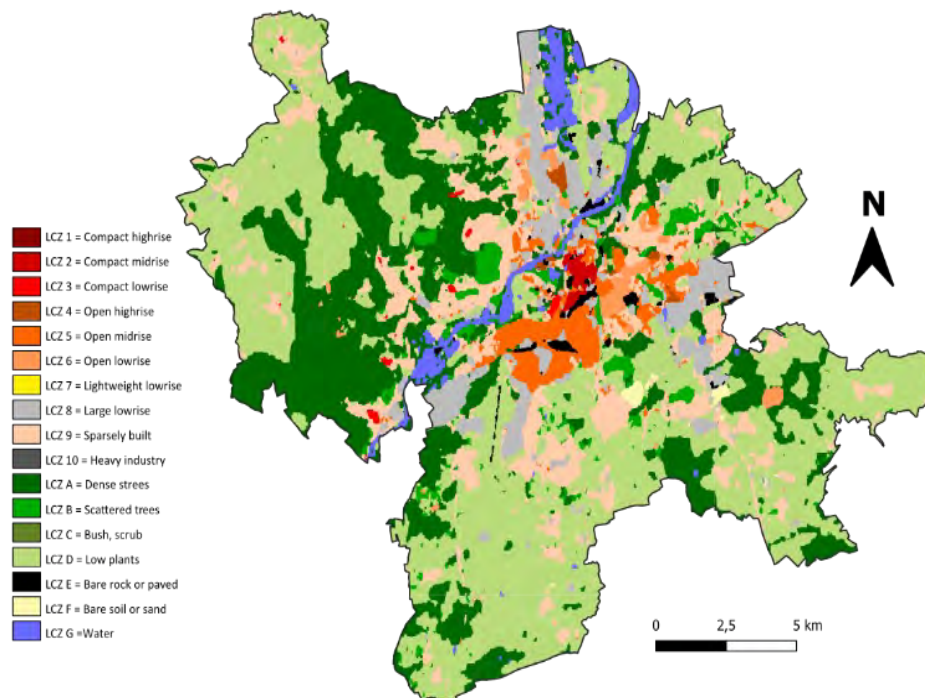


figure 1. Carte des Local Climate Zones (LCZ) de l'Eurométropole de Metz.

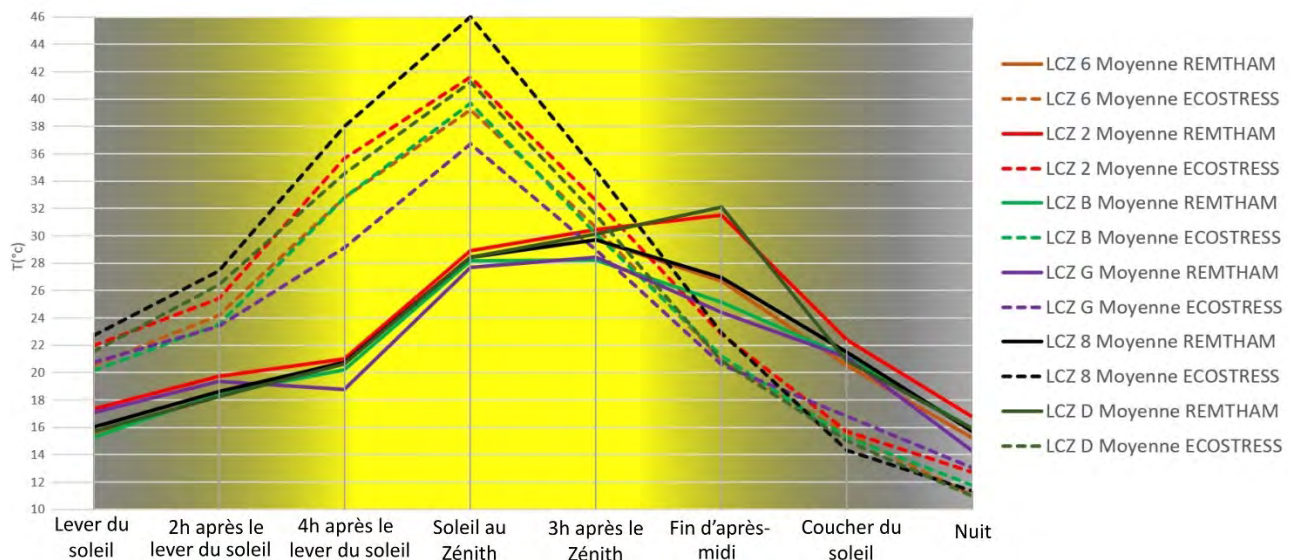
## 2. Résultats

### 2.1. Courbe des températures de l'air (Ta) et de surface (Ts)

Pour analyser les Ta et les Ts à différents moments de la journée, les températures moyennes ont été calculées à partir des images disponibles (tab.1) et confrontées aux températures de l'air observées par le réseau REMTHAM aux mêmes moments. Ces valeurs ont été calculées pour différentes LCZ (fig. 2). Le cycle diurne des Ta et Ts, avec l'alternance du jour et de la nuit mais aussi au cours de la journée est effectivement mesuré. Le premier constat est le déphasage entre les courbes de Ta et Ts. Les Ts sont directement calées sur l'irradiation solaire avec des températures maximales, quelles que soient les LCZ, lorsque le soleil est au « zénith » (fig. 2) et minimales durant la nuit. En revanche les Ta maximales sont mesurées au moins 3 heures après le midi solaire. On note donc ici l'inertie thermique de l'air. Cette inertie différentielle entre Ta et Ts est le second point marquant. Les Ts sont minimales durant la nuit et augmentent dès que le soleil éclaire les surfaces alors que les températures de l'air sont minimales à ce moment. Cette inertie se traduit également par l'amplitude thermique diurne ; d'une trentaine de degrés pour les Ts, elle est de la moitié pour les Ta.

En ce qui concerne les classes LCZ, les résultats indiquent que la classe "zone d'activités" (LCZ 8) est celle qui affiche les températures de surface les plus élevées, vient ensuite la classe "centre-ville" (LCZ 2). En revanche, lorsque l'on s'intéresse aux températures de l'air, c'est l'inverse qui ressort : la classe "centre-ville" est celle qui affiche les températures les plus élevées car la densité urbaine empêche la circulation de l'air. A l'inverse, la classe "points d'eau" (LCZ G) est celle qui affiche les températures les plus basses en journée, mais cela s'inverse la nuit du fait de l'inertie thermique de l'eau : les températures de surface au niveau de cette classe deviennent les plus élevées à partir du coucher de soleil.

Comme l'ont déjà montré de nombreux auteurs, il n'y a pas de corrélation entre les Ts et les Ta, si ce n'est pour les températures de nuit pour des types de temps calme. Néanmoins la connaissance des températures de surface reste très importante non seulement pour obtenir les conditions limites de l'atmosphère mais également car elles traduisent l'ambiance thermique, la température ressentie par la population, en fonction des différents états de surface.

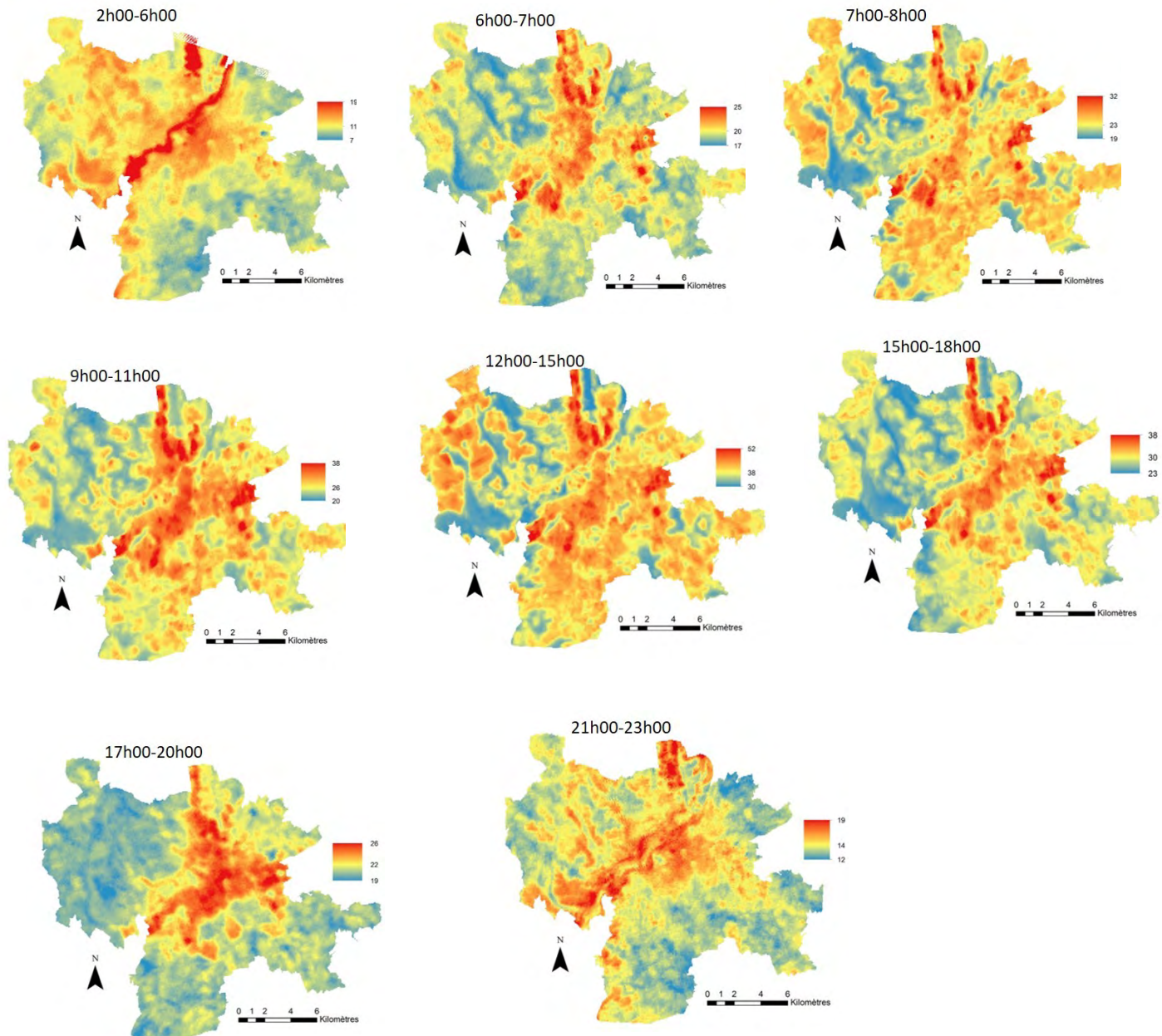


**figure 2.** Moyennes des températures de l'air (REMTHAM) et de surface (ECOSTRESS) selon les classes LCZ (2, 6, 8, B, D et G) pour la période allant de mai à septembre (années de 2018 à 2021).

### 2.1. Organisation spatiale des Ts

Les cartes (fig.3) sont réalisées à partir des valeurs moyennes calculées par pixel selon les plages horaires consignées dans le tableau 1. L'amplitude thermique diurne (fig.4) a été calculée comme la différence entre les Ts moyennes de 12-15h UTC et celles de 02-06h UTC.

On retrouve les contrastes thermiques diurnes ( $\Delta T^{\circ}\text{C}$ ) les plus faibles, de l'ordre de  $12^{\circ}\text{C}$ , sur les secteurs associant végétation et masse d'eau conséquentes (LCZ G) sous la forme de gravières environnées d'arbres tels qu'on les trouve au nord du territoire Metz Métropole en rive gauche de la Moselle et au sud en rive droite. La Moselle, large d'une centaine de mètres, présente des  $\Delta T^{\circ}\text{C}$  plus marqués, compris entre  $17^{\circ}\text{C}$  pour les secteurs les plus profonds et  $23^{\circ}\text{C}$  pour les secteurs peu profonds dans sa traversée de la ville de Metz. A noter que le plan d'eau de Metz d'une surface de 10,5 ha a un  $\Delta T^{\circ}\text{C}$  de  $17^{\circ}\text{C}$ .



**figure 3.** Organisation spatiale des Ts (°C) pour différents moments de la journée.

Ces entités hydrographiques au sens large sont les milieux les plus chauds la nuit (fig. 3). Les espaces boisés (LCZ A et B), essentiellement situés à l'ouest du territoire présentent des  $\Delta T^{\circ}\text{C}$  de l'ordre de  $17^{\circ}\text{C}$  ; leur Ts maximale n'excède pas  $30^{\circ}\text{C}$ . Les Ts maximales des secteurs agricoles (LCZ D) jouxtant ces bois, peuvent dépasser les  $40^{\circ}\text{C}$ , pour des  $\Delta T^{\circ}\text{C}$  de plus de  $30^{\circ}\text{C}$ . Ceci tient au fait que sur la période investiguée certaines parcelles sont dépourvues de végétation ; ces terrains s'échauffent dès le lever du soleil. Les  $\Delta T^{\circ}\text{C}$  les plus marqués, de l'ordre de  $35^{\circ}\text{C}$ , caractérisent les secteurs d'activités commerciales et industrielles (LCZ 8 et E) caractérisées par de grande surface en bitume et métal (parkings et toits). Ces surfaces présentes au nord, à l'est et au sud de Metz s'échauffent dès le lever du soleil et peuvent atteindre une Ts supérieure à  $50^{\circ}\text{C}$ . L'habitat groupé, que cela soit au centre de la ville de Metz ou dans les villages alentour (LCZ 2 et 3) présente un  $\Delta T^{\circ}\text{C}$  de  $29^{\circ}\text{C}$  ; mais dès que l'habitat devient moins dense (LCZ 4, 5, 6 et 9), notamment en périphérie de la ville de Metz, l'amplitude thermique diurne tombe à  $27^{\circ}\text{C}$ . Les Ts maximales en habitat groupé atteignent  $43^{\circ}\text{C}$  mais tombent à  $40^{\circ}\text{C}$  pour les moins denses.



On peut noter que la végétation en centre-ville, qu'elle soit en bordure d'eau (canaux, Moselle, plan d'eau) ou le fait de parc urbain a une température maximale de l'ordre de 38°C pour un  $\Delta T^{\circ}\text{C}$  de 25°C.3

## Conclusion

L'analyse des données de température de surface et de l'air met en évidence un contraste thermique conséquent sur le territoire de Metz Métropole en fonction des types d'occupation du sol. Les caractéristiques physiques des surfaces ainsi que le degré de densité du bâti expliquent la configuration spatiale des champs thermiques.

Les données de températures de surface et de l'air sont complémentaires pour contribuer à la connaissance de l'ICU sur un territoire. Si cette dernière caractérise mieux l'ambiance climatique dans laquelle évolue la population, la température de surface acquise par le capteur ECOSTRESS a apporté un nouvel éclairage sur le cycle thermique diurne à l'échelle de Metz Métropole. Il serait néanmoins intéressant de mener une comparaison de ces valeurs avec celle issues d'autres capteurs disposant d'une résolution plus fine, dans le but d'augmenter encore la précision de la cartographie des températures de surfaces.

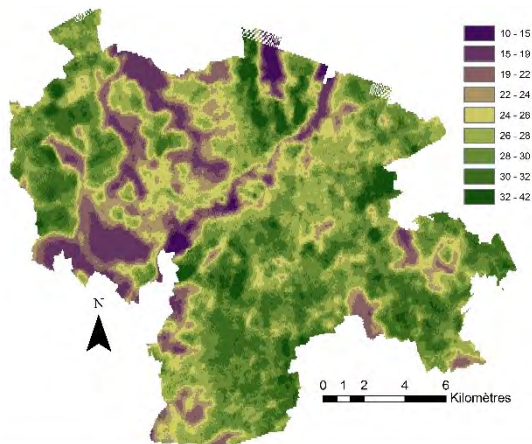


figure 4. Amplitude thermique diurne (T°C)

**Remerciement :** Ce travail a bénéficié du soutien technique et de l'accompagnement de Metz Métropole.

## Bibliographie

Bechtel B., Pesaresi M., See L., Mills G., Ching J., Alexander PJ, Feddema JJ, Florczyk AJ, Stewart I., 2016 : Towards consistent mapping of urban structure-global human settlement layer and local climate zones. *ISPRS-Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, **41**, pp. 1371-1378

Brousse O., Martilli A., Foley M., Mills G., Bechtel B., 2016 : WUDAPT, an efficient land use producing data tool for mesoscale model ? Integration of urban LCZ in WRF over Madrid. *Urban Clim.*, **17**, pp. 116-134

Chang Y., Xiao J., Li X., Frolking S., Zhou D., Schneider A., Weng Q., Yu P., Wang X, Li X., Liu S., Wu Y., 2021 : Exploring diurnal cycles of surface urban heat island intensity in Boston with land surface temperature data derived from GOES-R geostationary satellites. *Science of The Total Environment*, Volume **763**, 144224.

Dubreuil V., Foissard X., Nabucet J., Thomas A., Quénot H., 2020 : Fréquence et intensité des îlots de chaleur à rennes : bilan de 16 années d'observations (2004-2019). *Climatologie*, **17**, 6.

Hassani N., Drogue G., 2020 : Mesure et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain dans l'aire urbaine de Metz Métropole : premiers résultats de la campagne de mesure 2019. *Climatologie*, **17**, 8.

- Hook S. J., Cawse-Nicholson K., Barsi J., Radocinski R., Hulley G., Johnson WR., Rivera G., Markham B., 2020 : In-Flight Validation of the ECOSTRESS, Landsats 7 and 8 Thermal Infrared Spectral Channels Using the Lake Tahoe CA/NV and Salton Sea CA Automated Validation Sites. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **58**(2), pp. 1294–1302.
- Jones PD., Lister DH., Li Q., 2008 : Urbanization effects in large-scale temperature records, with an emphasis on China. *J. Geophys. Res.*, **113**.
- Larsen L., 2015 : Urban climate and adaptation strategies. *Frontiers in ecology and the Environment*, Volume **13**, Issue 9, pp. 486-492.
- Mackey CW., Xuhui L., Smith RB., 2012 : Remotely sensing the cooling effects of city scale efforts to reduce urban heat island. *Building and Environment*, Volume **49**, pp. 348-358.
- Malvina S., Romaniello V., Hook S., Musacchio M., Teggi S., Buongiorno MF, 2020 : First Comparisons of Surface Temperature Estimations between ECOSTRESS, ASTER and Landsat 8 over Italian Volcanic and Geothermal Areas. *Remote Sensing* **12**, no. 1 : 184.
- Oke T.R., 1982 : The energetic basis of the urban heat island. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, **108** (455), pp. 1-24.
- Silvestri M., Romaniello V., Hook S., Musacchio M., Teggi S., Buongiorno MF., 2020 : First comparison of surface temperature estimation between ECOSTRESS, ASTER and Landsat 8 over italian volcanic and geothermal areas. *Remote Sens.*, **12**, 184.
- Stewart ID., Oke TR., 2012 : Local climate zones for urban temperature studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **93**, pp. 1879-1900.

## MODÉLISATION STATIQUE MULTICRITÈRE DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN EN CONTEXTE CANICULAIRE

**N. HASSANI<sup>1</sup>, D. FRANÇOIS<sup>1</sup>, G. DROGUE<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> *Université de Lorraine, LOTERR, F-57000 Metz, France (nassima.hassani@univ-lorraine.fr)*

**Résumé :** Cette étude vise à tester la robustesse d'une méthode d'interpolation spatiale multicritère de l'îlot de chaleur urbain (ICU) dans l'agglomération messine à partir d'un réseau de sondes de température sous abri. L'intensité de l'ICU est définie à partir d'un indice ICU ( $\Delta T_{u-r}$  maximum moyen sur  $n$  nuits consécutives) calculé pour chaque point de mesure par rapport à une référence péri-urbaine (station Base-vie). Trois épisodes caniculaires récents ont été testés (juin 2019, juillet 2019, août 2020) : pour chacun d'entre eux, l'indice ICU est mis en relation avec des descripteurs physiques de l'environnement afin de construire un modèle statistique. Ce dernier fait ensuite l'objet d'un test de performance et de stabilité par fractionnement de données. Les résultats montrent que le modèle est relativement stable et performant.

**Mots-Clés :** Indice ICU, régression linéaire multiple, analyse spatiale, modélisation

**Abstract:** This study aims to test the robustness of a multi-criteria interpolation method of urban heat island (UHI) in the Metz city conurbation based on a limited network of temperature probes with shelter. The intensity of the UHI is defined from an index ( $\Delta T_{u-r}$  averaged over  $n$  consecutive nights) calculated for each measurement point with respect to a peri-urban reference (Base-vie station). Three recent heatwave episodes have been tested (June 2019, July 2019, August 2020): for each of them the UHI index is related to physical descriptors of the urban environment to build a statistical model. The model is then tested for performance and stability by splitting the data. The results show that the model is relatively stable and performs well.

**Key words:** UHI index, multiple linear regression, spatial analysis, modelling.

### Introduction

Cette étude s'intéresse à l'organisation spatiale de l'ICU en période caniculaire sur la partie de l'Eurométropole de Metz instrumentée d'un réseau de sondes HOBO (Hassani et Drogue, 2020). L'objectif est de tester la performance et la robustesse d'une méthodologie permettant de connaître l'intensité de l'ICU en tout point du terrain d'étude au cours de trois épisodes de chaleur historiques qui l'ont affecté récemment lors des étés 2019 et 2020 et au cours desquels les températures ont été d'une intensité exceptionnelle au point de dépasser par endroit les 40°C. Pour cela, nous avons eu recours à une modélisation statistique multicritères. Celle-ci a déjà été employée avec succès dans de nombreux travaux en climatologie pour diverses applications : agricoles, urbaines, forestières...) et variables (précipitations, température, ensoleillement...) (Foissard, 2015; Straub et al., 2019). Cette modélisation statistique multicritère est testée ici dans une approche de géo-régression multiple couplée à du rééchantillonnage pour identifier les co-variables les plus significatives.

### Zone d'étude et réseau de mesure fixe

L'agglomération messine se situe dans le quart nord-est de la France (figure 1). Elle s'inscrit dans le territoire de l'Eurométropole de Metz qui compte environ 220 000 habitants répartis dans 44 communes (Insee, 2016). D'une étendue de 306 km<sup>2</sup>, celle-ci est traversée par deux cours d'eau : la Moselle et la Seille. Selon la classification de Köppen-Geiger, ce territoire connaît un climat tempéré chaud de type Cfb/Csb, avec des hivers relativement froids et des étés relativement chauds (Eveno et al., 2016). Le territoire de l'agglomération messine a été équipé de 21 sondes de température de type HOBO en 2019, afin que différents types d'environnement (urbains, péri-urbains et ruraux) soient échantillonnés (Hassani et Drogue, 2020). Ce réseau a été complété en 2020 par 5 points de mesures supplémentaires dont 4 sondes HOBO et une station météorologique complète Vantage Pro 2 Plus (station 22). Ces 26 points d'observations dont les altitudes s'échelonnent entre 167 m et 232 m forment le *Réseau de Mesures Thermo-Hygrométriques de l'agglomération de Metz (REMTHAM)*. Deux stations météorologiques gérées par Météo-France (aérodrome de Metz Frescaty) et ATMO Grand-Est

sont également présentes sur le territoire étudié.

## Méthodologie

L'interpolation de l'ICU est réalisée en trois étapes : le pré-traitement des données, la construction du modèle d'interpolation et la validation du modèle.

### Prétraitement des données

Notre point de départ est le calcul d'un indice ICU durant les séquences caniculaires des étés 2019 (25-30 juin et 21-26 juillet) et 2020 (7 août - 13 août), qui ont offert la possibilité de mieux comprendre le comportement thermique du tissu urbain et la dynamique de l'ICU local lors d'extrêmes chauds. Cet indice se calcule ainsi pour chaque point de mesure :

$$\Delta Tu - r_{max,i} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_{max} (T^{\circ} |_{air\ sonde, i} - T^{\circ}_{Base-vie}) \quad (1)$$

où  $\Delta Tu - r_{max,i}$  représente la moyenne des écarts maximum horaires ( $\Delta_{max}$ ) entre  $T^{\circ}_{air\ sonde, i}$  et  $T^{\circ}_{air\ Base-vie}$  observés entre le coucher et le lever du soleil pour  $n$  nuits consécutives ;  $T^{\circ}_{air\ sonde, i}$  représente la température de l'air mesurée sous abri à 3 m du sol (hauteur retenue habituellement notamment pour limiter le vandalisme et le risque de vol) par une sonde  $i$  du réseau REMTHAM ;  $T^{\circ}_{air\ Base-vie}$  représente la température de l'air mesurée sous abri à 3 m du sol par la sonde péri-urbaine de Base-vie située à proximité de l'aérodrome de Metz Frescaty à environ 6 km à vol d'oiseau du cœur de ville (Hassani et Drogue, 2020).

Une base de données constituée de 801 descripteurs relatifs à la topographie (altitude, exposition, encaissement...), la couverture du sol (surfaces bâties, végétation, surfaces imperméables, NDVI...) ou la morphologie urbaine (comme le facteur de vue du ciel) a été ensuite créée à partir de la BD TOPO v.3 (2019) et du MNT RGE Alti de l'IGN. Certains descripteurs ne se distribuant pas selon une gaussienne (ex. le descripteur « surfaces imperméables » dans un rayon de 50 m), des transformations (exponentielle, logarithmique...) ont été appliquées aux données. Chaque descripteur a été déterminé sur des grilles de 5 m dans des zones tampons autour de chaque point de mesure (50 m à 100 m, 200 m, 300 m, 400 m, 500 m, 700 m, 800 m, 900 m) à l'aide du logiciel *Matlab*, dans le but d'identifier sa dimension optimale du point de vue statistique (Amorim et al., 2015 ; Foissard et al., 2019). Des indices statistiques telles que le minimum, le maximum, la somme, la moyenne et l'écart-type ont également été déterminés pour chaque rayon.

### Construction du modèle statistique

En premier lieu, un préfiltrage des descripteurs a été effectué grâce à une analyse de multicollinéarité pour ne conserver que les descripteurs indépendants. Ensuite, nous avons automatisé la méthode de construction de la régression linéaire multiple (RLM) en utilisant l'outil *Regsubsets* du logiciel *R* qui explore toutes les combinaisons possibles de descripteurs, les compare pour ensuite les classer selon des critères prédéfinis. Le nombre de co-variables retenues dans la régression est alors paramétré (trois au maximum par souci de parcimonie), de même que le résultat graphique du classement des modèles possibles. Ensuite, nous avons

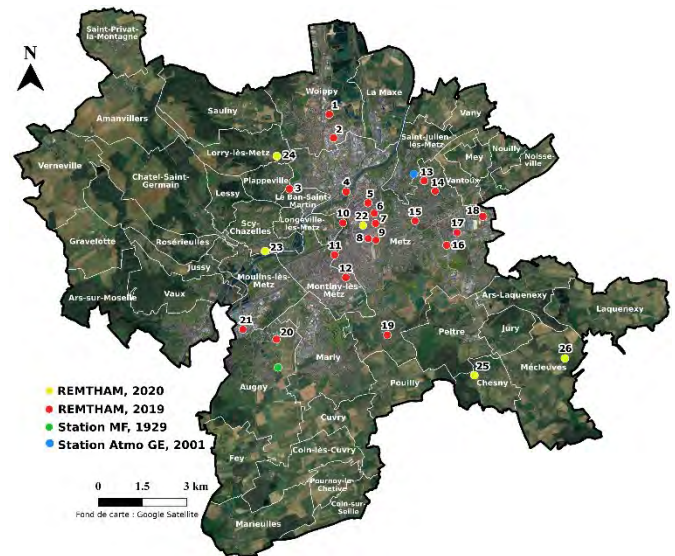


figure 1 : Carte de répartition des sondes du réseau REMTHAM sur le territoire de l'Eurométropole de Metz.

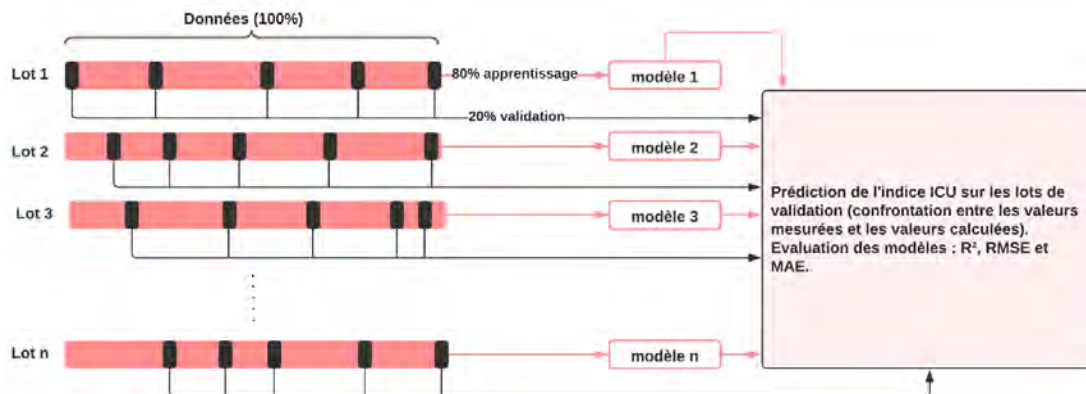
réalisé un tri entre les co-variables à l'aide du *Bayesian Information Criterion (BIC)* pour sélectionner le meilleur modèle de régression (au sens de la minimisation des erreurs).

La qualité du modèle de régression a été vérifiée sur la base de métriques d'erreur classiques ( $R^2$  et  $R^2_{aj} > 0,80$  et erreur quadratique moyenne RMSE  $< 0,6^\circ\text{C}$ ). En outre, les résidus du modèle ont été analysés afin de vérifier leur normalité, leur homoscédasticité et leur éventuelle structuration dans l'espace. Les modèles de régression finaux ont été implémentés à l'aide du module d'analyse spatiale d'*ArcGIS* afin de produire les cartes de l'indice ICU présentées dans la section 3.

### Test de stabilité et de performance par fractionnements de données

Pour tester la stabilité de la paramétrisation du modèle statistique et son niveau de performance, une technique de rééchantillonnage a été appliquée aux données collectées lors de chaque épisode caniculaire. La variante testée est celle des échantillons fractionnés ou *split-sample test*. Comme son nom l'indique, cette technique consiste à évaluer les performances d'un modèle en divisant l'ensemble du jeu de données en deux sous-ensembles : l'un sert à l'apprentissage, au calage du modèle ; l'autre à sa validation.

Le partitionnement utilisé est du type 80/20 : 80% des données sont utilisés pour la phase d'apprentissage, 20% pour la phase de validation. À chaque itération, les données d'apprentissage et les données de validation sont tirées au hasard (Figure 2). Grâce à cette technique, un grand nombre de modèles a été ajusté (440 pour les canicules de juin et juillet 2019 et 1000 pour celle d'août 2020). Les modèles sont évalués en calculant trois métriques :  $R^2$  (variance expliquée), RMSE (erreur quadratique) et MAE (biais de l'erreur).



**figure 2** : Chaîne de traitement décrivant la méthodologie suivie pour le calage et la validation croisée du modèle d'interpolation spatiale.

## 3. Résultats

### o Géorégression et sous-échantillonnage

Les résultats des régressions multiples appliquées aux trois périodes caniculaires sont présentés dans le tableau 1. Dans les trois cas, le pourcentage de variance expliquée excède 80%, ce qui est conforme à l'état de l'art (voir Foissard, 2015 ; Straub et al., 2019 par exemple).



**Tableau 1** : Synthèse des statistiques des modèles de régression linéaire multiple.

Type d'épisode	Modèles de régression		
	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajusté	RMSE (°C)
Canicule juin 2019	0,82	0,80	0,42
	$\Delta Tu - r_{max,i} = -1,60 + 0,08 * Bat\_900 + 0,80 * \log(Sim\_50)$		
Canicule juillet 2019	0,85	0,82	0,54
	$\Delta Tu - r_{max,i} = -13,11 + 0,14 * Bat\_900 + 0,81 * Altitude + 1,16 * \log(Sim\_50)$		
Canicule août 2020	0,89	0,88	0,45
	$\Delta Tu - r_{max,i} = -6,43 + 0,14 * Bat\_900 + 0,08 * Eau\_800 + 0,03 * Altitude$		

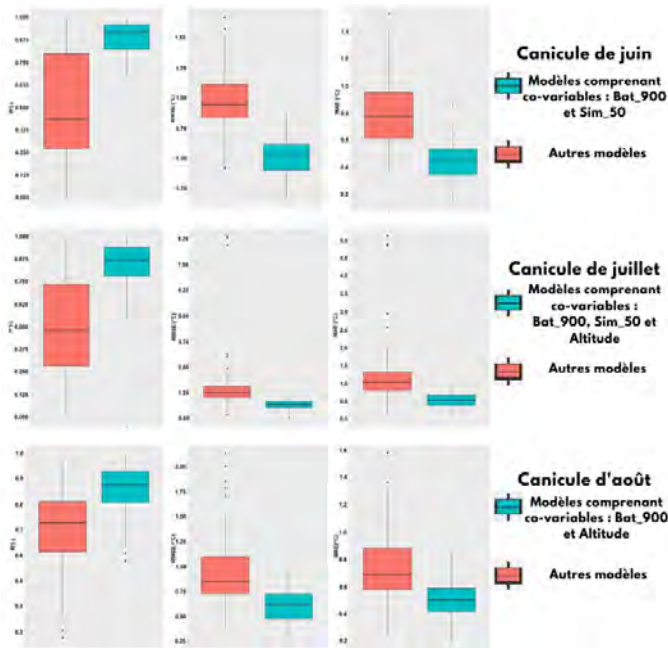
Sans surprise, plusieurs co-variables se rapportant à l'environnement bâti (Bat\_900 : fraction bâtie dans un rayon de 900 m et Sim\_50 : surface imperméable dans un rayon de 50 m), la présence d'eau (Eau\_800 : surfaces en eau dans un rayon de 800 m) et la topographie (Altitude) sont identifiées. La fraction bâtie dans une zone tampon de 900 m est commune aux trois modèles d'interpolation et traduit l'effet réchauffant (par rugosité et piégeage infrarouge) des parties de l'agglomération les plus densément bâties. La co-variable Sim\_50 traduit un effet réchauffant plus localisé lié au stockage d'énergie dans les surfaces artificialisées (routes, parkings et places). Le signe de la corrélation est cohérent pour ces deux co-variables. En revanche pour les deux autres co-variables (Eau\_800 et Altitude), le signe de la corrélation est contre-intuitif même si concernant l'eau, on sait que son effet rafraîchissant est faible en raison de son inertie thermique. Notons que la végétation n'est pas identifiée comme co-variable sans doute en raison d'une sous-représentation dans les environnements échantillonnés par nos sondes.

Le tableau 2 représente les co-variables les plus fréquentes dans les modèles ajustés sur les sous-ensembles d'apprentissage. Les co-variables dominantes sont identiques à celles du modèle « global » ajusté sur l'ensemble des données disponibles. Cela démontre une certaine stabilité des paramétrisations. L'augmentation du nombre de capteurs entre 2019 et 2020 a visiblement permis de gagner en stabilité puisque les co-variables Bat\_900 et Altitude sont ultradominantes.

Co-variables	Fréquence (%)		
	juin 2019	juillet 2019	août 2020
Bat_900	58,4	47,9	88,50
Sim_50	53,18	55,2	12,70
Altitude	/	55,7	87,48
Eau_800	/	/	2,5

**Tableau 2** : Fréquence des co-variables dans les modèles de régression ajustés sur les sous-ensembles d'apprentissage.

La figure 3 synthétise les statistiques issues de l'application des modèles en validation. Les modèles intégrant les co-variables récurrentes du tableau 2 sont représentés par les boîtes à moustaches bleues, tandis que les autres modèles sont représentés par les boîtes à moustaches rouges. Les statistiques prouvent que les modèles intégrant les co-variables récurrentes sont bien les plus compétitifs (gain en  $R^2$  moyen de 0,15 à 0,5 entre août 2020 et juin 2019 ; chute des RMSE et MAE moyennes de quelques dixièmes pour les trois épisodes testés). Il existe cependant des sous-ensembles qui génèrent de mauvaises simulations (score en  $R^2 < 0,5$  ; RMSE et MAE  $> 1^\circ\text{C}$ ).



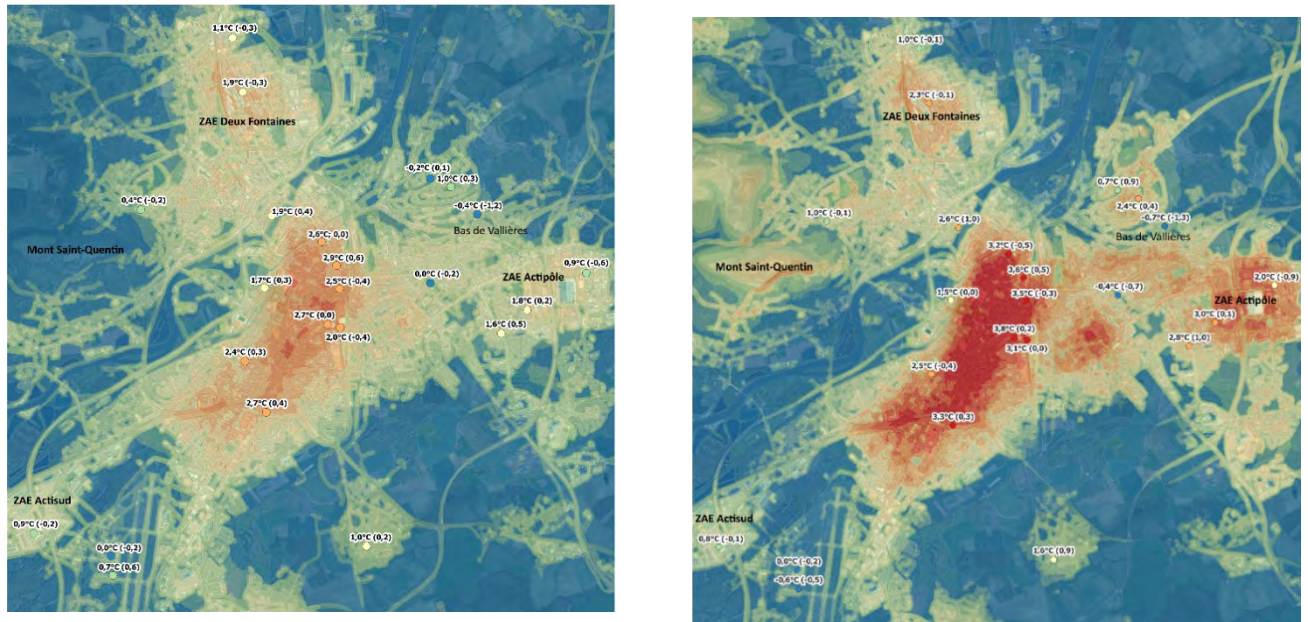
**figure 3** : Boîtes à moustaches représentant les métriques de validation ( $R^2$ , RMSE et MAE) des modèles de régression intégrant (bleues) ou non (rouges) les co-variables les plus fréquentes.

### 3.2. Cartes de l'indice ICU

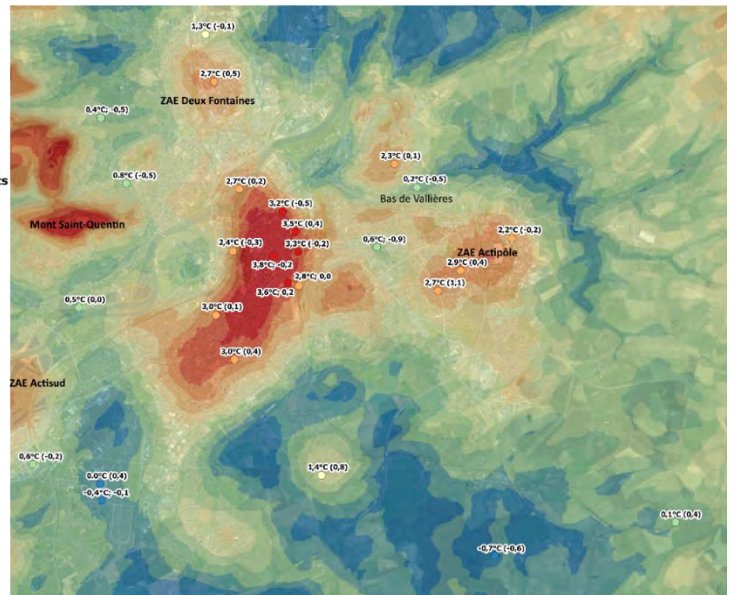
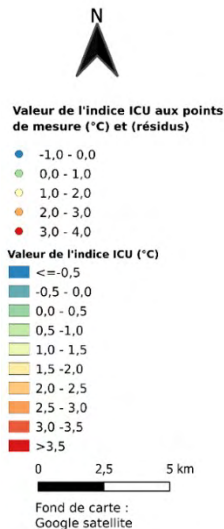
Les cartes produites (figure 4) fournissent les principales tendances de l'indice ICU. La carte de la canicule de juin 2019 se démarque des deux autres : l'indice ICU en cœur de ville est inférieur à  $3^\circ\text{C}$  et l'altitude n'est pas un déterminant de l'indice, contrairement aux deux autres canicules. Sur les cartes de juillet 2019 et d'août 2020, l'indice augmente au niveau des zones d'activités (situées au nord, à l'est et au sud-ouest de la carte) et sur les coteaux de la Moselle, ce qui se traduit par l'apparition de petits îlots de chaleur. L'influence de l'altitude est prégnante surtout sur la carte d'août 2020 : les écarts de température « ville-campagne » sont plus élevés lorsque l'altitude augmente et l'on voit apparaître des noyaux de chaleur en milieu forestier sur des points hauts (Mont Saint-Quentin). De petites poches de fraîcheur se dessinent dans les parcs et points d'eau, ainsi que dans les creux topographiques.

Notons que sur la carte de juin 2019, le résidu le plus important est celui de la sonde « Bas de Vallières » avec une valeur de  $-1,2^\circ\text{C}$  (figure 4). Cette sonde est située au fond d'un vallon où coule le ruisseau de Vallières et se démarque des autres puisque son écart n'est que de  $-0,4^\circ\text{C}$  avec la sonde de référence, soit  $2^\circ\text{C}$  à  $2,5^\circ\text{C}$  de moins que les sondes urbaines. Elle restitue donc une ambiance typiquement « rurale » en milieu suburbain. Nous supposons que durant la nuit, sur les versants du vallon, l'air au contact du sol se refroidit par conduction, devient plus dense et s'écoule gravitairement vers les points « bas » ou creux topographiques alimentant une légère brise de versant. Le modèle a du mal à détecter ces axes de fraîcheur provoqués par la topographie en creux sans doute en raison d'une sous-représentation de ce phénomène dans les mesures. Cela se vérifie également pour juillet 2019

malgré l'intégration de la co-variable altitude. En 2020 ce résidu « rentre dans la norme » grâce à un *pattern* qui est davantage structuré par la topographie



**figure 4** : en haut à gauche, carte de la distribution de l'indice l'ICU lors de la canicule de juin 2019 (maille 5 x 5 m). En haut à droite, carte de la distribution de l'indice ICU lors de la canicule de juillet 2019 (maille 5 x 5 m). Ci-contre, carte de la distribution de l'indice ICU lors de la canicule d'août 2020 (maille 5 x 5 m).



#### 4. Discussion

Malgré un échantillonnage de données assez limité, ce travail a permis d'établir des relations statistiquement robustes entre un indice ICU calculé à partir de données de température et des descripteurs physiques de l'environnement à l'échelle de l'agglomération messine pendant des épisodes caniculaires. Une approche multicritère a été utilisée pour identifier les deux ou trois co-variables les plus significatives. . Celles-ci sont principalement liées aux caractéristiques de l'environnement bâti à deux échelles : la densité du bâti à l'échelle locale et la présence de surfaces imperméables à l'échelle ultra-locale. Cette paramétrisation est cohérente pour une agglomération de taille moyenne. Dans les trois cas testés (juin et juillet 2019, août 2020), la régression sur des sous-ensembles de sondes permet d'expliquer plus de 80 % de la variabilité spatiale de l'indice ICU et les niveaux d'erreur en validation fractionnée sont conformes à l'état de l'art. La paramétrisation des

modèles de régression est assez stable. Ceci prouve que les sites de mesure ont été bien choisis et que l'information apportée par les sondes reste pertinente même lorsque le réseau de mesure est dégradé. Si les relations entre l'indice ICU et les co-variables se rapportant au milieu urbain paraissent réalistes (*i.e.* physiquement interprétables) ; en revanche, l'influence univoque de l'altitude détectée pour deux canicules sur trois est contre-intuitive. Elle permet de restituer l'effet d'une inversion thermique dans les vallons mais tend probablement à surestimer l'indice ICU sur certains points hauts de la topographie (dépassant 250 m) *a fortiori* lorsque ceux-ci sont boisés, et à sous-estimer l'indice ICU dans le chenal de la Moselle par un rafraîchissement excessif. L'absence de point de mesure dans ces sites ne nous permet pas à ce stade de formuler un avis définitif. Les cartes de l'indice ICU produites grâce à l'automatisation des calculs montrent des structures spatiales communes aux trois cartes (figure 4): le cœur de ville où le phénomène d'ICU est le plus sensible, les zones d'activités qui restent chaudes la nuit et l'armature urbaine (petites villes périphériques). Les cartes se différencient principalement par le lissage qu'opère la topographie sur la carte d'août 2020 tandis que les deux autres cartes sont davantage structurées par la densité du bâti et les surfaces imperméables incluant les grandes voies de circulation (ce qui paraît singulier). Ces différences mettent en évidence le fait que la cartographie de l'indice ICU n'est pas figée dans le temps (influence des conditions atmosphériques et des écoulements d'air locaux) et dépend de la stratégie d'échantillonnage.

## Conclusion

Les limites de l'échantillonnage des données (seulement 28 sondes dans le meilleur des cas) incitent à la prudence vis-à-vis de cette première modélisation statistique qui rappelons-le, n'a pas la prétention d'estimer avec précision la valeur exacte de l'indice ICU en tout point du territoire mais plutôt d'esquisser les grands traits du phénomène. Nos travaux futurs s'orientent vers la mobilisation des sources de données complémentaires (images ASTER, données de campagne mobiles) pour documenter les températures urbaines dans les espaces dépourvus de mesure et juger du réalisme des modèles statistiques et des cartes produites.

**Remerciements** : les auteurs remercient l'Eurométropole de Metz pour son soutien et son accompagnement dans la pose des sondes ainsi que l'ADEME Grand Est pour son aide financière.

## Bibliographie

Amorim M., Dubreuil V., Cardoso R., 2015 : *Modelagem espacial da ilha de calor urbana em presidente prudente (SP) – Brasil*. Rev. Bras. Climatol., 16, pp. 29-45.

Eveno M., Planchon O., Oszwald J., Dubreuil V., Quénoel H., 2016 : *Variabilité et changement climatique en France de 1951 à 2010 : Analyse au moyen de la classification de Köppen et des types de climats annuels*. Climatologie, 13, 47–70.

Foissard X., 2015 : *L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : application à l'agglomération rennaise*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 2, Rennes, France, 248 p.

Foissard X., Dubreuil V., Quénoel H., 2019 : *Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city: Rennes (France)*. Urban Climate, Volume 29.

Hassani N. et Drogue G., 2020 : *Mesure et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain dans l'aire urbaine de Metz Métropole : premiers résultats de la campagne de mesure 2019*. Climatologie, 17, 8.

Straub A., Berger K., Breitner S., Cyrus j., Gerschkat U., Jacobeit J., Kühnbach B., Kusch T., Philipp A., Schneider A., Umminger R., Wolf K., Beck C., 2019 : *Statistical modelling of spatial patterns of the urban heat island intensity in the urban environment of Augsburg, Germany*. Urban Climate, Volume 29.

## LES PRINCIPAUX RISQUES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES AU MAROC : CAS DE LA PLAINE DU GHARB

**Mohamed FATHI<sup>1</sup>, Saida AITEL ABASS<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Université Hassan II, Casablanca, Maroc, (fathimohamed1990@gmail.com)

<sup>2</sup>Université de Sorbonne Faculté des Lettres1, Paris, (saidaitelabass@gmail.com)

**Résumé :** Dans le cadre du réchauffement planétaire que le monde a connu ces dernières décennies, plusieurs recherches ont été lancées pour étudier les changements climatiques associés et leurs impacts sur les systèmes humains et naturels.

Le Maroc a connu au début du 21e siècle des inondations majeures qui ont causé des dégâts économiques importants dans plusieurs régions du pays. Les événements catastrophiques de la vallée de l'Ourika en 1995, de la ville de Tétouan et de la plaine de Marti en 2000, des régions de Mohammedia, Berrechid et Settat en 2002, de la région de Tanger en 2008, de la plaine du Gharb en 2009, de la région de Taza en 2010 et de la région de Kénitra en 2011, en témoignent.

Cet article étudie les effets profonds des risques climatiques sur la plaine du Gharb et ses répercussions négatives liées essentiellement aux changements climatiques que le monde en entier connaît comme la succession des vagues de sécheresse et de chaleur et la montée du niveau de la mer et aussi des inondations qui résultent de l'abondance des précipitations qui peuvent laisser de graves effets matériels et humains.

**Mots-clés :** Changement climatique- inondations- gestion- plaine du Gharb

### Introduction :

Le changement climatique est l'un des phénomènes les plus controversés parmi les scientifiques et les chercheurs. Il reçoit une attention internationale, gouvernementale et populaire. Due aux effets dangereux de ce phénomène sur les humains et les écosystèmes qui ont déjà commencé à émerger.

Les résultats des recherches et études en cours sonnent l'alarme sur l'impact profond des aléas climatiques et leurs répercussions négatives liées aux changements climatiques, (fathi,M 2020) comme la succession de sécheresses et de températures élevées provoquées par une hausse des concentrations des gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) (**Karrouk, 2006**), et la volatilité du système de précipitation que connaîtra le Maroc une forte baisse d'environ 20 % à l'horizon de l'année 2100 (**Mokssit, 2016**).

De ce point de vue, cet article cherche à consolider l'étude scientifique du phénomène du changement climatique en en prenant acte au niveau régional-national puis au niveau de la Plaine du Gharb.

### 1. ZONE D'ÉTUDE

La plaine du Gharb correspond à une vaste cuvette située dans la partie avale du bassin de Sebou dont 80 % sont à une altitude inférieure à 20 m (Figure 1). Elle couvre une superficie d'environ 4000 km<sup>2</sup> et est limitée au Nord et à l'Est par les rides pré-rifaines, à l'Ouest par l'Océan Atlantique, au Sud par la région de Zemmour Maâmora. (**Benseddik b, 2012**)



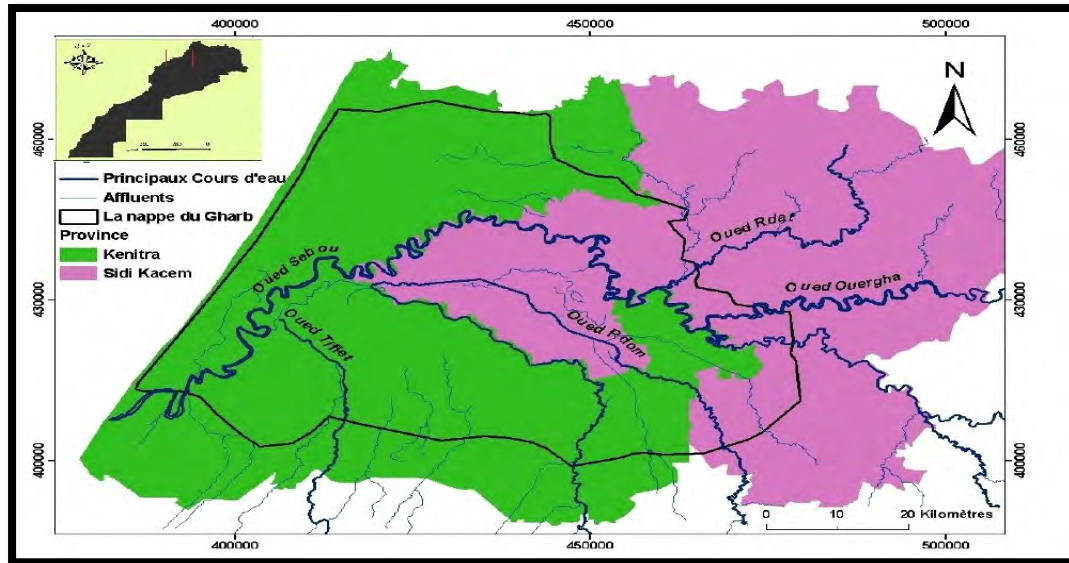


figure 1 : Situation géographique de la plaine du Gharb

## 2. Problématique de l'étude et la méthodologie suivie

La problématique à laquelle cette étude tente de répondre est liée à la détermination de l'orientation et les effets du changement climatique au Maroc et au niveau de la Plaine du Gharb. Le processus de suivi des différents indicateurs statistiques climatiques a montré des changements dans les taux de chaleur et de précipitation, ainsi qu'un déséquilibre dans leur distribution spatio-temporelle, ce qui laisse présager que le Maroc entrera dans une phase de transition climatique dont l'ampleur de ses effets ne peut être limitée, compte tenu de son instabilité et compte tenu du caractère relationnel et interactif entre les différents indicateurs. Toutes les données météorologiques disponibles indiquent un réchauffement significatif durant les dernières décennies avec une augmentation importante de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes du type sécheresses et inondations.

Pour cela, il a fallu chercher des réponses à un certain nombre de questions et de problèmes, tels que :

Quelles sont Les principaux risques des changements climatiques au Maroc ?

Pour répondre à ces questions, deux approches principales ont été adoptées :

- Une approche historique comparative : elle repose sur une comparaison entre des données statistiques à différentes périodes selon des indicateurs et selon la disponibilité des données.

- Approche analytique inductive : Elle permet l'extrapolation de la zone étudiée et l'analyse des données et statistiques qui s'y rapportent, en tenant compte des facteurs causals du Changements climatiques. Cette approche s'attache également à suivre les relations interactives entre les variables.

Un ensemble d'outils a également été adopté pour réaliser cette étude. Où des outils techniques statistiques (EXCEL-SPSS) ont été adoptés. Et des applications pour les systèmes d'information géographique (ArcGIS). Visites de terrain, et une base de données climatique qui comprend plusieurs indicateurs.

## 3. Analyse des résultats

Le Maroc est largement exposé aux risques d'origine naturelle : inondations, sécheresses, mouvements de terrains, séismes, tempêtes, vagues de chaleur ou risque de tsunami peuvent affecter



le territoire national et engendrer des pertes humaines et économiques conséquentes. **(GUIDE PRATIQUE CONNAITRE ET EVALUER LES RISQUES DE CATASTROPHES NATURELLES AUMAROC, 2018)**

Les catastrophes les plus fréquentes et les plus meurtrières pour le Maroc sont la récurrence terrible des inondations. Le phénomène ne des inondations au Maroc a commencé à être ressenti d'une façon plus accrue lors des trois dernières décennies, principalement en raison de l'occupation croissante des zones vulnérables d'une part et de l'aggravation des phénomènes extrêmes (sècheresse et crues) suite aux changements climatiques d'autre part ; engendrant de forts orages localisés à l'origine de crues rapides et violentes. Pour mémoire citons les événements marquants de : **(Plaine du Gharb – Maroc inondations et impact sur la population. Organiser la réponse des secours.2017)**

- 1995 dans la vallée de l'Ourika,
- 1997 dans la région d'El Hajeb,
- 2002 dans les villes de Mohammedia et de Settat,
- 2003 dans les régions de Tan-Tan, Nador, Al Hoceima et Khenifra,
- 2008 dans plusieurs régions du Maroc (Rif, oriental, région d'Er-Rachidia, Haouz, ...)
- Et les crues de l'Oued Baht (2009/2010) restent gravées dans les mémoires des marocains.

### 3.1 Au niveau de la plaine du Gharb :

Les crues massives ont fait plonger la plaine du Gharb dans le désarroi de 1927 à 2010 : (1927-1933-1936-1948-1954-1963-1977-1979-1987-1989-1996-1999-2008-2009-2010).

La région du Gharb a subi des pluies exceptionnelles en janvier et février 2009 ayant causé des dommages préjudiciables à la campagne agricole 2008-2009. Au total, onze (11) communes rurales de la province de Kenitra et dix (10) communes rurales de la province de Sidi Kacem ont été touchées par ces inondations dont les impacts sur le secteur agricole ont été drastiques. **(Banque Africaine de Développement (2009)** . Les précipitations de 2009/2010 sont exceptionnelles du fait qu'elles se sont concentrées entre mi-décembre et début Mars d'une manière reconnue, ce qui n'a pas permis l'évacuation des eaux stagnées auxquelles se sont rajoutées les eaux d'inondations.

L'année 2009-2010 restera marquée dans les annales hydrologiques du bassin du Sebou comme une année exceptionnellement humide avec des pluies qui ont atteint 2739 mm dans le Rif et entre 700 et 900 mm dans les autres zones et sous bassins.

### 3.2 PRINCIPALES CAUSES DES INONDATIONS :

**INONDATION OUED SEBOU** : Les fortes pluies enregistrées dans le bassin d'ouargha au niveau de la station du Jbel Adka du 13 décembre. Au 15 janvier 2010 était de 1405 mm. Elles représentent environ le double de la moyenne normale annuelle enregistrée dans cette station (830 mm) au cours de cette même période.

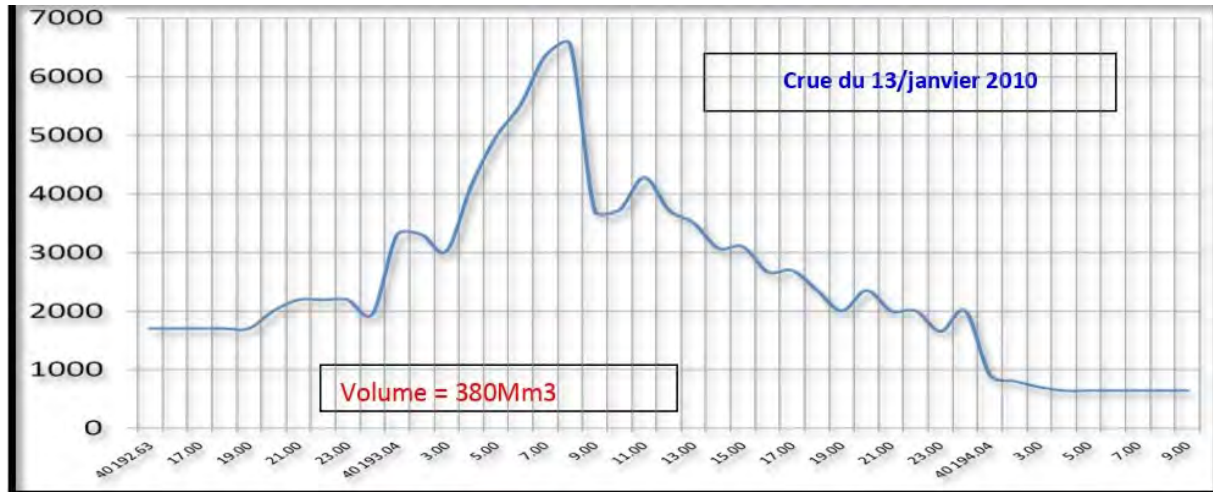
station	sept	oct.	nov.	(13-31) Déc.	(1-15) Janv.	total
jbel Adka	27	83.2	155.1	738.3	667.2	<b>1670</b>
Moyenne normale	<b>30</b>	<b>95.7</b>	<b>227.8</b>	<b>273.2</b>	<b>203.2</b>	<b>830</b>

**figure 2** : le bassin d'ouargha au niveau de la station du jbel Adka

Cette situation a provoqué le remplissage progressif du barrage Wahda. Mais les lâchers modérés dans le barrage (600 à 800 m<sup>3</sup>/s) ajoutés aux apports des affluents intermédiaires de Sebou, non régulés, ont provoqué des débordements des eaux au niveau de la commune houafat. Ces débordements n'avaient pas un important effet sur la plaine car les eaux sont moyennement drainées

par les canaux d'assainissement vers merjas amer avant de rejoindre oued Beht au niveau de la commune rurale de Mograne.

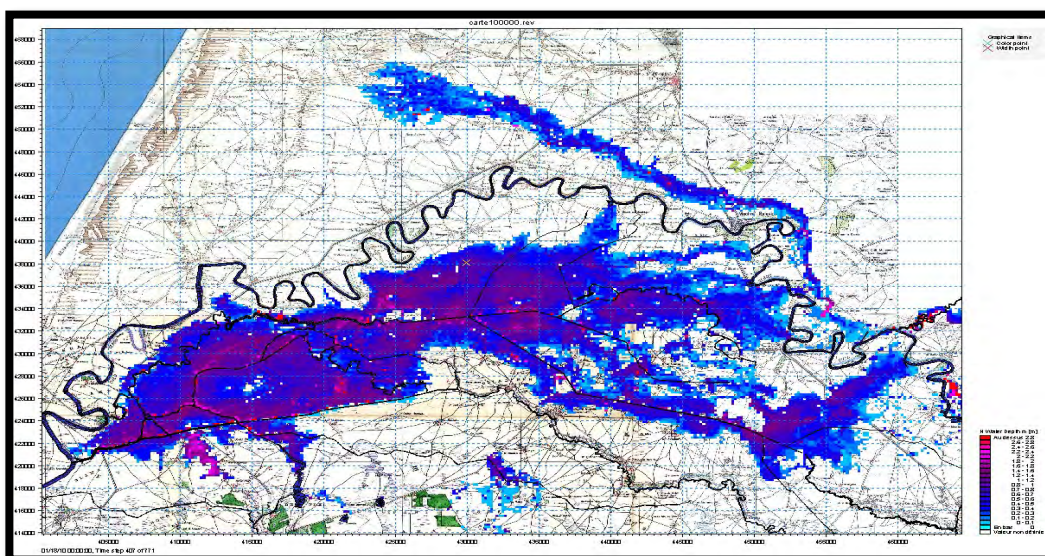
Cependant la forte crue enregistrée, au niveau du bassin d'ouargha le 13 janvier 2010 avait un débit de pointe de 6500 m<sup>3</sup>/s (figure 3) (semblable à la crue de 1970), correspondant à un volume journalier de 380 Mm<sup>3</sup>. Ceci a porté le taux du remplissage du barrage Wahda à 104%, dépassant sa capacité normale de stockage (taux record jamais enregistré).



**figure 3** : crue du 13 janvier 2010

Devant cette situation et pour ne pas mettre en cause la sécurité du barrage Wahda, ABHS a été contraint de procéder à des lâchers supplémentaires par la vidange du fond, jusqu'à atteindre 2000 m<sup>3</sup>/s. Ces lâchers ajoutés aux apports du barrage Driss 1<sup>er</sup> et des oueds intermédiaires non régulés (Rdat, leben, ...etc.) ont porté le débit de l'oued Sebou en amont de la station belsiri à 3500 m<sup>3</sup>/s (janvier 2010). Signalons que ce débit avait atteint 6000 m<sup>3</sup>/s en mars 2010 causant la plus importante inondation du Gharb.

Ainsi, devant la capacité limitée de la section de l'oued Sebou au niveau du pont belsiri (1000 m<sup>3</sup>/s) de faire transiter ce grand débit, plusieurs débordements ont eu lieu dans l'ordre chronologique aux points dénommés, lahmidiyine, Briber, hakamat, klea et abiat. Ainsi l'excédent des apports a été débordé sur la plaine du Gharb, qui a connu le même phénomène d'inondation en trois reprises, en janvier, février et mars 2010. Mais en passant d'un épisode à l'autre, l'ampleur des inondations s'accroît car les merjas de la plaine sont saturées et ne peuvent plus stocker les eaux. Aussi la capacité de transit des oueds devient de plus en plus faible à cause du blocage des eaux en aval d'oued Sebou par des effets conjugués de la marée d'une part et des fortes eaux de débordements qui s'orientent toutes vers l'aval de l'oued Sebou. (figure 3)



**figure 4 :** Carte des étendues inondées obtenues à partir d'image satellite Radar datant du 10 mars 2010 (source : CRTS, 2010)

Signalons que cette image a été prise 2 jours avant le débordement de l'oued Sebou dans sa partie aval pour inonder les communes rurales de Mnasra et Benmensour (Rive droite) et la ville de Kenitra (Rive gauche). La superficie totale inondée de la plaine du Gharb a été évaluée à 135000 Ha.



**figure 5 :** des zones inondées à la plaine du Gharb, Source : Observatoire Régional de Kénitra pour l'Environnement et le Développement Durable, 2015

**Conclusion :** L'empreinte du changement climatique global est déjà discernable dans les observations météorologiques marocaines. Le constat est clair : ces dernières décennies le risque d'inondation s'est accru non seulement en raison d'une trop grande concentration des hommes et de leurs activités à proximité des cours d'eau, mais aussi des changements climatiques des nouveaux modes d'occupation et d'utilisation des sols.

### Bibliographie

FATHI M., KARROUK M.S., 2020, LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET LES CATASTROPHES NATURELLES AU MAROC, XXIIIème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, p 307.

Mokssit A., 2016. Présentation générale des phénomènes climatiques extrêmes : cas du Maroc. Actes de la session plénière solennelle, année 2015, académie Hassan 2 des Sciences et techniques, Maroc, p. 51.

Plaine du Gharb – Maroc inondations et impact sur la population. Organiser la réponse des secours.2017

Benseddik b, 2012, synthèse du système d'aide à la décision (SAD) pour les ressources en eaux du Gharb, 2012, Master spécialisé en sciences de l'ingénieur, université ibn tofail, faculté des sciences.

Banque Africaine de Développement (2009) – Proposition visant l'octroi d'un don de 1.000.000,00 USD au titre de l'aide d'urgence au programme d'actions pour atténuer les effets des inondations dans la région du Gharb – Maroc. 16 pages

Karrouk M.S., 2006. Climate change and its impacts in Morocco, regional variability and its impacts in the Mediterranean area. NATO science series IV earth and environmental sciences, 79, p.253.

## ÉVALUATION DE LA CANICULE ESTIVALE 2021 DANS LES VILLES MAROCAINES : REGARDS SUR LES MODIFICATIONS STATISTIQUES DES TEMPÉRATURES

**Hind FATTAH**

*Laboratoire d'études et de recherches « Sociétés, Territoires, Histoire et Patrimoine (STHP) », Dpt. Géographie, FLSH Rabat, Université Mohammed V Maroc, [Fattah.hind@gmail.com](mailto:Fattah.hind@gmail.com)*

**Résumé :** Au cours de l'été 2021, une vague de chaleur exceptionnelle a touché la majorité des villes Marocaines. Cet événement climatique extrêmement puissant a été caractérisé par l'enregistrement de nouveaux records de températures maximales journalières dépassant largement 48°C dans certaines stations, et accompagnées de vents chauds, secs et forts de type *Chergui*. De juillet à août 2021, le Maroc a connu plusieurs épisodes successifs de canicule qui ont duré entre quatre et sept jours. Devant l'ampleur de cette situation, on s'est posé les questions problématiques suivantes : **Comment les températures maximales ont-elles évolué au Maroc depuis l'accélération du réchauffement climatique ? Quelles sont les villes Marocaines les plus touchées par la canicule estivale 2021 ? Et comment peut-on expliquer cet aléa climatique ?** Cette étude a pour objectif, dans un premier temps, de suivre la tendance évolutive des températures maximales des mois les plus chauds de l'année pour six stations météorologiques pendant la période 1973-2021 (49 ans) et d'analyser statistiquement le nombre de jours de très fortes chaleurs ( $T_{Max} \geq 40^{\circ}C$ ) durant l'été 2021. Dans un deuxième temps, une analyse synoptique a été indispensable pour mieux expliquer les épisodes caniculaires de 2021.

**Mots-Clés :** Canicule estivale – Aléa climatique – Températures maximales – Réchauffement climatique

### Introduction

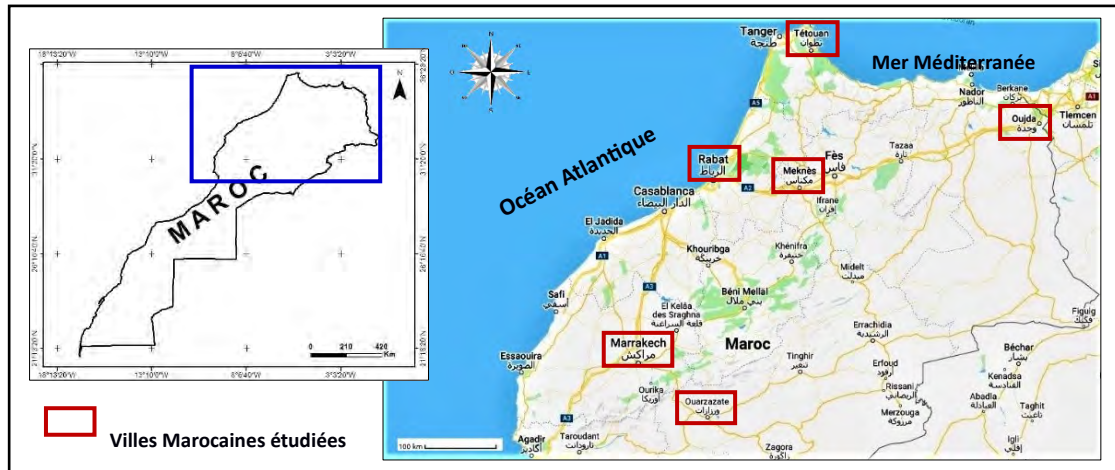
Dans son usage courant, le terme *canicule* évoque à lui seul un contexte climatique exceptionnel, marqué avant tout par une chaleur intense mais également par une grande sécheresse et un fort ensoleillement rendant l'ambiance éprouvante (CANTAT.O, 2005). Avec l'accélération du réchauffement climatique pendant les années 1980, 1990 et le début du 3<sup>ème</sup> millénaire, les canicules d'été ont pris une ampleur extravagante, tant dans leur fréquence que dans leur intensité. Plusieurs pays ont été touchés par cet aléa climatique cataclysmique, notamment ceux localisés dans les moyennes latitudes. L'Espagne, la France et l'Italie faisaient partie des pays subissant les dégâts les plus considérables, suite à la vague de chaleur survenue en été 2003. Le système climatique Marocain a été également influencé au cours de la même année par la persistance d'un type de temps plus au moins chaud. Depuis cette date, la fréquence des vagues de chaleur au Maroc n'a pas cessé d'augmenter.

Récemment, et notamment au cours de l'été 2021, une vague de chaleur exceptionnelle a touché la majorité des villes Marocaines. Cet événement climatique extrêmement puissant a été caractérisé par l'enregistrement de nouveaux records de températures maximales journalières dépassant largement 48°C dans certaines stations, et accompagnées de vents chauds, secs et forts de type *Chergui* (vent continental extrêmement brutal et violent, venant du Sahara et soufflant vers le territoire Marocain pendant l'été). De juillet à août 2021, le Maroc a connu plusieurs épisodes successifs de canicule qui ont duré entre quatre et sept jours. Devant l'ampleur de cette situation, on s'est posé les questions problématiques suivantes : **Comment les températures maximales ont-elles évolué au Maroc depuis l'accélération du réchauffement climatique ? Quelles sont les villes Marocaines les plus touchées par la canicule estivale 2021 ? Et comment peut-on expliquer cet aléa climatique ?** Cette étude a pour objectif, dans un premier temps, de suivre la tendance évolutive des températures maximales des mois les plus chauds de l'année (juillet et août) pour six stations météorologiques et d'analyser statistiquement le nombre de jours de très fortes chaleurs ( $T_{Max} \geq 40^{\circ}C$ ) et ce, en se basant sur des données mensuelles et journalières pour une période de 49 ans, allant de 1973 à 2021. Dans un deuxième temps, une analyse synoptique a été indispensable pour mieux expliquer les épisodes caniculaires de 2021.



## Site d'étude

Une grande attention a été accordée à six villes Marocaines (**Figure 1**) représentant ainsi quatre domaines climatiques du pays<sup>2</sup> et dont les caractéristiques climatiques restent totalement variables : Oujda (Région orientale), Tétouan, Rabat-Salé et Meknès (Région Atlantique Nord), Marrakech (Région Atlantique centre) et Ouarzazate (Région Sub-Saharienne).



**figure 1.** Carte de localisation des villes Marocaines étudiées. **Source :** Données CARTO, Google Maps, 2022

## Données et méthodes

La base de données climatiques utilisées dans ce travail, est composée de plusieurs séries de températures maximales (°C), journalières et mensuelles, relatives aux mois les plus chauds de l'année (juillet et août) couvrant une période de 49 ans (1973-2021), et ce, pour six stations météorologiques Marocaines, dont deux sont côtières (Tétouan et Rabat-Salé) et quatre dans les terres (Oujda, Meknès, Marrakech et Ouarzazate). Ces données nous ont été fournies par la DGM<sup>3</sup> de Casablanca et ne présentent aucune rupture climatique. Les mesures susmentionnées ont été complétées par des cartes isobariques à une altitude de 500hPa. Ces cartes synoptiques, provenant notamment de « Wetterzentrale (Weather central) », couvrent ainsi toute l'Europe et une partie du territoire Marocain. Nous avons volontairement choisi les cartes présent à 12h00 UTC<sup>4</sup> puisqu'en général, la température maximale de la journée s'enregistre au début de l'après-midi.

Pour l'analyse statistique et l'explication de l'évènement météorologique vécu en été 2021, une méthodologie à double approche (analytique et synthétique à la fois) a été adoptée, et dont les différentes étapes sont les suivantes :

- L'utilisation du test non-paramétrique de Mann-Kendall (Mann 1945, Kendal 1975) a permis de détecter l'absence ou la présence d'une tendance évolutive (progressive ou régressive) dans la série temporelle étudiée. Il a servi également pour savoir si les résultats obtenus sont significatifs ou non.
- La classification des maximales thermiques journalières en se basant sur l'indice de fréquence a été indispensable. Elle a permis d'obtenir des statistiques représentatives du nombre total des journées chaudes ( $35 > T_x \geq 40^\circ\text{C}$ ) ou très chaudes ( $T_x \geq 40^\circ\text{C}$ ).
- L'explication de l'aléa climatique a été basée sur une analyse synoptique descriptive qui a mis le point sur le type de temps régnant pendant cette période de l'année.

## Résultats

<sup>2</sup> Selon la répartition des stations Marocaines par domaines climatiques (établie par Abdelali SEBBAR en 2013).

<sup>3</sup> Direction Générale de Météorologie.

<sup>4</sup> Universel Temps Coordonné.

### Analyse statistique des maximales estivales mensuelles pendant la période 1973-2021

À partir des années 1980 et 1990, le climat des différentes stations Marocaines a été caractérisé par une augmentation généralisée des températures. La situation s'est aggravée encore plus au cours des deux premières décennies du 3<sup>ème</sup> millénaire qui ont été marquées par une accélération brusque de la fréquence des chaleurs caniculaires. Des températures maximales enregistrant des valeurs extrêmes ont été alors observées lors des récentes canicules estivales, notamment celles des années 2010, 2017 et 2020... D'ailleurs, La DGM de Casablanca a confirmé dans un rapport spécial édité en Février 2021 que l'année 2020 était l'année la plus chaude au Maroc, par rapport aux années 1970, 1980, 1990 et 2000. Les tendances d'évolution des températures maximales mensuelles ont été calculées pour les mois de juillet et d'août sur la période 1973-2021. Afin de vérifier la significativité statistique des tendances, le test non-paramétrique de Mann-Kendal a été appliqué (avec un niveau de confiance de 95% i.e. pour une valeur  $p < 0.05$ ). Les résultats obtenus diffèrent d'un mois à l'autre :

Tendances du mois de juillet : Les températures maximales pour les stations de l'Atlantique Nord (Rabat-Salé et Meknès) ne suivent aucune tendance évolutive temporelle. En revanche, les autres stations analysées (Oujda, Tétouan, Marrakech et Ouarzazate) présentent des tendances évolutives progressives significatives durant la période 1973-2021 oscillant entre  $+0,054^{\circ}\text{C}$  et  $+0,083^{\circ}\text{C}$  par an (**Tableau 1**).

**Tableau 1.** Résultats du test de Mann-Kendall appliqué aux températures maximales d'été 1973-2021 (Niveau de confiance de 95%). Les astérisques indiquent les tendances significatives.

Région	Station	Pente de Sen (Valeur-p du test)			
		Juillet		Août	
Orientale	Oujda	$+0,083^*$	$(<0,0001)$	$+0,062^*$	$(<0,0001)$
Atlantique Nord	Tétouan	$+0,061^*$	$(<0,0001)$	$+0,038^*$	$(0,000)$
	Meknès	$+0,023$	$(0,305)$	$+0,064^*$	$(<0,0001)$
	Rabat-Salé	$+0,008$	$(0,575)$	$+0,019$	$(0,142)$
Atlantique Centre	Marrakech	$+0,054^*$	$(0,018)$	$+0,050^*$	$(0,004)$
Sub-Saharienne	Ouarzazate	$+0,060^*$	$(<0,0001)$	$+0,045^*$	$(<0,0001)$

Tendances du mois d'août : Les résultats obtenus à travers le calcul du test, nous permet de dire avec certitude que la majorité des stations étudiées, à savoir Oujda, Tétouan, Meknès, Marrakech et Ouarzazate, présente une tendance positive significative variant de  $+0,038^{\circ}\text{C}$  et  $+0,064^{\circ}\text{C}$  par an. Pour la station de Rabat-Salé, aucune tendance significative n'a été détectée pour les températures maximales d'août (comme en juillet) malgré le sens positif de la tendance (**Tableau 1**).

### Analyse statistique des maximales estivales journalières durant les mois de juillet et août 2021

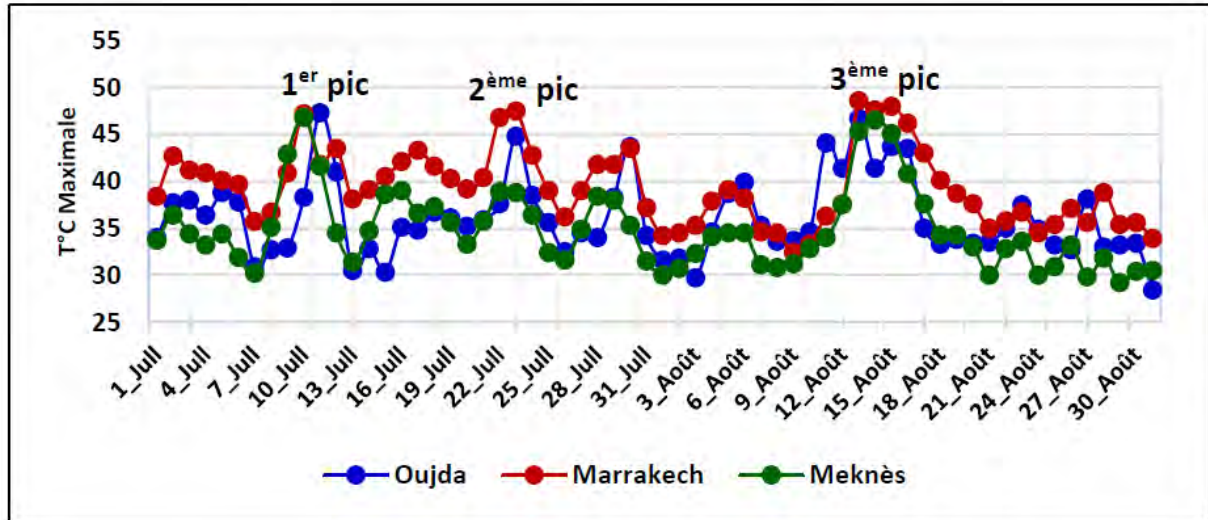
Le mois de juillet 2021 a connu deux épisodes caniculaires. Le premier épisode a duré quatre jours. Il a débuté le 09 juillet et s'est prolongé jusqu'au 12 du même mois, et ce, pour la majorité des stations étudiées, notamment Oujda, Marrakech, Meknès et Rabat-Salé. Les maximales journalières enregistrées (respectivement  $47,3^{\circ}\text{C}$ ,  $47,2^{\circ}\text{C}$ ,  $46,8^{\circ}\text{C}$  et  $33,6^{\circ}\text{C}$ <sup>5</sup>) entre le 10 et le 11 juillet 2021 ont largement dépassé la normale mensuelle 1981-2010<sup>6</sup> et ont battu les records des années précédentes. La station de Ouarzazate, quant à elle, a connu également ce temps chaud, mais plus tardivement. Ce n'est qu'à partir du 13 juillet 2021 que les températures ont commencé d'augmenter pour atteindre

5 Une telle différence de température entre Rabat-Salé et les autres stations peut s'expliquer par le fait que la station de Rabat-Salé est une station côtière bénéficiant tout au long de l'année des influences océaniques Atlantique ce qui rend les valeurs thermiques moins fortes.

6 Respectivement  $33,7^{\circ}\text{C}$ ,  $37,2^{\circ}\text{C}$ ,  $33,7^{\circ}\text{C}$  et  $27,2^{\circ}\text{C}$ .



une maximale de 42°C le 18 juillet. De même, la station de Tétouan a atteint 38,2°C à la même date. Un deuxième épisode de chaleur a été observé entre le 17 et le 23 juillet 2021 (7 jours), mais moins sévère que le premier pour la majorité des stations, à l'exception de la station de Marrakech qui a enregistré sa température record du mois (47,5°C) le 23 juillet 2021, dépassant ainsi la normale mensuelle 1981-2010 de 10,3°C (**Figure 2**).



**figure 2.** Maximales journalières des stations les plus touchées par la canicule estivale 2021 (juillet et août)

Au cours du mois d'août, une vague de chaleur de six jours (du 12 au 17 août 2021) a touché une grande partie du pays. Sur les six stations analysées, quatre stations (Marrakech, Oujda, Meknès et Tétouan) ont battu les records mensuels enregistrés il y a quelques années. Les mesures journalières dévoilent une hausse sensible des températures maximales franchissant la normale mensuelle (1981-2010) de 11,9 °C à 13,3°C (**Figure 2**).

Durant les mois de juillet et août 2021, la région Sub-Saharienne et celle de l'Atlantique Centre ont été marquées par un très fort dôme de chaleur<sup>7</sup>. Les stations de Ouarzazate et Marrakech (influencées par un degré très élevé de continentalité) ont enregistré, respectivement, 28 et 26 jours de  $T_x \geq 40^\circ\text{C}$  et 34 et 28 jours de  $35 > T_x \geq 40^\circ\text{C}$  (sur un total de 62 jours). La station d'Oujda, représentative de l'Est du pays, a atteint 10 jours de  $T_x \geq 40^\circ\text{C}$  et 22 jours de  $35 > T_x \geq 40^\circ\text{C}$ . En ce qui concerne la station de Meknès, le nombre total de jours extrêmement chauds ( $T_x \geq 40^\circ\text{C}$ ) était de 7 jours et ceux dépassant  $35^\circ\text{C}$  étaient de 16 jours. Quant aux stations côtières (Tétouan et Rabat-Salé), les températures au-delà de  $40^\circ\text{C}$  et  $35^\circ\text{C}$  ont été moins fréquentes en raison de l'influence de la mer (**Tableau 2**).

<sup>7</sup> Phénomène météorologique désignant une importante masse d'air chaude piégée entre la surface et l'altitude par une haute pression persistante.

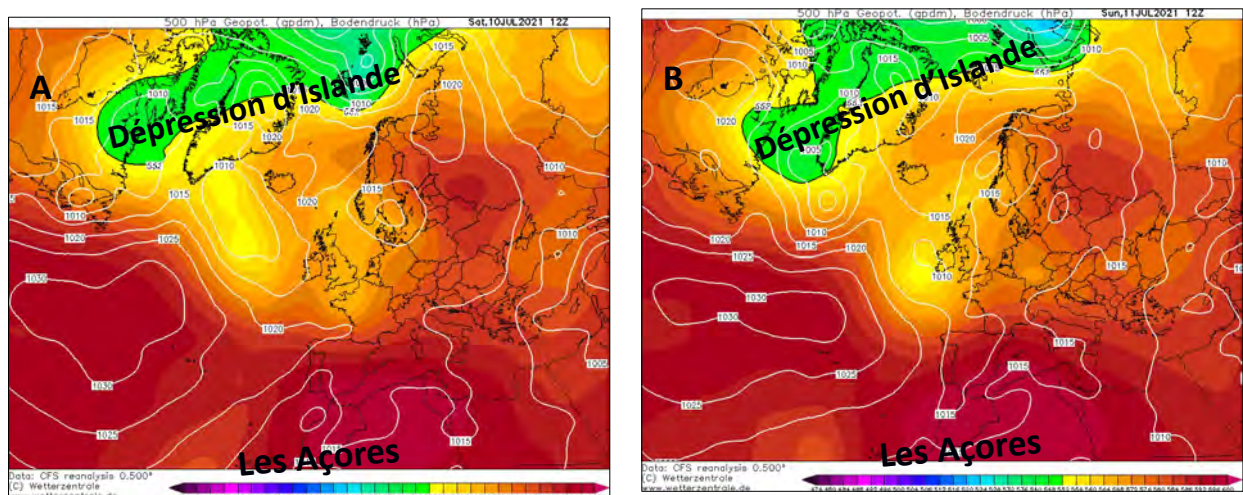
**Tableau 2.** Classification des maximales journalières des mois de juillet et août 2021 selon les valeurs enregistrées (en Nbr)

Région	Station	Tx≥40°C	35>Tx≥40° C	30>Tx≥35° C	25>Tx≥30° C	20>Tx≥25° C
Orientale	Oujda	10	22	28	2	0
Atlantique Nord	Tétouan	1	8	18	34	1
	Meknès	7	16	37	2	0
	Rabat-Salé	0	0	6	50	6
Atlantique Centre	Marrakech	26	28	8	0	0
Sub-Saharienne	Ouarzazate	28	34	0	0	0

### Analyse synoptique des conditions atmosphériques engendrant la canicule estivale 2021

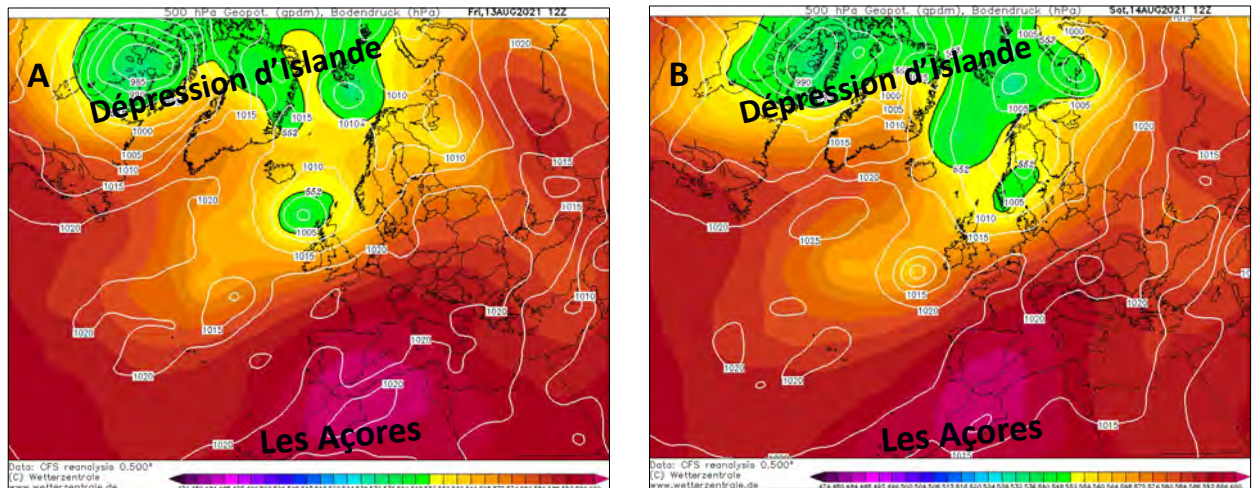
La situation météorologique vécue au Maroc au cours des mois de juillet et août 2021 a exigé une analyse synoptique à la fois descriptive et profonde. Une grande attention a été accordée notamment aux journées ayant enregistré des records absolus (**Figures 3 & 4**) :

La situation synoptique des 10 et 11 juillet 2021 : À ces dates, l'avancée de l'anticyclone des Açores (venant du Sud-Ouest) vers le Nord, notamment le Maroc et une grande partie de l'Europe, a engendré un état atmosphérique caractérisé par des crêtes planétaires chaudes qui ont rendu l'ambiance thermique totalement éprouvante. Autrement dit, l'anticyclone subtropical a transporté en se dirigeant vers l'Afrique du Nord, y compris le Maroc, une masse d'air très chaude accompagnée de rafales de vent (69 Km/h à Marrakech) très sèches, poussiéreuses et sableuses (connues sous le nom de *Chergui*). Cette situation explique les hautes températures enregistrées au cours de la journée du 10 juillet 2021 pour les stations de Meknès et Marrakech et la journée du 11 juillet pour la station d'Oujda. Cette situation s'est combinée avec un recul notable de la dépression d'Islande vers le Nord et le Nord-Ouest, prenant ainsi place au-dessus de la Groenland et une partie de l'Amérique du Nord (**Figure 3 (A) & (B)**).



**figure 3.** Cartes synoptiques à 500 hPa (12h00 UTC). **A-** 10 juillet 2021. **B-** 11 juillet 2021. **Source :** Wetterzentrale

La situation synoptique des 13 et 14 août 2021 : La chaleur extrême dominait toujours au Maroc, l'Algérie et une grande partie de l'Europe. L'anticyclone des Açores – chargé d'air chaud et sec – s'est installé avec force dans ces territoires. La dépression d'Islande quant à elle, a été observée notamment au-dessus de la Groenland et au Nord de l'Amérique du Nord. Elle n'a pas cessé de gagner du terrain vers la Norvège et la Suède, mais en saison estivale, il est évident que cette dynamique dépressionnaire ne se prolonge pas vers le territoire Marocain. Tout au contraire, au-dessus du pays, la prédominance des hautes pressions (1020 hPa), coïncidant avec un état anticyclonique stable et puissant et engendrant un temps purement chaud et sec, explique les records battus par la majorité des stations analysées (**Figure 4 (A) & (B)**).



**figure 4.** Cartes synoptiques à 500 hPa (12h00 UTC). **A-** 13 août 2021. **B-** 14 août 2021. **Source :** Wetterzentrale

## Conclusion et discussion

Les résultats obtenus montrent une tendance significative d'augmentation des températures maximales estivales au Maroc sur la période 1973-2021 et reflètent davantage l'ampleur de l'événement météorologique survenu au Maroc au cours de l'été 2021. D'un point de vue spatial, les stations localisées à l'intérieur du pays, à savoir Oujda, Meknès, Marrakech et Ouarzazate ont été les plus touchées par cette canicule. Pour les stations côtières (Tétouan et Rabat-Salé), la vague de chaleur était moins frappante et agressive. Au Maroc, comme partout en Afrique du Nord et en Europe, la succession des épisodes sévères de températures extrêmes au cours de l'année 2021 a relancé un important débat sur les causes directes de cet événement bouleversant. D'après Claire CHANAL, prévisionniste à Météo-France, « les records de chaleur enregistrés dans le bassin Méditerranéen en été 2021 sont expliqués par deux phénomènes : le premier est strictement météorologique, il s'agit d'une situation de blocage anticyclonique – comme nous l'avons mentionné plus haut – l'anticyclone des Açores a stagné pendant un bon moment et la masse d'air s'est réchauffée petit à petit. Le deuxième phénomène n'est autre que le réchauffement climatique. Avec l'accentuation de ce dernier, les masses d'air qui stagnent sont plus chaudes à la base, et donc, on bat les records ». Selon les communications du climatologue Marocain M-Saïd KARROUK (2021), les records thermiques enregistrés au Maroc et même en Europe étaient bien prévus dans les scénarios climatiques élaborés par le GIEC. D'après la même source, ces extrêmes thermiques étaient une exception auparavant. Dorénavant, il faut s'attendre qu'elles soient la règle.

## Bibliographie

Avila F., 2018 : La chaleur dans le Sud du Bassin aquitain : Contribution du poste d'aire sur l'Adour (1971-2018) à la connaissance du climat. 31<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Nice, France, 62-67.

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

Direction Générale de la Météorologie., 2021 : *Maroc : Etat du climat 2020*. DGM de Casablanca. Ministère de l'équipement, du transport, de la logistique et de l'eau, Maroc. 36 pages.

Faci M., 2018 : Evolution du nombre et de la durée de l'apparition des canicules en Algérie. 31<sup>ème</sup> colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Nice, France, 80-85.

Faci M., Oubadi M., Matari A. et Farhi Y., 2016 : Analyse des journées caniculaires au Sahara algérien. *Revue des régions arides*, numéro spécial, 44, Tunisie, 37-42.

Rome S., Bigot S., Foissard X., Fouvét A.-C., Madelin M. et Duche S., 2020 : L'été 2019 à Grenoble (France) : Analyse d'un extrême de chaleur et mesures d'adaptations mises en place par la collectivité. 33<sup>ème</sup> Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rennes, France, 601-606.



## LES PREMIERS RÉSULTATS DE LA SURVEILLANCE DE L'ÎLOT DE CHALEUR À CLUJ-NAPOCA À L'AIDE DU RÉSEAU AUTOMATIQUE MICCRO (MONITORIZAREA INSULEI DE CALDURA IN CLUJ - ROMANIA)

HOLOBĂCĂ I.H.<sup>1</sup>, ALEXE M.<sup>1</sup> et TEMERDEK-IVAN K.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire de Télédétection et Observation de l'Environnement (GEOTOMLAB), Université Babeş-Bolyai, Roumanie, [iulian.holobaca@ubbcluj.ro](mailto:iulian.holobaca@ubbcluj.ro)

**Résumé :** Le réseau automatique de mesure peut assurer une évaluation quantitative de l'intensité de l'ICU. La conception du réseau reposait sur deux stratégies. La première est basée sur la manière dont la structure urbaine interagit avec le rayonnement solaire (Locale Climate Zones) et implique une investigation nocturne avec des stations mobiles. Sur la base des résultats de ces campagnes d'observation expéditionnaires, les points critiques des zones thermiques élémentaires ont été identifiés. Ces points ont été choisis pour l'installation de capteurs de température automatiques. Ainsi, 40 capteurs ont été installés répartis sur une superficie de 179,5 km sur les poteaux du réseau électrique à 3 m de hauteur. Les données horaires collectées pour le mois d'août 2020 ont permis pour la première fois d'évaluer le régime spatio-temporel de îlots de chaleur urbaine à Cluj-Napoca.

**Mots clés :** réseau automatique ; télédétection ; points critiques ; îlot de chaleur urbain ; MICCRO

**Summary:** The First Results of the Monitoring of The Heat Island in Cluj-Napoca Using the MICCRO Automatic Network (Monitorizarea Insulei De Caldura In Cluj - Romania). The automatic observation network can provide quantitative assessment of ICU intensity. The network design was based on two strategies. The first is based on how the urban structure interacts with solar radiation (Urban Climate Zones) and involves a night investigation with mobile stations. Based on the results of these expeditionary observation campaigns, the critical points of the elementary thermal zones have been identified. These points were chosen for the installation of automatic temperature sensors. Thus, 40 sensors were installed spread over an area of 179.5 km on the electricity grid poles at a height of 3 m. The hourly data collected for the month of August 2020 made it possible for the first time to assess the spatio-temporal regime of urban heat islands in Cluj-Napoca.

**Key words:** automatic network; remote sensing; critical points; urban heat island; MICCRO

### Introduction

La conception du réseau d'observation automatique de l'îlot de chaleur urbaine avait comme point de départ les zones climatiques locales (LCZ) définies par Stewart et Oke (2012). Elles sont des régions urbaines avec couverture de surface, structure, matériaux et activité humaine uniformes qui s'étendent sur des centaines de mètres à plusieurs kilomètres à l'échelle horizontale. La délimitation et l'utilisation des LCZ présentent deux avantages majeurs dans l'étude de l'îlot de chaleur urbain (ICU) : d'une part l'observation objective de ICU, et d'autre part la comparabilité des résultats grâce à la large utilisation internationale.

Bechtel et autres, (2015) considère que le progrès de la science du climat urbain est sévèrement limité par le manque d'informations décrivant les aspects de la forme et de la fonction des villes à haute résolution. Dans le cadre du projet World Urban Database and Access Portal Tools (WUDAPT) a été lancé un effort international pour développer une base de données urbaine mondiale et un portail d'accès pour rassembler et diffuser ces informations de manière cohérente pour les zones urbaines du monde entier (<http://www.wudapt.org/>). Le portail fournit une méthodologie cohérente et un accès au logiciel nécessaire pour cartographier les LCZ à l'aide d'une classification supervisée des images satellites. Cette méthodologie a été utilisée pour identifier LCZ à Cluj-Napoca.

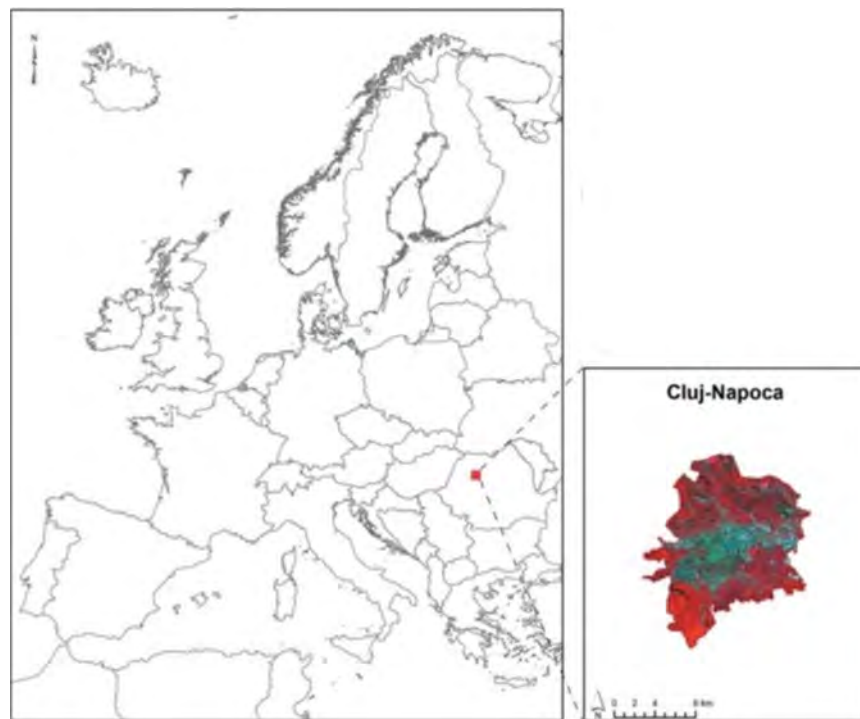
L'identification de la position optimale des capteurs de température du système automatique de monitoring a nécessité plusieurs campagnes d'observations. La préoccupation principale a été l'assurance de la représentativité spatiotemporelle en employant les LCZ pour choisir les points d'observation. Aussi, les observations ont été effectuées pendant des nuits sans nuages et sans vent (régime anticyclonique) et durant la période de stabilité (entre 23h et 1h du matin), en utilisant une correction de temps.

L'identification objective des « points critiques » pour le monitoring automatique de l'ICU a été faite par l'élaboration de la carte des zones thermiques élémentaires en ArcGis à partir des cartes saisonnières de l'ICU.

## 1. Données et Méthodes

### 1.1. La ville de Cluj-Napoca

Cluj-Napoca est une ville située au nord-ouest de la Roumanie (Figure 1) dans une zone vallonnée sur la rivière de Someșul Mic. La troisième du pays par la population, 323 484 habitants (INS – L'Institut National de la Statistique 2018), la ville a une superficie de 179,5 km<sup>2</sup>. Cluj est le principal pôle économique et culturel de la Transylvanie.



**figure 1.** Cluj-Napoca (Roumanie) en fausse couleur (PIR, Rouge, Vert).

### 1.2. Données spatiales

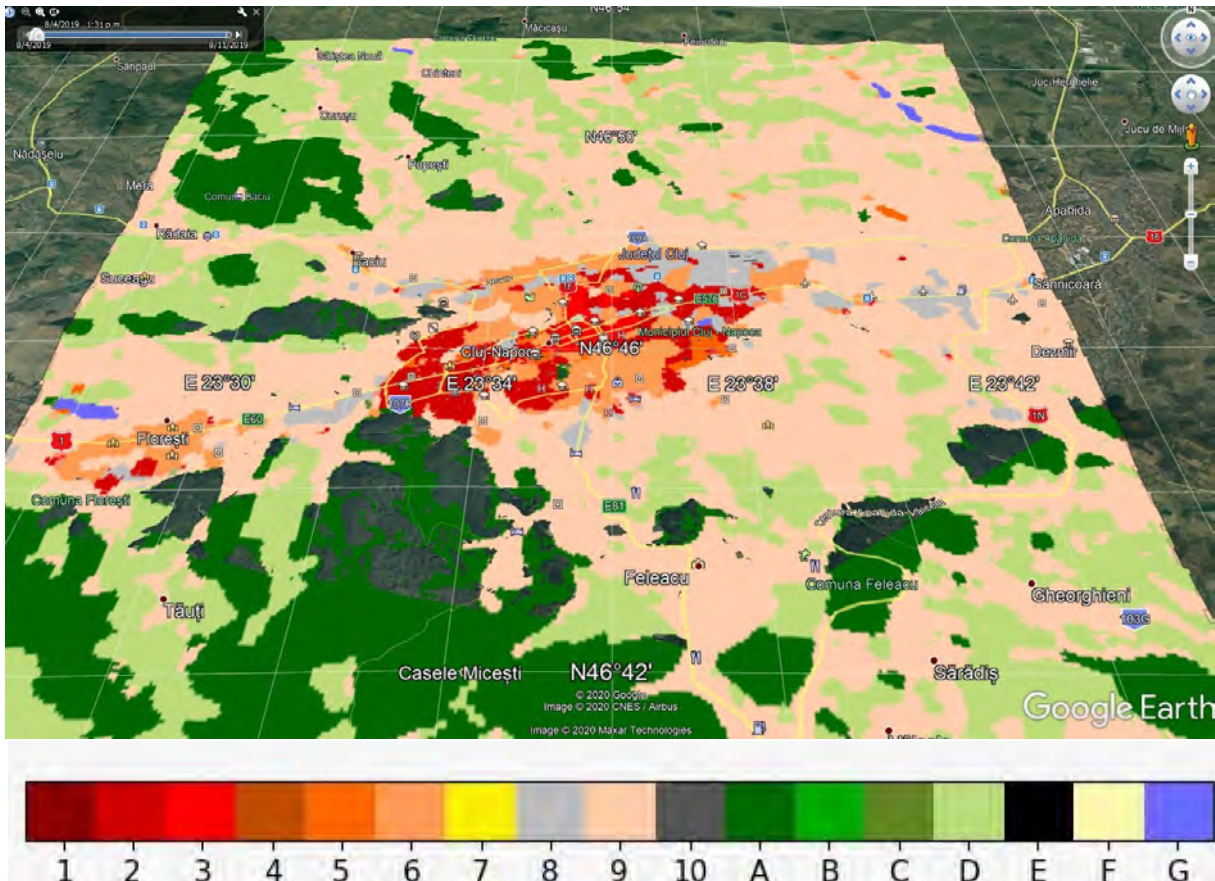
Pour la cartographie de LCZ nous avons utilisé des images satellites de plusieurs capteurs optiques (Landsat et Sentinel 2) et radar (Sentinel 1) (Figure 2). Les images de la période de végétation ont été choisies pour mieux saisir le degré d'imperméabilité du substrat et pour améliorer la qualité des données d'apprentissage pour l'algorithme d'apprentissage automatique décrit ci-dessous.

Les images optiques proviennent de l'Imageur Terrestre Opérationnel (OLI) à une résolution spatiale de 30 mètres (visible, PIR, SWIR) pour la scène Landsat 8 du 2 juillet 2019. L'Instrument Multispectral (MSI) qui mesure le rayonnement réfléchi de la Terre dans 13 bandes spectrales (visible, PIR, SWIR) à une résolution spatiale comprise entre 10 mètres et 60 mètres a fourni la scène Sentinel 2 du 1 juillet



2019. Les deux images SAR utilisées sont du type GRD (Ground Range Detected) en bande C dans les IW (Interferometric Wide) mode de traitement d'image et à une résolution spatiale de 30 mètres (double polarisation VV et VH). Pour Cluj-Napoca, nous avons utilisé une image prise sur orbite ascendante Sentinel 1 A (31 mai 2018) et une image prise sur orbite descendante Sentinel 1 B (4 juin 2018).

Nous avons produit également des données spatiales vectorielles, qui ont été numérisées en Google Earth. Il s'agit de données d'apprentissage et ROI qui ont ensuite été intégrés dans la classification supervisée Random Forest (Figure 2).



**figure 2.** Les LCZ à Cluj-Napoca : LCZ 2 taille mi- haute compacte – qui correspond à Cluj au HLM, LCZ 3 taille basse compacte- qui correspond à Cluj au centre-ville, LCZ 5 taille mi- haute ouverte- à Cluj les quartiers type ville jardin, LCZ 6 taille basse ouverte- à Cluj quartiers avec des maisons de type urbaine, LCZ 8 taille basse compacte large- à Cluj soit des supermarchés avec parking soit l'ancienne zone industrielle de la ville, LCZ 9 peu construit- à Cluj quartiers avec des maisons de type rural ou fermes isolées ; A – forêt dense ; B- forêt rare ; D- plantes basses ; E – sol nu ; G – eau.

### 1.3. L'algorithme WUDAPT

La cartographie des LCZ a employé une classification supervisée Random Forest à l'aide d'un outil développé par Bechtel et Conrad (2015) pour le logiciel gratuit SAGA GIS (Bechtel et autres, 2015). L'algorithme implique la numérisation en Google Earth du ROI qui comprend à la fois la zone urbaine et une zone tampon qui s'étend à environ 15 km de la ville. Dans cet espace, les LCZ sont identifiées selon la description faite par Stewart et Oke (2012). Pour chaque LCZ identifiée sont numérisées des 5 à 10 zones jugées représentatives. Celles-ci sont ensuite intégrées dans la classification supervisée en utilisant le logiciel SAGA. En raison de problèmes connus causés par l'agrégation dans le cas de la cartographie LCZ, une intervention post-classification est nécessaire. Pour cela, un Majority filtre a été

utilisé. Une option très utile est la possibilité d'exporter le résultat vers Google Earth et d'évaluer rapidement la précision de la classification.

#### 1.4. L'algorithme utilisé pour la cartographie des thermiques élémentaires et mis en place du réseau

Après avoir obtenu les LCZ, il a été possible de planifier des observations saisonnières des ICU. Les cartes saisonnières de l'ICU ont été ré-classifiées en utilisant les quantiles pour assurer la comparabilité des données spatiales ayant un intervalle total de variation inégal. Pour limiter le nombre des classes on a utilisé trois quantiles. L'outil ArcGis « combine » a permis l'identification des zones thermiques élémentaires. Les polygones ainsi obtenus ont été simplifiés en éliminant les surfaces trop petites (< 0.1 km<sup>2</sup> dans notre cas). Les « points critiques » sont les centroïdes des surfaces thermiques élémentaires (Holobacă, 2017). Finalement les 40 capteurs ont été installés répartis sur une superficie de 179,5 km<sup>2</sup> sur les poteaux du réseau électrique à 3 m de hauteur dans la proximité de « points critiques ».

## 2. Résultats

Le passage des campagnes saisonnières d'observations nocturnes de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain à l'observation permanente a surtout permis d'obtenir des données tout au long de la journée. En même temps, la simultanéité des observations peut être assurée, éliminant ainsi les erreurs résultant de l'application de corrections temporelles.

Ainsi, sur la base de ce réseau d'observation automatique, il a été possible pour la première fois à Cluj-Napoca de cartographier les valeurs moyennes de température dans l'espace urbain à l'échelle mensuelle (Figure 3). Sur la base de la carte thermique de l'heure locale 01 août 2020, les zones chaudes et froides de la ville et la structure de l'îlot de chaleur urbaine ont été identifiées et quantifiées.

On peut voir qu'à Cluj-Napoca il y a un écart par rapport à la structure classique de l'îlot de chaleur urbain pour laquelle la zone la plus chaude de la ville est observée au centre-ville et diminue vers les périphéries avec des variations locales dues à des propriétés physiques différentes de la surface urbaine. C'est le modèle spatial qui s'applique le plus aux villes nouvelles aux États-Unis.

A Cluj-Napoca nous pouvons observer le rôle majeur des conditions topographiques locales dans la structure thermique horizontale et verticale. Horizontalement, un contraste thermique important peut être observé entre la partie ouest et est de la ville et la poussée vers l'est du noyau de l'îlot de chaleur. La différence entre la périphérie nord-ouest de la ville et la partie la plus chaude située dans la partie centre-est de la ville dépasse les trois degrés Celsius en valeurs moyennes mensuelles (Figure 3). Cette situation semble être causée par la pénétration de la brise de montagne nocturne sur la vallée de Someș depuis l'ouest et la poussée de l'air plus chaud vers la partie est de la ville. Des cas similaires ont été rapportés par Stewart et Oke (2012) en cas d'advection nocturne importante.

Si la structure thermique horizontale de l'îlot de chaleur a également été observée à partir des campagnes d'observation précédentes, on ne peut qu'identifier maintenant les caractéristiques de la stratification verticale. Un deuxième noyau chaud est visible dans la partie sud de la ville. Ce noyau correspond aux quartiers situés sur le versant sud du massif de Feleac. Ces quartiers sont situés à une altitude d'environ 250 mètres plus haut que la partie centrale située près de la rivière Someș. La différence d'environ deux degrés Celsius suggère la présence d'une inversion thermique nocturne.



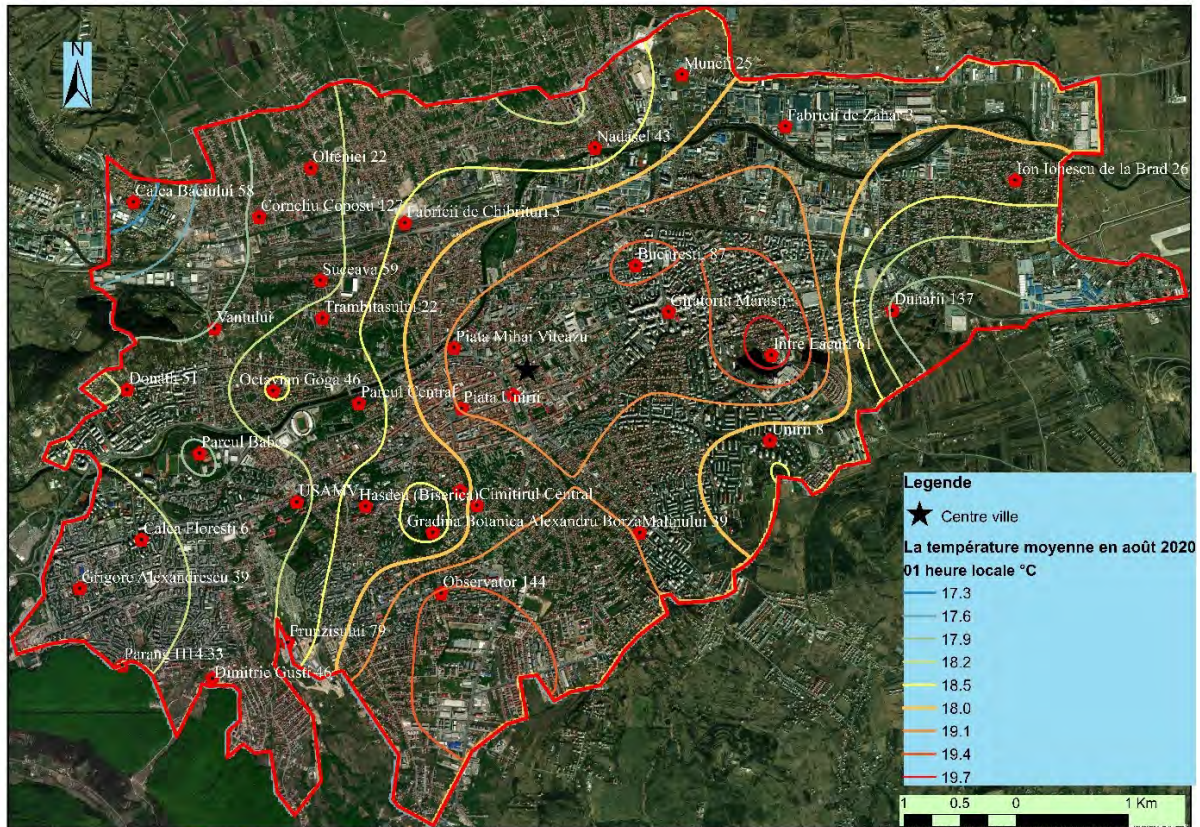


figure 3. La température moyenne en aout 2020 (01 heure locale).

## Conclusions et Discussion

Le portail WUDAPT offre une méthodologie et un accès aux données spatiales et logiciels gratuits qui permettent une classification rapide et fiable des LCZ. Il peut fournir un cadre viable pour unifier la définition et la méthodologie de travail pour la classification LCZ au niveau international.

L'utilisation d'images satellite radar a un potentiel élevé pour augmenter la précision de la classification, car la réflexion des ondes radar est fortement influencée par la structure de type urbain (Koppel et autres, 2017, Holobacă et autres, 2019).

Le passage de l'observation manuelle à l'observation automatique a permis de mesurer simultanément des données avec une résolution temporelle de 5 minutes avec un potentiel d'utilisation très élevé. Les erreurs humaines et celles causées par les corrections de temps ont été éliminées. Cela a rendu possible pour la première fois la spatialisation horizontale et verticale de l'îlot de chaleur urbain à l'échelle mensuelle.

L'accumulation d'un très grand volume de données de température et d'humidité à haute résolution spatiale et temporelle ouvre la perspective de leur utilisation à la fois dans la recherche climatique à l'échelle fine, la recherche en climatologie appliquée (bioclimatique, pollution de l'air, etc.) et dans l'activité opérationnelle au sein du stratégie de "ville intelligente" de Cluj-Napoca.

**Remerciements :** Les auteurs remercient le projet UBB2019 Implementation of an Urban Heat Island measurement network in Cluj-Napoca, car il a rendu possible cette approche.

## Bibliographie

Bechtel, B., & Daneke, C., 2012. Classification of local climate zones based on multiple earth observation data. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, **5**, 1191–1202.

Bechtel, B., Alexander, P.J., Böhner, J., Ching, J., Conrad, O., Feddema, J., Mills, G., See, L. & Stewart, I., 2015. Mapping Local Climate Zones for a Worldwide Database of the Form and Function of Cities. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.*, **4**, 199-219.

Koppel, K., Zalite, K., Voormansik, K. & Jagdhuber T., 2017. Sensitivity of Sentinel-1 backscatter to characteristics of buildings, *International Journal of Remote Sensing*, **38**(22), 6298-6318.

Holobâcă, I.H. 2017. Le monitoring de l'îlot de chaleur urbain de Cluj-Napoca, Roumanie, *Actes du XXXe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Climat, ville et environnement*, Sfax, Tunisie.

Holobâcă, I.H., Ivan, K. & Alexe, M., 2019, Extracting built-up areas from Sentinel-1 imagery using land-cover classification and texture analysis, *International Journal of Remote Sensing*, **40**(20), 8054-8069.

Stewart, I.D., & Oke, T.R., 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **93**, 1879–1900.

## THE OPERATIONAL METAMATRIX OF THERMAL COMFORT FOR EUROPEAN AREAS, A GRAPHICAL METHODOLOGY FOR APPROPRIATE SELECTION OF OUTDOOR THERMAL COMFORT INDICES: APPLICATION TO AN URBAN PLANNING STUDY-CASE

Matteo MIGLIARI <sup>1</sup>, Rémi BABUT <sup>2</sup>, Camille DE GAULMYN <sup>3</sup>, Loïc CHESNE <sup>4</sup>, Olivier BAVEREL <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Navier, UMR 8205, Ecole des Ponts, Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, CNRS, UPE, Champs-sur-Marne, France; Franck Boutté Consultants, Paris, France. E-mail: [matteo.migliari@enpc.fr](mailto:matteo.migliari@enpc.fr); [mmigliari@franck-boutte.com](mailto:mmigliari@franck-boutte.com).

<sup>2</sup> Franck Boutté Consultants, Paris, France. E-mail: [rbabut@franck-boutte.com](mailto:rbabut@franck-boutte.com).

<sup>3</sup> Franck Boutté Consultants, Paris, France. E-mail: [cdegaulmyn@franck-boutte.com](mailto:cdegaulmyn@franck-boutte.com).

<sup>4</sup> Franck Boutté Consultants, Paris, France. E-mail: [lchesne@franck-boutte.com](mailto:lchesne@franck-boutte.com).

<sup>5</sup> Laboratoire Navier, UMR 8205, Ecole des Ponts, Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, CNRS, UPE, Champs-sur-Marne, France. E-mail: [olivier.baverel@enpc.fr](mailto:olivier.baverel@enpc.fr).

**Abstract:** In the current climate crisis, safeguarding citizens from thermal strokes without resorting to energy-intensive strategies is a crucial challenge for urban design. More than 200 calculation methods can be adopted to design thermally comfortable outdoor public spaces, but existing literature lacks selection criteria to choose appropriate ones. As resolution, an Operational Metamatrix of Thermal Comfort for European areas has been developed. It is a graphic chart that allows to compare the specificities of thermal comfort indices usable in Europe and that can be computed by available software, capable to simulate the urban climate. The Metamatrix has been applied on a European study-case, to find calculation methods to assess the citizen's thermal comfort in different configurations of the urban space during all seasons.

**Keywords:** Outdoor thermal comfort; Urban microclimate; Human-biometeorology; Urban planning.

### Introduction

In the climate change scenarios, extreme meteorological occurrences, such as heat waves, will be ever-growing (<https://meteofrance.fr/>). A calibrated coexistence between artificial and natural environments is crucial for the amelioration of urban microclimates, to protect citizens from thermal strokes without resorting to energy-intensive strategies (Kumar & Sharma, 2020). To design thermally comfortable outdoor public spaces, more than 200 calculation methods can be adopted, but selection criteria to choose the appropriate ones is lacking in existing literature. Providing a scientific answer to this problematic is crucial for the development of operational studies, such as the ongoing ADEME's MODEVAL-URBA 2019 research project "MESH 2C" by Franck Boutté Consultants, whose aim is to develop methodologies for the generation and the rapid evaluation of urban morphologies, to optimize outdoor thermal comfort. To overcome this knowledge gap, within the framework of the "MESH 2C" project, an Operational Metamatrix of Thermal Comfort for European areas has been developed. The name has been chosen by adding the prefix "meta", meaning "comprehensive", to the noun "matrix", since the objective is to produce a graphic chart that allows to comprehend and compare the specificities of the most renowned thermal comfort indices, adapted for Europe, that can be computed by the available software capable to simulate the urban climate. This pull of indices has been identified after extensive literature review of the present state of the art of thermal comfort calculation methods and tools. In the following chapters, the list of the selected indices and the description of the methodology adopted for the creation of the Operational Metamatrix are provided. Consequently, the instructions for the use of the tool are presented, with an example of application. Finally, a conclusion highlights the key issues.

## 1. Methodology

### 1.1. Examined thermal comfort indices with literature references

As mentioned by Epstein & Moran, 2006, thermal comfort studies often emphasise the academic accuracy of the different methodologies, to the detriment of their practical use. The use of thermal comfort indices outside the academic field is related to the availability of tools that can conveniently calculate them. To promote thermal comfort verification in European urban planning, an Operational Metamatrix of Thermal Comfort was developed, which only includes adapted indices that can be calculated using dedicated software that can simulate the urban climate. The defined pool of indices is presented in Table 1:

**Table 1.** Thermal comfort indices considered in the current work.

Full title	Acronym	Main publication	Software for calculation
Actual Sensation Vote	ASV	Nikolopoulou & Lykoudis, 2006	Ladybug Tools
Modified Physiologically Equivalent Temperature	mPET	Chen & Matzarakis, 2014	Rayman
Net Effective Temperature	NET	Gregorcuz, 1968 (cited by Landsberg, 1972)	Ladybug Tools
New Perceived Temperature	PT**	Staiger et al., 2012	Rayman, UBIKLIM, PALM-4U, SkyHelios
Outdoor Standard Effective Temperature	Out_SET*	Pickup & de Dear, 1999	Ladybug Tools
Physiological Equivalent Temperature	PET	Höppe, 1999	Rayman, ENVI-met, UMEP-SOLWEIG, Ladybug Tools, PALM-4U, SkyHelios
Predicted Mean Vote	PMV	Fanger, 1970	Rayman, ENVI-met, Ladybug Tools
Predicted Percentage of Dissatisfied	PPD	Fanger, 1970	Rayman, ENVI-met, Ladybug Tools
Standard Effective Temperature	SET*	Gonzales et al., 1974	Rayman, ENVI-met, Ladybug Tools
Universal Thermal Climate Index	UTCI	Jendritzky et al., 2009	Rayman, ENVI-met, UMEP-SOLWEIG, Ladybug Tools, CityComfort+, SOLENE-microclimate, PALM-4U, SkyHelios

### 1.2. Categories and features for the construction of the Metamatrix of Thermal Comfort

The Operational Metamatrix of Thermal Comfort for European areas provides different categories, starting from “CLIMATIC FACTORS”, which includes all major environmental parameters of thermal comfort: air temperature, mean radiant temperature, wind speed and relative humidity. Among the “PHYSICAL FACTORS” are gathered the physical characteristics of the person: metabolic heat production, clothing insulation, sweating and/or skin temperature, and body composition (referring to a multilayer representation of the human body). The category “METEOROLOGICAL CONDITIONS OF APPLICATION” analyses where the application of the index is suitable: hot / cold, humid / dry, highly



ventilated / poorly ventilated. “SOLAR EXPOSURE” refers to the ability of the index to provide valuable results in direct exposure to solar radiation or in the lack of direct solar radiation. The “TYPE OF ENVIRONMENT” category describes the precision of the index in different areas, such as a natural landscape, an urban settlement, or an indoor space. The “TYPOLOGY OF THE RESULT” describes the form of the result: equivalent temperature, which means that the index is expressed in a well-known temperature measurement unit (such as °C), or dimensionless value. Finally, the “USABILITY ISSUES” designate if the index is “suitable for application in human biometeorological studies” according to Staiger et al., 2019, while reporting the number of available software that can calculate it and if, among them, there is at least one that responds to the definition of “user-friendly tool to improve the urban microclimate” by Jänicke et al., 2021.

### 1.3. Interpretation of the graphics of the Metamatrix

To be able to describe each index comprehensively in regards with the categories identified in Chapter 1.2., each feature may present two graphic symbols: the cross (X) specify the impossibility to take in account the selected parameter, while the filled circle (●) indicates that the feature is considered. In addition, the Metamatrix provide a hierarchisation through different size of the filled circle:

- The large circle indicates that the corresponding feature represents one of the main objectives, according to the declared aims of the index and to the emphasis given by the scientific literature.
- The mean circle states that the analysed feature is widely considered by the index (with no to minor limitations), but it doesn't take priority over other criteria.
- The small circle defines the presence of limits of validity with respect to the analysed feature or inaccuracies in the assessment detected by the scientific literature, bringing the reader's attention to caution.

The symbols corresponding to the features' evaluation have been assigned following the information provided by the scientific community, including the author's statements about their own indices and the feedbacks provided by other researchers after their practical application. This evaluation could be somehow subjective, hence the function of the Metamatrix as a decision aid tool, which doesn't replace the study of the selected indices. No direct assessment of all the classified indices has been performed. Moreover, editable inputs (marked with an “I”) are explicitly identified, allowing the user to understand which parameters can be modified, to guide the choice of appropriate indices in relation to the objectives of the assessment.

## 2. Results

### 2.1. Operational Metamatrix of Thermal Comfort for European areas and recommendations for its application

The Operational Metamatrix of Thermal Comfort is displayed in Figure 1. It is intended to be an easily readable graphic chart that allows to quickly compare strengths and weaknesses of thermal comfort calculation methods adoptable in European countries, with respect to pre-identified features.

THERMAL COMFORT INDICES	CLIMATIC FACTORS		PHYSICAL FACTORS					RELEVANT CRITERIA / FEATURES								USABILITY ISSUES							
	Air temperature	Mean radiant temperature	Air velocity	Relative humidity	Clothing insulation	Metabolic activity	Sweating and/or skin temperature	Body composition	METEOROLOGICAL CONDITIONS OF APPLICATION	SOLAR EXPOSURE		TYPE OF ENVIRONMENT		TYPOLGY OF RESULT	USABILITY ISSUES								
								Hot	Cold	Humid	Dry	Highly ventilated	Poorly ventilated	Exposed to direct solar radiation	Lack of direct solar radiation	Rural or natural	Urban	Indoor	Equivalent temperature	Dimensionless value	Applicability in human biometeorological studies (Steger et al., 2019)	Number of available software for calculation	Compatibility with user-friendly tool for urban microclimate (Janicki et al., 2021)
Net Effective Temperature (NET) [Gregorcuzk, 1968 (apud Landsberg, 1972)]	● <sub>1</sub>	×	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	×	×	×	×	●	●	●	●	●	×	●	●	●	×	●	×		1	×
Predicted Mean Vote (PMV) + Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) [Fanger, 1970]	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	×	×	●	●	×	×	●	×	●	×	×	●	×	●	×	3	●
Standard Effective Temperature (SET*) [Gonzalez et al., 1974]	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	●	●	●	●	●	●	●	×	●	●	●	●	×	●	●	3	●
Outdoor Standard Effective Temperature (Out_SET*) [Pickup & de Dear, 1999]	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	×	×	●	×	×	1	×
Physiological Equivalent Temperature (PET) [Noppe, 1999]	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	6	●
Actual Sensation Vote (ASV) [Nikolopoulou & Lykoudis, 2006]	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	×	×	×	×	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	×	●	●	1	×
Universal Thermal Climate Index (UTCI) [Jendritzky et al., 2009]	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	×	●	8	●
New Perceived Temperature (PT**) [Steiger, Laschewski & Gratz, 2012]	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	×	●	4	●
Modified Physiologically Equivalent Temperature (mPET) [Chen & Malzarakis, 2014]	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	●	1	●

LEGEND: ● = yes, with reduced accuracy or limitations; ● = yes; ● = yes, it's the main purpose of the model; × = no; ◦ = corresponding criteria is an input; (◦) = some inputs may be related to the corresponding criteria.

figure 1. Operational Metamatrix of Thermal Comfort for European areas.

For its application, it's recommended to define the domains of interest at first, including only the key features that are needed for a project, to retain the indices that has no cross (×), or at least the lesser number of them, in the identified domain. Nevertheless, a cross (×) isn't a necessarily a demerit: in fact, for conducting studies where few data are available (for example at the macro-scale), it is preferable to find an index that doesn't consider the unknown variables in the thermal comfort assessment. If multiple indices will be retained after this operation, a further selection can be made by the user, consulting the original literature.

### 3. Study-case and discussion

#### 3.1. Description of the requirements of the selected study-case

To better understand the application process of the Metamatrix, a study-case with the objective to analyse the link between human thermal perception and the configuration of the urban environment in Europe, both in summer and in winter, is provided. These conditions reflect the operational needs of the ongoing ADEME's MODEVAL-URBA 2019 research project "MESH 2C" by Franck Boutté Consultants. The following selection criteria were considered:

all the environmental factors must be integrated in the calculation methodology: air temperature, mean radiant temperature, wind speed and relative humidity;

applicability of the index at any time of the day and of the year, which implies different seasons and situations with and without direct solar radiation;

employability in urban areas;

the index must be appropriate for applications in human biometeorological studies and computable with at least 3 Software.

Since this study-case has the aim is to investigate thermal comfort without focusing on pedestrian physical factors, whose variability can be very high due to the multiplicity of users in urban spaces, no specific conditions were imposed in this category. Other studies that might be interested, for example, in the impact of walking speed or clothing preferences on thermal comfort, will necessarily have to select criteria on personal parameters (which should be editable inputs). Similarly, no specific

conditions were imposed on the type of the result, since its form isn't a discriminating factor for obtaining valuable assessments.

### 3.2. Application of the Metamatrix of Thermal Comfort and discussion

To select consistent comfort indices with the criteria listed in chapter 3.1, several domains of interest have been bordered on the Metamatrix by blue rectangles. The domains include all CLIMATIC FACTORS, all the features related to the METEOROLOGICAL CONDITIONS OF APPLICATION and all the possibilities of SOLAR EXPOSURE. For the TYPE OF ENVIRONMENT category, only the urban area assessment is asked to provide a valuable result. Furthermore, a selection criterion in the category USABILITY ISSUES discards indices considered inappropriate to predict the human biometric response in thermal environments and retains only the ones that can be computed by at least 3 Software. An index can be considered applicable for the purposes of the previously described study-case if there are no crosses (X) in the blue rectangles. Moreover, all climatic factors should be editable inputs in the calculation process.

In accordance with these selection criteria, all the thermal comfort calculation methodologies have been coloured according to the following legend:

- the red indices have been retained unsuitable for the proposed study-case and excluded;
- the green ones represent the final selection operated with the Metamatrix, meaning that they're all potentially applicable in the considered study-case.

The result of the application of the Operational Metamatrix of Thermal Comfort for European areas is showed in Figure 2.

THERMAL COMFORT INDICES	CLIMATIC FACTORS				PHYSICAL FACTORS				RELEVANT CRITERIA / FEATURES				TYPE OF ENVIRONMENT		TYPOLGY OF RESULT		USABILITY ISSUES						
	Air temperature	Mean radiant temperature	Air velocity	Relative humidity	Clothing insulation	Metabolic activity	Sweating and/or skin temperature	Body composition	Hot	Cold	Humid	Dry	Highly ventilated	Poorly ventilated	Exposed to direct solar radiation	Lack of direct solar radiation	Rural or natural	Urban	Indoor	Equivalent temperature	Dimensionless value	Applicability in human biometeorological studies (Stager et al., 2019)	Number of available software for calculation
Net Effective Temperature (NET) [Gregorczyk, 1968 (apud Landsberg, 1972)]	●	×	●	●	×	×	×	×	●	●	●	●	●	●	×	●	●	●	×	●	×	1	×
Predicted Mean Vote (PMV) + Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) [Fanger, 1970]	●	●	●	●	●	●	×	×	●	●	●	×	×	×	×	●	×	×	●	×	×	3	●
Standard Effective Temperature (SET*) [Gonzalez et al., 1974]	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	●	●	●	●	×	3	●
Outdoor Standard Effective Temperature (Out SET*) [Pickup & de Dear, 1999]	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	●	×	×	●	×	1	×
Physiological Equivalent Temperature (PET) [Höppe, 1999]	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	6	●
Actual Sensation Vote (ASV) [Nikolopoulou & Lykoudis, 2006]	●	●	●	●	×	×	×	×	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	×	●	1	×
Universal Thermal Climate Index (UTCI) [Jendritzky et al., 2009]	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	×	8	●
New Perceived Temperature (PT**) [Steiger, Laschewski & Gratz, 2012]	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	×	4	●
Modified Physiologically Equivalent Temperature (mPET) [Chen & Matzarakis, 2014]	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	1	●

LEGEND: ● = yes, with reduced accuracy or limitations; ● = yes; ● = yes, it's the main purpose of the model; × = no; ◐ = corresponding criteria is an input; (◐) = some inputs may be related to the corresponding criteria.

figure 2. Graphical representation of the methodology for indices selection using the Operational Metamatrix of Thermal Comfort for European areas, referring to the described study-case.

Only three indices have been selected in green, as potentially suitable for the study-case: Physiological Equivalent Temperature (PET); Universal Thermal Climate Index (UTCI); New Perceived Temperature (PT\*\*). At present, the combination of these indices would allow to assess thermal comfort in each European urban area, consistently with the arbitrarily selected criteria for the described study-case. However, in future climate scenarios, where microclimatic situations that doesn't exist yet could

emerge, the pertinence of these indices should be revalued, and new validity limits could be discovered.

According to Staiger et al., 2019, UTCI is the index that offers the highest level of detail with respect to the human body model, as well as the consideration of clothing insulation as a function of air temperature, to account for seasonal adaptability. In accordance with the current state of the art, UTCI has been selected as the most reliable thermal comfort index to study the variations in the citizens' thermal comfort in different configurations of the European urban space, both in summer and in winter.

Nevertheless, it should be kept in mind that UTCI has several validity limits in terms of air temperature (from -50 to +50 °C), mean radiant temperature (from -30 to +70 °C deviation from the value of air temperature), windspeed (from 0,5 to 17 m/s at 10 m from the reference ground), and water vapour pression (up to 50 hPa maximum vapour pression, within a relative humidity range from 5% to 100%) (Bröde et al., 2012; Jendritzky et al., 2009). For instance, areas with no wind, frequently encountered in case of dense urban fabric, must be investigated with other indices, such as PET or PT\*\*. Given these premises, a range of various thermal comfort indices might be necessary to precisely assess the complexity of all the microclimatic ambiances within an operational project, to better respond to factors' local variability. This implies the evolution of most of existing software, that focus on few specific methodologies for thermal comfort assessment, by implementing the simulation of multiple indices in the same work session.

## Conclusion

Outdoor thermal comfort is an essential aspect for sustainable urban development and citizen's safety in the ongoing climate change scenario. Studies to quantify thermal satisfaction produced more than 200 thermal comfort calculation procedures over the past 100 years. Although comprehensive reviews are provided, the existing literature lacks comparative criteria to choose appropriate ones. As resolution, the Operational Metamatrix of Thermal Comfort for European areas has been developed. This graphic chart compares 10 renowned thermal comfort indices, adapted for European climate, that can be computed by available software, capable to simulate the urban climate. Each index is qualitatively evaluated by more than 20 criteria (including physical and climatic factors, types of environments, solar exposures, meteorological conditions and so on), allowing to rapidly detect the thermal comfort calculation methods compatible to customized needs. A study-case has been described through the definition of several domains, for questioning the thermal comfort calculation procedures according to the selected features. The Metamatrix converged on the indices PET, UTCI and PT\*\*. UTCI has been selected as the more appropriate index to respond to the described study-case, jointly with the application of PET or PT\*\* for the microclimatic ambiances outside the UTCI validity domain. For a rigorous assessment of the various microclimatic ambiances coexisting in outdoor spaces, it's advisable to retain a pool of indices among the ones pre-selected by the Metamatrix. Their simultaneous application requires the evolution of most of available software, by implementing multiple simulations in the same work session.

**Acknowledgement:** The authors are grateful to Franck Boutté Consultants, to Ecole des Ponts ParisTech, to ADEME (Agence de la transition écologique) and to ANRT (Association Nationale Recherche et Technologie) for funding this research.

## Bibliography

Bröde P., Fiala D., Błażejczyk K., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., Tinz B. & Havenith G., 2012 : Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, **56**, 481–494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>.

Chen Y. C. & Matzarakis A., 2014 : Modification of physiologically equivalent temperature. *Journal of Heat Island Institute International*, **9**, 26–32.

- Epstein Y., & Moran D. S., 2006 : Thermal Comfort and the Heat Stress Indices. *Industrial Health*, **44**, 388-398. <https://doi.org/10.2486/indhealth.44.388>.
- Fanger P. O., 1970 : *Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. Danish Technical Press, **244**. [https://doi.org/10.1016/s0003-6870\(72\)80074-7](https://doi.org/10.1016/s0003-6870(72)80074-7).
- Gonzalez R. R., Nishi Y. & Gagge A. P., 1974 : Experimental evaluation of standard effective temperature: a new biometeorological index of man's thermal discomfort. *International Journal of Biometeorology*, **18**, 1-15. <https://doi:10.1007/BF01450660>.
- Gregorczyk M., 1968 : Biometeorological and hygienic assessment of negative effective temperatures. *Hygiene & Sanitation*, **33**, 400-403.
- Höppe P., 1999 : The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, **43**, 71-75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>
- Jänicke B., Milošević D. & Manavvi S., 2021 : Review of User-Friendly Models to Improve the Urban Micro-Climate. *Atmosphere*, **12**, 1291. <https://doi.org/10.3390/atmos12101291>.
- Jendritzky G., Havenith G., Weihs P., & Batchvarova E., 2009 : Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for Assessing the Thermal Environment of the Human Being. *Final Report COST Action 730*, 1-26.
- Kumar P., & Sharma A., 2020 : Study on importance, procedure, and scope of outdoor thermal comfort: a review. *Sustainable Cities and Society*, **61**, 102297. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102297>
- Landsberg H. E., 1972 : The Assessment of Human Bioclimate: a limited review of physical parameters. *World Meteorological Organization*, **331**, 1-33.
- Nikolopoulou M. & Lykoudis S., 2006 : Thermal Comfort in Outdoor Urban Spaces: analysis across different European countries. *Building and Environment*, **41**, 1455-1470. <https://doi:10.1016/j.buildenv.2005.05.031>.
- Pickup J. & de Dear R. D., 1999 : An outdoor thermal comfort index (Out-SET\*): the model and its assumptions. de Dear, R., Kalma, J., Oke, T. R., & Auliciems, A., eds., *Biometeorology and Urban Climatology at the turn of the Millennium*. 279-283. World Meteorological Organization.
- Staiger H., Laschewski G., & Grätz A., 2012 : The perceived temperature - a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: Scientific basics. *International Journal of Biometeorology*, **56**, 165-176. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0409-6>.
- Staiger H., Laschewski G., & Matzarakis A., 2019 : Selection of appropriate thermal indices for applications in human biometeorological studies. *Atmosphere*, **10**, 1-15. <https://doi.org/10.3390/atmos10010018>.



## VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DE LA TEMPÉRATURE À GABÈS

Mounir BERRICHE<sup>1et2</sup>, Sami CHARFI<sup>1</sup> et Salem DAHECH<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Sfax, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, SYFACTE, (berriche.mounir2013@gmail.com) (charfisami\_geo@yahoo.fr)

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

**Résumé :** Gabès, ville de la rive sud de la Méditerranée en Tunisie, subit un réchauffement avéré entre 1973 et 2020 et une disparité spatiale des températures de l'air ; ces constats découlent de l'analyse 1/ d'un réseau de 3 stations Davis déployé du 18 août au 30 septembre 2020, 2/ de mesures itinérantes effectuées le 10 août 2021 et 3/ de l'image satellite ASTER-TIR du 09 juillet 2019. Les résultats montrent un écart thermique moyen entre l'oasis et les espaces bâtis de l'ordre de 6°C et un maximum de 10.5°C et révèlent un îlot de chaleur urbain en surface comparable à celui dans l'air d'environ 10°C.

**Mots-Clés :** champs thermique, campagnes de mesure, îlot de chaleur, Gabès

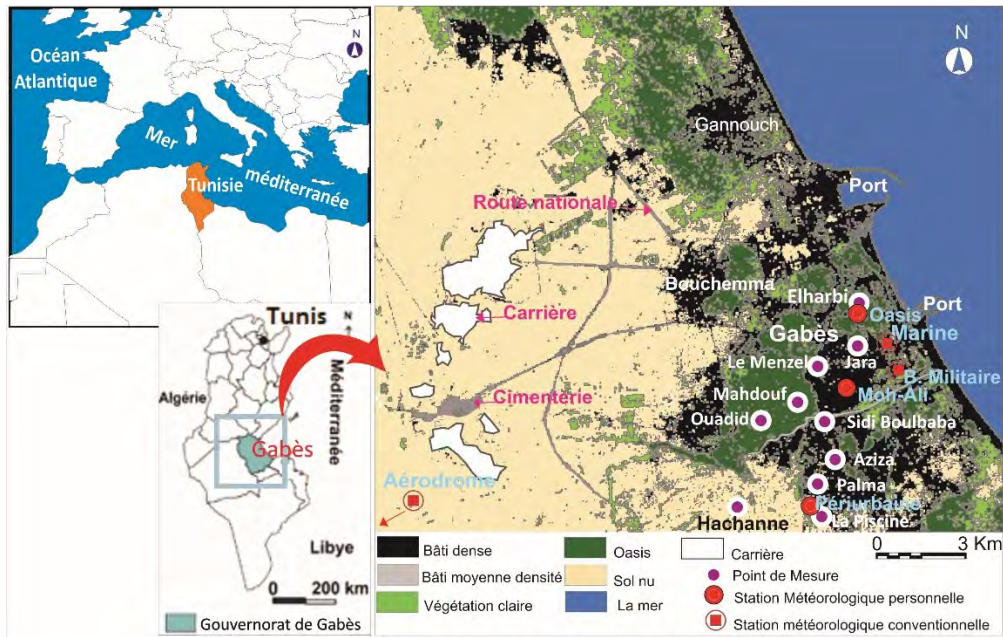
**Abstract:** Gabès, a city on the south bank of the Mediterranean, has experienced a tendency of temperature rise between 1973 and 2020. Moreover, we note a spatial disparity in air temperatures through the establishment of a network of 3 Davis stations from August 18 to September 30, 2020. The measurements survey of August 10, 2021 shows an average thermal difference between the oasis and urban areas of about 6 ° C and a maximum of 10.5 ° C. The ASTER-TIR satellite image from July 09, 2019 reveals a surface urban heat island comparable to that in the air of about 10°C.

**Keywords:** thermal fields, measurement survey, urban heat island, Gabès.

### Introduction

La modification de la chimie de l'atmosphère, surtout après l'ère industrielle, a entraîné une hausse de la température globale, qui varie dans l'espace. En effet, elle est largement remarquable dans la zone méditerranéenne (Toreti et Desiato, 2008). Selon le 5<sup>ème</sup> rapport du GIEC publié en 2014, celle-ci est considérée comme « hotspot » du changement climatique. Par ailleurs, l'artificialisation du milieu, notamment l'étalement urbain au détriment de territoires ruraux, a engendré une élévation des températures des villes et a provoqué le phénomène de l'îlot de chaleur urbain (IUC) (Oke, 1973 ; Cantat, 2004 ; Dahech, 2007, Charfi, 2012). La ville de Gabès qui compte 173 838 habitants (INS, 2014), est une ville de Tunisie méridionale sur la rive sud du bassin méditerranéen. Elle est connue pour la juxtaposition de palmeraies verdoyantes et des activités industrielles polluantes (Bechraoui, 1980). L'expansion de cette ville dans les années soixante-dix, particulièrement après la mise en place d'usines à procédés industriels, a non seulement intensifié le recul de la biodiversité et le tarissement des nappes (Hamdi, 1985 ; Hayder, 1986) mais a aussi provoqué une modification du climat urbain, via la dégradation de la qualité de l'air et une tendance à la hausse de la température (Berrich, 2018). En outre, les oasis de Gabès représentent des palmeraies maritimes uniques dans la zone méditerranéenne. Elles sont caractérisées par des plantations stratifiées denses et peuvent jouer un rôle bioclimatique non négligeable offrant un confort thermique pour les riverains (Bensalah, 2011) bien qu'elles soient sous l'incidence de la contrainte de la pression démographique et l'extension du tissu urbain.

Dans ce travail, nous essayons de mettre en lumière, d'une part, le réchauffement à Gabès entre 1973 et 2020, et d'autre part, de spatialiser la température de l'air et de la surface à l'échelle de l'agglomération et ses environs.



Source: CRDA et la Municipalité de Gabès

figure 1. Localisation de la zone d'étude.

## 1. Zone d'étude

L'agglomération de Gabès se situe au sud-est de La Tunisie. Elle est caractérisée par une topographie isotrope et drainée par un oued qui prend son nom. Son espace urbain est composé de cinq communes (Fig. 1) : Teboulbou, Gabès-ville, Chenin-Enahal, Bouchemma et Gannouche. La localisation de Gabès aux abords du nord du Sahara et en bordure sud du bassin méditerranéen sous un climat semi-aride à nuance sèche, représente une source de vulnérabilité aux extrêmes climatiques à occurrence accrue (GIEC, 2014).

## 2. Données et méthodes

Nous utilisons des mesures issues de la station météorologique de l'Institut National de la Météorologie (INM). Elle est implantée depuis les années quarante au centre-ville de Gabès. La base de données est constituée d'une série chronologique des maxima et des minima quotidiens de température de 1973 à 2020. Pour évaluer l'homogénéité de ces données, nous utilisons la méthode de segmentation d'Hubert et le test de Pettitt. Par ailleurs, nous utilisons le test de Mann-Kendall pour vérifier la significativité de la tendance des séries.

La spatialisations des températures de l'air à 2 m du sol dans la ville de Gabès est fondée sur des mesures itinérantes réalisées en voiture dans les oasis et les différents quartiers par temps radiatif (un ciel dégagé et un vent faible), en été. Les dix points de mesure sont distribués dans la ville : trois oasisiens et sept dans l'espace bâti (fig. 1). La campagne de mesure retenue dans ce travail date du 10 août 2021 à 22h, réalisée à l'aide d'un thermohygromètre Testo 901. Il s'agit d'une journée radiative (ciel clair vent faible) marquée par une forte chaleur ( $t_{x42}^{\circ}\text{C}$ ,  $T_n 26^{\circ}\text{C}$ ) ; ces conditions sont favorables à un ICU intense.

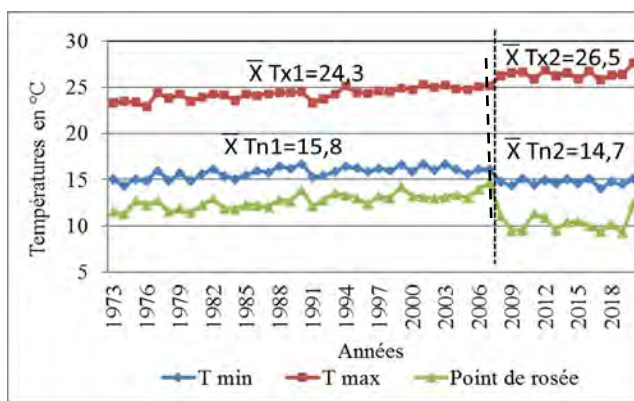
En outre, et afin d'étudier l'intensité et l'évolution des écarts thermiques à Gabès à l'échelle journalière, nous avons implanté trois stations météorologiques de types Davis au centre-ville, à la périphérie et dans l'oasis, du 17 août au 30 octobre 2020. Les données recueillies auprès de ces stations sont comparées entre elles et avec celles issues des stations synoptiques du centre-ville et de l'aérodrome, qui font partie du réseau de l'INM. Afin de mettre en évidence la variabilité spatiale de la température de surface de l'agglomération de Gabès, nous avons recouru à l'imagerie satellitaire issue de l'Advanced Spaceborne Thermal Emission and reflection Radiometer (ASTER) à 90 m de résolution,

prise le 09 juillet 2019 par temps radiatif caniculaire. Les températures de brillance ont été déduites en appliquant la formule de Planck détaillée dans les travaux de Jimenez-Munoz et Sobrino (2010).

### 3. Résultats

#### 3.1. Une tendance à la hausse des températures minimales et maximales

Les tests d'homogénéité des données confirment une rupture statistique en 2007 causée par la délocalisation de la station vers une zone rurale à 25 km du centre-ville et de la mer d'où la chute des températures du point de rosée et des températures minimales (Fig. 2). L'analyse des chroniques thermiques sur la période homogène, de 1973 à 2006 (Fig. 2), montre une tendance significative à la hausse des températures maximales (croissance de 0.47°C/décennie) et minimales (croissance de 0.4°C/décennie), confirmée par le test de Man Kendall avec une marge d'erreur respectivement inférieure à 0.01% et 0.02%. Nous constatons que la tendance à la hausse se poursuivait après 2007 (année de la délocalisation de la station).



**figure 2.** Variations des moyennes annuelles des minima et des maxima de températures et du point de rosée à Gabès entre 1973 et 2020 (Données : INM).

La hausse des températures depuis trois décennies a été confirmée par des investigations dans d'autres villes en Tunisie comme Sfax et Tunis (Dahech, 2012 ; Charfi et Dahech, 2018). Il est édifiant de signaler aussi que, l'extension urbaine aux dépens des oasis et des sols nus surtout aux abords de la station urbaine, explique à son tour cette tendance au réchauffement. En effet, l'énergie accumulée pendant la journée par les constructions et les autres espaces imperméables est relâchée lentement sous forme de chaleur tellurique pendant la nuit (Oke, 1987).

En effet, la pression démographique à Gabès après les années soixante-dix a provoqué l'étalement urbain avec l'apparition de plusieurs quartiers comme ceux de Mohamed Ali, El Ezdihar et Bab Bhar rendant le centre-ville plus compact et plus dense. L'évolution du tissu urbain serait un facteur déterminant de la variation spatiale des températures à Gabès par temps radiatif dont le phénomène de l'îlot de chaleur urbain est la manifestation majeure.

#### 3.2. Intensité et variabilité temporelle de l'îlot de chaleur urbain (ICU)

La station Davis installée située au centre-ville (Mohamed Ali) est en moyenne plus chaude la nuit que le site de l'oasis et que celui de la périphérie (Fig. 1). Un ICU faible de 0.5 à 2°C, en moyenne, s'installe la nuit. La faiblesse des écarts s'explique vraisemblablement par l'installation des capteurs des stations au-dessus des toits, d'où l'effet de site, exprimé par l'effet de paroi, qui explique en grande partie l'atténuation du phénomène de l'ICU. Une heure après le lever du soleil, le site de la station de l'Oasis commence à être plus chaud que ceux du centre-ville et de la périphérie (Fig. 3). Ce phénomène particulier pourrait s'expliquer par une faible turbulence due à la faible densité de l'oasis, d'où la réduction des échanges de vapeur d'eau (Riou, 1990). Par conséquent, le brassage de l'air diminue aux environs de la station, située à une altitude plus basse que la canopée de l'Oasis. En effet, la diminution de la turbulence peut entraîner un ralentissement de la dissipation de la chaleur (le jour) ou du froid (la nuit) et amener des températures plus élevées le jour et plus basses la nuit (Riou, 1990). Au cours de la journée, la station urbaine est plus exposée à la brise de mer et donc plus fraîche que la périphérie. L'effet de la continentalité devient plus marqué à la station de l'aéroport, qui est plus chaude le jour et plus froide la nuit à cause de la brise d'amont qui se confond avec la brise de terre. L'inversement de

l'écart thermique entre la station du centre-ville et celle de la périphérie est plus tardif que celui à l'Oasis. En effet, cette dernière se réchauffe plus rapidement le matin que les deux autres stations et demeure plus chaude que la station du centre-ville jusqu'au début de l'après-midi, parallèlement au renforcement de l'évaporation qui permet l'émergence de l'effet rafraîchissant de l'oasis. Cette apparition tardive d'un îlot de fraîcheur au niveau de l'oasis s'explique par l'arrosage irrégulier dans le temps et dans l'espace des cultures maraîchères relativement abondantes dans la strate herbacée.

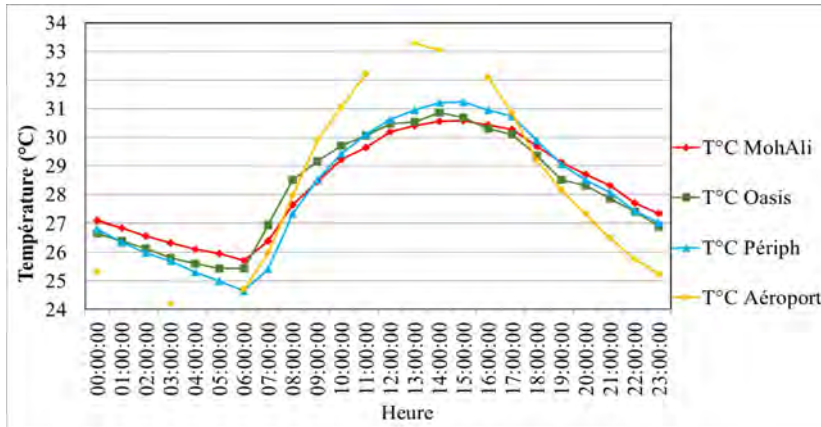


figure 3. Évolution des températures moyennes horaires de quatre stations météorologiques: Mohamed Ali (urbaine), Oasis, Périphérie (périurbaines) et Aéroport (rurale) du 18 août 2020 au 30 septembre 2020.

En périphérie, l'arrivée de la brise de mer est plus tardive (elle se lève vers 12h) à cause de l'éloignement de la mer. Ce fait explique l'écart positif des températures par rapport aux deux stations plus proches de la mer : Mohamed Ali et Oasis. Pour affiner davantage nos déductions, il était obligatoire d'augmenter la résolution spatiale des mesures thermo-hygrométriques et du vent par le biais des campagnes itinérantes.

### 3.3. Variabilité ponctuelle des températures de l'air à Gabès

La campagne de mesure du 10 août 2021 à 21h montre une disparité thermique spatiale fonction de l'occupation du sol. Les sites des mesures dans les palmeraies sont plus frais que ceux dans les espaces bâtis (Fig. 4 & 5). La valeur maximale enregistrée à Jara, au centre-ville, atteint 32.5° contre 22°C à l'Oasis (Ouadid), soit un gradient thermique spatial de 10.5°C.

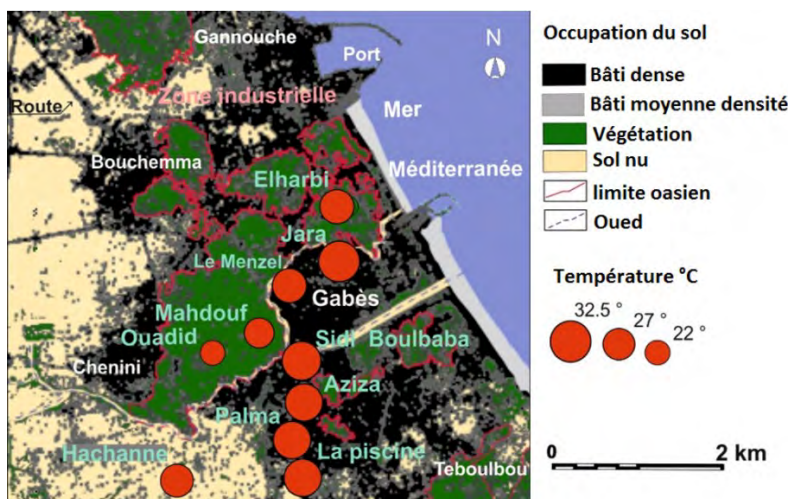


figure 4. Spatialisation de la température nocturne de l'air à 2 m du sol à Gabès le 10 août 2021 à 21 h.

Cet écart thermique s'explique par le fait que le bilan énergétique varie entre les espaces bâtis et les végétations oasiennes. Celles-ci, pendant la journée, atténuent le rayonnement solaire par le biais de l'ombrage et l'utilisation de l'énergie solaire sous forme de chaleur latente par évapotranspiration (Bigorgne, 2015). L'arrosage a probablement renforcé l'intensité de cet écart.

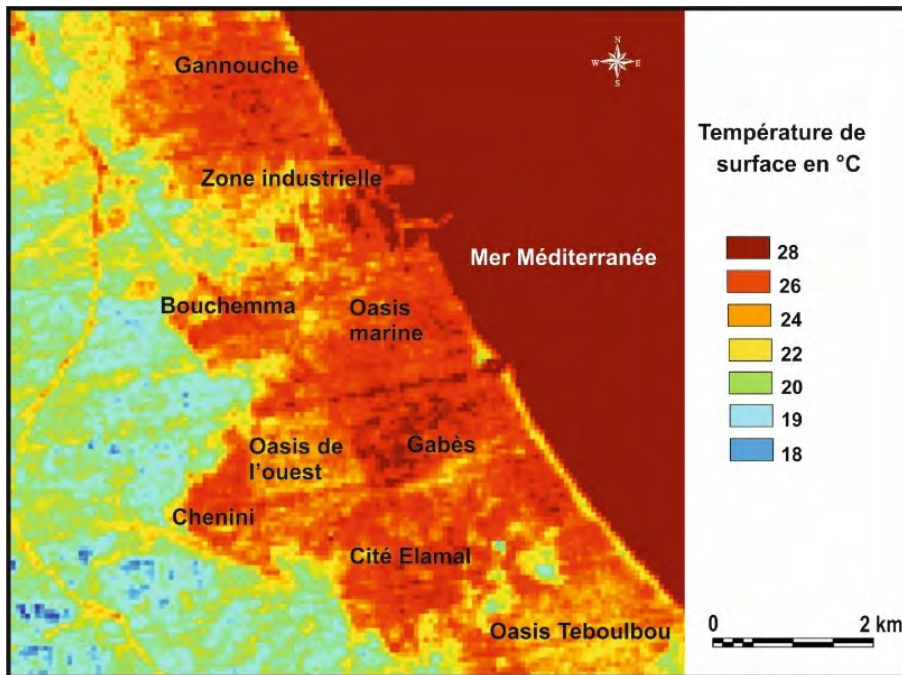
Quelques disparités sont également enregistrées en milieu oasien. En effet, la figure 4 révèle que le site oasien Elharbi enregistre une température nocturne plus élevée que ceux de Mahdouf et d'Ouadid, avec respectivement 30°C, 28°C et 22°C. Ces derniers se situent dans une palmeraie dense et étendue à l'ouest de Gabès (590 ha), donc plus fraîche. Cependant, le point de mesure « Elharbi » se trouve dans l'oasis marine moins étendue (290 ha), à faible densité (CRDA, 2020) et plus influencé par la mer. Cette



dernière agit par sa forte inertie thermique et fait que la frange littorale enregistre des températures plus élevées que l'arrière-pays, la nuit.

### 3.4. Un îlot de chaleur en surface à Gabès

L'imagerie satellitaire permet de mettre en relief la thermographie des différents éléments tant de la zone urbaine que de l'espace rural (Song et Park, 2015). L'image ASTER-TIR montre une nette variabilité spatiale de la température de surface à Gabès, enregistrée par un temps radiatif et chaud (Fig. 5). En effet, le 9 juillet 2019 les températures ont oscillé entre 26 et 45°C. La partie centrale de la ville de Gabès est occupée par un noyau chaud, mais discontinu.



**figure 5.** Disparités spatiales de la température nocturne de surface suivant la scène ASTER-TIR datée le 09 juillet 2019.

Vers le nord, des micro-îlots de chaleurs dans la zone industrielle et à Gannouche sont bien individualisés, et avec moins d'intensité au sud, à la Cité Elamal. Cette scène permet aussi de se rendre compte des températures relativement élevées dans les oasis allant de 22° à 26°C vu que le radiomètre ne capte que l'émissivité de la canopée (le niveau supérieur des palmiers). Malgré les limites de l'imagerie spatiale, la scène nocturne d'ASTER visualise un champ thermique proche de celui qu'on a enregistré à 2 m de la surface (dans l'air).

### Conclusion

Nous avons constaté une augmentation significative de la température entre 1973 et 2006, expliquée à l'échelle globale par les quantités additionnelles des gaz à effet de serre, et localement par l'extension horizontale et verticale des bâtis au détriment des oasis et du sol nu. L'îlot de chaleur urbain à Gabès paraît proportionnel à la taille de la ville. L'implantation des stations au-dessus des toits fait que les comparaisons effectuées se faisaient entre les impacts des différents types d'"airs" (urbain, périurbain, oasien) et non entre sites. L'effet de l'oasis paraît variable en fonction de la densité des palmiers, et de l'arrosage. De surcroît, cette étude révèle une inégalité spatiale de température de l'air ambiant entre les espaces bâtis, plus chauds que les palmeraies, et les terres nues. Les oasis forment des îlots de fraîcheurs pendant les nuits radiatives de la saison chaude dans une zone semi-aride qui se situe aux abords nord du Sahara, une sorte de « climatiseur naturel » qui impulse des vents frais vers les quartiers limitrophes. En outre, les jours de temps calme favorisent le phénomène d'ICU la nuit dans l'air et à la surface. La hausse des températures, en relation avec le réchauffement climatique



peut augmenter le stress hydrique et donc la vulnérabilité d'une région où la question de l'eau est problématique.

## Bibliographie

Bechraoui A., 1980 : *La vie rurale dans les oasis de Gabès*. Thèse de doctorat, Université de Tunis, 301 pages.

Bensalah M., 2011 : *La palmeraie de Gabès*. Projet Phoenix France-Italie, 7 pages.

Berrich M., 2018 : *La disparité de la perception et de la vulnérabilité envers la pollution atmosphérique à Gabès : Etude comparative entre Bouchemma et Ezzarat*. Mémoire de Master. Faculté des Lettres et des Sciences Humaines de Sfax, 118 pages.

Bigorgne J., 2015 : Les îlots de chaleur urbains à Paris, *Cahier #1 .Atelier Parisien d'Urbanisme*, 35 pages.

Cantat O., 2004 L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois* [En ligne], **191** | 2004/2, mis en ligne le 10 septembre 2008, 33 pages.

Charfi S., 2012 : *Le comportement spatio-temporel de la température dans l'agglomération de Tunis*. Thèse de doctorat, Université de Tunis et Université de Nice (en cotutelle), 308pages.

Charfi S., Dahech S., 2018 : Cartographie des températures à Tunis par modélisation statistique et télédétection, *M@ppemonde*, **123**, 14 pages.

CRDA., 2020 : Rapport Annuel de Commissariat Régional de Développement Agricole de Gabès. Tunisie, 209 pages.

Dahech S., 2007 : *Le vent à Sfax (Tunisie), impact sur le climat et la pollution atmosphérique*. Thèse de doctorat soutenue à Université de Paris VII, 309 pages et annexes.

Dahech S., 2012 : Evolution de la répartition spatiale des températures de l'air et de surface dans l'agglomération de Sfax entre 1987 et 2010. Impact sur la consommation d'énergie en été. *Climatologie*, numéro spécial « Climats et changement climatique dans les villes », 11 – 32.

GIEC., 2014 : Changements climatiques 2014: Rapport de synthèse, Genève, Suisse, 161 pages.

Hamdi A. M., 1985 : *Industrialisation et environnement : étude d'un cas : Gabès (Tunisie)*. Thèse de doctorat, Université de Paris 10, 434 pages.

Hayder A., 1986 : *L'industrialisation à Gabès et ses conséquences : étude de géographie urbaine et économique*. Thèse de doctorat, Université de Tunis, 242 pages.

Jimenez-Munoz J., Sobrino J., 2010 : A Single-Channel Algorithm for Land-Surface Temperature Retrieval From ASTER Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* **7**(1), 176 – 179.

Oke T-R., 1973 : City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment Pergamon Press* 1973. **Vol. 7**, 769-779.

Oke T-R., 1987 : *Boundary Layer Climates*. British Library Cataloguing in Publication Data, Second edition, 435 pages.

Riou C., 1990 : Bioclimatologie des oasis. In : Dollé V. (ed.), Toutain G. (ed.). *Les systèmes agricoles oasiens*. Montpellier, <http://om.ciheam.org/om/pdf/a11/Ci901496.pdf>.

Song B., Park A., 2015 : Analysis of Surface Temperature Accuracy in ASTER Images according to Land-Use Type. ICUC9 - *9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment*, 6 pages.

Toreti, A., Desiato F., 2008 : Change in temperature extremes over Italy in the last 44years. *Int. J. Climatol.*, **28**:733-745.

## SITUATIONS MÉTÉOROLOGIQUES EXTRÊMES AU MAROC SEPTENTRIONAL : CAS DES VAGUES DE CHALEUR SUR LA VILLE DE CASABLANCA

**Aissam BOUAICHE<sup>1</sup>, Nidal LOTFI<sup>1</sup>, Mohamed Saïd KARROUK<sup>1</sup>, Majda CHAIR<sup>1</sup>, Mohamed YAZAMI<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Laboratoire des Changements Environnementaux et Aménagement Territorial (LCEAT), FLSHBM, UHII-Casablanca, Maroc. E-mail : [BOUAICHE.Aissam.UH2.LCEAT@gmail.com](mailto:BOUAICHE.Aissam.UH2.LCEAT@gmail.com), [Nidal.lotfi86@gmail.com](mailto:Nidal.lotfi86@gmail.com), [Chairmajda@gmail.com](mailto:Chairmajda@gmail.com), [M.Karrouk@FLBenMSik.ma](mailto:M.Karrouk@FLBenMSik.ma), [mohamed.yazamiztait@usmba.ac.ma](mailto:mohamed.yazamiztait@usmba.ac.ma)

**Résumé :** La ville de Casablanca, caractérisée par une grande variabilité climatique, est souvent exposée à des extrêmes climato-thermiques, parfois aigus, qui méritent le qualificatif de paroxysme. Ces événements extrêmes se manifestent par des anomalies thermiques positifs très amples, traduisant une forte chaleur. Le présent travail propose d'étudier l'intensité et la fréquence des vagues de chaleurs à la station de Casablanca. Il cherche également à déceler les tendances des fortes chaleurs afin de percevoir la réalité des changements climatiques dans cette ville. Pour cette étude, nous utilisons les données des températures maximales et minimales quotidiennes, pour la période allant de 1976 à 2016. Les résultats obtenus révèlent que la température a tendance à augmenter dans cette station, ce qui correspond avec la problématique du réchauffement climatique.

**Mots-Clés :** extrêmes, vagues de chaleur, Casablanca, Maroc

### Introduction

Les températures en région Méditerranéenne restent une préoccupation majeure, car leur variabilité ainsi que leurs extrêmes ont des implications sociales et économiques fortes. Par exemple, des vagues de chaleur étendues qui semblent devenir plus fréquentes dans la région Méditerranéenne peuvent provoquer la hausse du taux de mortalité, en particulier dans les zones urbaines. Une plus grande fréquence des vagues de chaleur a aussi des conséquences désastreuses sur la santé humaine et sur la végétation, en particulier les forêts (Khomsî, 2014).

Le Maroc septentrional, vu sa position géographique, entre les régions arides du Sahara et en bordure de la Méditerranée et l'Atlantique reste l'une des zones marocaines les plus vulnérables aux effets néfastes des changements climatiques (Born et *al.*, 2008). Les premiers signes de changements climatiques se manifestent déjà au Maroc à travers à la fois les évolutions des températures et des précipitations. Le quatrième rapport du GIEC prévoit une diminution au niveau des précipitations qui peut atteindre 20% pour la fin du siècle courant sur le Maroc. L'augmentation au niveau des températures est prévue d'atteindre 2,5 °C à 5,5°C suivant les mêmes scénarios du GIEC vers la fin du siècle courant (GIEC, 2014).

Selon des études plus récentes (Sebbar et Hanchane, 2022), la ville de Casablanca possède un climat méditerranéen à forte tendance océanique qui lui confère des hivers doux et relativement humides et des étés modérément chauds et sans précipitations. La ville connaît des conditions environnementales complexes, une mauvaise qualité de l'air due au transport et aux activités industrielles et peu d'espaces verts. Elle est devenue la ville la plus polluée au Maroc. Cette pollution atteindrait, selon la plupart des sources de mesure de qualité de l'air, un seuil critique et la santé des habitants s'en retrouve parfois très sérieusement menacée (Nejjari et *al.*, 2016).

Pour cette raison, nous proposons dans ce travail d'étudier l'intensité et la fréquence des vagues de chaleur à la station de Casablanca pour la période allant de 1976 à 2016. On cherche également à déceler les tendances de ces fortes chaleurs afin de percevoir la réalité des changements climatiques dans la ville de Casablanca.

## Données et méthodes

### Présentation de la zone d'étude

La ville de Casablanca est la capitale économique du Maroc, faisant partie de la région Casablanca-Settat, avec une population proche des 4,5 millions d'habitants (HCP, 2014). Il s'agit d'un site presque totalement urbanisé du fait de la croissance démographique et économique. Son littoral s'étend sur plus de 50 km. Le secteur d'étude est limité, au Nord, par les eaux de l'Atlantique, à l'est, par les plateaux de Ben Slimane et au sud à l'ouest, par les riches et fertiles plaines de Chaouia (Fig. 1). Elle est située sur la plaine de Chaouia qui est considérée comme une région agricole par excellence. Sa position sur la côte atlantique, au nord-ouest de l'Afrique lui confère un rôle stratégique pour les échanges commerciaux d'import et d'export à l'échelle mondiale, et fait d'elle une des villes les plus attractives du Maroc.

Casablanca a un climat méditerranéen semi-aride, caractérisé par un été chaud très sec et un hiver doux. Les précipitations sont irrégulières dans l'espace et dans le temps, elles varient entre 55mm et 500mm/an. La température annuelle moyenne de 21,8 °C. La température moyenne la plus basse est enregistrée en janvier (17,1 °C) et la plus élevée est en juillet (25,9°C) (Tableau 1).

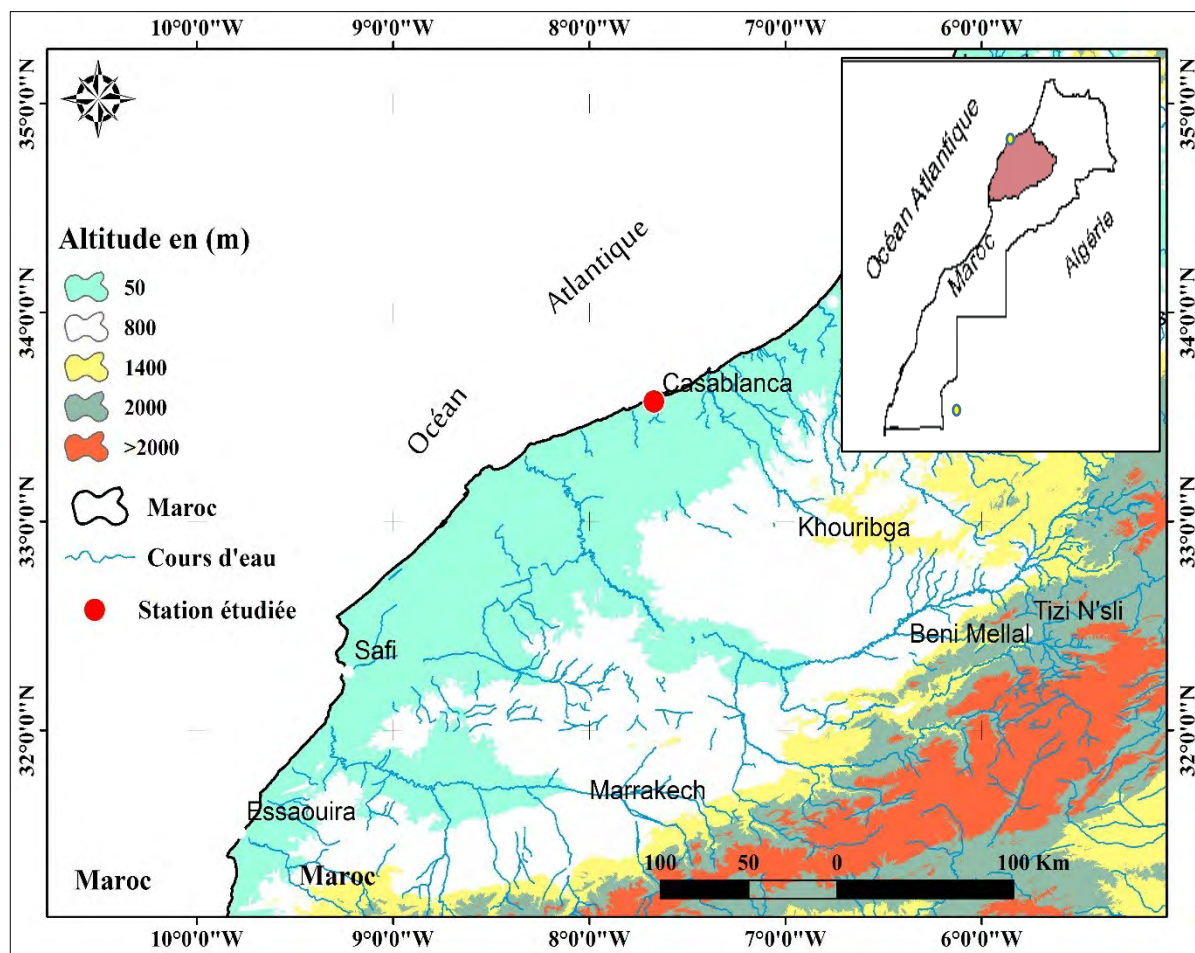


figure 1. La situation géographique de la zone d'étude (la ville de Casablanca)

### Données

Pour cette étude, nous utilisons les mesures des températures maximales diurnes (TX) et minimales nocturnes (TN) de la station de Casablanca. La période de référence s'étend de 1976 à 2016 (40 ans x

365 jours). La Figure 1 illustre la position géographique de cette station et le Tableau 1 fournit des informations sur cette station.

**Tableau 1.** Les données géographiques et climatiques (température de l'air) de la station météo de Casablanca (1976-2016). Données : Direction Générale de la Météorologie (DGM, 2016).

Région	Station	Long.	Lat.	Altitude	Moyenne annuelle	Moyenne en Janvier	Moyenne en juillet
Atlantique	Casablanca	7°33'28" Ouest	33°35'18" Nord	60 m	21,8°C	17,1°C	25,9°C

## Méthodologie

Cette étude est fondée sur une approche méthodologique simple pour caractériser un épisode de forte chaleur ou de très forte chaleur et torride. En général les méthodes proposées dans le présent travail sont subdivisées en trois approches statistiques :

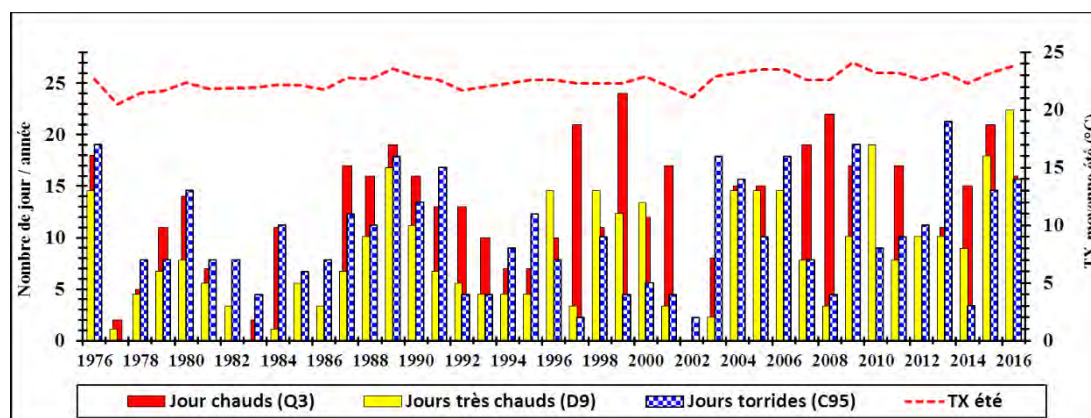
1. L'analyse de la fréquence des jours de forte chaleur (toutes types de chaleurs confondues).
2. L'analyse de l'intensité de la chaleur, soit le poids par rapport à la durée. Il s'agit des vagues de chaleur qui peuvent être longues et modérées, d'autres courtes mais intenses. La méthode consiste d'abord à calculer les degrés-jours (DJ) quotidiens. Ensuite, la somme des degrés-jours de chaque épisode incluant au moins un jour de chaleur torride permet de déduire son poids. Ce poids, divisé par le nombre de jours de l'épisode donne l'intensité de la chaleur du jour.
3. L'analyse des vagues de chaleur par l'indice climatique SU35, qui correspond au nombre total annuel de jours ayant une température maximale supérieur à 35°C (Babqiqi, 2013).

## Résultats et discussions

### Fréquence des jours de fortes chaleurs

Ben Boubaker (2010), dans un premier temps, utilisait une approche statistique pour identifier les vagues de chaleur, en se basant sur des seuils relatifs de chaleur. La méthode consiste à analyser les quantiles de la distribution des TX et des TN quotidiennes sur l'ensemble de la série d'observation pour calculer le 3<sup>ème</sup> quartile (Q3), le 9<sup>ème</sup> décile (D9) et 95<sup>ème</sup> centile (C95) correspondant respectivement aux jours de forte chaleur, de très forte chaleur et aux jours torrides.

L'analyse de la Fig. 2 a montré que la station de Casablanca présente une fréquence élevée des jours chauds, très chauds et torrides : leur total au sein de la série statistique (1976-2016) est d'environ 1180 jours. Les jours chauds arrivent en tête avec un taux de 42,37% (500 jours), suivis par les jours très chauds, avec environ 386 jours, soit 31,16%. L'année 2016 a enregistré le taux le plus élevé de jours très chauds (20 jours) (Fig. 2). Le nombre des jours torrides a été de 312, soit 26,44 % du nombre total de jours. L'année 2013 a enregistré le taux le plus élevé de jours torrides (19 jours), alors que l'année 1999 reste celle qui a enregistré le plus grand nombre des jours chauds (24) (Fig.2).



**figure 2.** Variabilité interannuelle du nombre des jours chauds, très chauds et torrides, ainsi que de la moyenne des températures maximales diurnes en été (TX) à Casablanca entre 1976-2016

### Intensité des fortes chaleurs

L'intensité des fortes chaleurs dépend de l'ampleur magnitude de la chaleur diurne (TX), nocturne (TN), mais également de sa persistance inter-journalière. En effet, une forte chaleur peut être longue et modérée (une semaine) ou courte mais de forte intensité (passagère de 1 à 2 jours) (Ben Boubaker, 2010 ; Azzi et Medjerda, 2015).

Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer l'intensité des fortes chaleurs dans certains pays méditerranéens, comme c'est le cas pour le Maroc, Algérie et la Tunisie. Selon Boubaker (2010) et Azzi Medjerba (2015) pour évaluer l'intensité de la chaleur, nous avons commencé par répertorier tous les jours de chaleur forte, très forte et extrêmes, c'est-à-dire tous ceux appartenant au 3<sup>ème</sup> quartile (TX>25.9°C et TN>20°C).

Dans la deuxième étape nous avons calculé les degrés-jours (DJ) quotidiens, c'est-à-dire (TX-25.9°C) + (TN-20°C). Ensuite la somme de degrés-jours (DJ) de chaque épisode incluant au moins un jour de chaleur torride permet de déduire son poids (Tableau 2). Ce poids, divisé par le nombre de jours de l'épisode donne l'intensité de la chaleur du jour (Ben Boubaker, 2010. Azzi et Medjerda, 2015). Dans ce contexte, nous avons choisi trois jours à température maximale diurne entre 32°C et 37,6°C. Le degré-jours, le poids et l'intensité se calcule comme indiqué dans le tableau ci-dessous (Tableau 2).

**Tableau 2.** Exemple de trois jours consécutifs (entre 1 et 3/08/2003) pour déterminer le poids, les degrés- jours et l'intensité des fortes chaleurs à la station de Casablanca

Jours	TX (°C)	TN (°C)	Calculé	Degrés -jours (DJ) (°C)	Poids (°C)	Intensité (°C)
01/08/2003	37.6	27.2	(37.6-25.9)+ (27.2-20)	18.9		41/3=
02/08/2003	34.1	23.4	(34.1-25.9)+ (23.4-20)	14.1	<b>41.0</b>	<b>13.66</b>
03/08/2003	32.0	22.2	(31.8-25.9)+ (22.2-20)	08.1		

Les résultats présentés dans le Tableau 3 nous permettent de classer les vagues de chaleur selon leur intensité, leur poids ou leur persistance. Au niveau de la station de Casablanca sept épisodes les plus chauds ont été détectés au cours du période étudié 1976-2016 (Tableau3). Ces vagues de chaleur se sont stabilisées au cours des mois de juillet et d'août qui constituent la saison estivale. Les vagues de chaleur les plus intenses ont été enregistrés au cours de dernière décennie. Les étés 1982, 1989, 2000, 2003, 2004, 2005 et 2010 ont été marqués par des jours torrides sans précédent.

En ce qui concerne le poids total (P, en °C), l'intensité de chaleur (I/Jour, en °C) et persistance, c'est la vague du 01 au 03 aout 2003 qui a été le plus important avec P = 41.0°C et 13.6°C pour l'intensité, suivi de l'année 2004 (P=37.4°C), 1989 (P= 29.3°C), 1982 (P=25.9°C) (Tableau3).

**Tableau 3.** Caractéristiques des principales vagues de chaleur à Casablanca entre 1976-2016 (les 7 épisodes les plus chauds, avec un poids total P >12.0°C)

Rang	Épisode	Durée (jours)	Poids total (P en °C)	Intensité de chaleur /jour (°C)
1	27/08/2010	1	16.6°C	16.6°C
2	21/07/2005	1	14.8°C	14.8°C
3	23-24/07/2004	2	37.4°C	18.7°C
4	1-2-03/08/2003	3	41.0°C	13.6°C
5	15/07/2000	1	12.0°C	12.0°C
6	20-21/07/1989	2	29.3°C	14.6°C
7	18-19/08/1982	2	25.9°C	12.9°C



### Tendance de l'indices SU35

La Figure 3 présente la variation du nombre total annuel de jours ayant une température maximale supérieur à 35°C (l'indice de chaleur SU35) sur la période allant de 1976 à 2016 au niveau de la ville de Casablanca. On constate que cet indice est très variable avec une tendance à la hausse.

Par ailleurs, dans la Fig. 3 on constate que le nombre de fois où l'indice SU35 a été supérieur à 3 par an est nettement en hausse et même que toutes les années 1989-2000-2003-2004-2005-2006 et 2015 ont enregistré plus de 2 jours avec des températures supérieures à 35°C. De manière générale, on constate que la station de Casablanca a connu une tendance à la hausse de cet indice (Fig.3).

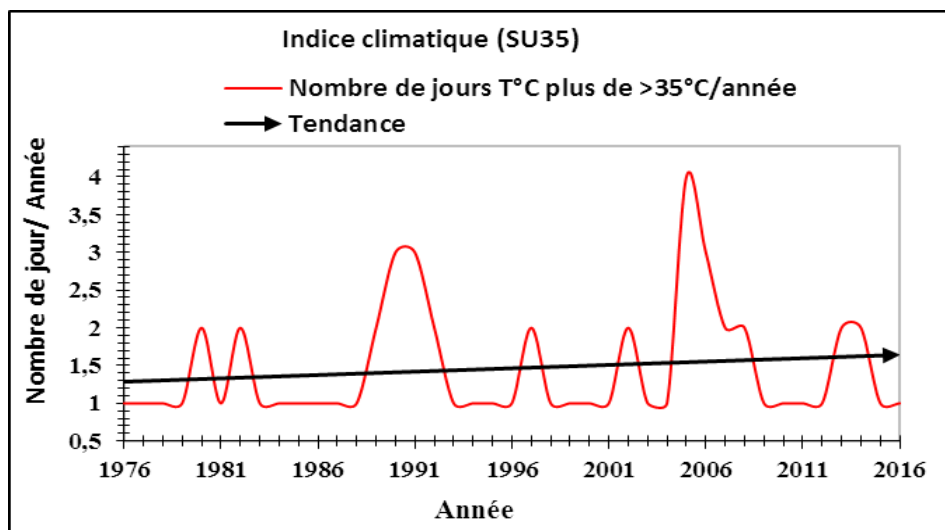


figure 3. Variation de l'indice de chaleur SU35 à Casablanca entre 1976-2016

### Conclusion

Le but principal de cet article est de fournir un aperçu sur les particularités des jours chauds et des vagues de chaleur (fréquence, intensité, tendance) au niveau de la ville de Casablanca pour la période 1976-2016. Les résultats montrent une grande variabilité interannuelle pour les trois catégories de jours de chaleur (jours chauds, très chauds et torrides). Les vagues de chaleur les plus importants en termes d'intensité ont été enregistrés au cours des étés 1982, 1989, 2000, 2003, 2004, 2005 et 2010.

L'analyse du nombre de jours ayant une température maximale supérieur à 35°C (l'indice SU35) a montré qu'au niveau de la station de Casablanca, cet indice a une tendance à la hausse, avec un taux entre 0.017 et 0.018 jours/an, soit une augmentation de 2 jours sur 40 ans (1976-2016). Les résultats obtenus ont montré que la température de l'air, en particulier les hautes valeurs, ont tendance à augmenter dans cette station, ce qui correspond avec la problématique du réchauffement climatique.

En effet, les vagues de chaleur ont des impacts négatifs important sur les activités socio-économiques, telle que l'agriculture et la ressource en eau, ainsi que sur les êtres vivants (Porter et Gawith, 1999). Par exemple, les cultures et le système hydrologique dans les oueds (les lacs, les nappes phréatiques) pourraient être gravement endommagées si la température quotidienne dépasse un certain seuil à un certain stade de développement des plantes.

### Remerciements

Les auteurs remercient vivement le comité scientifique du 35<sup>ème</sup> colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie (AIC'2022 Toulouse France) en particulier le professeur Liliana ZAHARIA

pour son aide précieuse et sa patience pour l'évaluation de cet article avec ses remarques et réflexions pertinentes.

## Bibliographie

- Azzi A., Medjerba A., 2015 : Les situations météorologiques extrêmes, signe d'un éventuel changement climatique : cas des vagues de froid sur le Nord de l'Algérie. *Actes du XXVIIIème colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Liège, 463-368.
- Babqi Abdelaziz., 2013 : Changements Climatiques au Maroc : *Etude du cas de la Région de Marrakech Tensift Al Haouz et implications sur l'agriculture à l'horizon 2030*. Thèse de doctorat, Université Caddi Ayad-Marrakech, 252 pages.
- Ben Boubaker H., 2010 : Les paroxysmes climato-thermiques en Tunisie : approche méthodologique et étude de cas. *Climatologie*, 56-87.
- Born K., Christoph M., Fink A.H., Knippertz P., Paeth H., Steph P., 2008: Moroccan climate in present and future: combined view from observational data and regional climate scenarios. *In. Meteorol. Zeit*, **17**,533-551.
- Escourrou G., 1991 : Le climat et la ville. *Norois*, **162**, 358-359.
- GIEC., 2014 : *Changements climatiques, rapport de synthèse : Contribution des groupes de travail I, II et III au cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat*, GIEC, Genève, Suisse, 161 pages.
- Haut-Commissariat au Plan (HCP), 2014 : *Projection de la population rurale et urbaine du Maroc entre 1960 et 2050*, Rabat, Maroc, 255 pages.
- Khoms K., 2014 : *Variabilité hydro-climatique dans les bassins versants du Bouregreg et du Tensift au Maroc : moyennes, extrêmes et projections climatiques*. Thèse de doctorat. Faculté des Sciences, Université Mohamed V Rabat, 218 pages.
- Nejjari C., Machakra-Tahiri T., Tessier J. F., 2016 : La pollution atmosphérique : qu'en est-il au Maroc?, *Pollution Atmosphérique*, **165**, 91- 96.
- Porter, J.R., Gawith, M., 1999: Temperatures and the growth and development of wheat: a review. *Eur. J. Agron.* **10** (1), 23–36.
- Sebbar A., Hanchane M., 2022 : L'îlot de chaleur urbain (ICU) sur la ville de Casablanca. Actes du colloque international "Climat urbain entre urbanisation et changement/aléas climatiques", FLSH-Université Ibn Zohr Agadir, 210 pages.

## HABITER EN PÉRIODES DE FORTES CHALEURS - VÉCUS ET INÉGALITÉS SOCIO-SPATIALES DES HABITANTS DE SAINT-PRIEST

Malou ALLAGNAT <sup>1</sup>, Géraldine MOLINA <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Doctorante en géographie sociale. Thèse Cifre : ESO Nantes UMR6590,IRSTV FR CNRS2488, Grand Lyon, France et MSH LSE ([malou.allagnat@univ-nantes.fr](mailto:malou.allagnat@univ-nantes.fr) et MSH, 14 Av. Berthelot, 69007 Lyon)

<sup>2</sup> CR CNRS au laboratoire ESO Nantes UMR6590,IRSTV FR CNRS2488, France ([geraldine.molina@gmail.com](mailto:geraldine.molina@gmail.com) et IRSTV,

1 rue de la Noë 44321 Nantes Cedex 3)

**Résumé :** La contribution analysera la manière dont les habitants vivent les périodes de fortes chaleurs ainsi que leurs différences de vulnérabilités qui s'observent à travers plusieurs échelles spatiales et temporelles : le corps, l'espace domestique et l'espace du dehors. La communication propose d'exposer les premiers résultats d'une enquête qualitative menée auprès des habitants de Saint-Priest, une commune située en périphérie urbaine de la métropole de Lyon. Lors des étés 2020 et 2021, une combinaison de modes d'investigation ont permis d'analyser les rythmes et espaces de la vie estivale des habitants.

**Mots-Clés :** Période de fortes chaleurs, habiter, inégalités socio-spatiales, Métropole de Lyon.

**Abstract:** The contribution will examine the experiences and vulnerabilities of inhabitants in periods of hot weather across different spatio-temporal scales including the body, the home environment and the outdoors. The first results of a qualitative survey carried out on inhabitants of Saint-Priest located on the urban outskirts of Lyon Metropole are presented. During the summers of 2020 and 2021, several modes of investigations were combined in order to analyse the inhabitants' summer time lifestyle.

**Keywords:** Period of hot weather, living, socio-spatial inequalities, Lyon Metropole.

### Introduction

Comment l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des périodes de fortes chaleurs bousculent-elles nos « géographies tranquilles » (Di Méo, 1999) pour s'inscrire de plus en plus dans nos « expériences climatiques ordinaires » (Molina, 2016) ? Dans ce contexte de changements climatiques globaux et locaux, se pose la question des amplifications des inégalités sociales et spatiales lors des fortes chaleurs. Cette communication s'appuie sur une recherche doctorale CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) réalisée en collaboration avec la Métropole de Lyon, le laboratoire de recherche ESO (UMR 6590), la MSH-LSE et l'IRSTV (FR CNRS 2488). À travers le prisme des « modes d'habiter », cette recherche s'attache à comprendre et expliquer les tensions spatiales et sociales amplifiées lors des périodes de fortes chaleurs. Pour ce travail doctoral rythmé par les saisons, la période estivale représente une phase de recueil de données. Celle-ci prend place dans la plaine de l'Est lyonnais sur un terrain en périphérie urbaine : Saint-Priest. Cette commune a subi une pression foncière importante et présente des inégalités socio-spatiales notables. Les enquêtes qualitatives réalisées durant deux étés consécutifs<sup>8</sup> auprès des habitants présentent une méthodologie construite à partir de modes d'investigation multiples et croisés.

---

<sup>8</sup> Les jours de fortes chaleurs, correspondants aux jours où la température a dépassé 30°C, ont été comptabilisés au nombre de 42 en 2020 (similaire à l'été 2019 qui recense 38 jours de fortes chaleurs) tandis que l'été 2021 en dénombre trois fois moins soit 14 jours de fortes chaleurs. La Normale climatique est estimée à 22,1 jours dépassant une température de 30°C. Ces données sont issues du site [meteociel.fr](http://meteociel.fr) données de Météo-France pour la station Lyon-St Exupéry.

## 1. Terrain d'enquête et méthodologies employées.

### 1.1. Un terrain d'exploration en périphérie urbaine de Lyon

Le secteur de l'Est lyonnais a subi d'importantes mutations urbaines et paysagères sous l'effet d'une pression foncière notable. Il est défini ainsi dans le SCoT (Schéma de Cohérence Territoriale) : « *l'Est, un secteur clé pour répondre à l'ambition de croissance résidentielle* » (SCoT 2030). À mi-chemin entre la première et la seconde couronne de l'agglomération lyonnaise, Saint-Priest présente un tissu urbain « *complexe provenant de périodes de constructions successives rapides et brutales, souvent en rupture avec le paysage naturel et le bâti préexistant* ». Au sein de ce terrain d'étude, trois secteurs ont été sélectionnés car ils présentent des ambiances urbaines et sociales diverses (figure 1) : 1/ le centre-ville composé d'une structure bâtie hétérogène (grands ensembles, petits collectifs, maisons de ville...) a connu des projets de rénovations urbaines importants, comme celui de la copropriété de Bellevue, classé en Nouveau Programme National de Renouvellement Urbain (NPNRU) ; 2/ le plateau de Bel Air, au tissu urbain plus « aéré » composé de barres et de tours, incarne l'habitat collectif des grands ensembles des années 1950-70 ; 3/ enfin le hameau dit rural de la Fouillouse, enserré par des parcelles agricoles et séparé du reste de la commune par les routes (RN6) et les autoroutes (A46/A43), est composé principalement de maisons individuelles cossues.



**figure 1.** Une gradation d'ambiances urbaines et paysagères allant de la « banlieue » jusqu'au « périurbain ». De gauche à droite : 1/ le Centre-Ville, 2/ plateau de Bel-Air et 3/ La Fouillouse.

### 1.2. Les méthodologies estivales

La période estivale a représenté une phase importante de recueil de données permettant, à travers une posture de « doctorante saisonnière », de recueillir la « mémoire vive » de la chaleur des habitants. Tout d'abord, pendant la période estivale 2020, des entretiens semi-directifs ont été réalisés. Pour faciliter les prises de contacts<sup>9</sup> la notion de « mode d'habiter », centrale dans notre sujet de thèse, a été mise à l'épreuve en résidant et en s'impliquant sur le terrain pendant trois mois. Cette stratégie d'une enquête d'observation participante, c'est-à-dire d'immersion dans la réalité sociale du terrain, s'est structurée sur deux principaux dispositifs : résider dans un ménage saint-priot et s'impliquer dans des structures locales telles que la Maison des Jeunes et de la Culture (MJC), les maisons de quartier et l'épicerie sociale et solidaire. Des observations et interactions dans les espaces publics du terrain ont été réalisées en complément. Ces rencontres *in situ* permettent d'échanger avec des habitants, le plus souvent non impliqués dans les associations du terrain, et ainsi d'élargir l'échantillon des témoignages.

Ainsi, de fin juin à fin septembre 2020, l'enquête a permis de réaliser 70 entretiens individuels avec des habitants de Saint-Priest. L'échantillon visait à représenter le mieux possible la diversité des profils d'habitants et des types d'habitats : âges, genres, origines culturelles, catégories socioprofessionnelles et types de logements (appartement/maison individuelle). Cette observation distanciée invitait l'habitant à décortiquer minutieusement son quotidien en période de fortes chaleurs, du lever du soleil jusqu'à la tombée de la nuit, des premiers gestes pour se protéger jusqu'à la recherche du confort nocturne. Après cette description des pratiques, l'échange se poursuivait à travers la relation sensible

<sup>9</sup> Des prises de contacts d'autant plus difficiles car celles-ci ont été réalisées en période de post-confinement.

que l'habitant entretient avec les changements de son environnement, la perception de formes d'inégalités, ou encore les stratégies d'adaptation de chacun. Plusieurs méthodes permettaient alors d'animer les échanges comme par exemple la « carte mentale » qui met en évidence les rapports entre représentations habitantes et leurs espaces de vie sociale. L'été 2021 a été l'occasion de retourner ponctuellement sur le terrain. L'objectif était de partager les premières tendances et profils issus des données récoltées l'été précédent et d'affiner les pistes d'analyse. Les ateliers collectifs avec des groupes d'adolescents (Maison de quartier et MJC), de parents et enfants (Ludothèque de Bel-Air) et de personnes âgées (MJC et résidence du Clairon) ont été effectués grâce au réseau associatif constitué l'été 2020 et convoqués pour l'occasion. Les groupes ont été invités à partager leurs expériences sur leurs vécus en périodes de fortes chaleurs permettant de percevoir des significations partagées et contrastées au regard d'un thème. Plusieurs outils ont été utilisés variant en fonction de l'âge, comme par exemple l'utilisation du jeu ou l'expression par l'image.

## 2. Ça commence par le corps. La chaleur, une présence qui perturbe la relation corps/espace

Il s'agit ici d'étudier la manière dont la surchauffe estivale s'immisce dans les ressentis et les « expériences spatiales des corps » (Barthe-Deloizy, 2013). Cette confrontation corps/chaleur nous donne à voir des sensibilités et relations spatiales plurielles. Le corps est la première « coquille » (Moles, Rohmer, 1972, Frémont, 1976) par laquelle l'individu appréhende l'espace, construit sa spatialité et s'insère dans les sociétés (Barthe-Deloizy, 2013). Les besoins thermiques constituent, avec d'autres, des besoins primaires au sens où leur satisfaction est indispensable à la survie de l'être humain (Briseperre, 2011). Que se passe-t-il quand la surchauffe estivale perturbe les besoins du corps ? Quand, au fil des jours, « *la chaleur te prend et t'enveloppe (...)* Quand nous sommes enfermés par l'extérieur et bouillonnant à l'intérieur » Myriam, 35 ans, Manissieux.

### 2.1. Des émotions exacerbées face à la surchauffe

Nous commencerons par une première approche sensible : celle des émotions exacerbées face à la chaleur. Nombreux sont les entretiens qui commencent par un souffle long traduisant un certain « ras le bol » : « *la chaleur ?! (Souffle) ... de toutes façons je ne l'ai jamais supportée (Souffle)* ». En modifiant nos besoins, celle-ci peut jouer un rôle sur le contrôle de nos émotions. Cette chaleur n'est pas la seule cause de ce trop-plein mais, elle peut agir comme la « *goutte d'eau qui fait déborder le vase* » d'émotions souvent préexistantes : l'énerverment, le découragement, l'appréhension, le stress, la peur ... Les émotions s'inscrivent dans des espaces du quotidien (l'espace domestique ou espaces sur fréquentés ; sensation d'étouffement) en lien avec des attaches sociales particulières (familiales, professionnelles ...). Lorsque la chaleur persiste, s'installe dans le temps, les témoignages relatent une fatigue mentale et physique qui s'accroît. Cette chaleur, matière impalpable, est décrite comme une présence supplémentaire qui vient peser sur la vie quotidienne et dans les espaces pratiqués : « *parce que c'est épuisant hein. Parce que c'est épuisant de lutter contre la chaleur la journée et la nuit et de ne pas récupérer* ». Au fil de l'été les « dettes de sommeil » s'accumulent et le corps ne récupère pas.

### 2.2. Le corps qui change et le corps exposé au regard des autres

Nous détenons chacun une sensibilité et une expérience individuelle propre face à la surchauffe estivale. Un facteur bien identifié par la plupart des habitants rencontrés, et bien connus dans la littérature scientifique et les campagnes de prévention, « *c'est la vieillesse* »<sup>10</sup>. Les périodes de fortes chaleurs et les symptômes qui peuvent en découler sont des moments de prise de conscience pour certains habitants de plus de 40ans. Ce facteur de l'âge est également exprimé par les déplacements qui deviennent plus restreints. Au lieu des espaces estivaux fréquentés autrefois on préférera rester chez soi lorsqu'il fait très chaud. S'habiller léger et se baigner permet de mieux vivre les jours de fortes chaleurs. Seulement, exposer son corps au regard des autres peut générer une appréhension et parfois

<sup>10</sup> Les personnes âgées sont particulièrement vulnérables à la chaleur car elles détiennent des mécanismes de thermorégulation déficients, une déshydratation chronique et parfois de lourdes charges médicamenteuses qui rendent l'organisme plus vulnérable du fait de la réduction de certaines fonctions thermorégulatrices.



un refus de fréquenter certains espaces. Le regard des autres a une influence sur la relation entre corps et espaces et ainsi sur le vécu de la chaleur.

### 2.3. Faire corps avec la chaleur : les conditions d'une acceptation et les attentions au corps

Comment faire corps avec la chaleur ? Les habitants rencontrés nous exposent une large panoplie d'astuces pour maintenir le corps à une température acceptable, que ce soit en période diurne ou nocturne, dans l'espace intime du logement ou les transports en commun. Ces attentions au corps ont d'après les habitants rencontrés une efficacité à court terme. Les témoignages montrent également que ressasser cette chaleur ne fait qu'empirer son ressenti. Il est possible d'aborder la chaleur avec sérénité mais cela requiert des dispositions socio-spatiales particulières. Les habitants ont exprimé la nécessité de s'occuper l'esprit et occuper des espaces nouveaux « sortir du quotidien ». Cela demande des dispositions particulières amplifiant les inégalités comme nous le verrons dans la partie 4.

## 3. L'intérieur du logement et la chaleur : la gestion de la « cocotte-minute » jusqu'à son explosion ?

La recherche du confort dans son « chez soi » possède une forte composante sociale et culturelle, évolutive dans le temps (Sèze, 1994 ; Le Goff, 1994 ; Shove, 2003 ; Subrémon ; 2010). Cet équilibre spatio-temporel n'est pourtant pas immuable au fil du temps, n'est pas émancipé du rythme des saisons (Guez, Subrémon, 2013). Comment la surchauffe bouscule ce confort ou renforce un inconfort existant ? Le logement est un espace primordial dans l'étude des inégalités en période de fortes chaleurs. Selon les ressources dont on dispose, cet espace de vie est un facteur de différenciation et/ou d'ascension sociale (Charles *et al.*, 2020).

### 3.1. Vivre à plusieurs avec la chaleur

Vivre à plusieurs implique de partager un espace domestique et thermique identique. Toutefois, chaque membre du ménage n'a pas la même tolérance et les mêmes besoins thermiques. Alors, en période de surchauffe, comment trouver son propre confort lorsque l'on vit à plusieurs ? Les « désaccords thermiques » au sein de membres d'un même foyer ont été un sujet récurrent dans les témoignages recueillis impliquant des gestions de la chaleur parfois contradictoires. De ces compromis peuvent advenir des tensions et conflits (Brisepierre, 2011). Chaque habitant d'un logement est « *un radiateur supplémentaire* ». Alors, lorsque l'appartement est trop petit par rapport au nombre de résidents, l'ambiance devient particulièrement insupportable en périodes de fortes chaleurs. En guise d'illustration le témoignage de Gabriella, 44 ans, habitante d'un logement social dans le centre-ville de Saint-Priest avec ses trois enfants et son mari. Ils vivent à 5 dans un 66m<sup>2</sup> : « *on est les uns sur les autres (...) vous avez les nerfs, ils sont tendus. Moi du coup quand il fait chaud, les trois se mettent à courir, il n'y a pas assez d'espace (...) Quand vous avez de l'espace aussi, vous pouvez aller dans l'autre pièce quand il fait chaud. Parce que nous... Moi franchement, je me sens, on est coincée quoi* ». Les témoignages recueillis ont également montré que la gestion de la chaleur dans le logement s'additionne au reste des tâches domestiques. Celles-ci étant le plus souvent rétribuées aux femmes peuvent amplifier les inégalités de genre à l'échelle de l'espace domestique. Une inégale répartition des tâches domestiques amplifie le sentiment de ras-le-bol et d'épuisement face à la chaleur.

### 3.2. Négocier avec la chaleur et se résigner

Dans la gestion de leur logement, les habitants sont amenés à « négocier » avec la chaleur. Fermer ses volets la journée et ouvrir ses fenêtres la nuit, sont des gestes bien connus des habitants qu'ils mettent en place « *naturellement* » pour se prémunir de la lumière ou pour capter la brise nocturne : « *on se calfeutre* », « *on se barricade* ». Ces méthodes ne sont pourtant pas adaptées à tous les contextes. En adoptant ces « bons gestes » les habitants font face à des répercussions sur leur bien-être. La journée,

rester dans le noir implique d'être « coupé du monde » ou « ne pas vas voir passer le temps ». Aussi les campagnes de sensibilisation insistent sur les bienfaits de l'aération nocturne en période de canicule. Seulement la configuration du logement ou la fréquentation extérieure nocturne peuvent entraîner des nuits chaotiques. L'exposition aux nuisances urbaines renforce les inégalités environnementales (Laigle, 2005).

« *Il faut essayer de résister* » nous ont confié plusieurs habitants, « *résister car plus les années vont passer plus ce sera pire* ». Mais lorsque le cocon devient un carcan, de cette lutte découle une « résignation » celle de passer le cap et s'équiper en climatisation. Cette fraîcheur immédiate que génère la climatisation est donc une solution d'adaptation tentante pour les habitants qui en ont les moyens. Cette tendance à l'accroissement en équipement de climatisation est aujourd'hui palpable<sup>11</sup> mais n'est pas sans doutes et méfiances de la part de certains habitants. Des entretiens, plusieurs questions ont été soulevées : l'impact sur la santé « *un air froid artificiel* », les nuisances sonores engendrées « *un bourdonnement sourd* », rafraichir l'intérieur pour réchauffer l'extérieur « *un pansement sur une jambe de bois* » ... Ce phénomène constitue un enjeu environnemental et social prégnant pour les politiques publiques de la Métropole de Lyon.

#### **4. Le dehors en périodes de fortes chaleurs : « en bas de chez soi » jusqu'à s'échapper.**

Comment habite-t-on ces espaces du dehors lorsque les températures sont au plus haut ? L'habiter ne se cantonne pas seulement au logement (De Radkowski, 2002). Le « chez-soi » s'étend en dehors des murs de l'habitat et englobe une diversité d'échelles spatiales. Il se déploie aussi dans les espaces publics aux interstices des immeubles, se propage dans les grands parcs urbains à l'influence métropolitaine. Ce dehors peut être constitué par des accès privés attenants au logement, comme le jardin privé d'une maison individuelle. Il comprend également les espaces climatisés, ces « frigos urbains » qui représentent pour certains habitants une ressource en périodes de fortes chaleurs.

##### **4.1. Les espaces du dehors au rythme de la chaleur : un temps social**

Dans la plupart des témoignages recueillis et lorsque cela est possible, le milieu de journée constitue une période pendant laquelle tout déplacement extérieur est banni lors des fortes chaleurs. Ce n'est pas une chaleur à flâner, alors les déplacements à pieds sont programmés avec une grande précision pour certains habitants (cartes mentales). Fréquenter les magasins climatisés l'été est une pratique intergénérationnelle. On s'y promène ou on y mange : entre la nounou qui « pour passer l'après-midi au frais » balade les enfants dans les rayons du supermarché climatisé ou les colocataires qui profitent de la climatisation du fast-food pour diner au frais. À la tombée du jour, les espaces publics de proximité deviennent des lieux de respiration, un « temps social ». Ces espaces situés en bas des logements ont une importance toute particulière en période estivale. A cette saison, lorsque certains quartiers se vident de leurs occupants, ces lieux de proximité constituent pour les habitants restant une bouffée d'air et un souffle social. On y voit autant des familles n'ayant pas la possibilité de partir en vacances que des personnes âgées en perte de mobilité. La chaleur peut rythmer les usages des espaces publics mais la motivation sociale est toute aussi remarquable. Le banc à l'ombre : cet élément qui paraît anodin a un réel impact sur la vie de quartier l'été. Les habitants, armés de leurs chaises pliantes disposées autour des bancs recréent leur salon extérieur. Nous remarquons ainsi l'importance des solidarités de proximité (l'entraide entre voisins) et du « capitale social (Bourdieu, 1986) lors de ces périodes propices à l'isolement social. À l'échelle de l'espace public, les témoignages montrent une différence de fréquentation en fonction du genre en période nocturne qui met en évidence une vulnérabilité des femmes plus importante face à la surchauffe.

##### **4.2. Le jardin privé : le « saint-graal estival » ?**

<sup>11</sup> Selon le Baromètre des Services Urbains (BSU) de la Métropole de Lyon réalisé l'été 2020 à propos des pratiques et représentations des habitants (échantillon : 2000 hab.) pendant les périodes de fortes chaleurs: 21% des grands lyonnais sont équipés en climatisation 11 % d'une climatisation fixe, 10% d'appareil(s) de climatisation mobile. Ces résultats sont plus élevés que lors de l'enquête BSU Énergie réalisée en décembre 2019, qui mesurait 17% de personnes équipées d'une climatisation.

Ce n'est pas parce que l'on vit en maison avec jardin que l'on ne souffre pas de la chaleur. En s'intéressant à différentes formes d'habitats, notre enquête a permis de nuancer le fait que vivre en maison avec un jardin signifie échapper à la surchauffe. En effet, de quel jardin parle-t-on ? Il existe une hétérogénéité de jardins privés entraînant une grande diversité d'usages en période estivale. Comme tout autre espace extérieur, le jardin privé n'échappe pas aux critères limitant ou favorisant la surchauffe. Il apparaît lui aussi impacté par le tissu dans lequel est inscrite la maison, la densité de végétation arborée, les revêtements, la présence d'un espace de baignade, l'orientation de la parcelle, les moustiques... La piscine creusée représente elle, est considérée par les habitants comme un marqueur fort d'inégalités. Samia, 16 ans, habitante de Bel-Air nous raconte : « *ceux qui ont une piscine et ben ils sont tout le temps dedans à prendre des photos. Je les vois sur les story Instagram (...) c'est plus facile pour eu de vivre la chaleur, pour se rafraichir (...) Après mes amis sont tous du même milieu que moi donc on vit pratiquement tous les mêmes choses* ».

#### 4.3. Partir ailleurs pour « changer d'air » : quelles dispositions ?

« Les vraies vacances c'est partir » (Urbain, 2002) découvrir d'autres paysages, expérimenter d'autres loisirs et rencontrer de nouvelles personnes... bref, casser cette routine estivale<sup>12</sup>. Partir en vacances dépend du niveau de vie et du milieu social<sup>13</sup> La situation géographique et la desserte influencent sur la capacité à pouvoir se déplacer vers les grands parcs et plans d'eau de la Région. Saint-Priest comme diraient certains, est à deux pas de la bretelle d'autoroute et donc à « deux pas des montagnes et de la mer » : pratique pour s'échapper l'été. Pour bénéficier de cet atout, encore faut-il avoir une voiture et le permis. Être mobile est un critère pour fuir dépendant de la motorisation, de l'état de santé mais aussi du réseau social. Même si l'on bénéficie des moyens nécessaires pour se déplacer, les sorties à la journée ne peuvent pas se faire au quotidien. Partir requiert du temps et des capitaux sociaux et culturels spécifiques (Chareyron *et al.* 2021) creusant ainsi les inégalités. On notera l'importance du cercle associatif en période estivale permettant via certaines structures associatives locales d'organiser des journées ou des séjours hors de la commune.

#### Conclusion

La notion « d'habiter » a été utilisée ici comme un outil d'observation et d'analyse qui permet de saisir le rapport entre l'habitant et l'espace en période de surchauffe. Cette enquête a mis en lumière les arbitrages auxquels les habitants doivent recourir durant ces événements. Face à la chaleur nous ne sommes pas tous égaux : plusieurs formes d'inégalités se cumulent (Bihr, Pfefferkorn, 2008) comme les inégalités liées au genre, au logement ou encore à l'environnement ... Les données recueillies permettront de renforcer les dispositifs d'aide à la décision en matière d'action publique et d'aménagement du territoire : espace public, mobilité et espaces naturels, habitat/logement, cohésion sociale, aide médico-sociale et santé-environnement.

**Remerciements** : François Madoré co-directeur de thèse et Luce Ponsar tutrice de thèse à la Métropole de Lyon. Un grand merci également aux habitants rencontrés et aux structures qui ont facilité ces échanges (la MJC Jean Cocteau, l'EPI San Priot, La Ludothèque, la résidence du Clairon...)

#### Bibliographie :

Barthe-Deloizy F., 2010 : *Les spatialités du corps : Des pratiques ordinaires aux expériences extrêmes*. Géographie. Université Michel de Montaigne, 278 pages.

Bihr A., et Pfefferkorn R., 2008 : *Le système des inégalités*. La Découverte, 128 pages.

Brisepierre G., 2011 : *Les conditions sociales et organisationnelles du changement des pratiques de consommation d'énergie dans l'habitat collectif*. Cifre, Sociologie. Université Paris Descartes, 847 pages.

<sup>12</sup> L'été 2020, les frontières vers l'étranger étaient fermées pour suite aux restrictions de la crise sanitaire du Covid 19, ce qui a limité les départs en vacances pour nombre d'habitants.

<sup>13</sup> D'après le CREDOC (Centre de Recherche pour l'Étude et l'Observation des Conditions de vie).

- Chareyron G., Cousin S. et Jacquot S., 2021 : Crise du tourisme et résistances des vacances. Valeurs et pratiques des mobilités de loisirs en période de pandémie. *Mondes du Tourisme*, **20**.
- Charles *et al.*, 2020 : Les multiples facettes des inégalités écologiques. *Développement durable et territoires*, **11**.
- De Radkowski G.H., 2002 : *Anthropologie de l'habiter*. PUF, 166 pages.
- Di Méo G., 1999 : Géographies tranquilles du quotidien. Une analyse de la contribution des sciences sociales et de la géographie à l'étude des pratiques spatiales. *Cahiers de géographie du Québec*, **43**, 75-93.
- Frémont A., 1976 : *La région espace vécu*. Flammarion, 290 pages.
- Subrémon H., et Guez A., 2013 : *Saisons des villes*. Donner Lieu, 224 pages.
- Le Goff O., 1994 : *L'invention du confort. Naissance d'une forme sociale*. Presses universitaires de Lyon, 222 pages.
- Sèze C., 1994 : *Confort moderne. Une nouvelle culture du Bien-être*. Autrement, 216 pages.
- Shove E., 2003 : Converging Conventions of Comfort, Cleanliness and Convenience. *Journal of Consumer Policy*, **26**, 395-418.
- Oke, T.R., 1973 : City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, **8**, 769-779.
- Subrémon H., 2010 : Le climat du chez-soi : Une fabrication saisonnière. *Ethnologie française*, **40**, 707-714.
- Moles A., et Rohmer E., 1972 : *Psychologie de l'espace*. Casterman, 162 pages.
- Molina G., 2016 : *L'adaptation aux changements climatiques en ville : les expériences climatiques des citoyens en question*. Projet CNRS déposée en section 39 du CNRS, 41 pages.
- Urbain J.D., 2002 : *Les Vacances*. Le Cavalier Bleu, 128 pages.

## IMPACT OF A MODERATE WATER STRESS ON THE CLIMATIC SERVICES PROVIDED BY STREET TREES: AN EXPERIMENTAL STUDY INSIDE AN OUTDOOR CANYON STREET SCALE MODEL

Julien THIERRY<sup>1</sup>, Sophie HERPIN<sup>1</sup>, Loli MATURANA<sup>1</sup>, Sabine DEMOTES-MAINARD<sup>2</sup>, Fabrice RODRIGUEZ<sup>3</sup>, Patrice CANNAVO<sup>1</sup>, Pierre-Emmanuel BOURNET<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Institut Agro, EPHOR, FR IRSTV, SFR QuaSaV, 49000, Angers, France ([julien.thierry@agrocampus-ouest.fr](mailto:julien.thierry@agrocampus-ouest.fr), [sophie.herpin@agrocampus-ouest.fr](mailto:sophie.herpin@agrocampus-ouest.fr), [maturana.loli42@gmail.com](mailto:maturana.loli42@gmail.com), [patrice.cannavo@agrocampus-ouest.fr](mailto:patrice.cannavo@agrocampus-ouest.fr), [pierre-emmanuel.bournet@agrocampus-ouest.fr](mailto:pierre-emmanuel.bournet@agrocampus-ouest.fr))

<sup>2</sup> Université Angers, Institut Agro, INRAE, IRHS, SFR QUASAV, 49000, Angers, France ([sabine.demotes-mainard@inrae.fr](mailto:sabine.demotes-mainard@inrae.fr))

<sup>3</sup> Université Gustave Eiffel, LEE, IRSTV, 44344, Bouguenais, France ([fabrice.rodriquez@univ-eiffel.fr](mailto:fabrice.rodriquez@univ-eiffel.fr))

**Abstract:** With climate change, cities are experiencing more frequent heatwaves which are also enhanced by the urban characteristics. The cast shadows and evapotranspiration provided by street trees appear to be able to mitigate the cities microclimate but might depend on the trees water supply. In this study, the climatic benefits (air temperature reduction, Universal Thermal Climate Index) provided by street trees (*Malus Coccinella*<sup>®</sup> 'Courtarou') located in a 1/5 scale canyon street model and exposed to a moderate water restriction were monitored during a 10 days sunny and warm period in July 2021. Although the trees experiencing water restriction reduced their transpiration, they maintained a level of benefits close to that of the well-watered trees probably because the radiation interception by their foliage was still important.

**Keywords:** Water restriction, tree transpiration, human thermal comfort, urban environment

### Introduction

The ongoing climate change is accompanied by a multiplication of extreme events such as heatwaves. In cities, overheatings are already enhanced by the urban configuration, the reduction of the amount of vegetation and water surfaces and the nature of the materials, which produce an Urban Heat Island (UHI) effect (Bouyer, 2009) and may cause sanitary issues. Vegetation, especially street trees, may counteract this phenomenon by means of two main benefits: cast shadows and evapotranspiration. However, the water resources of trees won't be guaranteed all along the growing season in the near future given that the quantity and the distribution of rainfalls are expected to be modified. As a consequence, their ability to maintain significant cooling benefits under such conditions needs to be studied.

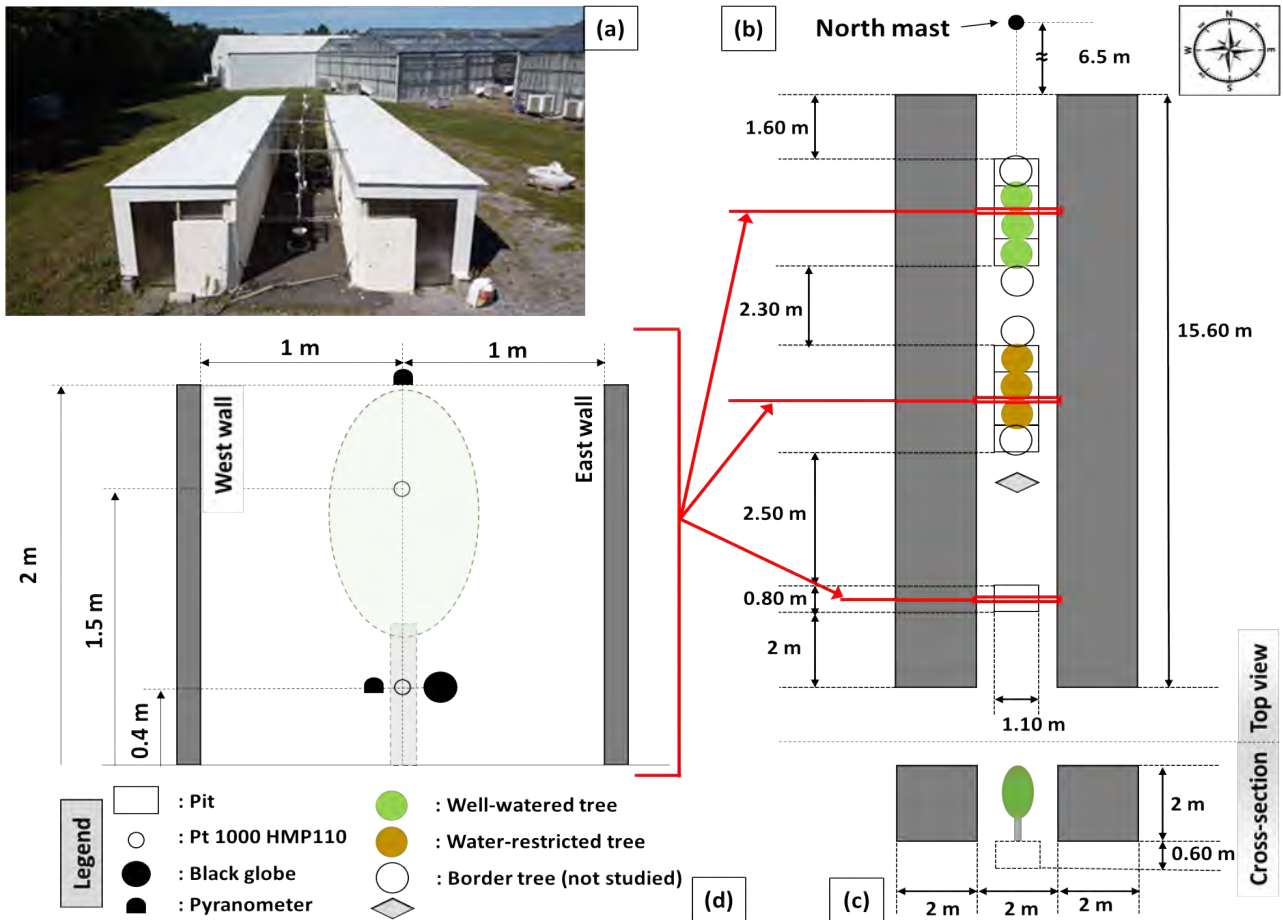
Since the pioneering work of Oke (2002), many studies related to the UHI quantified the overheating effect in various cities, such as Paris where it can exceed 10 °C (Cantat, 2004), and its characteristics as reviewed by Arnfield (2003). Different promising strategies to mitigate the urban climate based on urban geometry and urban greening (including street trees) were already explored (Jamei et al., 2016). A wide range of air temperature reduction attributable to street trees can be found in the literature (from 0.4 °C to 6 °C) (Mballo et al., 2021). Several studies took place in canyon streets, a common urban configuration which appeared to be adapted to observe the phenomena at stake in the UHI and now tend to be used at a reduced scale to assess experimentally the climatic benefits of vegetation. Mballo et al. (2021), for instance, measured a 2.7 °C air temperature reduction at mid-day under well-watered street trees in a reduced-scale canyon street. Gebert et al. (2019) or Chen et al. (2011) are some of the few authors to have measured the soil water content and established a link between tree transpiration and soil water availability. However, very few studies tried to link the climatic benefits of street trees to their hydric status. In order to enlighten



this relationship, the present work proposes to evaluate the microclimate and human thermal comfort under trees grown in a reduced scale canyon street during a controlled moderate water restriction.

## 1. Materials and methods

The experiments were realized in a 1/5 scale canyon street model built at Institut Agro Rennes-Angers, France (47°28' N, 0°33' W) in 2017-2018. The street (see dimensions in Fig. 1) is bordered by two buildings made of a concrete wall covered with white paint on the street side forming a canyon which aspect ratio (height of the buildings divided by the width of the street) is 1. The street is oriented North-South and its ground is covered with a 0.04 m layer of asphalt. The street is divided into one treeless zone (southern part) and two treed zones (northern part and middle of the street) both containing 5 aligned ornamental apple trees (*Malus Coccinella*® 'Courtarou') which were 4 years old at the time of the experiment. Each tree was planted in a container filled with a 44.5 L volume of a topsoil-compost mixture (from now on referred as "soil") placed in a pit dug along the North-South central axis of the street. The containers were covered with lids and the pits with asphalt panels preventing rainfalls infiltration and evaporation from the soil. The trees were drip-irrigated daily from June 1, 2021 between 20h and 22h UTC with an amount of water allowing to fill the soil up to the water-field capacity. The occasional drainage water was collected manually every day in a tank placed below every container. The matric potential and the soil volumetric water content were monitored in the 3 central containers of each zone with 4 tensiometers (0.15 m and 0.3 m depth, East-West central axis, STCP 850, SDEC, [0:1000 hPa] ± 0.5%) and 2 capacitive probes (0.225 m depth, North-south central axis, ECH20 EC-5, Decagon, [0:100%] ± 0.03 m<sup>3</sup>.m<sup>-3</sup>). A daily water balance is realized over the transpiration period (adjusted according to the sunlight duration and the climatic demand) to evaluate tree transpiration which was considered equal to the soil water content variation (Mballo et al., 2021).



**figure 1.** South view picture of the street (a). Drawing of the top view (b) and a cross-section (c) of the canyon street. Location of the sensors in the three studied zones (d).

Meteorological sensors were mounted in the center of each zone at three heights above the ground of the street (Fig. 1): 0.4 m (which corresponds to a height of 2 m at full-scale, for the evaluation of human thermal comfort) and 1.5 m and 2 m which are respectively inside and above the tree crowns. Air temperature and relative humidity were measured at 0.4 m and 1.5 m from the ground with platinum and capacitive probes (Pt 1000 HMP, Vaisala,  $[-40:60] \pm 0.2$  °C and  $[0:100] \pm 2\%$ ). Globe temperature was measured at 0.4 m from the ground using platinum probes enclosed in black painted copper spheres of 15 cm diameter. The above-mentioned measurements were also carried out outside the street on a mast located approximately 6.5 m north from the street. Pyranometers (CNR4, Campbell Scientific Ltd,  $[0:2000$  W/m<sup>2</sup>]  $\pm 10\%$ ) placed above and under the trees (0.4 m and 2 m from the ground) were used to measure the solar short wave radiation and to calculate a radiation transmission ratio defined as the radiation measured under the trees divided by that measured above them. The wind speed was measured inside the street with a 3D sonic anemometer (CSAT3, Campbell Scientific Ltd,  $[0:30] \pm 0.08$  m.s<sup>-1</sup>) mounted at 0.4 m from the ground and outside the street with a LCJ CV-7 2D sonic anemometer ( $[0.5:148] \pm 0.5$  km.h<sup>-1</sup>) placed at 2 m from the ground on a mast located 8 m west from the street. The meteorological variables measured on both masts located outside the street were used to evaluate reference evapotranspiration with the Penman-Monteith equation whereas those measured inside the street were used to evaluate the human thermal comfort by calculating the Universal Thermal Climate Index (UTCI) (Bröde et al., 2011).

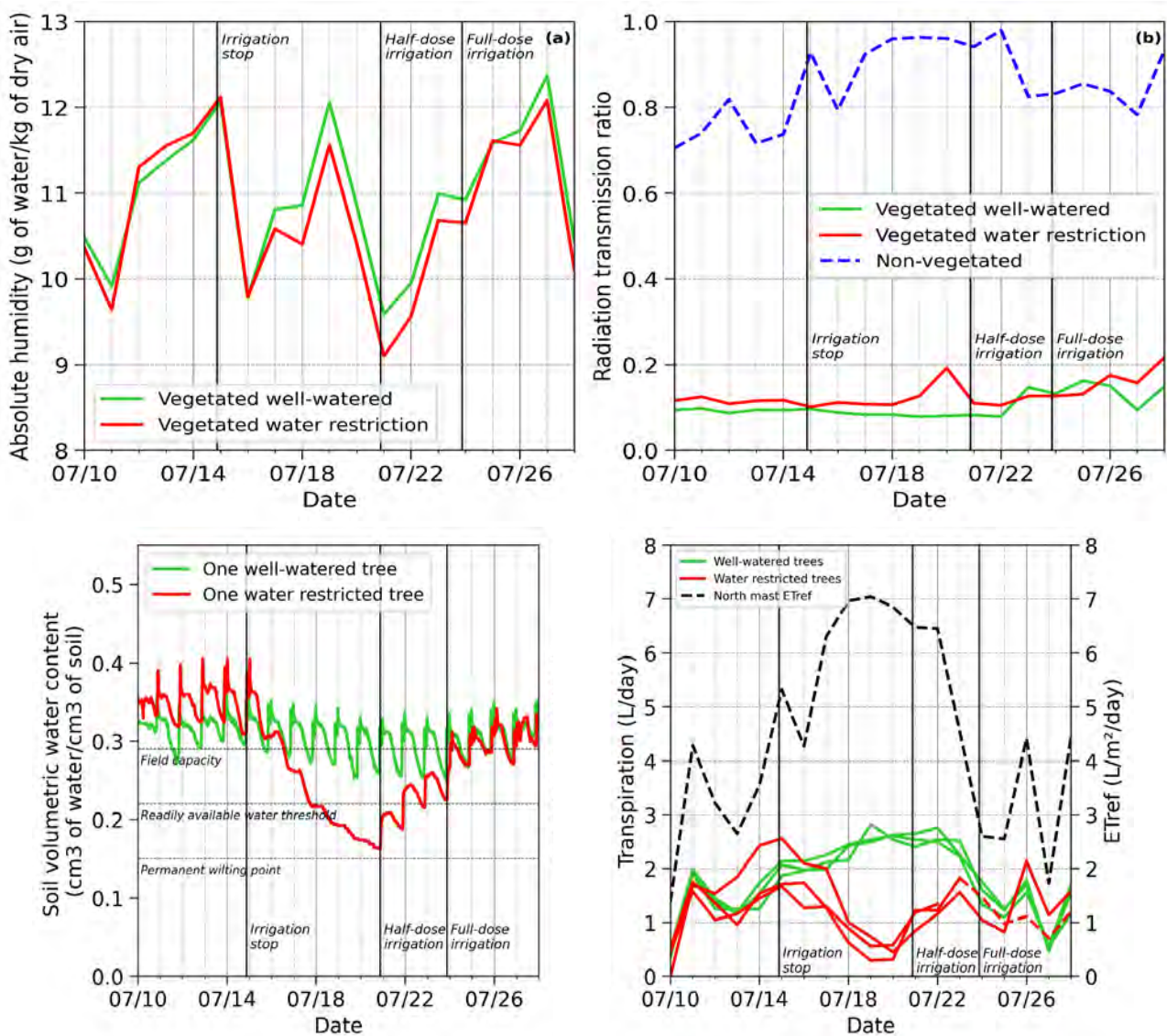
Previous studies were carried out using the present scale canyon street model with a similar setup leading to the characterization of the microclimate inside the street with well-watered trees (Mballo et al., 2021). In the present study, during a sunny period in July 2021, one treed zone (North area) was kept well-

watered (irrigation:  $4.8 \text{ L.tree}^{-1}.\text{day}^{-1}$ ) while the irrigation of the second one (middle area) was stopped from July 15, 2021. The matric potential and the soil volumetric water content of this zone were then expected to decrease, empty the readily available water content of the soil (determined with the FAO et al. (2006) recommendations) and finally reach the permanent wilting point. At that moment, the irrigation of the water restricted zone was partially turned back on to half of the dose of the well-watered trees. This  $2.4 \text{ L.tree}^{-1}.\text{day}^{-1}$  irrigation was close to the transpiration rates of the well-watered trees and was meant to maintain the available water content above the permanent wilting point and within the non-readily available water storage capacity for a few days. Full irrigation was finally turned back on July 23, 2021, because deteriorated weather conditions were forecast for the next days.

## 2. Results

The trees access to water can be assessed with the evolution of the soil volumetric water content. Fig. 2 shows as an example the evolution of the average soil volumetric water content for one well-watered tree and one water restricted tree (for each tree an average value was calculated with both capacitive probes of its container). Similar patterns were observed for the other trees which are not shown here for more visibility. After the last irrigation (July 14) the soil volumetric water content of the water restricted trees decreased and they began to experience water stress on July 17 when their readily available water storage capacity was fully emptied. On the same day, their matric potential went beyond the measurement range of the tensiometers (lower limit comprised between -800 and -1000 hPa) whose signal was lost for the rest of the experiment. The permanent wilting point was approached on July 20 and irrigation was partially turned back on the same day. The daily amount of water poured appeared to be sufficient to gradually refill the soil water storage capacity and the field capacity was reached back on July 24. During this whole period, the soil volumetric water content of the well-watered trees remained close to the field capacity.

The daily transpiration of the 3 central trees of each zone, was compared to a reference evapotranspiration as shown on Fig. 3. Before the water restriction, all trees were having similar behaviors but when the reference evapotranspiration doubled between July 14 and 19 (from about  $3.5 \text{ L.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$  to  $7 \text{ L.m}^{-2}.\text{day}^{-1}$ ), the transpiration of the well-watered trees increased by about 70% while that of the water restricted trees collapsed by about 70% during the same period. They reached a minimum transpiration of about  $0.5 \text{ L.day}^{-1}$  on July 20 that is almost 5 times less than the transpiration of the well-watered trees. As a consequence, the water restricted trees sprayed less water into the air of the street during that period as shown by Fig. 4a which introduces the evolution of the daily average absolute humidity calculated around noon between 11h and 13h UTC inside the tree crowns. A maximum difference between both zones was reached on July 19, the absolute humidity being about  $0.5 \text{ gwater/kgdry air}$  lower in the water restricted zone, whereas both zones had shown similar behaviours before the irrigation stop (difference lower than  $0.27 \text{ gwater/kgdry air}$ ). After the irrigation return, the transpiration of the water restricted trees rose back and reached a rate close to that of the well-watered trees on July 24 and the difference of absolute humidity between both zones decreased.



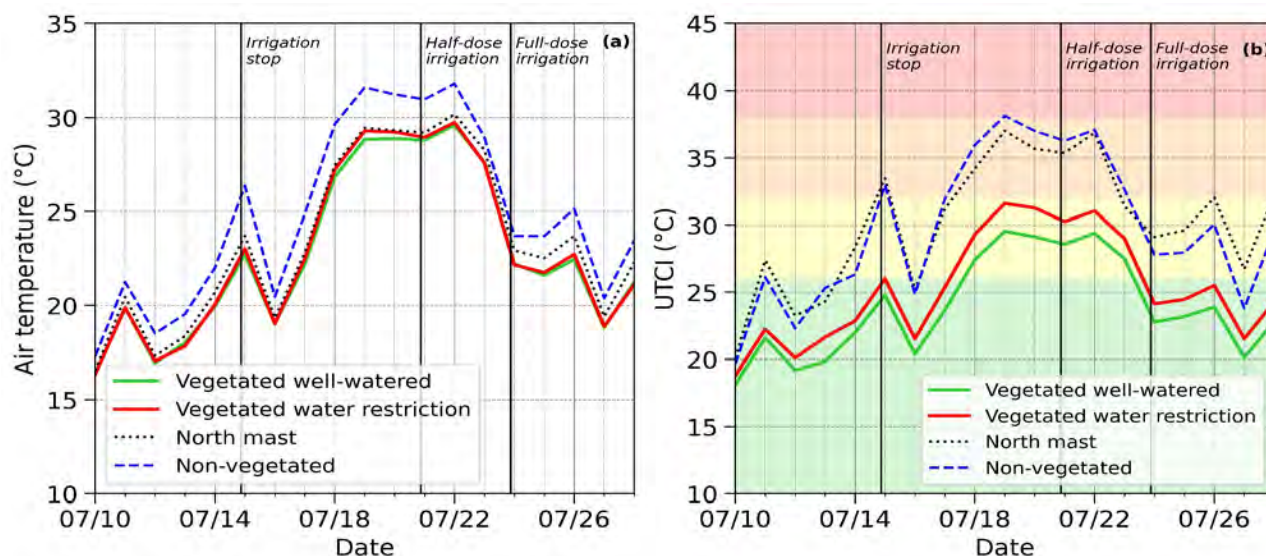
**figure 2.** Evolution of the mean soil volumetric water content measured for one well-watered tree and one water restricted tree.

**figure 3.** Evolution of the daily transpiration estimated for the 3 central trees of each zone and the corresponding local reference evapotranspiration  $E_{Tref}$ . Red dotted line: only 1 ECH20 EC-5 working, red solid line stopped on July 22: no more ECH20 EC-5 working.

Regarding the cast shadows provided by the trees, second phenomenon involved in the climatic benefits, the daily radiation transmission ratios (averaged around noon) of both vegetated zones remained very close all along the water restriction period (mean difference is 0.03) except on July 20 when a temporary extreme difference (0.11) was observed (Fig. 4b). Thus, both vegetated zones kept providing efficient radiation interception, their ratio being much lower than that of the non-vegetated zone.

**figure 4.** a) Evolution of the absolute humidity averaged from 11h to 13h UTC at 1.5 m from the ground, b) evolution of the radiation transmission ratio between 2.1 and 0.4 m from the ground averaged from 11h to 13h UTC.

The daily average air temperature calculated around noon at 0.4 m from the ground (which corresponds approximately to human height at full-scale) highlights the overheating effect of the street (Fig. 5a). The non-vegetated zone is on average 1.4 °C higher than the local environment (North mast located outside the street) and a maximum difference of 2.6 °C was measured on July 15. Before the restriction period, the difference of mean air temperature calculated in both vegetated



zones remained lower than 0.2 °C, which corresponds to the measurement accuracy of the platinum probes. Then, from July 17 to July 20, this difference exceeded 0.3 °C during four days and reached a maximum value of 0.4 °C on July 19. Such difference between both vegetated zones is quite low and the cooling effect of the water restricted zone is still noticeable, the daily mean air temperature calculated in this zone being at least 1 °C lower and up to 3.3 °C lower than that calculated in the non-vegetated zone.

The UTCI, calculated at 0.4 m from the ground in each zone as well as at the North mast, and averaged around noon is shown in Fig. 5b. The UTCI appears to be already higher in the water restricted zone than in the well-watered one (+ 0.9 °C in average) before the irrigation stop. From July 15, this difference increases and will remain higher than 1.1 °C for the rest of the analyzed period even after the end of the water restriction. This difference reaches a maximum value of 2.1 °C on July 20 while the soil volumetric water content of the water restricted zone is at its lowest point. Yet, on the same day, the water restricted zone and the well-watered zone provided respectively a 5.7 °C and a 7.8 °C UTCI reduction compared to the non-vegetated zone whose UTCI was 1.3 °C higher than that estimated outside the street. The water restricted zone was maintained in the moderate heat stress category, like the well-watered zone.

**figure 5.** a) Evolution of the air temperature averaged from 11h to 13h UTC at 0.4 m from the ground, b) evolution of the UTCI averaged from 11h to 13h UTC at 0.4 m from the ground regarding the different thermal stress categories: no thermal stress (9 to 26 °C UTCI, green), moderate heat stress (26 to 32 °C UTCI, yellow), high heat stress (32 to 38 °C UTCI, orange), very high heat stress (38 to 46 °C UTCI, red) and extreme heat stress (>46 °C UTCI, not shown).

### 3. Discussion

The water restricted zone kept providing efficient cooling benefits all along the restriction period regarding both the air temperature, which remained close to that of the well-watered trees, and UTCI which was kept in the moderate heat stress category in both vegetated zones. During the studied period, the water restricted trees were maintained under the readily available water threshold for only 5 days (from July 17 to July 21). Thus, among both phenomena involved in the climatic benefits, only tree transpiration was very impacted whereas the water restricted trees kept providing efficient cast shadows. Indeed, the water restricted trees used nearly 57% less water for their transpiration than the well-watered trees while the irrigation was completely stopped (from July 16 to July 20) despite the high reference evapotranspiration of that period (Fig. 3). They sprayed less water into the air of the street lowering the contribution of evapotranspiration to air cooling. On the contrary, no significant evolution of the radiation transmission ratio of the water restricted trees was observed. Although a few weaknesses were visually noticed on the leaves of the water restricted trees from July 20 (some leaves starting to wither or turning



yellow and falling), no impact of the water restriction beyond the irrigation return could be observed. The water restriction might have been too short and not intense enough to induce an important foliage loss. Then, the low impact on the climatic benefits observed in the present study is consistent with the conclusions of Mballo et al. (2021) who estimated that shade cover effect was responsible for 74% of the cooling benefits of trees and transpiration for the remaining 26%.

Finally, the impact of the water restriction was higher on the UTCI than on air temperature. The UTCI evaluation, requires the calculation of the mean radiant temperature ( $T_{mrt}$ ), which is very sensitive to all short wave and long wave radiation. A noticeable  $T_{mrt}$  difference was observed (not shown) between both vegetated zones during the water restriction but cannot be attributed to short wave radiation as explained previously. Given that transpiration is a mechanism that helps the trees to cool down their leaves, the water restricted trees, by reducing their transpiration, might not have been able to cool down their foliage whose temperature rose, increasing the long wave radiation fluxes. Further analysis will have to be carried out to enlighten the relationship between this mechanism and the impact on the UTCI.

## Conclusion

The present work showed that ornamental apple trees grown in a 1/5 scale canyon street, when exposed to a moderate water stress, were able to maintain a level of climatic benefits close to that of well-watered trees. A short-term significant impact was measured on their transpiration but not on their ability to intercept the short wave radiation. In the next step of the project, the effect of a more severe water stress will be investigated to analyze up to what extent the climatic benefits of the trees can be impacted by longer periods of drought.

**Acknowledgement:** This work took place within the framework of a thesis financed by the City of Paris, the Ministry of Education, Research and Innovation through the ANRT (National Association for Research and Technology) and the regional program "Objectif Végétal, Research, Education and Innovation in Pays de la Loire", supported by the French Region Pays de la Loire, Angers Loire Métropole and the European Regional Development Fund. Our thanks also go to Dominique Lemesle and Lydia Brialix (EPHOR, Institut Agro Rennes-Angers) who implemented the street sensors and to the staff of the Phenotic platform and IRHS for their help in this project. We finally thank our tree supplier, the nurseryman Jacques Briant.

## Bibliography

- Arnfield, A.J., 2003. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *Int. J. Climatol.* **23**, 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>.
- Bouyer, J., 2009. Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments (phdthesis). Université de Nantes.
- Bröde, P., Krüger, E.L., Rossi, F.A., 2011. Assessment of urban outdoor thermal comfort by the universal thermal climate index (UTCI). p. 7.
- Cantat, O., 2004. L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois Environ. Aménage. Société* 75–102. <https://doi.org/10.4000/norois.1373>.
- Chen, L., Zhang, Z., Li, Z., Tang, J., Caldwell, P., Zhang, W., 2011. Biophysical control of whole tree transpiration under an urban environment in Northern China. *J. Hydrol.* **402**, 388–400. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.034>.
- FAO, Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 2006. Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements).
- Gebert, L.L., Coutts, A.L., Tapper, N.J., 2019. The influence of urban canyon microclimate and contrasting photoperiod on the physiological response of street trees and the potential benefits of water sensitive urban design. *Urban For. Urban Green.* **40**, 152–164. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.07.017>.

Jamei, E., Rajagopalan, P., Seyedmahmoudian, M., Jamei, Y., 2016. Review on the impact of urban geometry and pedestrian level greening on outdoor thermal comfort. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **54**, 1002–1017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.104>.

Mballo, S., Herpin, S., Manteau, M., Demotes-Mainard, S., Bournet, P.E., 2021. Impact of well-watered trees on the microclimate inside a canyon street scale model in outdoor environment. *Urban Clim.* **37**, 100844. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100844>.

Oke, T.R., 2002. *Boundary Layer Climates*. Routledge.

## BRISES THERMIQUES À BIZERTE : APPROCHE MULTISCALEAIRE

Mounir SELLAMI.<sup>1,2</sup>, Salem DAHECH.<sup>1</sup>, Sami CHARFI.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> : Université Paris Cité, UMR PRODIG ([mounir\\_sellami@yahoo.fr](mailto:mounir_sellami@yahoo.fr)) ([salem.dahech@gmail.com](mailto:salem.dahech@gmail.com))

<sup>2</sup> : Université de Sfax, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Laboratoire SYFACTE ([charfisami\\_geo@yahoo.fr](mailto:charfisami_geo@yahoo.fr))

**Résumé :** À Bizerte, agglomération littorale, de l'extrême nord de la Tunisie, le tracé en angle droit du trait de côte et la topographie contrastée ainsi que l'occupation du sol variée, influencent l'aérodynamisme local, notamment en été. Les contrastes thermiques terre-mer donnent naissance à la brise de mer et la brise de terre. Cette dernière est dédoublée par la brise de montagne qui s'écoule sur les versants de djebel Ennadhour. La brise littorale est plus fréquente en été, saison durant laquelle elle est observée durant deux tiers des journées. Elle souffle à une vitesse moyenne de 6 m/s du nord et de l'est à cause d'un tracé en angle droit du trait de côte. Souvent, elle est devancée par une brise de lac soufflant du Sud. La brise de terre est de faible vitesse ; elle ne dépasse pas 3 m/s. Sa trajectoire est influencée par la topographie : elle longe les basses plaines et les vallées sises à l'ouest de la station météorologique de la base aérienne Sidi Ahmed. À une échelle plus fine, à l'intérieur de la ville, la morphologie urbaine et l'orientation vers la mer entrent en action pour impacter à la fois l'orientation et la vitesse des brises. Les voies larges et à faible encaissement avec une même orientation que la brise de mer enregistrent des vitesses de vent oscillant entre 3 m/s en début de l'après-midi et 4 m/s en fin d'après-midi. Les voies plus encaissées et moins larges enregistrent des vitesses entre 4 et 7 m/s, respectivement en début de l'après-midi et en fin d'après-midi.

**Mots clés :** Brises, multiscaleaire, morphologie urbaine, Bizerte

**Summary** —In Bizerte, a coastal agglomeration in the north of Tunisia, the right angle course of the coastline and the contrasting topography as well as the varied land use influence the local aerology, especially in summer. The land-sea thermal contrasts give rise to the sea breeze and the land breeze. The latter is split by the mountain breeze that flows on the slopes of Jebel Ennadhour (Dahech and Charfi., 2018). The coastal breeze is more frequent in summer, a season during which it persists for more than two thirds of the days. It blows at an average speed of 6 m/s from the north and east because of a right-angled course of the coastline. Often, it is preceded by a lake breeze blowing from the southern quadrant. The land breeze is of low speed; it does not exceed 3 m/s. It generally blows towards the sea. Its trajectory is influenced by the topography: it runs along the low plains and valleys located to the west of the Sidi Ahmed air base meteorological station. On a finer scale, inside the city, other factors come into play to impact both the orientation and the speed of the breezes. The influence of urban morphology is felt when comparing traffic lanes oriented in the direction of the breezes and others that are sheltered. The width of these roads and their entrenchment, the distance to buildings, as well as their exposure to the sun influence the breezes. The wide and shallow ways with the same orientation as the sea breeze recorded wind speeds oscillating between 3 m/s at the start of the afternoon and 4 m/s at the end of the afternoon. The steeper and narrower ways recorded speeds between 4 and 7 m/s, respectively at the beginning of the afternoon and at the end of the afternoon.

**Keywords :** Breezes, multiscalear, urban morphology, Bizerte

## Introduction

Conscients de leurs impacts environnementaux, sanitaires voire socio-économiques, les géographes-climatologues s'intéressent de plus en plus à l'étude de l'aérodologie, notamment les brises thermiques. Leur rôle dans le transfert des polluants et la sensation du confort thermique est indéniable (Beltrando et al., 2009). L'observation et la description des brises thermiques ont fait l'objet de nombreuses études, que ce soit pour les brises littorales (Dahech, 2006 et 2007), orographiques (Madelin, 2004) ou urbaines (Carrega, 1994). À Bizerte, en Tunisie septentrionale, l'étude de la brise est très intéressante car elle impacte le confort thermique et la dispersion des polluants primaires et photochimiques durant la saison estivale chaude et à ciel clair. Les caractéristiques de la brise de mer ont été évoquées par Dahech et Charfi (2018) et ce en comparant les données de deux stations : la première synoptique se trouvant à 9,7 Km du littoral, la deuxième est une station météorologique expérimentale fixe Davis, installée à quelques dizaines de mètres de la mer. Dans ce qui suit, nous présentons une étude multiscale de l'aérodologie à Bizerte à deux échelles différentes : l'échelle de l'agglomération et ses environs et l'échelle locale du quartier européen.

### 1. Zone d'étude

Située au nord de la Tunisie, l'agglomération de Bizerte (350 000 d'habitants) s'étend de Menzel Jemil au sud, à la Corniche au nord. Elle se caractérise par une topographie contrastée (de 2 m près de la côte à 250 m au niveau des hauteurs d'Ennadhour au nord) et un tissu urbain diversifié (fig. 1). Ces conditions agissent fortement sur l'écoulement des brises thermiques et la répartition spatiale des polluants.

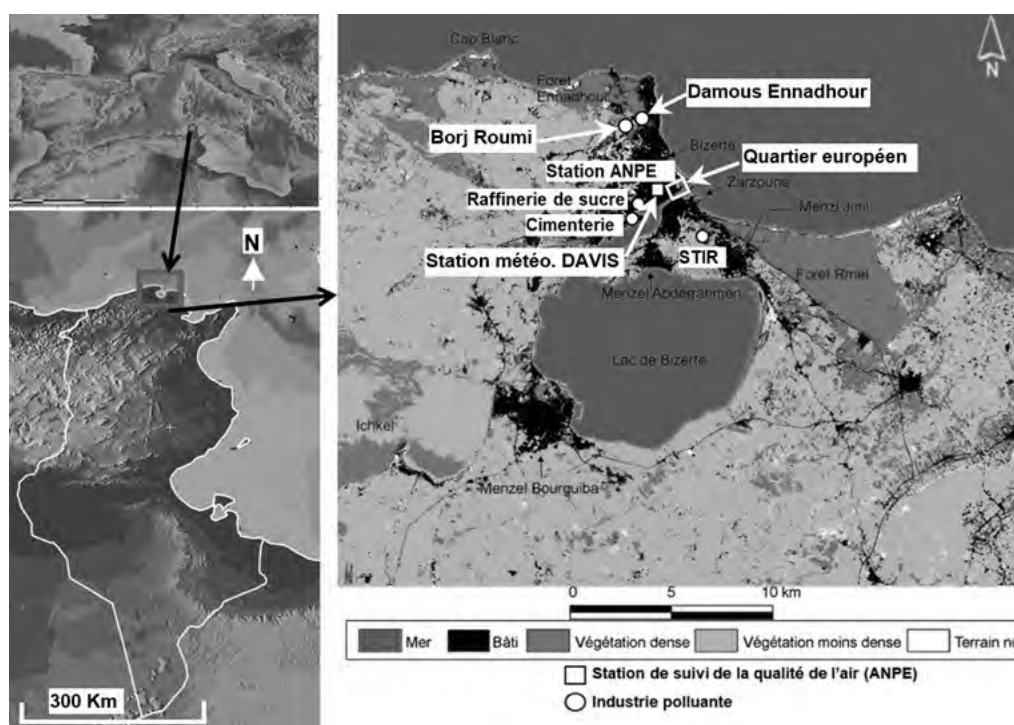


figure 1. Localisation et emprise urbaine dans l'agglomération de Bizerte (Dahech et Charfi, 2018)

Bizerte bénéficie d'un climat méditerranéen. L'aérodologie locale est très influencée, notamment en été, par les facteurs géographiques locaux : effets de la mer, du lac et de la topographie. En été, particulièrement, les conditions radiatives omniprésentes favorisent les contrastes thermiques terre-mer et donnent naissance à la brise de mer et la brise de terre. Cette dernière se confond avec la brise de montagne qui s'écoule sur les versants de djebel Ennadhour (au nord de l'agglomération avec une forêt

portant le même nom). La périphérie rurale, plus végétalisée, est plus fraîche la nuit que le centre de Bizerte, par temps radiatif avec un vent faible et une nébulosité nulle (Dahech et Charfi, 2018).

## 2. Données et méthodes

Des données météorologiques horaires de la direction et la vitesse du vent, de la température de l'air et du point de rosée, la visibilité et la pression atmosphérique de la station sise à l'aérodrome de Sidi Ahmed à Bizerte sont des données de l'Institut National de la Météorologie (ce sont des données horaires METAR téléchargées depuis le site de la NOAA). Elles couvrent la période 1973-2021. En complément, des campagnes de mesure semi-itinérantes de quelques paramètres météorologiques ont été réalisées du 15 au 21 août 2021. Ces données s'ajoutent à celles fournies par une station météorologique DAVIS qu'on a installée au centre-ville de Bizerte du 07 août au 21 septembre 2020. Elle mesure les paramètres précités avec un pas de temps demi-horaire.

En parallèle, des mesures météorologiques (température, humidité et vent), à une échelle plus fine, ont été réalisées dans le quartier européen en tenant compte de la morphologie urbaine et de la direction dominante de la brise de mer. Cette campagne semi-itinérante, au mois d'août 2021, couvre un réseau de 70 points de mesure.

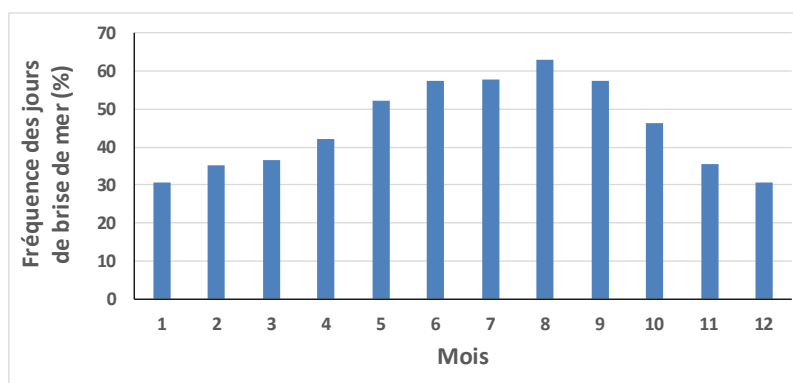
Des filtres<sup>14</sup> ont été appliqués sur les données météorologiques horaires afin de sélectionner les jours de brise. Il s'agit essentiellement de la vitesse du vent, la pression atmosphérique et les précipitations. Ces critères sont structurés sous forme de filtres (Dahech et al., 2012), une méthode inspirée des travaux de Borne et al., (1998) et Dahech et al., (2005).

## 3. Caractéristiques des brises thermiques à Bizerte

### 3.1. Direction et vitesse à l'aérodrome de Sidi Ahmed

Bizerte est une des régions les plus ventées en Tunisie où le vent synoptique s'impose l'hiver. Cependant, en été, les situations de marais barométrique sont plus fréquentes (Dahech et al., 2018) et le temps radiatif domine (vent faible et ciel clair). Ces conditions sont propices au déclenchement de la brise de mer.

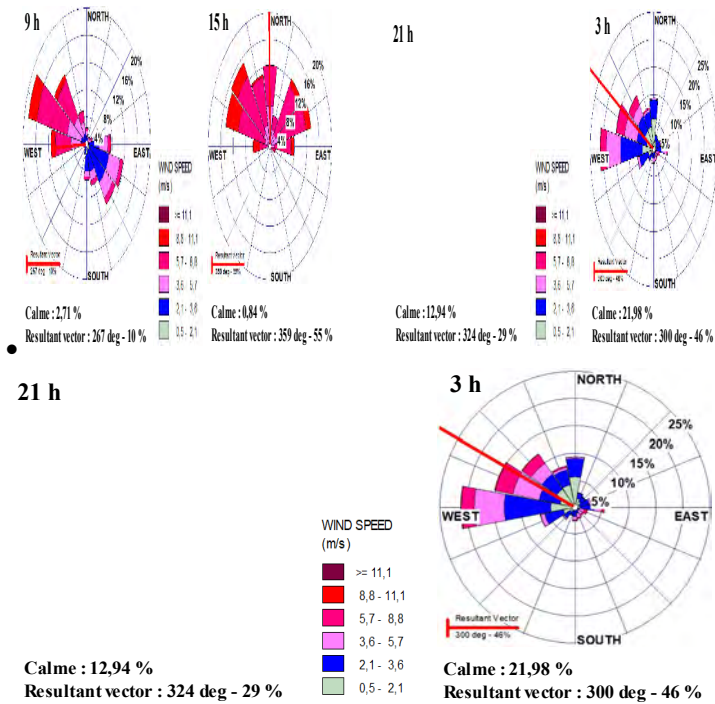
La brise de mer atteint sa fréquence maximale au mois d'août avec 63%. En hiver, elle devient moins occurrente : sa fréquence est alors de l'ordre de 30-35% (d'après les données de la station de Sidi Ahmed). La figure 2 représente la fréquence mensuelle moyenne de brise de terre-mer à Bizerte entre 1973 et 2021. D'une façon globale, à partir des données de la période 1973-2021 (après avoir filtré les jours de brises des mois de juin, juillet et août), la brise de terre souffle du quadrant sud de 23h jusqu'à 8h du matin, une brise de mer oscillant entre E et SE se lève à 8h et persiste jusqu'à 20h.



<sup>14</sup> La méthode utilisée s'est basée essentiellement sur des jours pluvieux et cycloniques (sont retenus les jours sans précipitations et durant lesquels la pression est supérieure à 1007 hPa). Puis, ont été retenus les jours où la vitesse du vent maximale instantané est inférieure à 12 m/s. Ensuite, les jours où il y a alternance de brises de mer et de terre sont sélectionnés.

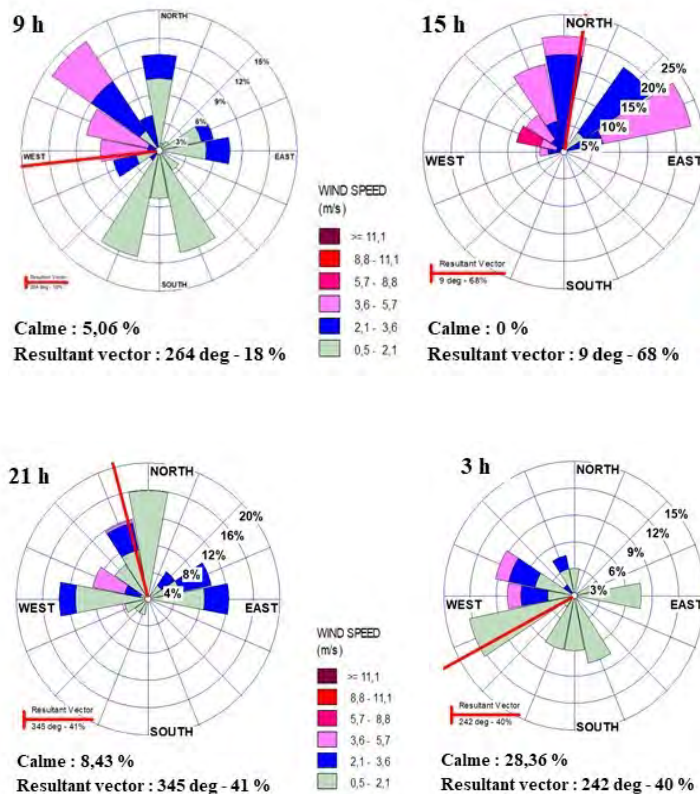


**figure 2.** Fréquence mensuelle (%) des jours de brise terre-mer (Données METAR téléchargées depuis le site de la NOAA, période 1973-2021)



La brise nocturne est de faible vitesse ne dépassant pas les 3 m/s et soufflant vers la mer (fig. 3). Influencée par la topographie, elle longe les basses plaines et les vallées sises à l'ouest de la station météorologique de la base aérienne Sidi Ahmed. À cause de la distance entre la station de Sidi Ahmed et le lac (1km au nord), d'une part, et la mer de l'autre (11,5 km), on enregistre deux type de brises : une brise de terre soufflant vers le lac (vent de N à NW) ou vers la mer (W à WSW) et une brise de lac (par temps calme, soit environ 25% des situations de brise en été) précédant celle de la mer. Elle souffle du SE avec une vitesse souvent inférieure à 4 m/s à 9h du matin (fig. 3).

●figure 3. Roses de vent par tranches de vitesse enregistré à 9h, 15h, 21h et 3h dans la station de l'aérodrome de Bizerte, durant les mois de juin, juillet et août entre 1973 et 2021 (Données METAR téléchargées depuis le site de la NOAA).



### 3.2. Caractéristiques de la brise près de la mer d'après les données de la station fixe : du 07 août au 21 septembre 2020

Les données météorologiques recueillies de la station DAVIS sur la période 07 août - 21 septembre 2020 ont quasiment reproduit ce qui est décrit par Dahech et Charfi, 2018 « une brise de mer qui se lève vers 9h30, soit environ trois heures après le lever du soleil, et se couche vers 21h soit environ deux heures après le coucher du soleil ». D'après la campagne de mesure de 2020 nous remarquons une brise de mer venant de l'E (vers 9h30) et du N vers 12h00. L'heure du coucher de la brise de mer varie de 21h00 à minuit. Le matin à 9h, le contraste thermique entre terre et mer n'étant pas très prononcé, le site de la

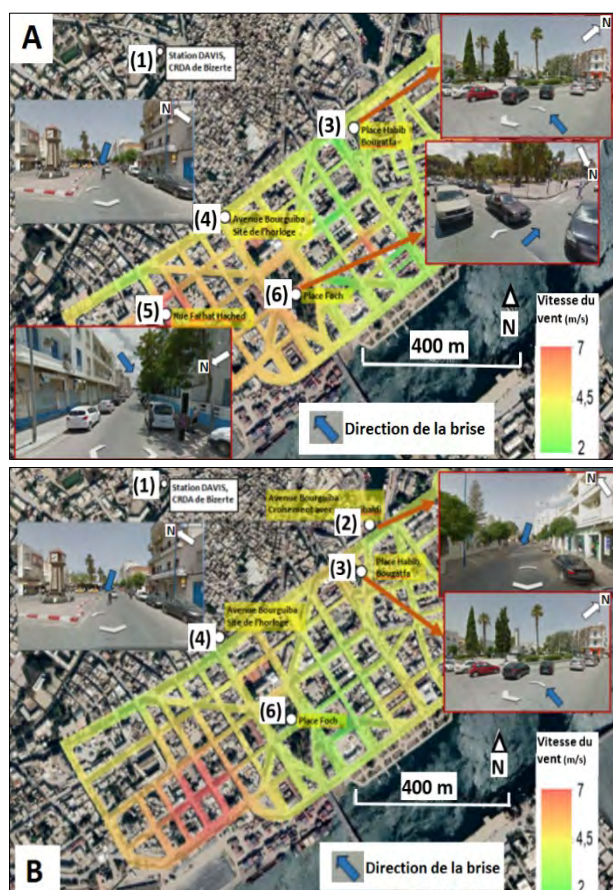
**figure 4.** Roses de vent par tranches de vitesse enregistré à 9h, 15h, 21h et 3h dans la station DAVIS installée au CRDA de Bizerte au centre-ville, du 07 août au 21 septembre 2020.

station se trouve sous l'influence de plusieurs flux d'air : brise d'amont des secteurs N et NW (celle du NW est plus importante de point de vue fréquence et vitesse parce que plus canalisée par la topographie), brise de terre du secteur W avec une fréquence moins importante, une autre brise de terre du secteur S et une brise de mer avec une vitesse avoisinant les 3,5m/s. A 15h, le contraste thermique terre-mer bien prononcé, la brise de mer prend de l'ampleur et vient du N et de l'E, à une vitesse comprise entre 2m/s et 5,7 m/s. Cette vitesse est plus faible que celle enregistrée dans l'aérodrome où le milieu est plus dégagé. Sur la rose de 21h, on remarque que la brise de mer laisse la place pour les brises d'amont (du N) et de terre de l'W. A 3h, le calme devient plus fréquent, de faibles brises soufflant à la fois de la campagne, de la montagne et de la terre se chevauchent (fig. 4).

Bien connue par la direction qu'elle peut emprunter, la brise de mer du secteur E souffle ou bien en perpendiculaire au trait de côte (90°) ou bien en oblique du NE. En se basant sur les roses de vent du jour, le trajet de la brise de mer venant du secteur N est influencé par la topographie par effet de canalisation (couloir topographique d'une longueur de 3,5 km de la mer jusqu'au niveau de Damous Ennadhour ou jusqu'au niveau de Borj Roumi). Le vent synoptique dominant soufflant du N au NW peut influencer également la direction de la brise de mer (Pédélaborde, 1985).

### 3.3. L'étude des brises à l'échelle fine en ville : cas du quartier européen

Dans le quartier européen, avec un plan en damier, le choix des itinéraires de mesure, a été fondé sur la représentativité des points de mesures des différentes situations des sites par rapport à l'orientation géographique et à la brise et la morphologie des rues (fig. 5).



**figure 5.** Vents en début de l'après-midi (A) et en fin d'après-midi (B) (les 20 et 21 août 2021), (1) Station DAVIS, (2) Croisement Avenue Habib Bourguiba et rue de l'Horloge, (3) Place Habib Bourguiba, (4) Avenue Bourguiba Site de l'Horloge, (5) Rue Farhat Hached, (6) Place Foch

L'analyse des mesures mobiles prouve que l'architecture du quartier européen à Bizerte influence en grande partie l'écoulement du flux d'air dont la source est la brise de mer<sup>15</sup>. En effet, la disposition, l'orientation, la largeur, l'encastrement, la rugosité et la distance par rapport à la mer des voies de circulation peuvent être classées en deux grandes classes : (1) des voies orientées dans le même sens de l'écoulement de la brise de mer (venant de l'Est-ENE) avec un dimensionnement (largeur entre 8 et 12 mètres) permettant l'écoulement fluide de l'air, (2) des voies, généralement en oblique d'une orientation NW et dont la largeur est moins importante que la première catégorie (5-10 mètres) (fig. 5). Une autre orientation des rues, moins fréquente, est celle du E-W. Elle s'individualise par des largeurs importantes variantes entre 10 et 15 m. Les sites enregistrant des brises avec les vitesses les plus importantes (6-7 m/s) sont variant entre le début et la fin de l'après-midi (fig. 5). Les sites caractérisés par un encastrement moins important et des rues plus larges, tels que les ronds-points, connaissent des vitesses de brises plus faibles et ce par effet de "relâchement" de l'effet de canalisation comme le site du rond-point de l'horloge à l'avenue de Habib Bourguiba.

## Conclusion

Dans cette étude des brises thermiques, nous exploitons les données météorologiques horaires enregistrées entre 1973 et 2021 par la station de l'aérodrome de Sidi Ahmed à 11 Km de la mer à l'ouest ainsi que des données météorologiques issues d'une station automatique DAVIS installée au centre-ville de Bizerte durant la période estivale de 2020. En complément, on a pu exploiter les données des campagnes itinérantes en août 2021. Les connaissances sur les caractéristiques des brises à Bizerte ont pu être améliorées à deux échelles. Une première échelle locale de toute l'agglomération de Bizerte et de son arrière-pays, ainsi qu'une deuxième échelle plus fine au niveau du quartier européen de Bizerte. Nous avons pu déceler qu'en fonction de l'éloignement du littoral et de la diversité des éléments topographiques et de l'occupation du sol, la brise de mer apparaît tout d'abord sur les sites proches du littoral Est. Elle est plus tardive quand elle souffle du littoral Nord, ou aussi pour arriver à l'arrière-pays de l'agglomération. La brise de mer, d'une vitesse variante entre 2 et 8 m/s, subit les effets perturbateurs de la topographie et de l'occupation du sol dont les caractéristiques thermiques sont contrastées. L'agglomération de Bizerte et son arrière-pays se trouve sous différents types de brises : brises de mer (Est et Nord), brises de lac (SW pour le centre-ville de l'agglomération et SE pour son arrière-pays), brises de terre (NW et W) et brise d'amont (N et NNW). À une échelle plus fine, au niveau du quartier européen, étant donné que les données sont relevées pendant la période où c'est la brise de mer qui est active, les analyses ont pu montrer que l'architecture urbaine influence la circulation de l'air : la vitesse de la brise est plus importante dans les rues à faible largeur, à fort encaissement et qui ont des orientations parallèles à celle de la brise de mer. Par endroit, le vent thermique peut subir l'effet du site (effet canyon, effet tourbillon, ...) et de ses caractéristiques thermorégulateurs (végétation, effet d'ombre, ...).

Dans des travaux futurs nous souhaitons montrer l'impact de la brise thermique sur la répartition spatiotemporelle de la pollution de l'air à Bizerte.

## Bibliographie

- Beltrando G., Dahech S. et Madelin M., 2009, : L'intérêt de l'étude des brises thermiques : exemples des brises littorales et orographiques », *Bull. Soc. Géogr. de Liège*, vol. **51**, 49-61.
- Borne K., Chen D. and Nunez M., 1998 : A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the Swedish west coast. *Int. J. Climatology*, **18**, 901-914.
- Carrega P., 1994 : Topoclimatologie et habitat, *Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée*, **35** et **36**, 408p.
- Dahech S., 2007 : Le vent à Sfax (Tunisie), impacts sur le climat et la pollution atmosphérique. Thèse de doctorat de l'Université Paris VII, 309 p.
- Dahech S., Beltrando S., et Bigot S., 2005 : Utilisation des données NOAA-AVHRR dans l'étude de la brise thermique et de l'îlot de chaleur. Exemple de Sfax (SE tunisien). *Cybergeo* : European Journal of Geography article 317, <http://cybergeo.revues.org/3132> ; DOI : 10.4000/cybergeo.3132.
- Dahech S., Berges J.C. et Beltrando G., 2012 : Localisation et dynamique du front de la brise de mer au Maghreb oriental, *Climatologie*, volume **9**, 59-81.
- Dahech S., et Charfi S., 2018 : Aspects topoclimatiques de Bizerte (NE de la Tunisie) : îlot de chaleur et brises thermiques, *Les imprévus du LPED* : Variabilité, changement climatique et conséquences en Méditerranée, 138-158.
- Madelin M., 2004 : L'aléa gélif printanier dans le vignoble marnais en Champagne. Modélisation spatiale à une échelle fine des écoulements de l'air et des températures minimales. Thèse de doctorat de l'Université de Paris VII, 347 p.
- Pédélaborde P., 1985, « Les brises de mer et les brises de terre », *Géographie et recherche*, vol. **54**, 97-111.

## CARACTÉRISTIQUES DE LA BRISE LITTORALE À DJIBOUTI : ÉTUDE PRÉLIMINAIRE

**Moumina IDRIS DAUD<sup>1</sup> et Salem DAHECH<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Université Paris Cité, UMR PRODIG ; Campus Paris Rive Gauche, Site Olympe de Gougues, 75013 Paris, France, [mouminaidriss@gmail.com](mailto:mouminaidriss@gmail.com).

<sup>2</sup>Université Paris Cité, UMR PRODIG ; Campus Paris Rive Gauche, Site Olympe de Gougues, 75013 Paris, France, [salem.dahech@gmail.com](mailto:salem.dahech@gmail.com).

**Résumé :** Cet article étudie les caractéristiques de la brise terre/mer dans la ville de Djibouti située sur le littoral de la mer Rouge. Dans cette zone à été chaud, la brise de mer peut améliorer le confort thermique et réduire l'utilisation de la climatisation artificielle. Il s'agit d'une des premières investigations sur le phénomène dans la zone. À partir des données horaires enregistrées par la station météorologique d'Ambouli entre 1996 et 2021, nous montrons que la brise de mer est très fréquente quelle que soit la saison. Le jour, le vent dominant est d'est, à une vitesse moyenne de 5 m/s. La nuit, le vent d'ouest prédomine avec une vitesse inférieure à 2 m/s. Une rotation anticyclonique lors de la renverse de brises est remarquée.

**Mots clés :** brise littorale, vent, Djibouti.

**Abstract:** This paper studies the characteristics of the land/sea breeze in the city of Djibouti located on the Red Sea coast. In this area, in hot summer, the sea breeze can improve thermal comfort and subsequently reduce the use of artificial air conditioning. This is one of the first investigations of the phenomenon in the area. From hourly data recorded by the Ambouli meteorological station between 1996 and 2021, we show that the sea breeze is very frequent regardless of the season. The dominant wind is from the east, during the day, with an average speed of 5 m/s. During the night, the west wind predominates with a speed lower than 2m/s. An anticyclonic rotation during the passage between the two coastal breezes is noticed.

**Keywords:** coastal breeze, wind, Djibouti.

### Introduction

Selon le GIEC (2021), l'Afrique est considérée comme étant l'une des hotspots du réchauffement climatique. Pour la région de l'Afrique de l'Est (du Soudan à la Tanzanie), la synthèse qui a été effectuée sur les tendances climatiques montre une décroissance des précipitations et une augmentation des températures (Omondi et *al.*, 2014). Djibouti, pays de l'Afrique de l'Est situé à mi-distance de l'équateur et du tropique, connaît une tendance à la hausse des températures (Nour, 2019). En parallèle au réchauffement induit par le forçage radiatif causé par les quantités additionnelles des gaz à effet de serre (GES), la population urbaine de Djibouti ne cesse d'augmenter pour avoisiner environ 800 000 habitants en 2014 (Worldometer, 2014) ce qui engendre l'étalement et la densification des surfaces bâties. Cette artificialisation du milieu n'est pas sans conséquences sur l'ambiance thermique (Oke, 1982).

La ventilation naturelle à travers la brise littorale pourrait améliorer le confort thermique en ville (Dahech, 2014). La brise est un vent thermique qui se déclenche du fait du contraste thermique terre / mer. Le phénomène de brise de mer peut être favorisé à Djibouti par la forte fréquence des conditions radiatives et la faible topographie près de la mer.



Nous souhaitons, dans ce travail, étudier les caractéristiques des brises littorales dans la ville de Djibouti en abordant la persistance, la durée, la vitesse, la direction et l'évolution de la brise pendant la journée. Pour atteindre ces objectifs nous recourons aux traitements statistiques des données enregistrées par la station météorologique de l'aéroport d'Ambouli entre 1996 et 2021.

### Présentation de la ville de Djibouti

Djibouti est située dans la corne d'Afrique (environ 12°N ; 43° E), à l'entrée Sud de la mer Rouge, couvrant une superficie de 23.200 km<sup>2</sup> et partage ses frontières avec l'Éthiopie, l'Érythrée et la Somalie. Elle dispose de 372 km de côte. La zone côtière de Djibouti est très convoitée : elle concentre la majorité de la population du pays, les infrastructures de communication (routes, ports, aéroport) et les principales activités économiques (figure 4). Elle est dotée d'un climat semi-aride chaud avec une précipitation moyenne annuelle de 160 mm et d'une température moyenne annuelle de 30.1°C (Cherel *et al.*, 2020).

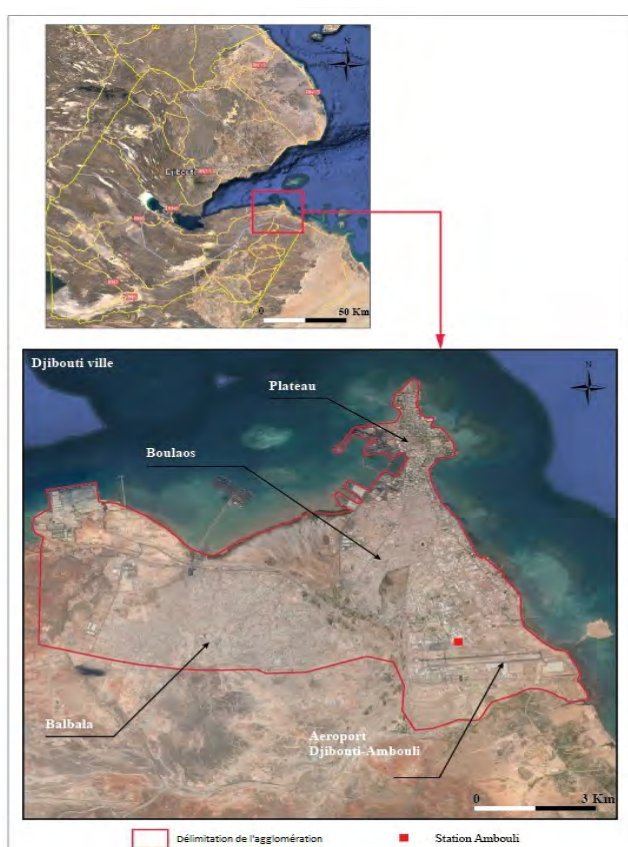


figure 4. Localisation de la zone d'étude ; Source Google earth.

La vitesse moyenne du vent calculée à partir des données enregistrées à l'aérodrome de Djibouti de 1996 à 2021 est d'environ 3.9 m/s. La température de la mer moyenne varie entre 26°C en février et 30.8°C en juin et septembre (Figure 2). Cette zone littorale connaît un ciel souvent dégagé. Ces conditions météorologiques sont favorables au déclenchement des vents thermiques telles que la brise de mer et la brise de terre. La topographie très basse près de la côte (une plaine côtière s'étend sur 8 km ; figure 6) devient accidentée vers l'ouest avec le Mont Arta qui culmine jusqu'à 755 m.



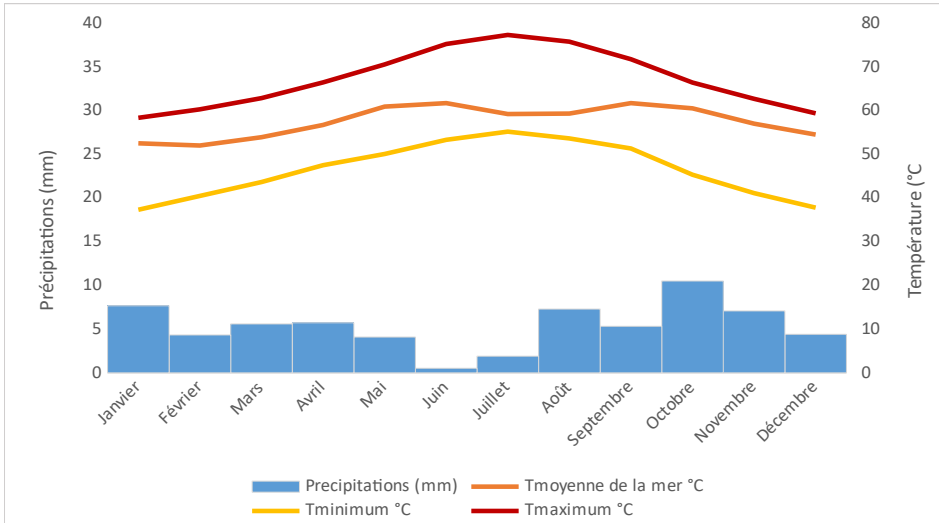


figure 5. Diagramme ombrothermique à Djibouti de 1991-2020, (données station Ambouli et Seatemperature.org).

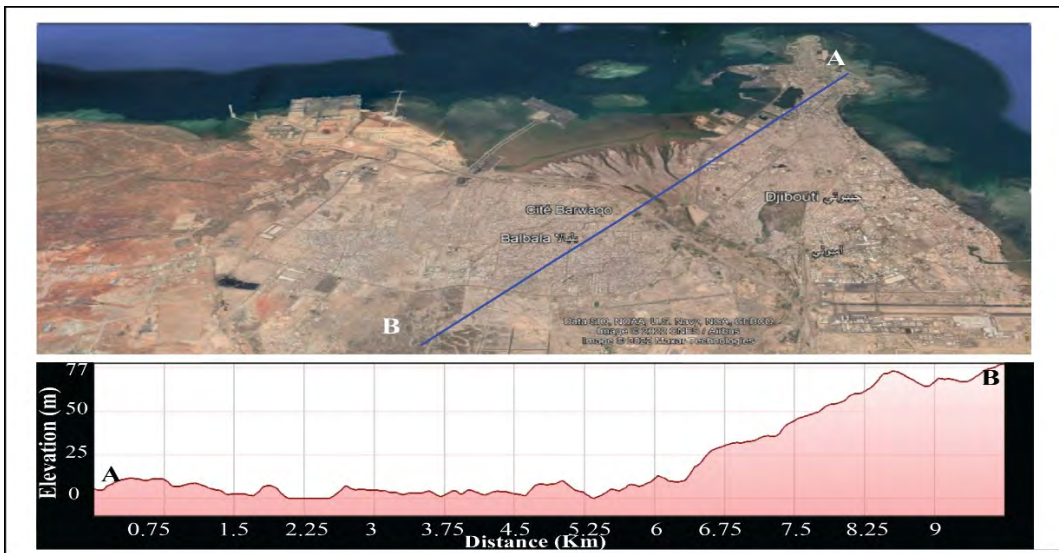


figure 6 .Topographie de la ville de Djibouti suivant un transect [AB] reliant le plateau à Balbala en passant par la plaine alluviale. (Données issues de Google Earth).

## Méthodes et Données

Nous utilisons les données météorologiques horaires (vent, température, pression, point de rosée) enregistrées par la station météorologique située dans le sud-est de la ville de Djibouti (4.2 km du centre de la ville et à environ 2 km de la mer), dans l'aéroport de Djibouti-Ambouli. Les données météorologiques couvrent la période 1996-2021. Ces données sont téléchargées depuis le site de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). La zone d'étude se trouve dans le fuseau horaire UTC+3. Nos données sont prises en compte sur la base de l'heure locale. Pour sélectionner les jours de brise, les jours de pluie > 1mm et de basse pression atmosphérique (<1010 hPa) ne sont pas pris en compte. Ensuite nous retenons les jours dont la vitesse maximale du vent ne dépasse pas 11 m/s et quand la brise de mer alterne avec celle de terre. Cette méthode a été appliquée par de nombreux auteurs comme Simpson (1994), Planchon (1997), Borne *et al.*, (1998), Dahech *et al.*, (2005). Pour ce travail nous étudions la brise pendant la période estivale (juin-juillet-août) durant laquelle la brise est réputée pour son effet rafraîchissant. Pour cela, des anémogrammes et des roses de vent permettront de déterminer les caractéristiques de la brise thermique.

## Les caractéristiques de la brise thermique dans la zone d'étude

La brise de mer est omniprésente toute l'année, sa fréquence varie entre 56 et 93%. La légère baisse de sa fréquence en été s'explique par l'activité du vent synoptique chaud et sec « Khamsin ».

Dans la plupart des cas, la brise de mer apparaît 1h ou 2h après le lever du soleil et prend fin 1h ou 2h après le coucher du soleil. Ici, elle apparaît entre 9h et 10h (heure locale) du matin et sa vitesse augmente progressivement dans la journée en allant de 3 m/s à 6 m/s avec une déviation de la direction du vent vers le NE (figure 7).



**figure 7.** Anémogramme à Djibouti du mois de juin au mois d'août (heure locale) ; (Données de l'aéroport Ambouli, période : 1994-2021, direction modale).

L'arrivée de la brise de mer se manifeste dans la plupart des cas par une accélération de la vitesse et une brusque déviation vers l'est de la direction du vent. Évidemment, l'arrêt de la brise de mer s'accompagne par la baisse de la vitesse du vent mais aussi un changement de direction vers l'ONO en passant par le sud, donc dans le sens horaire. La vitesse de la brise de terre ne dépasse pas 2.5 m/s car le contraste entre la terre et la mer est faible la nuit. Ce dernier, étant plus creusé le jour, la brise de mer peut atteindre en moyenne 6 m/s. La rose des vents indique un vent dominant d'ouest à 4h contre un vent d'est à 18h. Les différences de vitesse précitées sont faciles à identifier à partir des roses de vent qui montrent un vent synoptique d'ouest relativement fort (Figure 8).

La fin de la brise de mer est observée entre 20h et 21h, soit environ deux heures après le coucher du soleil.

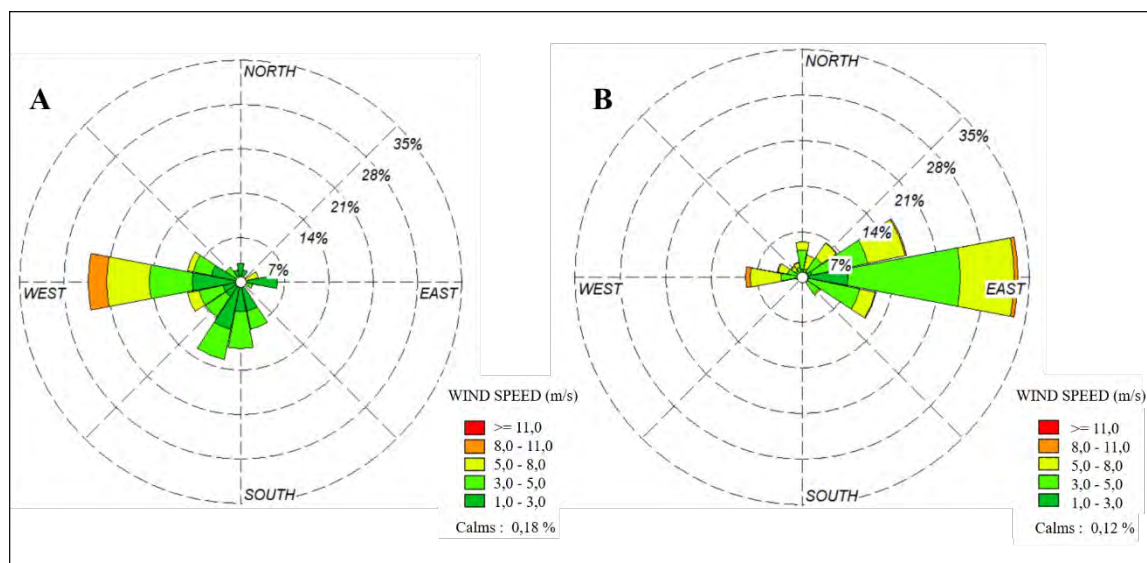


Figure 8.

Roses de vent à 4h (A) et 18h (B) (heure locale), juin-août 2005-2021. (Données aéroport d'Ambouli).

Les jours des brises observés entre 2005 et 2021 comprennent des cas isolés et d'autres appartenant à des séquences de deux à plusieurs jours successifs. Les jours isolés avec brises comptent pour environ 20% du total des jours des brises. Ils sont peu fréquents en mai (17%) et juin (15%) et deviennent plus fréquents en mars (32 %). Les jours consécutifs de brises sont observés presque tous les mois de l'année, en moyenne 80% (Figure 9).

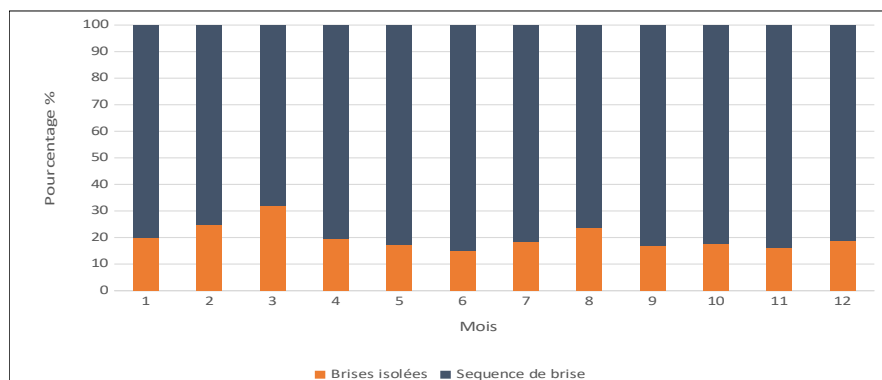


Figure 9. Persistance de la brise thermique à Djibouti de 2010 à 2021. (Données aéroport d'Ambouli).

## Conclusion

La brise de mer domine le jour. Elle apparaît environ 2h après le lever de soleil (soit 10h ; heure locale), et prend fin 2h après le coucher de soleil. Dans l'après-midi, la ville est ventilée par la brise de mer qui souffle à une vitesse moyenne comprise entre 5 et 8 m/s et cette condition persiste toute l'été. Ce vent thermique, potentiellement source de fraîcheur, aurait des impacts positifs sur le confort thermique. Pendant la nuit, la brise de terre domine, elle souffle, à une faible vitesse de l'ouest au sud-ouest. Cette brise nocturne pourrait être renforcée par une brise de montagne.

Ce travail présente des résultats préliminaires couvrant une zone d'étude pas encore explorée. Pour mieux comprendre la variation spatio-temporelle de la brise de mer dans l'agglomération de Djibouti un réseau de trois stations automatiques Davis sera mis en place en mai 2022. Il sera complété par des mesures itinérantes pour montrer l'effet de la ville, du tracé du trait de côte et du relief sur la brise. L'étude de l'impact de ce phénomène sur la qualité de l'air et le confort thermique est envisagé.

## Bibliographie

Cherel J. P., Omar B., Nour M. et Vinet F., 2020 : Activités cyclonique et nouveau risque dans le golfe d'Aden. *EchoGéo*, **51**, 30 pages.

Dahech S., 2014 : Impact de la brise de mer sur le confort thermique au Maghreb oriental durant la saison chaude. *Cybergeo, European Journal of Geography*, N°26555, 29 pages.

Dahech S., Beltrando G. et Bigots S., 2005 : Utilisation des données NOAA-AVHRR dans l'étude la brise thermique et de l'îlot de chaleur à Sfax (Tunisie). *Cybergeo, Revue européenne de géographie*, **371**, 15 pages.

GIEC.,2021 : Climate change. *Cambridge University Press*, 3949 pages.

Omondi P., Forootan E., Fesseha I et al., 2014: Changes in temperature and precipitation extremes over the Greater Horn of Africa region from 1961 to 2010. *International Journal of Climatology*, **34**, 1262-1277.

Nour M., 2019 : La dynamique des températures et les risques liés à cette dynamique pour les populations de Djibouti dans le contexte du réchauffement global, *GRENIER DES SAVOIRS, Science Afrique*, 16 pages.

Oke T.R.,1982: The energetic basis of urban heat island, *Quarterly Journal*, **108**, 1-24.

Planchon O., 1997 : *Les climats maritimes dans le monde. La brise de mer et climat maritime*. Presses Universitaires du Septentrion, 233 pages.

Simpson J. E., 1994 : *Sea breeze and local Wind*. Cambridge University Press, 234 pages.

<https://www.worldometers.info/world-population/djibouti-population> (2014).

## ÉTUDE DES TEMPÉRATURES SIMULÉES AVEC MÉSO-NH : SENSIBILITÉ À L'ARTIFICIALISATION DES SOLS À GRENOBLE ET LYON

Julita DIALLO-DUDEK<sup>1</sup>, Valéry MASSON<sup>2</sup>, Olivier PLANCHON<sup>1</sup>, Jacques COMBY<sup>3</sup>, Christine LAC<sup>2</sup>, Julien PERGAUD<sup>1</sup>, Nadège ALLEGRI-MARTINY<sup>1</sup>, Benjamin POHL<sup>1</sup>, Yves RICHARD<sup>1</sup>, Aude LEMONSU<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Centre de Recherches de Climatologie, UMR 6282 Biogéosciences, CNRS/Univ. Bourgogne-Franche-Comté  
[julita.diallo-dudek@u-bourgogne.fr](mailto:julita.diallo-dudek@u-bourgogne.fr)

<sup>2</sup>Centre National de Recherches Météorologiques, UMR3589, Météo-France & CNRS

<sup>3</sup>EVS UMR5600, Université de Lyon

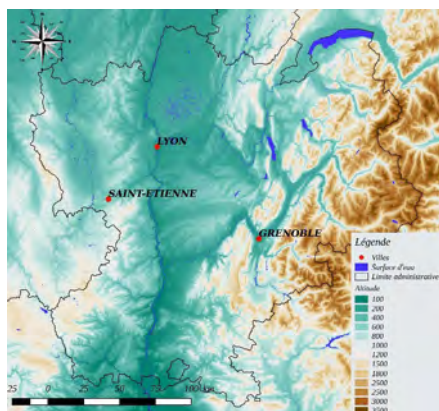
**Résumé :** La modélisation atmosphérique à très fine échelle permet d'analyser la dynamique de l'îlot de chaleur urbain en contexte de topographie complexe. Deux simulations (Urbaine et Non-Urbaine) mettent en évidence les effets associés à l'urbanisation. La taille des agglomérations, dans le cas de Lyon et Grenoble, n'influence pas la différence de température entre les deux simulations. Les conditions de stabilité influencent fortement ces différences. L'ICU peut être intensifié par l'affaiblissement du vent ou l'effet de piégeage et/ou le développement d'une couche d'inversion.

**Mots-Clés :** îlot de chaleur urbain, topographie, circulation locale, simulation numérique

### Introduction

L'urbanisation, en entraînant des modifications importantes du bilan énergétique de surface liées aux caractéristiques thermiques des matériaux de construction et à l'imperméabilité des surfaces, conduit au développement d'un "îlot de chaleur urbain" (ICU). L'ICU est caractérisé par des valeurs nocturnes de température de l'air plus élevées en ville qu'en milieu naturel (Grimmond et Oke, 1995). Dans les régions montagneuses, on distingue deux types d'écoulement : l'écoulement de pente, qui se manifeste par des vents ascendants (anabatiques)/descendants (catabatiques), et/ou un type d'écoulement canalisé par les vallées (Whiteman, 1990 ; Schmidli et Rotunno, 2010). Cependant, les effets combinés de l'urbanisation et de la topographie restent encore à étudier, en particulier leurs interactions avec le gradient de température de l'air, la circulation locale et les systèmes de brise montagne-vallée. Quelques études ont déjà montré que l'ICU pouvait être influencé par un drainage de vents catabatiques (Kuttler et al., 1996, Giovannini et al., 2014). Fernando (2010) a souligné que les brises urbaines peuvent se développer en réponse au gradient thermique, interférant avec les vents topographiques forcés. Pendant la nuit, le vent catabatique descendant subit un ajustement hydraulique après une rupture de pente, mais son influence sur la stratification de l'air dans le canyon urbain est encore inconnue. Rotach et al. (2005) ont montré, à partir de données de sondages, qu'une inversion de température dans la couche limite urbaine inférieure (UBL) peut apparaître vers 200–300 m, souvent accompagnée d'un jet de basse altitude de même direction que le vent thermique.





Nous proposons ici d'étudier l'Îlot de Chaleur Urbain (ICU) dans un contexte de canicule de moyenne magnitude (entre le 17 et le 26 août 2012 ; Ouzeau et al., 2016), pour des villes à topographie accidentée où cet événement atmosphérique particulier est susceptible d'être influencé aussi par le relief. Les seuils de canicule définis par Météo-France pour les départements concernés sont :  $T_n = 19^\circ\text{C}$ ,  $T_x = 34^\circ\text{C}$  pour l'Isère et  $T_n = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_x = 34^\circ\text{C}$  pour le Rhône. Sur deux stations représentatives de chacune des deux agglomérations étudiées (Bron pour Lyon et le Versoud pour Grenoble) les seuils ont été dépassés entre le 19 août et le 23 août.

**figure 1.** Localisation des agglomérations étudiées dans leur cadre topographique (ex-Région Rhône-Alpes).

La localisation de l'agglomération lyonnaise dans une vallée fluviale, à la confluence de deux grands cours d'eau (le Rhône et la Saône), permet d'étudier l'influence de la topographie et de l'hydrographie sur l'ICU. En même temps, l'agglomération lyonnaise est unique dans la région Auvergne-Rhône-Alpes par sa taille et par sa densité de population. L'agglomération grenobloise se distingue de l'agglomération lyonnaise par sa moindre extension spatiale, mais aussi et surtout par son environnement montagneux. Pourtant, la ville elle-même est l'une des villes de la France à la topographie la plus plate. Ces interactions entre l'ICU et la topographie sont difficilement observées en raison de mesures insuffisamment denses en milieu urbain et périurbain, ainsi la modélisation du climat urbain apparaît comme une réponse adéquate.

## 1. Méthode : simulation du climat urbain et écoulement de l'air

Le modèle atmosphérique méso-échelle Méso-NH (Lafore et al., 1998 ; Lac et al., 2018) a été utilisé pour étudier les interactions entre l'ICU et la topographie. Il s'agit d'un modèle non-hydrostatique et anélastique, basé sur l'équation de Navier-Stokes, utilisé pour les méso-échelles (Asencio et al., 2006) et les micro-échelles (en mode Large Eddy Simulation - LES ; Brun et al., 2017 a,b). Ce modèle a été largement validé pour la recherche sur le climat urbain (entre autres : Lemonsu et Masson, 2002 ; Hidalgo et al., 2008 ; Masson et al., 2013) et a été utilisé pour de nombreuses études d'écoulement en milieu montagneux (Blein, 2016). Le modèle Méso-NH a été couplé au modèle de surface externalisé (SURFEX ; Masson et al., 2013), incluant le modèle de canopée urbaine Town Energy Balance (TEB ; Masson, 2000) et l'ISBA - le modèle d'Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère avec le modèle sol-plante-atmosphère (Noilhan et Planton, 1989). Les conditions aux limites initiales et latérales ont été obtenues avec l'analyse du modèle opérationnel Application of Research to Operations at Meso-scale (AROME ; Seity et al., 2011), avec une grille de résolution de 2,5 km. Dans cette étude, deux domaines emboîtés ont été définis pour chacune des deux agglomérations avec une résolution de la première grille de 1,25 km (appelée la grille "père") et de 250 m de la deuxième grille (appelée la grille "fils"). Ces deux grilles sont emboîtées ("two-way nesting") : le premier domaine, avec une résolution de 1,25 km (RL : région de Lyon ; RG : région de Grenoble) ; le second domaine, avec une résolution de 250 m (GL : Grand Lyon ; GM : Grenoble Métropole). Les deux domaines ("père" et "fils") partagent la même grille verticale, avec 56 niveaux, dont 34 niveaux jusqu'à 3000 m et le premier niveau à 7,5 m, au-dessus du niveau du sol. La paramétrisation du modèle a été choisie pour présenter au mieux les deux processus : l'ICU et l'écoulement de l'air (Tableau 1).

**Tableau 1.** Paramétrisation du modèle Méso-NH pour les simulations.

Processus physique	Schéma de paramétrisation
Advection	WENO (Liu et al., 1994)
Radiation	ECMWF (Morcrette, 1991)
Microphysique	ICE3 (Caniaux et al., 1994)
Convection peu profonde	EDKF (Pergaud et al., 2009)
Turbulence	BL 89 (Bougeault et Lacarrère, 1989) ; DEAR (Sommeria et Deardorff, 1977)
Surface	SURFEX avec ISBA, TEB-Veg+CANOPY

Pour mieux faire ressortir les processus liés aux espaces urbains, nous avons effectué deux simulations, la première avec les zones urbaines existantes (simulation Urbaine) et la deuxième avec des surfaces naturelles à la place des surfaces urbaines (simulation Non-Urbaine). La base de données d'occupation des sols Ecoclimap (Faroux et al., 2013) à une résolution de 1 km a été utilisée pour la description des surfaces. La topographie a été dérivée de la base de données Shuttle Radar Topography Mission (SRTM ; NASA et NGA) à 250 m de résolution. Les deux bases ont ensuite été interpolées à partir des deux grilles sur la grille de modélisation. Pour la simulation Urbaine, une base de données d'occupation du sol de 250 m de résolution spatiale a été créée en utilisant la base de données de surface bâtie BD TOPO® (IGN, 2016) et la base de données Spot Thema (Malaval et Bénaroya, 2013) pour fournir une description plus détaillée de la zone urbanisée pour le deuxième domaine (GL et GM). En effet, trois composantes sont présentes : la surface urbaine, la surface naturelle et la topographie. Pour la deuxième simulation Non-Urbaine, les cultures et forêts (code 194 dans la base de données Ecoclimap) ont remplacé l'occupation du sol de type urbain. Cette simulation n'avait que deux composantes : la surface naturelle et la topographie. Afin de détecter une évolution éventuelle entre les deux simulations, on se base sur les paramètres atmosphériques tels que la température de l'air à 2m et le vent en surface. Pour mieux présenter les influences de l'urbanisation sur la couche de limite de surface, le vent moyen et l'indice de stagnation (Allwine, K. J., & Whiteman, C. D., 1994) ont été calculés sur une colonne d'air de 50 m. Les classes k-means ont ensuite été calculées à partir d'une ACP.

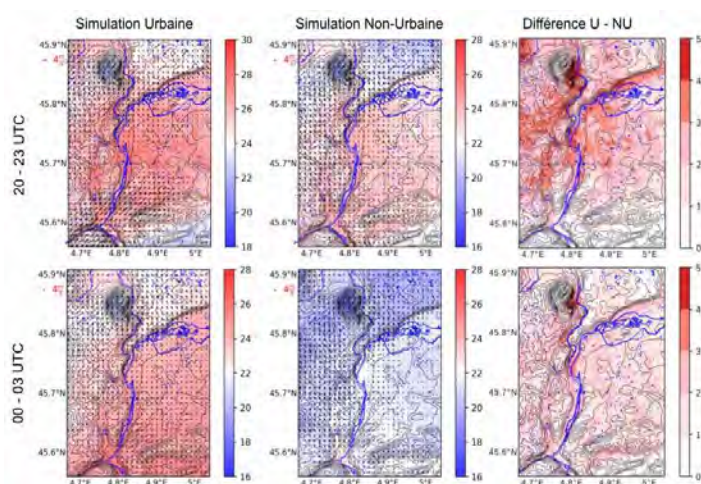
## 2. Résultats des simulations pour les deux agglomérations

Les conditions favorables (voir Introduction) pour étudier simultanément l'ICU et l'écoulement de l'air sont observées durant deux nuits différentes pour chacune des deux agglomérations : nuit du 22 au 23 août à Lyon et nuit du 18 au 19 août à Grenoble, lorsque le plus fort gradient ville-campagne a été observé. Pour les deux agglomérations, nous analysons ici les moyennes sur les deux parties de la nuit qui incluent : 20, 21, 22 et 23 h UTC pour la première partie de nuit et 00, 01, 02, 03h UTC pour la deuxième partie de nuit.

### 2.1. Lyon

Les conditions météorologiques favorables au développement de l'ICU dans l'agglomération lyonnaise ont été observées entre le 22 et le 23 août 2012, période pendant laquelle le gradient nocturne entre les stations de Bron et de Saint-Exupéry est devenu positif. La nuit a été caractérisée par des conditions de vent très faibles de secteur nord, bien reproduites par le modèle. Bien que les valeurs de température de l'air soient surestimées pour les stations sub-urbaines comme urbaines, ce biais spatialement homogène ne masque pas le gradient ville-campagne.

Dans la simulation Urbaine (Figure 2), comme prévu, les valeurs de température de l'air les plus élevées ont été obtenues pour les zones urbaines : on les observe sur la Plaine de l'Est lyonnais et la partie centrale de l'agglomération, puis sur les contreforts des Monts du Lyonnais, avec un contraste thermique fort jusqu'à 4°C entre les deux parties de la nuit. Pendant la première partie de la nuit, les valeurs obtenues pouvaient atteindre 28°C avec un contraste thermique plutôt faible entre les différentes zones urbaines (environ 2°C). Pendant la deuxième partie de la nuit, les valeurs maximales de la température de l'air étaient surtout caractéristiques des zones urbanisées (autour de 24°C). Pendant les deux parties de la nuit, les zones situées en dehors des zones urbaines en altitude, avec une couverture végétale naturelle, étaient les plus fraîches. Dans la simulation Non-Urbaine, le champ de température était surtout influencé par la topographie, indépendamment de la partie de la nuit. Pendant la première partie de la nuit, sur les reliefs,



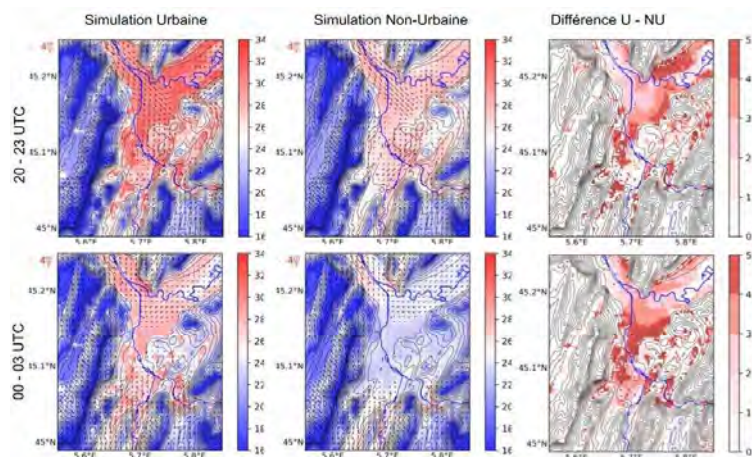
la température variait de 19 °C à 22 °C, tandis que dans les vallées et sur la Plaine de l'Est lyonnais, les valeurs étaient très homogènes (24°C). Le champ de vent en surface montre que, pendant la première partie de la nuit, dans la simulation Urbaine (Figure 2), les vents convergeaient vers la ville, tandis que dans la simulation Non-Urbaine, le vent était de direction dominante de nord. Dans les deux cas, la vitesse du vent diminuait visiblement au-dessus de l'Est lyonnais.

**figure 2.** Température moyenne avec la vitesse et la direction du vent moyen dans l'agglomération lyonnaise de la première (20, 21, 22 et 23 UTC) et de la deuxième (00, 01, 02 et 03 UTC) partie de la nuit du 22 au 23 août 2012, d'après les simulations Urbaine et Non-Urbaine.

Dans la deuxième partie de la nuit, dans les vallées plus étroites et encaissées (confluence du Gier et du Rhône vers Givors), un effet de piégeage de l'air s'est manifesté par une légère augmentation de la température. Pendant la première partie de la nuit, la différence de température entre les deux simulations (Figure 2) a atteint 5 °C, lorsqu'un rafraîchissement plus rapide était obtenu dans la simulation Non-Urbaine. L'ensemble de la plaine de l'Est lyonnais était de 2 à 4 °C plus chaud, avec un gradient thermique est-ouest en direction du centre-ville. Pendant la deuxième partie de la nuit, la différence de température s'atténuait et ne dépassait plus 3°C.

## 2.2 Grenoble

Dans le cas de l'agglomération grenobloise, dans la simulation Urbaine, pendant la première partie de nuit (Figure 3), comme dans le cas de Lyon, les valeurs de température de l'air les plus élevées ont été obtenues sur les zones urbaines dans les fonds des vallées, mais une augmentation de la température en altitude est aussi visible en présence des zones urbaines. La température baissait visiblement avec l'altitude, avec un refroidissement bien simulé dans tous les massifs (le gradient vertical pouvait atteindre 14 °C entre la Cluse de Voreppe et Villard de Lans dans le Vercors). La différence de température entre le milieu urbain (autour de 30 °C) et le milieu rural dans le Y grenoblois n'était pas homogène et variait d'une vallée à l'autre de 26 °C (vallée du Drac) à 28 °C (vallée de Grésivaudan). Les versants urbanisés des contreforts de la Chartreuse restaient les plus chauds (environ 32 °C). L'augmentation de la vitesse du vent dans la vallée a entraîné une diminution des valeurs de température de l'air dans l'axe des deux vallées, surtout dans la Cluse de Voreppe (27 °C) où l'effet Venturi est très fort. A l'approche des versants des montagnes, trois conditions défavorables se sont combinées : l'urbanisation et la faible vitesse du vent renforcées par les effets d'abri topographique.



**figure 3.** Température moyenne avec la vitesse et la direction du vent moyen dans l'agglomération grenobloise de la première

(20, 21, 22 et 23h UTC) et de la deuxième (00, 01, 02 et 03h UTC) partie de la nuit du 18 au 19 août 2012, d'après les simulations Urbaine et Non-Urbaine.

Dans la simulation Non-Urbaine (figure 3), comme dans le cas de Lyon, la distribution spatiale de la température et du vent ont été affectés par les facteurs topographiques. L'influence de la topographie sur le vent se manifeste par le développement des systèmes de brise de pente descendante. Le développement du système de brise de vallée a causé une légère diminution des valeurs de température dans les axes des vallées. Pour la première partie de la nuit, ce rafraîchissement était déjà bien simulé dans les axes des vallées du Grésivaudan et de la Cluse de Voreppe, ainsi que dans la partie centrale de la confluence. La jonction des deux vallées (Grésivaudan et centre de Grenoble), qui canalisent des vents de directions opposées, provoque une diminution significative de la vitesse du vent. Sur cette même zone, en première partie de nuit, la simulation Non-Urbaine montre des valeurs moyennes de température inférieures d'environ 3 °C par rapport à la zone voisine. Indépendamment de la simulation, dans la deuxième partie de la nuit (Figure 3), le rafraîchissement se poursuivait dans les axes des vallées. La direction du vent restait de nord-est dans le Grésivaudan, mais passait au sud-est dans la Cluse de Voreppe. Un vent relativement faible caractérisait la vallée du Drac, et un effet de piégeage y était visible, aussi bien pour la simulation Urbaine que pour la Non-Urbaine. Une inversion de température était visible sur les reliefs. La Figure 3 montre que, au pied des premières pentes de la Chartreuse - entre La Tronche et Corenc, l'augmentation des différences de température dans cette zone a été plus affectée par le refroidissement le plus fort dans la simulation Non-Urbaine que dans la simulation Urbaine (entre 4 et 6 °C). Quant à la partie sud de l'agglomération grenobloise, proche des premiers contreforts de la chaîne de Belledonne, la présence des zones urbanisées et la divergence du flux de NW provoquent un affaiblissement de la vitesse du vent et une augmentation de la différence de température supérieure à 5 °C. Dans la vallée de la Gresse, les différences de température pouvaient aussi être très élevées en raison de l'effet d'abri topographique. Le centre-ville de Grenoble apparaît ainsi plus chaud de 3 à 4 °C par rapport à la simulation Non-Urbaine. Lors du développement de l'inversion de température, pendant la deuxième partie de la nuit, la température de l'air était plus basse dans les axes des vallées, avec une nette augmentation des valeurs de température au pied des pentes et en altitude.

### 2.3 Complexité des relations entre les états de surface et les paramètres atmosphériques (exemple de Grenoble)

Avec l'analyse des différences de température entre les deux simulations et la classification par k-means, trois situations sont mises en évidence. L'augmentation de la température dans la simulation Urbaine dépend de l'état de la stabilité dans les vallées du Y grenoblois. Dans un premier cas, la température augmente, mais la vitesse du vent et l'indice de stagnation s'affaiblissent (première partie de la nuit) ; dans

un deuxième cas, la température augmente, mais la vitesse du vent et l'indice de stagnation ne changent pas (vallée du Grésivaudan quelle que soit la partie de nuit) ; et dans un troisième cas, la température, la vitesse du vent et l'indice de stagnation augmentent (surtout vrai pour la deuxième partie de la nuit dans la vallée du Drac, le centre-ville et la partie du Grésivaudan très peu urbanisée). Les effets de l'urbanisation sont dépendants de la partie de la nuit et de la localisation dans les vallées.

## Conclusion

La modélisation atmosphérique à très fine échelle permet d'analyser la dynamique de l'îlot de chaleur urbain, tant sur ses caractéristiques d'étendue horizontale et verticale, que sur son interaction avec la topographie dans des zones où celle-ci est complexe. L'urbanisation, en modifiant le bilan énergétique de surface, a toujours favorisé les anomalies thermiques positives, indépendamment de l'altitude des zones urbanisées. Dans cette étude, les fortes différences entre les simulations ne dépendent pas de la taille des agglomérations ; on pouvait retrouver les mêmes valeurs pour Lyon et Grenoble. Pour les deux agglomérations, indépendamment de leur taille, les effets de la topographie comme la canalisation des flux par les vallées mais également les effets de piégeage ont été simulés. L'augmentation de la température associée à l'urbanisation, dépend des conditions de stabilité qui peuvent se développer dans des vallées. Certaines conditions telles que l'affaiblissement du vent ou l'effet de piégeage et/ou le développement d'une couche d'inversion peuvent intensifier l'ICU.

## Bibliographie

- Allwine K. J., Whiteman C. D., 1994 : Single-station integral measures of atmospheric stagnation, recirculation and ventilation. *Atmospheric Environment*, **28(4)**, 713-721.
- Asencio N., Stein J., 2006 : Origins of the reversed flow over the windward Alpine foothills during MAP IOP3 and IOP8. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, **132(615)**, 297-316.
- Blein S., 2016 : *Observation et modélisation de couche limite atmosphérique stable en relief complexe: le processus turbulent d'écoulement catabatique* (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes (ComUE)).
- Bougeault P., Lacarrere P., 1989 : Parameterization of orography-induced turbulence in a mesobeta-scale model. *Monthly Weather Review*, **117(8)**, 1872-1890.
- Brun C., Blein S., Chollet J. P. 2017 : Large-Eddy Simulation of a Katabatic Jet along a Convexly Curved Slope. Part I: Statistical Results. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **74(12)**, 4047-4073.
- Caniaux G., Redelsperger J. L., Lafore J. P., 1994 : A numerical study of the stratiform region of a fast-moving squall line. Part I: General description and water and heat budgets. *Journal of the atmospheric sciences*, **51(14)**, 2046-2074.
- Faroux S., Kaptué Tchuenté A. T., Roujean J. L., Masson V., Martin E., Moigne P. L., 2013 : ECOCLIMAP-II/Europe: A twofold database of ecosystems and surface parameters at 1 km resolution based on satellite information for use in land surface, meteorological and climate models. *Geoscientific Model Development*, **6(2)**, 563-582.
- Fernando H. J. S., 2010 : Fluid dynamics of urban atmospheres in complex terrain. *Annual review of fluid mechanics*, **42**, 365-389.
- Giovannini L., Zardi D., de Franceschi M., Chen F., 2014 : Numerical simulations of boundary-layer processes and urban-induced alterations in an Alpin valley. *International Journal of Climatology*, **34(4)**, 1111-1131.
- Grimmond C. S. B., Oke T. R., 1995 : Comparison of heat fluxes from summertime observations in the suburbs of four North American cities. *Journal of Applied Meteorology*, **34(4)**, 873-889.
- Hidalgo J., Pigeon G., Masson V., 2008 : Urban-breeze circulation during the CAPITOUL experiment: observational data analysis approach. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **102(3)**, 223-241.
- IGN, 2016. Description of BD TOPO 2.1. Saint Mandé.



- Kuttler W., Barlag A. B. Robmann F., 1996 : Study of the thermal structure of a town in a narrow valley. *Atmospheric Environment*, **30(3)**, 365-378.
- Lac C., Chaboureau P., Masson V., Pinty P., Tulet P., Escobar J., Aumond P., 2018 : Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geoscientific Model Development*, **11**, 1929-1969.
- Lafore J. P., Stein J., Asencio N., Bougeault P., Ducrocq V., Duron J., Vilà-Guerau de Arellano J., 1998 : The Meso-NH atmospheric simulation system. Part I: Adiabatic formulation and control simulations. *Annales geophysicae*, **16**, 90-109.
- Lemonsu A., Masson V., 2002 : Simulation of a summer urban breeze over Paris. *Boundary-Layer Meteorology*, **104(3)**, 463-490.
- Malaval P., Bénaroya C., 2013 : *Aerospace marketing management*. Springer Internat. Publ.
- Masson V. Le Moigne P., Martin E., Faroux S., Alias A., Alkama R., Brousseau P., 2013 : The SURFEXv7. 2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, **6**, 929-960.
- Masson V., Lion Y., Peter A., Pigeon G., Buyck J., Brun E., 2013 : Grand Paris: regional landscape change to adapt city to climate warming. *Climatic Change*, **117(4)**, 769-782.
- Morcrette J. J., 1991 : Radiation and cloud radiative properties in the European Centre for Medium Range Weather Forecasts forecasting system. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **96(D5)**, 9121-9132.
- Noilhan J., Mahfouf J. F., 1996 : The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global and planetary Change*, **13(1-4)**, 145-159.
- 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**, 1-12.
- Pergaud J., Masson V., Malardel S., Couvreur F., 2009 : A parameterization of dry thermals and shallow cumuli for mesoscale numerical weather prediction. *Boundary-layer meteorology*, **132(1)**, 83-106.
- Rotach M. W., Vogt R., Bernhofer C., Batchvarova E., Christen A., Clappier A., Mitev V., 2005 : BUBBLE—an urban boundary layer meteorology project. *Theoretical and Applied Climatology*, **81(3-4)**, 231-261.
- Seity Y., Brousseau P., Malardel S., Hello G., Bénard P., Bouttier F., Masson V., 2011 : The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, **139(3)**, 976-991.
- Schmidli J., Rotunno R., 2010 : Mechanisms of along-valley winds and heat exchange over mountainous terrain. *Journal of the atmospheric sciences*, **67(9)**, 3033-3047.
- SPOT-Thema. [www.intelligence-airbusds.com/satellite-data](http://www.intelligence-airbusds.com/satellite-data)
- Sommeria G., Deardorff J. W., 1977 : Subgrid-scale condensation in models of nonprecipitating clouds. *Journal of Atmospheric Sciences*, **34(2)**, 344-355.
- Whiteman C. D., 1990 : Observations of thermally developed wind systems in mountainous terrain. In *Atmospheric processes over complex terrain* (pp. 5-42). *American Meteorological Society*, Boston, MA.

## STRUCTURE FINE DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN PARISIEN À PARTIR D'UN RÉSEAU DE STATIONS NON CONVENTIONNELLES

Malika MADELIN<sup>1</sup>, Vincent DUPUIS<sup>2</sup>

<sup>1</sup>UMR 8586 PRODIG, Université de Paris, Paris, France, malika.madelin@u-paris.fr

<sup>2</sup>UMR 8234 PHENIX, Sorbonne Université, Paris, France, vincent.dupuis@sorbonne-universite.fr

**Résumé :** Si l'îlot de chaleur urbain (ICU) se manifeste généralement par des températures urbaines nocturnes plus élevées que celles enregistrées dans les zones péri-urbaines ou rurales, la structure de l'ICU à des échelles plus fines est difficile à appréhender, en raison de la faible densité des réseaux de stations d'observation de référence. La disponibilité de nouvelles données de stations individuelles (e.g. Netatmo) offre des opportunités en termes de résolutions spatiales et temporelles, sous réserve d'une analyse critique importante. Dans cette communication, en utilisant un jeu de données Netatmo sur l'agglomération parisienne, nous nous intéressons à la structure fine de l'ICU et à la variabilité des températures inter et intra *Local Climate Zones*, résumant la morphologie urbaine et l'occupation du sol.

**Mots-Clés :** îlot de chaleur urbain ; stations individuelles ; LCZ *Local Climate Zones* ; agglomération parisienne.

**Abstract:** Fine scale structure of the urban heat island from a citizen weather station network. While the urban heat island (UHI) generally manifests itself by nighttime urban temperatures higher than those recorded in peri-urban or rural areas, the structure of the UHI at finer scales is difficult to apprehend. This is due to the low density of reference observation station networks. The availability of new data coming from individual weather stations (e.g. Netatmo) offers opportunities in terms of spatial and temporal resolutions, provided a significant critical analysis is done. In this communication, using a Netatmo dataset on the Paris agglomeration, we are investigate in the fine structure of the ICU and the inter and intra *Local Climate Zones* temperature variability, summarizing the urban morphology and the occupation of the ground.

**Keywords:** urban heat island, personal weather stations, LCZ *Local Climate Zones*, Paris area.

### Introduction

L'îlot de chaleur urbain est un phénomène majeur en climatologie urbaine (Oke *et al.* 2017). Il est caractérisé par des températures de l'air nocturnes plus élevées dans le centre des villes que dans les campagnes environnantes, surtout lors des nuits de ciel clair et de vent calme (conditions radiatives). Il est lié à l'hétérogénéité des propriétés thermiques et des perméabilités des surfaces urbaines et rurales.

Pour aller au-delà de cette dichotomie ville/campagne et mieux appréhender les liens entre le climat urbain local, la morphologie urbaine et l'occupation du sol aux échelles fines, une classification de l'espace en Zones Climatiques Locales (LCZ *Local Climate Zones*), supposées homogènes, a été introduite par Stewart et Oke (Stewart et Oke 2012). Celle-ci divise l'espace en 17 classes, 10 classes urbaines (de 1 à 10) qui diffèrent principalement selon la hauteur et la densité des bâtiments et 7 classes « naturelles » divisées en 4 classes « végétalisées » (de A à D), 2 classes concernant les sols minéraux (roches et sables, E, F) et une classe pour les surfaces d'eau (G). Grâce à une standardisation des méthodes permettant de déterminer ces LCZ (Demuzere *et al.* 2021, Wudapt [www.wudapt.org/](http://www.wudapt.org/)) pour différentes villes à partir de données satellitaires, cette classification en LCZ s'est rapidement imposée dans des études de climatologie urbaine et est maintenant disponible pour un grand nombre de villes dans le monde.

Pour tester la pertinence de ces classifications en LCZ pour représenter le climat urbain local, un grand nombre d'auteurs ont cherché à quantifier la variabilité des températures observées au sein d'un même

type de LCZ (*intra*) et entre types de LCZ différents (*inter*) pour différentes villes. En raison de la faible densité des réseaux de stations de référence, ces études se basent le plus souvent sur des observations satellitaires dans l'infrarouge thermique, disponibles avec une haute résolution spatiale (Geletič *et al.* 2016, Richard *et al.* 2018, Bechtel *et al.* 2019, del Pozo *et al.* 2021) mais possédant une résolution temporelle limitée. Si des différences sont effectivement observées entre LCZ, avec des LCZ urbaines en général plus chaudes que les LCZ végétalisées, le lien entre température de surface et température de l'air n'est toutefois pas évident, particulièrement en journée et la généralisation de ces résultats n'est donc pas triviale. Sur le plan des observations au sol, d'autres auteurs se basent sur des mesures mobiles (Leconte 2015, Renard et Alonso 2020) qui permettent d'avoir de la haute résolution spatiale mais là encore avec une profondeur temporelle souvent limitée. Enfin, d'autres travaux, plus rares, utilisent les mesures issues de réseaux denses de recherche et/ou des collectivités territoriales (quelques dizaines de stations) (Skarbit *et al.* 2017, Richard *et al.* 2018, Dubreuil *et al.* 2020, Gubler *et al.* 2021, Philipps *et al.* 2021). Là encore, des différences de comportements thermiques sont observées en fonction des types de LCZ mais le faible nombre de stations par type de LCZ rend les généralisations difficiles.

Parallèlement à ces études, un nombre plus limité d'auteurs se sont intéressés aux données issues des réseaux non conventionnels, émergents, de stations individuelles comme celles du réseau Netatmo (netatmo.com). Même si ces données nécessitent d'être sérieusement analysées et triées avant d'être utilisées (Meier *et al.* 2017, Madelin et Dupuis 2020), elles présentent l'avantage d'offrir une très haute résolution spatiale (plusieurs milliers de stations à Paris ou à Berlin par exemple) et temporelle, qui permet d'étudier la pertinence des LCZ pour caractériser le climat urbain local. Plusieurs études récentes ont été réalisées dans ce contexte pour les villes de Berlin (Fenner *et al.* 2017), Sydney (Potgieter *et al.* 2021), Moscou (Varentsov *et al.* 2021) ou encore Londres (Benjamin *et al.* 2021). Si dans toutes ces études, on retrouve des températures plus élevées pour les LCZ urbaines que pour les LCZ végétalisées, en accord avec le phénomène d'îlot de chaleur urbain, des différences au sein de LCZ d'un même type et entre LCZ d'un même groupe (urbains, végétalisés) sont également observées. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude sur Paris, métropole d'environ 10 millions d'habitants.

## 1. Données et méthodes

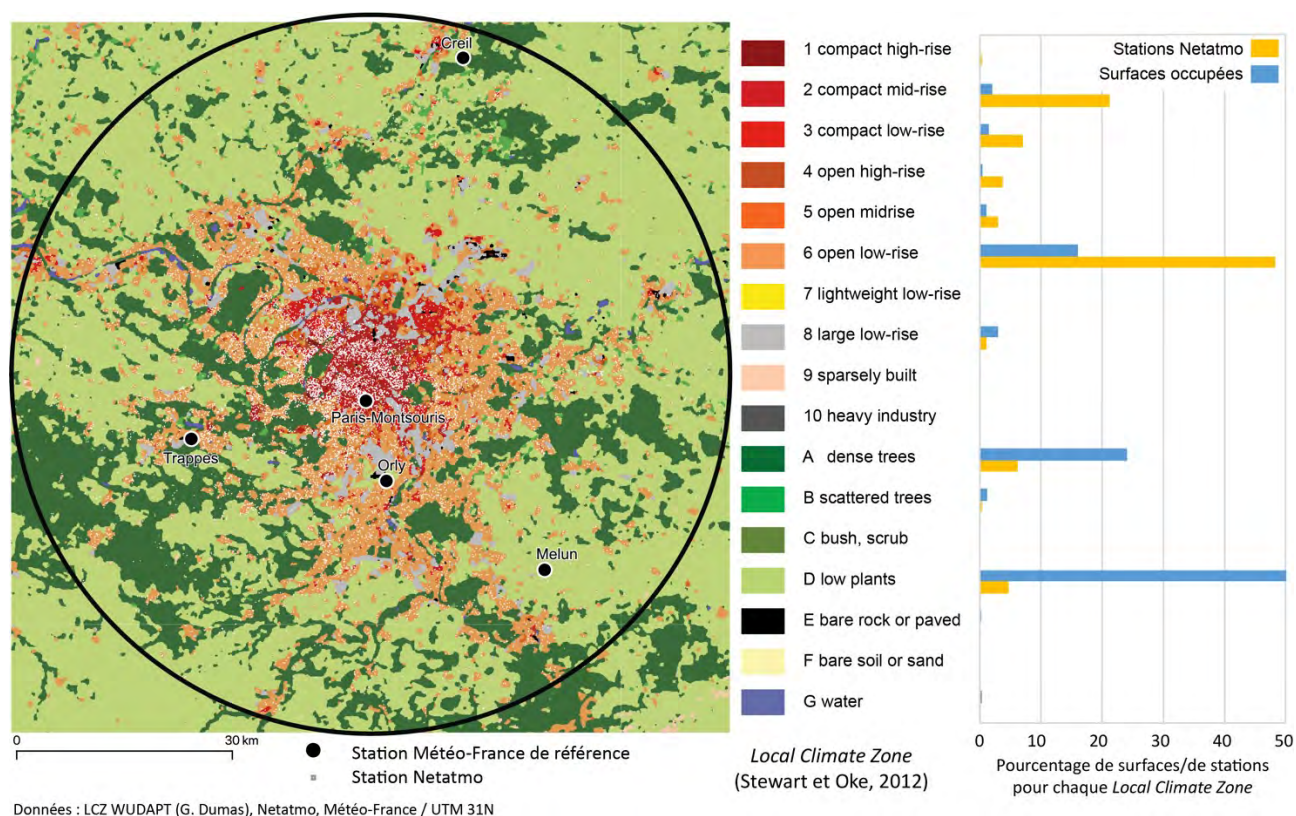
### 1.1. Classification en LCZ de l'agglomération parisienne

Pour cette étude, nous avons utilisé la classification LCZ de la région parisienne disponible sur le site WUDAPT ([www.wudapt.org](http://www.wudapt.org), Ching *et al.* 2018), plus précisément la version initiale pour l'agglomération parisienne, créée par Guillaume Dumas (Hidalgo *et al.* 2019). Il s'agit d'un raster (résolution 100m) qui recouvre une zone d'environ 50km autour de Paris, chaque pixel contenant l'information sur le type de LCZ (Figure 1).

### 1.2. Données de températures issues du réseau Netatmo

Nous avons utilisé des données de température de l'air des stations du réseau Netatmo autour de Paris collectées à l'échelon horaire depuis 2017 et triées suivant la méthodologie décrite dans Madelin et Dupuis (2020, proche de celle développée par Meier *et al.* 2017) : après tri, nous gardons du jeu initial environ un tiers des stations (~4 000 stations) et la moitié des données horaires. Pour cette étude, nous avons restreint le jeu de données aux stations situées à une distance inférieure à 50 km du centre de Paris (Figure 1), une distance suffisante pour bien appréhender l'îlot de chaleur urbain parisien (Madelin et Dupuis 2020).

Par ailleurs, pour le tri des données Netatmo, nous avons ainsi utilisé les températures minimales et maximales journalières de quatre stations de Météo-France (Paris Montsouris, Melun, Trappes et Creil). Nous avons également utilisé les données horaires de nébulosité et de vent moyen pour la station d'Orly, afin de déterminer les nuits correspondant à des situations de ciel clair (nébulosité moyenne inférieure ou égale à 2 octas) et de vent calme (vitesse moyenne inférieure ou égale à 2 m/s).



**figure 1.** Carte des LCZ pour l'agglomération parisienne et des stations Netatmo en 2021 (en points blancs) et des stations de référence (points noirs) ; délimitation de la zone d'étude d'un rayon de 50 km centré sur Paris (cercle noir) et histogrammes des surfaces occupées et des nombres de stations Netatmo par type de LCZ (en pourcentage).

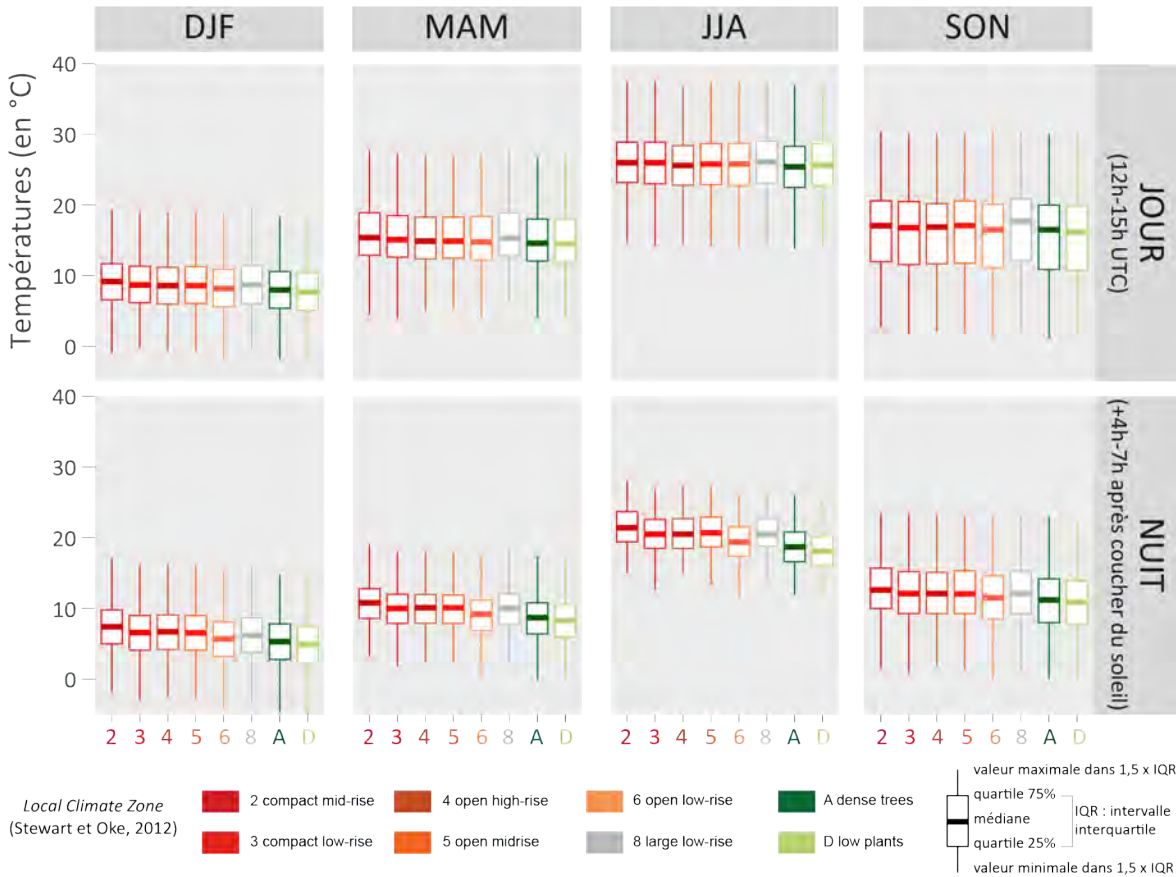
### 1.3. Méthodologie

Afin d'étudier les liens entre la structure spatiale de l'îlot de chaleur urbain parisien (et du champ de températures de façon plus générale) et la division de l'espace en LCZ, nous avons attribué à chaque station le type de LCZ correspondant à sa localisation. Nous avons ensuite calculé diverses statistiques par type de LCZ, résumées dans ce manuscrit sous forme de graphiques temporels et de boîte à moustaches ou *boxplot*, en regroupant les observations à différents échelons temporels : année, saison, jour/nuit, nuit de situations dites « radiatives » (ciel clair, vent calme). En cela, nous reprenons une méthodologie classique pour ce type d'étude du lien entre températures et LCZ déjà utilisée, par exemple par Skarbit *et al.* (2017) ou encore Fenner *et al.* (2017). Enfin, nous avons cherché à évaluer l'influence de la distance au centre de Paris en calculant les gradients thermiques par type de LCZ lors de nuits radiatives.

## 2. Variabilité *intra-* et *inter-LCZ* des températures du réseau Netatmo

### 2.1. Par saison, en fonction du jour et de la nuit

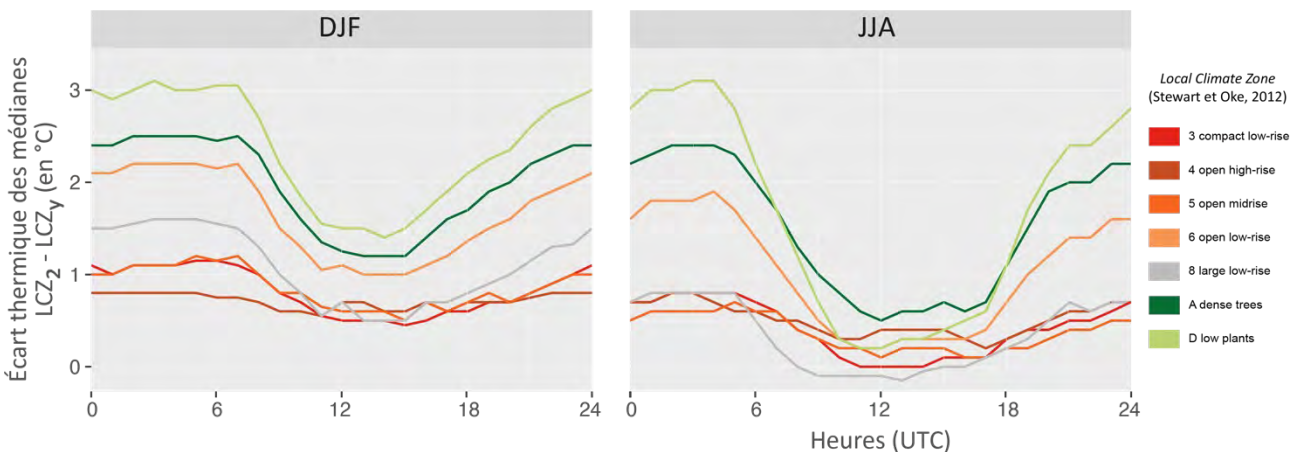
Nous avons choisi d'étudier la variabilité *intra-LCZ* et *inter-LCZ* des températures de l'air mesurées par les stations Netatmo en fonction des saisons en distinguant les jours (ici entre 12h et 15h UTC) et les nuits (entre 4h et 7h après le coucher du soleil). La figure 2 montre, pour l'année 2019, les températures médianes ainsi que les intervalles interquartiles pour les différentes classes LCZ. On observe globalement une variabilité *intra-LCZ* plus faible la nuit que le jour, pour une même saison, et des températures généralement plus élevées la nuit pour les classes LCZ urbaines que pour les classes LCZ végétalisées (A,D), en accord avec l'existence d'un îlot de chaleur urbain nocturne. Nous observons des tendances similaires pour les autres années étudiées (non montré ici).



**figure 2.** Températures médianes et intervalles interquartiles associés, pour les stations Netatmo en fonction du type de LCZ sous forme de *boxplot* pour les différentes saisons de l'année 2019 et selon le jour et la nuit.

### 2.2. En fonction de l'heure, selon les saisons

Pour aller au-delà de l'analyse précédente et mieux appréhender la dynamique des variations *inter-LCZ* à l'échelle de la journée, nous avons choisi de calculer et représenter la différence des températures médianes des LCZ, en prenant comme référence la température médiane de la classe LCZ urbaine de type 2 (*compact mid-rise*). La figure 3 montre ces écarts en hiver (DJF) et en été (JJA) pour l'année 2019. On voit très bien l'îlot de chaleur urbain nocturne et sa dynamique, avec des températures enregistrées par les stations situées dans les LCZ végétalisées, majoritaires à l'extérieur du centre urbain, plus élevées la nuit que celles enregistrées dans celles situées dans les LCZ urbaines. Des écarts de plusieurs degrés sont observés, quasiment toujours positifs, et les variations diurnes sont plus élevées en été.

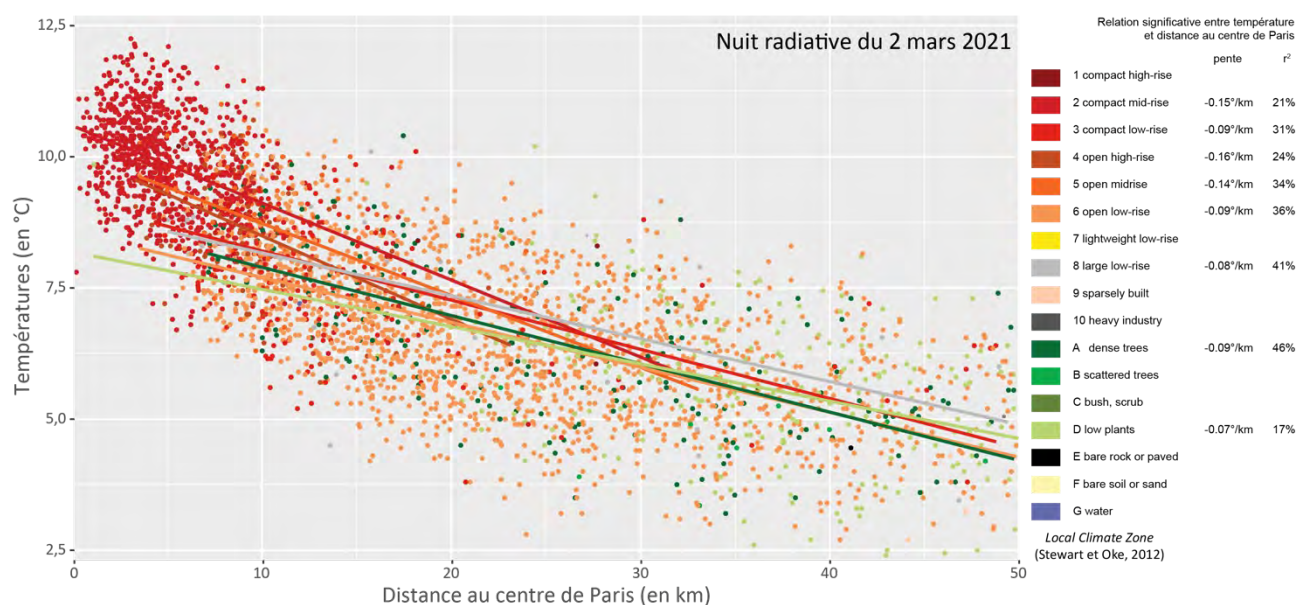




**figure 3.** Écart thermique des médianes entre LCZ 2 (*compact mid-rise*) et les autres LCZ, en fonction de l'heure, pour les stations Netatmo en hiver et en été 2019.

### 2.3. Influence de la distance au centre de Paris pour les dates correspondant à des situations de ciel clair et de vent calme

Pour mieux comprendre les variabilités *intra-* et *inter-LCZ*, particulièrement marquées lors des nuits radiatives (non montré ici), nous avons cherché à évaluer l'influence de la distance au centre de Paris. La figure 4 montre, pour une nuit radiative particulière (02/03/21), l'évolution des températures enregistrées par les stations associées à différentes LCZ en fonction de la distance au centre de Paris. On voit globalement une décroissance sur une vingtaine de kilomètres (en accord avec des résultats précédents, Madelin et Dupuis 2020), avec des gradients thermiques qui dépendent du type de LCZ.



**figure 4.** Températures de l'air des stations Netatmo associées à différentes LCZ en fonction de la distance au centre de Paris.

## Conclusion

Nous nous sommes intéressés dans cet article à la variabilité spatiale aux échelles fines des températures issues d'un réseau non conventionnel de stations individuelles, le réseau Netatmo, en lien avec la description de l'espace urbain au moyen de la classification LCZ. Nos résultats montrent une variabilité des températures enregistrées en fonction des LCZ. En se focalisant sur les saisons, en séparant jour et nuit et même au-delà en isolant les nuits « radiatives » (ciel clair, vent calme), les disparités entre températures médianes enregistrées en fonction du type de LCZ apparaissent plus nettement. On retrouve ainsi l'existence d'un îlot de chaleur qui se traduit par des températures plus élevées dans les zones urbaines que dans les zones végétalisées. Toutefois, des différences sont également observées entre LCZ d'un même groupe, LCZ urbaines par exemple, différences qui mériteraient d'être approfondies par l'installation d'un réseau dense de stations de référence, basé sur les LCZ (comme à Toulouse, Dijon ou encore Rennes).

## Bibliographie

Bechtel B., Demuzere M., Mills G., Zhan W., Sismanidis P., Small C. et Voogt J., 2019 : SUHI analysis using Local Climate Zones. A comparison of 50 cities. *Urban Climate*, **28**, p.100451.

Benjamin K., Luo Z. et Wang X., 2021 : Crowdsourcing urban air temperature data for estimating urban heat island and building heating/cooling load in London. *Energies*, **14**(16), p.5208.

- Ching J., Mills G., Bechtel B., See L., Feddema J., Wang X., Ren C., Brousse O., Martilli A., Neophytou M., Mouzourides P., Stewart I., Hanna A., Ng E., Foley M., Alexander P., Aliaga D., Niyogi D., Shreevastava A., Bhalachandran P., Masson V., Hidalgo J., Fung J., Andrade M., Baklanov A., Dai W., Milcinski G., Demuzere M., Brunzell N., Pesaresi M., Miao S., Mu Q., Chen F. et Theeuwes N., 2018 : WUDAPT: An Urban Weather, Climate, and Environmental Modeling Infrastructure for the Anthropocene. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **99**, 1907-1924.
- del Pozo S., Landes T., Nerry F., Kastendeuch P., Najjar G., Philipps N. et Lagüela S., 2021 : Evaluation of the Seasonal Nighttime Lst-Air Temperature Discrepancies and Their Relation to Local Climate Zones (LCZ) in Strasbourg. In *XXIVTH ISPRS CONGRESS*, **43**.
- Demuzere M., Kittner J. et Bechtel B., 2021 : LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. *Frontiers in Environmental Science*, **9**.
- Dubreuil V., Foissard X., Nabucet J., Thomas A. et Quénel H., 2020 : Fréquence et intensité des îlots de chaleur à Rennes : bilan de 16 années d'observations (2004-2019). *Climatologie*, **17**, p.6.
- Fenner D., Meier F., Bechtel B., Otto M. et Scherer D., 2017 : Intra and inter 'local climate zone' variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, Germany. *Meteorologische Zeitschrift*, **26**, 5, 525-547.
- Geletič J., Lehnert M. et Dobrovolný P., 2016 : Land surface temperature differences within local climate zones, based on two central European cities. *Remote Sensing*, **8**(10), p.788.
- Gubler, M., Christen, A., Remund, J. and Brönnimann, S., 2021. Evaluation and application of a low-cost measurement network to study intra-urban temperature differences during summer 2018 in Bern, Switzerland. *Urban climate*, **37**, p.100817.
- Hidalgo J., Dumas G., Masson V., Petit G., Bechtel B., Bocher E., Foley M., Schoetter R. et Mills G., 2019 : Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations. *Urban Climate*, **27**, 64-89.
- Leconte F., 2015 : *Caractérisation des îlots de chaleur urbain par zonage climatique et mesures mobiles : Cas de Nancy*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- Madelin M. et Dupuis V., 2020 : Intensité et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain parisien à partir de données participatives. *Climatologie*, **17**, 9.
- Meier F., Fenner D., Grassmann T., Otto M. et Scherer D., 2017 : Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research. *Urban Climate*, **19**, 170-191.
- Oke T.R., Mills G., Christen A. et Voogt J. A., 2017 : *Urban climates*. Cambridge University Press.
- Philipps N., Kastendeuch P. et Najjar G., 2020 : Analyse de la variabilité spatio-temporelle de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg (France). *Climatologie*, **17**, p.10.
- Potgieter J., Nazarian N., Lipson M.J., Hart M.A., Ulpiani G., Morrison W. et Benjamin K., 2021. Combining high-resolution land use data with crowdsourced air temperature to investigate intra-urban microclimate. *Frontiers in Environmental Science*, p.385.
- Renard F. et Alonso L., 2020 : Températures de surface et mesures mobiles confrontées aux zones climatiques locales : exemples des agglomérations de Tokyo et de Lyon. *Climatologie*, **17**, p.11.
- Richard Y., Emery J., Dudek J., Pergaud J., Chateau-Smith C., Zito S., Rega M., Vairet T., Castel T., Thévenin T. et Pohl B., 2018 : How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. *Urban Climate*, **26**, 258-274.
- Skarbit N., Stewart I.D., Unger J. et Gál T., 2017 : Employing an urban meteorological network to monitor air temperature conditions in the 'local climate zones' of Szeged, Hungary. *International Journal of Climatology*, **37**, 582-596.
- Stewart I.D. et Oke T.R., 2012 : Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **93**(12), 1879-1900.
- Varentsov M., Fenner D., Meier F., Samsonov T. et Demuzere M., 2021 : Quantifying Local and Mesoscale Drivers of

the Urban Heat Island of Moscow with Reference and Crowdsourced Observations. *Frontiers in Environmental Science*, p.543.

## COMMENT ET POUR QUI CARTOGRAPHIER L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN (ICU) ?

Yves RICHARD<sup>1</sup>, Julien CRÉTAT<sup>1</sup>, Julita DUDEK<sup>1</sup>, Nadège MARTINY<sup>1</sup>, Julien PERGAUD<sup>1</sup>, Benjamin POHL<sup>1</sup>, Mélissa POUPELIN<sup>1,2</sup>, Mario REGA<sup>1</sup>, Daniel JOLY<sup>2</sup>, Damien ROY<sup>2</sup>, Thomas THÉVENIN<sup>2,4</sup>, Justin EMERY<sup>3</sup>, Ludovic GRANJON<sup>4</sup>, Suzie BESSET<sup>5</sup>, Oanez CODET-HACHE<sup>5</sup>, Marie-Françoise DODET<sup>5</sup>, David FAU<sup>5</sup>, Anne VOLATIER<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Centre de Recherches de Climatologie, UMR 6282 Biogéosciences, CNRS/Univ Bourgogne Franche-Comté

<sup>2</sup> UMR 6049 ThéMA, CNRS/Univ Bourgogne Franche-Comté

<sup>3</sup> AVENUES EA 7284, Univ. de technologie de Compiègne

<sup>4</sup> MSH de Dijon, UAR 3516 CNRS-UBFC uB

<sup>5</sup> Dijon Métropole

**Résumé :** Le réseau MUSTARDijon offre la possibilité de procéder à une cartographie fine des températures horaires sur Dijon Métropole. La méthode proposée ici repose sur des régressions linéaires multiples mobilisant deux familles de prédicteurs : des descripteurs du relief et des descripteurs de l'occupation du sol. L'application porte sur la canicule de l'été 2020 (6-9 août). Deux configurations sont comparées. L'une, en mode recherche, laisse la possibilité aux descripteurs de varier dynamiquement en fonction de leur pertinence statistique, l'autre, en mode opérationnel, impose les 5 mêmes descripteurs en entrée. En termes de performance statistique ou de structure spatiale, l'impact de la méthode n'est pas négligeable.

**Mots-Clés :** Cartographie ; Géostatistique ; Îlot de Chaleur Urbain ; Dijon-Métropole.

### Introduction

La cartographie de la température de l'air à haute résolution spatio-temporelle est essentielle dans les environnements urbains, en particulier pour identifier les zones fréquemment caractérisées par des îlots de chaleur et de fraîcheur urbains (ICU et IFU). Ces cartes sont nécessaires aux politiques urbaines visant à améliorer le confort thermique (Buttstädt et al., 2011). Avec 67 stations de mesure de la température de l'air, le réseau Measuring Urban Systems Temperature of Air Round Dijon (MUSTARDijon ; Richard et al., 2018), offre la possibilité de procéder à une cartographie fine des températures horaires sur Dijon Métropole. Dans le cadre du projet européen RESPONSE, une méthode statistique d'interpolation de la température a été développée en partenariat entre universitaires et Dijon-Métropole. Les finalités sont 1/ de mieux comprendre le rôle respectif du relief et de l'occupation du sol sur le champ de température le long des cycles annuel et diurne, 2/ de développer une interface accessible à tous les acteurs et habitants du territoire permettant de visualiser à toute heure une carte de température en temps quasi-réel et 3/ d'accompagner l'action des décideurs pour atténuer l'ICU et favoriser des IFU.

### 1. Données et méthode

#### 1.1. Données

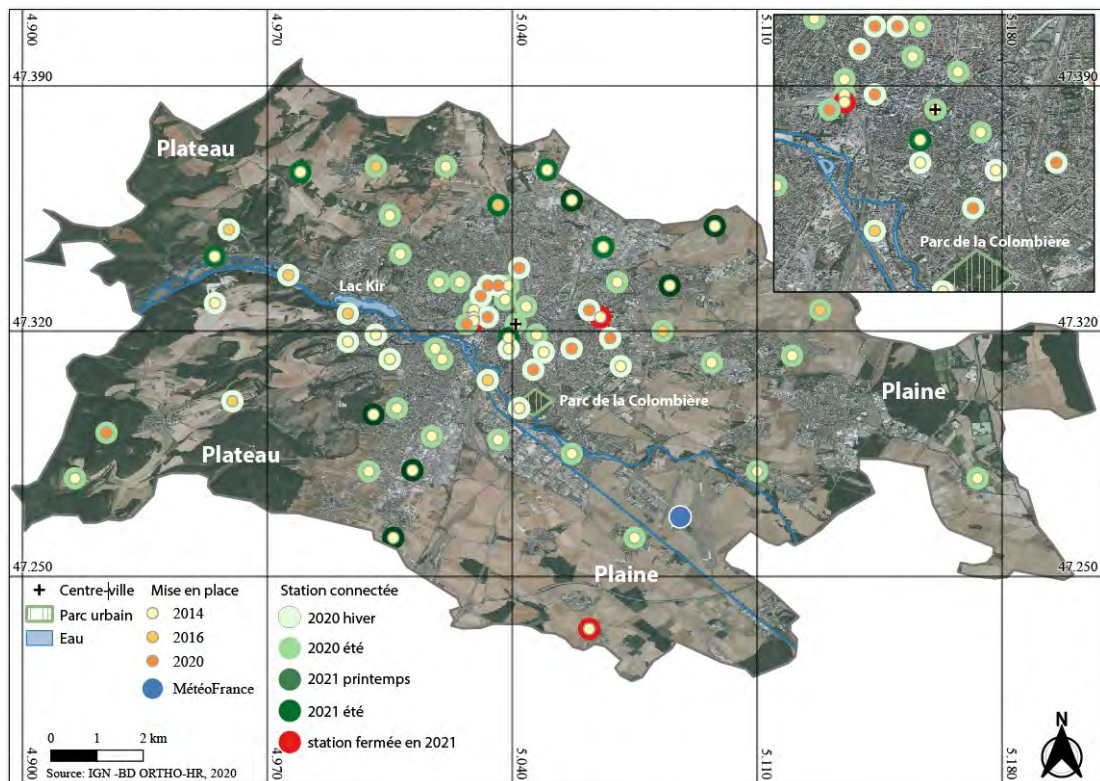
Les températures horaires sont issues du réseau MUSTARDijon conçu pour capturer les conditions thermiques méso-échelle (Oke, 1984) sur les diverses communes, quartiers et catégories d'utilisation du sol de Dijon Métropole (Fig. 1). Les mesures de température sont effectuées toutes les heures à 3 m au-dessus du sol depuis le 6 juin 2014 (de Lapparent et al., 2015). Le réseau s'est progressivement densifié, passant de 50 stations en 2014 à 67 en 2022 (Fig. 1). L'application porte sur la canicule d'août 2020, les périodes caniculaires étant propices au développement d'ICU, d'IFU, et génératrices de risques sanitaires (Richard et al., 2021).

Quatre catégories de prédicteurs potentiels sont utilisées pour interpoler les températures horaires : des surfaces de tendance, la topographie, des descripteurs urbains et de végétation (Tableau 1 ; colonne de gauche). Les surfaces de tendance incluent les coordonnées géographiques et la

distance au centre-ville. Cette dernière est connue pour affecter les températures en milieu urbain (Edmondson et al., 2016) et est calculée comme la distance euclidienne entre chaque station et le centre-ville (Place de la Libération représentée avec une croix arrière dans la Fig. 1). Le Modèle Numérique de Terrain (MNT), de résolution 50m, de l'Institut Géographique National (IGN) est utilisé pour extraire l'altitude du pixel de 50 m contenant chaque station (Tableau 1). Pour tenir compte des effets de la topographie locale sur les vents le long du cycle diurne, le MNT est également utilisé pour dériver l'ampleur des bosses et des vallées (Joly et al., 2012). Ces deux descripteurs sont moyennés pour les 7 pixels de 50 m les plus proches de chaque station afin de lisser les structures bruyantes (Tableau 1).

Les descripteurs urbains et de végétation sont dérivés d'un produit hybride associant la BD TOPO (IGN) et l'image satellite Pléiade du 29 mai 2021. Ces descripteurs ont été calculés dans une zone tampon de 300 m de rayon autour de chaque station (Tableau 1). Ils comprennent la fraction de surface couverte par les bâtiments et les surfaces artificielles (bâtiments + infrastructures de transport) et les trois catégories de végétation suivantes : les forêts et l'eau, les grandes cultures et la végétation basse. La fraction de surface totale couverte par les surfaces artificielles et les trois catégories de végétation est de 100 %. La relation spatiale entre la température et chaque catégorie urbaine et végétale reste quasi-constante quelle que soit la taille de la zone tampon (rayon de 150 m à 600 m, tous les 50 m). La relation est cependant plus faible pour les zones tampon de plus petite taille (50 m et 100 m), ce qui est cohérent avec le fait que les capteurs mesurent la température méso-échelle (Emery et al., 2021).





**figure1.** Localisation des stations du réseau MUSTARDijon (2014 à 2021). Cadre en haut à droite : zoom sur le centre-ville. Petit cercle de couleur chaude : date de déploiement. Grand cercle de couleur froide : passage de la récupération manuelle à la récupération automatique des données. Grand cercle rouge : station fermée. Grand cercle bleu : station de Météo-France utilisée pour identifier et caractériser la période de canicule.

## 1.2. Méthode

Par construction, plus la surface est minérale, moins il y a de végétation et inversement. De même, des colinéarités existent entre la topographie et l'occupation des sols du fait de l'intervention humaine. Un seuil de corrélation de  $|0,6|$  a été choisi pour identifier les colinéarités les plus problématiques (Craney and Surles, 2002). Des seuils proches, par exemple de  $|0,6|$  donnent des résultats très proches (non montré). La longitude et les surfaces artificielles ont été exclues car ces deux descripteurs étaient significativement corrélés avec de nombreux autres. Deux modèles sont construits sur cette base, l'un dédié à la recherche (solution 1), l'autre à la vulgarisation scientifique (solution 2). Dans les deux cas, un modèle par heure est construit. Pour la solution 1, chaque modèle utilise 5 prédicteurs maximum parmi les 7 candidats suivants : latitude, altitude ou ampleur des bosses, ampleur des vallées, distance au centre-ville ou fraction de bâtiments, fraction d'eau + forêt, principales cultures et végétation basse. Pour la solution 2, chaque modèle utilise 5 prédicteurs imposés : altitude, distance au centre-ville, fraction d'eau + forêt, principales cultures et végétation basse. Ces 5 prédicteurs ont été retenus car étant les plus fréquemment sélectionnés en solution recherche.

Prédicteurs Potentiels		Construction du modèle sur le réseau MUSTARDijon	Application du modèle sur une grille de mailles 100m x 100m
Coordonnées géographiques	Longitude (°)	Station MUSTARDijon	Centre de chaque maille
	Latitude (°)		
Topographie	Altitude (m)	Pixel de 50m le plus proche	

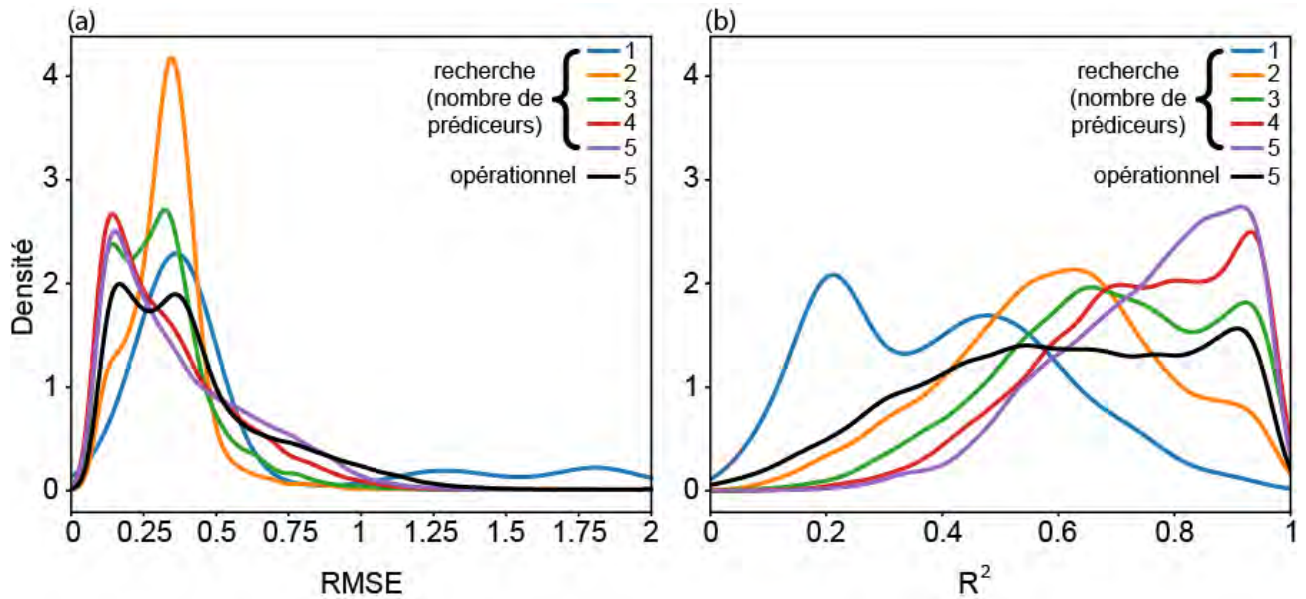
	<b>ou</b> <b>ampleur des bosses (m)</b>	Moyenne des 7 pixels de 50m les plus proches	
	<b>Ampleur des vallées (m)</b>		
	<b><i>Distance au centre-ville (m)</i></b>	Station MUSTARDijon	Centre de chaque maille
Urbain	<b>ou</b> <b>Bâti (%)</b>	Zone tampon de 300m de rayon autour de chaque station MUSTARDijon	Maille
	Surface artificialisée (%)		
Végétation	<b><i>Forêt + Eau (%)</i></b>		
	<b><i>Grande culture (%)</i></b>		
	<b><i>Végétation basse (%)</i></b>		

**Tableau 1.** Prédicteurs potentiels utilisés comme variables indépendantes pour expliquer la distribution spatiale de la température horaire mesurée par le réseau MUSTARDijon et l'interpoler sur une grille de 100 m x 100 m. Les prédicteurs en gras sont proposés pour la solution recherche, ceux en italique sont imposés pour la solution opérationnelle.

## 2. Résultats

### 2.1. Des cartes pour qui ? Des cartes pour quoi ?

Dans une perspective de recherche, la solution 1 vise à analyser dans quelle mesure les prédicteurs mobilisés pour construire les régressions varient le long des cycles diurne et annuel. Sur les 57571 modèles construits pour la période 2014-2020, 36% sont alimentés par 5 prédicteurs, 29% par 4 prédicteurs, 22% par 3 prédicteurs, 11% par 2 prédicteurs et 2% par 1 prédicteur. La valeur modale des  $R^2$  dépasse 0,9 avec 4-5 prédicteurs, tandis qu'elle tombe à 0,6 avec 2-3 prédicteurs et à 0,2 avec 1 prédicteur (Fig. 2). Ce protocole fait que deux modèles successifs sont indépendants l'un de l'autre. Ils peuvent être construits avec des prédicteurs de nature différente et dont le nombre varie de 1 à 5. Une des conséquences est que deux cartes successives peuvent présenter des structures spatiales très variables et sont ainsi susceptibles de perturber l'utilisateur. Dans une perspective de vulgarisation, le second protocole impose 5 prédicteurs fixes dans le temps ce afin de produire des informations théoriquement plus stables et homogènes. Le produit ainsi livré devrait être plus facile à appréhender pour un utilisateur lambda. La contrepartie est double, d'une part les performances sont dégradées (Fig. 2), d'autre part les déterminants ne peuvent être analysés avec autant de finesse.



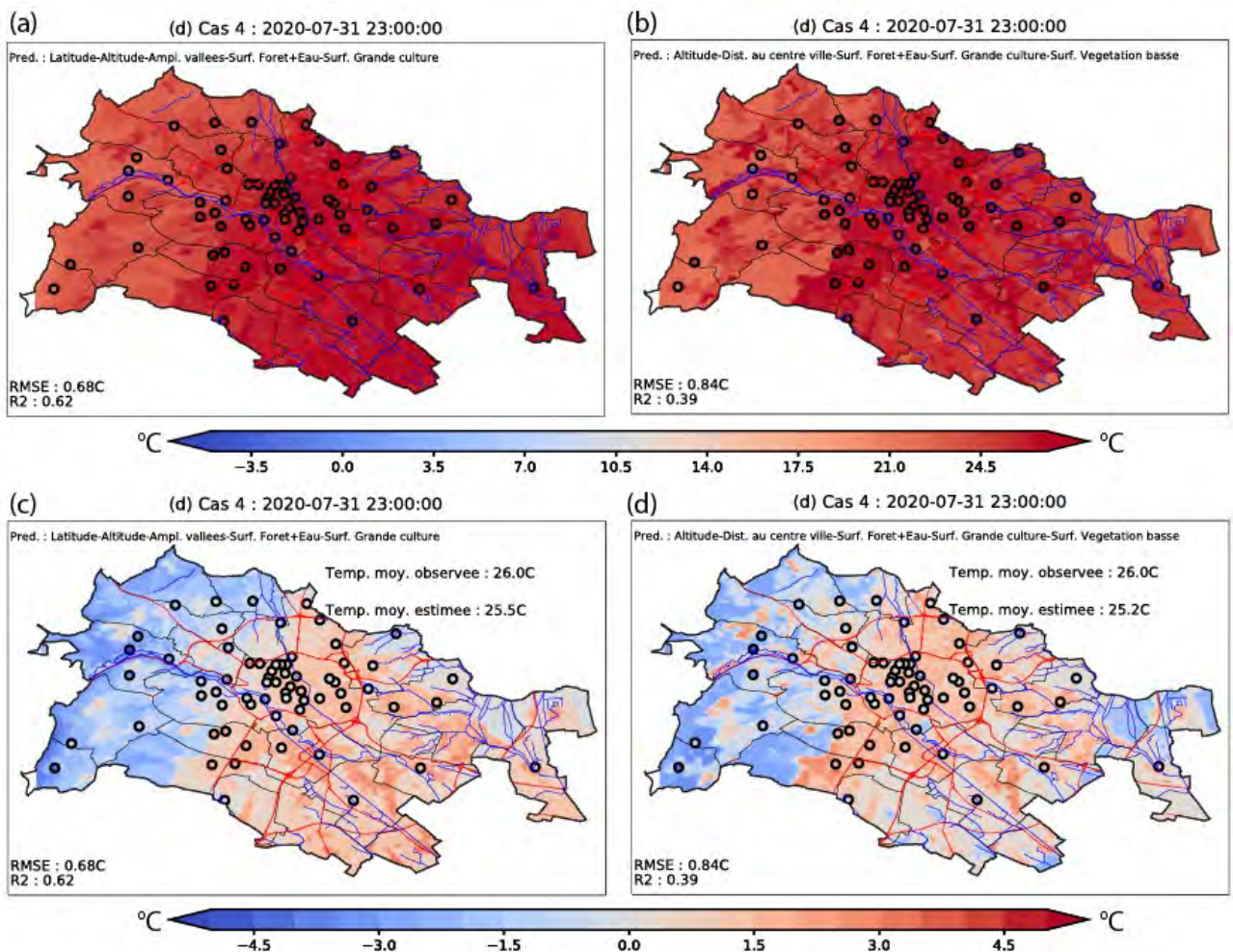
**figure 2.** Fonction de densité de probabilité de (a) l'intensité et (b) des erreurs spatiales des modèles alimentés par 1 à 5 prédicteurs en mode recherche et 5 prédicteurs en mode opérationnel (2014-2020). La root-mean-square error (RMSE) est une mesure de l'intensité des erreurs calculée en Leave One Out Cross Validation (LOOCV). Le coefficient de détermination ajusté ( $R^2$ -Adj) est une mesure de la performance spatiale.

## 2.2. Interpolations en mode recherche / opérationnel : illustration

Les deux méthodes ont été appliquées du 6 juin 2014 au 31 décembre 2020. L'illustration porte sur un champ extrait de la canicule de l'été 2020, le 31 juillet à 23h (Fig. 3). En solution recherche, les prédicteurs sélectionnés sont, par ordre décroissant de variance expliquée dans le modèle : latitude, altitude, ampleur des vallées, fraction de l'espace en forêt et en eau et fraction de l'espace en grandes cultures (Fig. 3a et c). En solution opérationnelle, la distance au centre-ville et la fraction de l'espace en végétation basse remplacent la latitude et l'ampleur des vallées (Fig. 3. b et d). Entre la solution recherche (gauche) et la solution opérationnelle (droite), les structures spatiales sont comparables au 1er ordre avec des températures dépassant les 20°C (Fig. 3 b et d), à l'exception des plateaux à l'ouest (Fig. 1). Dans le détail, les différences induites par la solution ne sont toutefois pas négligeables. Le gradient thermique nord-sud de la solution recherche est remplacé par un gradient périphérie-centre dans la solution opérationnelle. Cela a peu d'impact sur la température en cœur d'agglomération, mais induit un écart pouvant atteindre 1°C en périphérie du domaine, zone non primordiale dans le cadre du projet RESPONSE.



Les performances sont sensiblement dégradées en solution opérationnelle. La RMSE passe de 0.68°C à 0.84°C et le  $R^2$  chute de 0,62 à 0,39. Outre la dégradation de la performance, très variable d'une heure à l'autre (non montré), la solution *a priori* envisagée en mode opérationnel limite la compréhension de l'opérateur et de l'utilisateur quant au rôle des déterminants sur les températures le long des cycles annuel et diurne. Seule la solution recherche permet en effet d'analyser ce rôle en termes de fréquence d'apparition des déterminants (Fig. 4). L'altitude est le prédicteur qui est le plus souvent sélectionné, quasi indépendamment de la saison ou de l'heure. En revanche son signe (non montré) change fréquemment. Toutes heures confondues, les inversions de températures représentent 24% des cas, la nuit elles sont plus fréquentes, en particulier en été (non montré). Viennent ensuite la latitude, l'ampleur des vallées et la distance au centre-ville, tous les trois préférentiellement sélectionnés la nuit. L'ampleur des bosses et le bâti interviennent plutôt en journée. Enfin, la contribution de la végétation est le plus fréquemment nocturne et varie selon la saison : végétation basse en saison froide (automne et hiver), grandes cultures au printemps et en début d'été, forêt et eau en été. Ce dernier point est cohérent avec le fait que les grandes cultures (blé, orge, colza) sont moissonnées entre la fin juin et le début juillet. Lors des canicules, qui le plus fréquemment interviennent en juillet et août, ce sont les forêts et les surfaces en eau qui peuvent contribuer à rafraîchir les nuits. Selon les deux solutions, l'effet rafraîchissant du parc de la Colombière (33ha) et du



lac Kir (37 ha ; Fig. 1) est visible.

**figure 3.** Thermographie du 31 juillet 2020 à 23h obtenue par régression linéaire multiple. (a) et (c) Solution recherche. (b) et (d) Solution opérationnelle. (a) et (b) Température brute. (c) et (d) Écart à la moyenne spatiale de la température calculée sur Dijon Métropole.

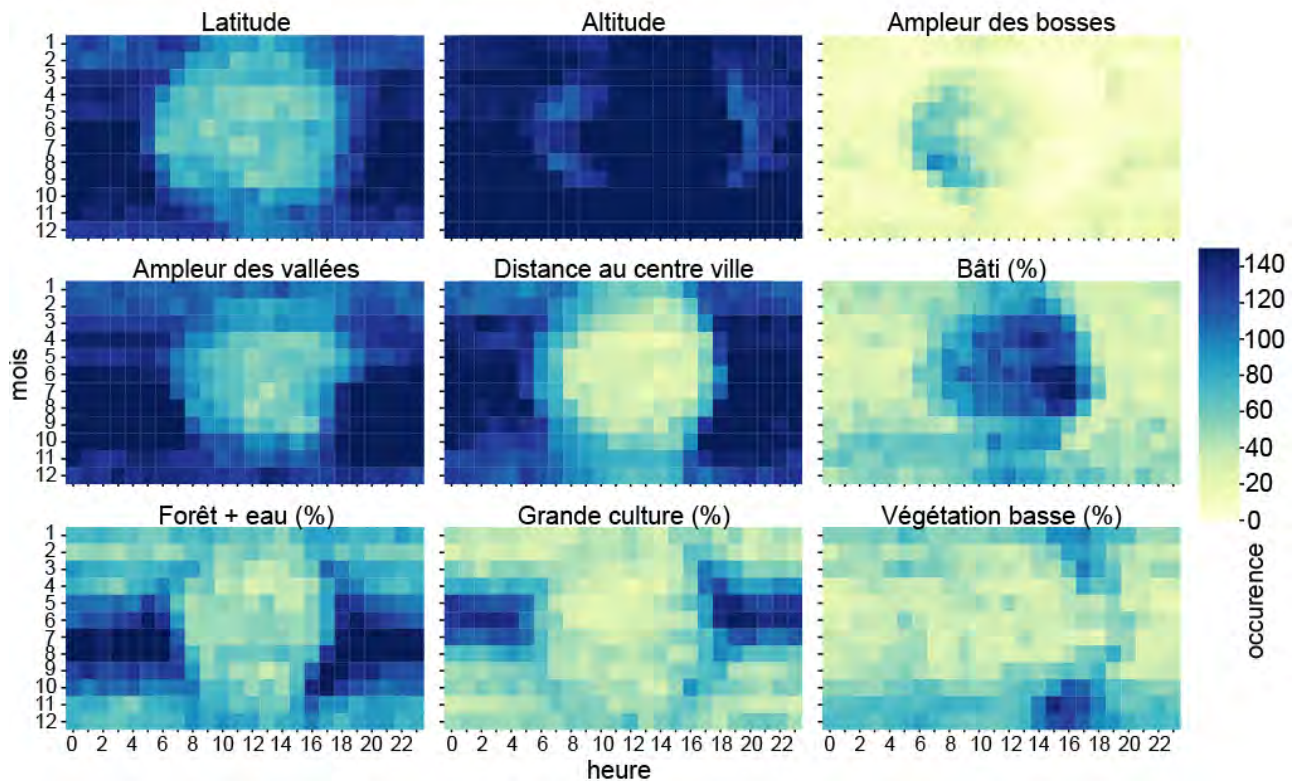


figure 4. Solution recherche : occurrence d'entrée des prédicteurs selon le mois et l'heure (2014-2020).

## Conclusion

Produire des cartes de température de l'air à résolution hectométrique reste un défi, surtout en milieu urbain en contexte topographique contrasté. Fort d'un réseau de stations (MUSTARDijon) particulièrement dense, 67 stations sur un territoire de 240 km<sup>2</sup>, cet exercice est développé sur le territoire de Dijon Métropole. Partenaires universitaires et acteurs de la collectivité développent des méthodes combinant exigence et performance, critères requis dans le domaine de la recherche, mais aussi accessibilité, critère requis pour une utilisation par tous, acteurs et citoyens. En mobilisant plusieurs bases de données et des outils statistiques, 57571 modèles horaires ont été construits sur la période 2014-2020. L'analyse de cet ensemble va permettre d'effectuer des choix en termes de méthode à mobiliser dans une perspective d'opérationnalité, à savoir construire en temps réel un modèle chaque heure. L'exemple mobilisé dans cet article, une soirée caniculaire de l'été 2020, est emblématique des enjeux en termes sanitaires, stress thermique lorsque canicule et ICU se combinent, ainsi qu'en termes de performance des modèles. L'idée initiale de privilégier la performance et la souplesse du modèle en mode recherche, mais plutôt la simplicité et la stabilité en mode opérationnel, est éprouvée sur cet exemple. Si les solutions produisent des thermographies proches l'une de l'autre, la dégradation observée en mode opérationnel n'en est pas pour autant négligeable.

**Remerciements :** Les auteurs remercient Météo-France pour la mise à disposition des données de la station de Dijon Longvic (convention avec l'université de Bourgogne), l'ADEME, la Région Bourgogne-Franche-Comté et Dijon Métropole pour leur soutien.



## Bibliographie

- Buttstädt M., Sachsen T., Ketzler G., Merbitz H., Schneider C., 2011: A new approach for highly resolved air temperature measurements in urban areas. *Atmospheric Measurement Techniques Discussions*, **4**, 1001-1019.
- Craney T.A., Surles J.G., 2002: Model-Dependent Variance Inflation Factor Cutoff Values. *Quality Engineering*, **14**, 391-403.
- De Lapparent B., Roux J., Richard Y., Pohl B., Bientz S., Codet-Hache O., Dumaitre F., Toussaint H., Tissot A.-C., Thévenin D., et al., 2015 : Mesures de la température et spatialisation de l'îlot de Chaleur Urbain à Dijon. *Actes de l'Association Internationale de Climatologie*, **28**, 257-262.
- Edmondson J.L., Stott I., Davies Z.G., Gaston K.J., Leake J.R., 2016: Soil surface temperatures reveal moderation of the urban heat island effect by trees and shrubs. *Scientific Reports*, **6**, 33708.
- Emery J., Pohl B., Créat J., Richard Y., Pergaud J., Rega M., Zito S., Dudek J., Vairet T., Joly D., Thévenin T., 2021: How local climate zones influence urban air temperature: Measurements by bicycle in Dijon, France. *Urban Climate*, **40**, 101017.
- Joly D., Bois B., Zaksek K., 2012: Rank-Ordering of Topographic Variables Correlated with Temperature. *Atmospheric and Climate Sciences*, **02**, 139-147.
- Oke T.R., 1984: Towards a prescription for the greater use of climatic principles in settlement planning. *Energy and Buildings*, **7**, 1-10.
- Richard Y., Emery J., Dudek J., Pergaud J., Chateau-Smith C., Zito S., Rega M., Vairet T., Castel T., Thévenin T., Pohl B., 2018: How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. *Urban Climate*, **26**, 258-274.
- Richard Y., Pohl B., Rega M., Pergaud J., Thevenin T., Emery J., Dudek J., Vairet T., Zito S., Chateau-Smith C., 2021: Is Urban Heat Island intensity higher during hot spells and heat waves (Dijon, France, 2014–2019)? *Urban Climate*, **35**, 100747.

## L'ADAPTATION CLIMATIQUE EN URBANISME, UNE OPPORTUNITÉ POUR LA JUSTICE ENVIRONNEMENTALE ET SOCIALE ?

**Geneviève BRETAGNE**

*Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités Sociétés Territoires, UMR 5193, Université Toulouse Jean Jaurès, Toulouse, France ; genevieve.bretagne@univ-tlse2.fr*

**Résumé :** A partir d'une approche transversale de documents de planification en urbanisme et en environnement sur treize métropoles françaises, l'étude vise à repérer comment la question des inégalités potentiellement liées à l'enjeu climatique s'invite dans les pratiques de planification à l'oeuvre. Sont ciblés les discours politiques, figurant dans les délibérations d'approbation du Plan Local d'urbanisme intercommunal (PLUi) et du Plan Climat Air Energie Territorial (PCAET), ainsi que les discours stratégiques, à travers le Projet d'Aménagement et de Développement Durable (PADD) du PLUi et le volet Stratégie du PCAET. Le prisme d'analyse retenu consiste en la recherche de mots-cibles témoins de l'appropriation des enjeux environnementaux et sociaux, par lexicométrie.

**Mots-clés :** urbanisme, adaptation climatique, vulnérabilité, inégalités environnementales

**Title:** Climate adaptation in urban planning, an opportunity for environmental and social justice?

**Abstract:** The study is based on a transversal approach of urban planning and environmental planning documents in thirteen French cities. It aims to identify how question of inequalities which are potentially due to climate change is taken into account in current planning practices. The study targets political speeches, in approval deliberations of the Local Intermunicipal Urban Plan (PLUi) and the Territorial Climate Air Energy Plan (PCAET), as well as strategic speeches, in the Planning and Sustainable Development Project (PADD) of the PLUi and in the Strategy of the PCAET. The analysis aims to search for target words as witnesses of awareness of environmental and social issues, by lexicometry method.

**Keywords:** urban plan, climate adaptation, vulnerability, environmental inequalities

### Introduction

Malgré une prise de conscience aujourd'hui partagée, l'adaptation climatique reste un problème complexe et transversal, selon les échelles spatiales et temporelles retenues, les caractéristiques du contexte environnemental et socioculturel, les secteurs considérés (Richard 2014; Simonet et Leseur 2016; Bertrand, Rocher et Melé 2007; Adger et al. 2007). Pourtant, la prise en compte de la dynamique climatique à l'oeuvre et sa mise à l'agenda à l'échelle locale constituent une opportunité pour les territoires de renouveler les processus classiques de planification et d'aménagement (Haouès-Jouve et Hidalgo 2016). L'innovation réside dans la manière de la raisonner en cohérence avec les enjeux de durabilité, intégrant notamment la question des inégalités environnementales et sociales (Peyrache-Gadeau et Pecqueur, 2011). Les conséquences du changement climatique peuvent être inégalement ressenties par les populations, selon leur fragilité sanitaire, financière, d'habitat, de lieux de vie. Il y a là potentiellement un facteur d'inégalité environnementale et sociale (Bertrand, Rocher et Melé 2007).

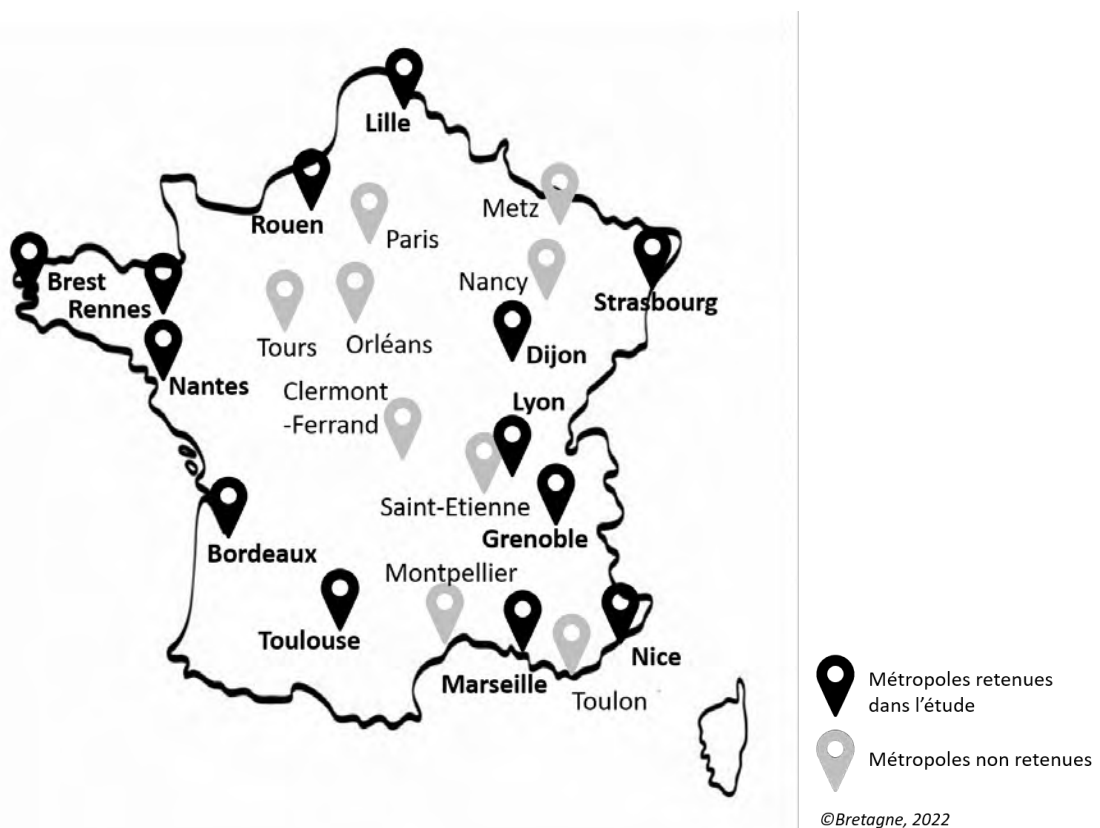
Plusieurs auteurs identifient les outils de planification en urbanisme comme de puissants outils de transformation et de maîtrise du développement des territoires, appropriés pour favoriser la mise en oeuvre d'actions d'adaptation, du fait de pratiques intégratrices (Simonet et Leseur 2016; Bertrand et Richard 2015). Pour autant, dans quelle mesure ces outils sont-ils saisis par les acteurs locaux pour intégrer l'enjeu d'adaptation climatique dans leur réflexion territoriale et y associer la question des inégalités environnementales, comprises au sens des relations réciproques entre question sociale et enjeux écologiques (Laurent *in* Larrère, 2017) ? L'étude cible l'analyse de discours associés à des

documents de planification en urbanisme et en environnement, afin d'appréhender l'appropriation de ces enjeux.

#### 4. Données et méthodes

##### a. Treize métropoles observées au niveau national, selon deux types de discours

L'analyse cible treize métropoles françaises, au sens institutionnel du terme<sup>16</sup> (Fig.1). Ce choix est guidé par deux critères principaux : d'une part, la concentration de population et d'emplois, le potentiel d'interactions et de mutualisation qui caractérisent ces espaces urbains, et, d'autre part, les compétences opérationnelles (par la règle ou le programme d'actions) dont les métropoles sont dotées. Etablissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI) à fiscalité propre, ces métropoles exercent en effet de plein droit des compétences, en matière d'aménagement de l'espace métropolitain, via le « Plan Local d'Urbanisme » (PLU) en lieu et place des communes membres (article L5217-2 du Code Général des Collectivités Territoriales), et de protection et mise en valeur de l'environnement et politique du cadre de vie, via notamment le « Plan Climat Air Energie Territorial » (PCAET). Du fait du calendrier de création de ces EPCI, les démarches de planification menées et approuvées sur ces territoires présentent un caractère récent, prenant en compte les derniers ajustements du cadre législatif et réglementaire en vigueur, et très souvent concomitant. Sur les 22 métropoles françaises actuelles, les 13 métropoles retenues dans l'étude correspondent aux territoires où les deux documents de PLUi et de PCAET sont approuvés au moment de l'analyse.



**figure 1.** Cartographie des 13 métropoles retenues dans l'étude, sur les 22 métropoles françaises

Deux entrées d'analyse sont ciblées pour opérer un décryptage des projets politiques en urbanisme et en environnement définis à l'échelle des treize métropoles : les discours « politiques », figurant dans les délibérations d'approbation des PLUi et des PCAET, et les discours « stratégiques », à travers l'énoncé du projet d'aménagement et de développement durable (PADD) du PLUi et du volet Stratégie du PCAET. Quatre corpus de textes ont donc été constitués.

<sup>16</sup> Créées par la loi de réforme des collectivités territoriales du 16 décembre 2010, elles sont au nombre de 22 à la date du 1<sup>er</sup> janvier 2018.

### b. L'analyse de mots-cibles par une approche statistique des textes

Le prisme d'analyse retenu consiste en la recherche de vocabulaires, appelés « mots-cibles », considérés comme témoins de la prise de conscience des problématiques d'adaptation au changement climatique et des dimensions environnementales et sociales qui peuvent lui être associées (Tab.1). Plus ces mots-cibles sont nombreux et associés entre eux, plus les enjeux climatiques, environnementaux et sociaux sont considérés par hypothèse comme majeurs et structurants pour les territoires concernés et pour les politiques publiques qu'ils définissent.

**Tableau 1.** Mots-cibles retenus dans l'analyse quantitative des corpus de discours sur les treize métropoles

<b>34 mots-cibles recherchés dans les PLUi et les PCAET</b>			
Adaptation	Environnemental.e	Risque	Solidarité
Adapter	Equité	Santé	Solidaire
Aléa	Equitable	Sanitaire	Transition
Climat	Inégalité	Sensibilité	Urbanisation
Climatique	Inégal.e	Sensible	Urbain.e
Bioclimatique	Précarité	Social.e	Urbanisme
Egalité	Précaire	Société	Vulnérabilité
Egal.e	Résilience	Sociétal.e	Vulnérable
Environnement	Résilient.e		

Le corpus de documents étant volumineux, une approche statistique des textes a été déployée (Lebart et Salem 1994). Procédant de manière automatisée grâce à l'utilisation d'un outil logiciel, la lexicométrie vise à repérer de manière systématique des « mots-cibles » et leurs associations. Cette démarche possède un caractère contrastif (Comby 2016), en ce qu'elle permet de comparer les caractéristiques de plusieurs textes et d'en identifier les similitudes, les variations ou les singularités. Ces atouts abondent pour une mise en perspective méthodologique pertinente pour l'analyse de documents de planification urbaine (Buhler et al. 2018). Notre choix s'est porté sur le logiciel IRaMuTeQ, accessible en open access et développé à l'Université Toulouse Jean Jaurès.

## 5. Résultats

### a. Principaux résultats de statistique textuelle

Afin de caractériser l'utilisation des mots-cibles dans les quatre discours, les 34 mots choisis ont été recherchés dans les quatre corpus de textes et leur fréquence d'apparition a été notée (Tab.2).

**Tableau 2.** Principaux résultats de statistique textuelle sur les quatre corpus de discours

	Plan Local d'Urbanisme intercommunal		Plan Climat Air Energie Territorial	
	Discours politique	Discours stratégique	Discours politique	Discours stratégique
<b>Mots-cibles identifiés</b>	28	34	29	33
<b>Mots-cibles non repérés</b>	6 : inégalité, inégal.e, précarité, précaire, sociétal.e, vulnérable	0	5 : vulnérable, égal.e, inégal.e, précaire, sensibilité,	1 : inégal.e
<b>Mots-cibles repérés une seule fois (hapax) ou à faible fréquence (<math>\leq 3</math>)</b>	4 hapax : bioclimatique, égal.e, résilient.e, vulnérabilité	3 mots-cibles à faible fréquence : égalité, égal.e, inégal.e	4 hapax : bioclimatique, équité, équitable, urbanisation	1 mot-cible à faible fréquence : précaire
<b>Mots-cibles parmi les 600 mots les plus fréquents du corpus</b>	11	15	18	17

Les mots-cibles recherchés ont principalement été repérés dans les discours stratégiques. Les discours politiques sont marqués par l'absence ou la faible représentation de mots-cibles, pourtant particulièrement recherchés, se référant tous à une même dimension sociale. Trois de ces mots-cibles sont absents dans les PLUI et dans les PCAET : inégal.e, précaire et vulnérable. Seul « bioclimatique » se distingue, se référant à une dimension environnementale. La question des inégalités sociales apparaît ainsi comme un « angle mort » des politiques locales en urbanisme et en environnement.

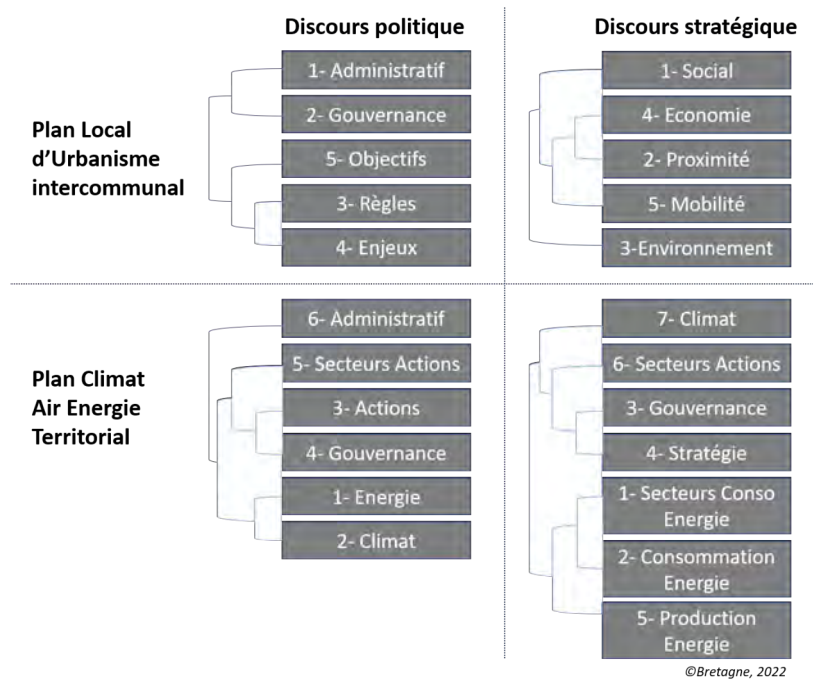
Neuf mots-cibles identiques ont été repérés parmi les 600 mots les plus fréquents des quatre corpus : adaptation, adapter, climat, environnement, environnemental.e, risque, transition, urbain.e et urbanisme. Ils témoignent de l'intégration similaire et affirmée d'une prise de conscience de l'enjeu climatique, percolant depuis les PCAET vers les PLUi, du risque induit qu'il est nécessaire de prendre en compte et du changement de posture, par adaptation ou transition, que cette prise en compte suppose, notamment en urbanisme.

#### b. Positionnement des mots-cibles dans les mondes lexicaux des quatre corpus de discours

La lexicométrie met en œuvre des techniques de classification automatique, qui repèrent les proximités entre les mots actifs<sup>17</sup> utilisés et les regroupent en classes (mondes lexicaux) (Reinert 1997). L'analyse de chaque classe permet au chercheur-interprétant de l'intituler au regard de son expertise. Une hiérarchie des classes, potentiellement emboîtées les unes dans les autres (Lebart et Salem 1994), est représentée par un arbre de classification. L'analyse statistique textuelle des quatre corpus de discours a donné à l'établissement de quatre arbres de classification, qui montrent des logiques distinctes d'association des mots actifs à travers les classes obtenues (Fig.2). Les logiques de classification des discours des PLUi sont très différentes. Les classes obtenues dans l'analyse des discours politiques sont représentatives des volets constitutifs des PLUi sur lesquels les délibérations portent : gouvernance, enjeux, objectifs et règles. La classification des discours stratégiques donne lieu à une logique très différente : le corpus s'organise en cinq classes thématiques illustrant les principaux motifs et contenus des documents de planification en urbanisme ; les classes « environnement » et « social » sont éloignées et très distinctes des trois autres classes. L'analyse des discours liés aux PCAET montre des logiques plus similaires. Les classes « énergie » et « climat » sont rapidement distinguées des autres classes. Proches dans les discours politiques, perçues comme allant de pair, ces deux classes sont très éloignées dans les discours stratégiques, témoignant de prise en considération très distincte par les stratégies et les plans d'actions locaux.

17 Les mots (ou formes) actifs regroupent les noms communs, adjectifs qualificatifs, adverbes, verbes qui donnent du sens au texte analysé.





**figure 2.** Arbres de classification et classes des quatre corpus de discours

Afin d'illustrer le positionnement des mots-cibles recherchés au sein des arbres de classification de chacun des quatre corpus, nous proposons de retenir les mots-cibles suivants : climat / climatique, adaptation, vulnérabilité, égalité / inégalité, équité, considérés comme représentatifs des enjeux environnementaux et sociaux dont nous recherchons la prise en considération dans les discours politiques et stratégiques des PLUi et des PCAET. Les mots-cibles repérés dans les discours politiques des PLUi font écho principalement aux « objectifs » que doivent porter les documents d'urbanisme ; seul le mot-cible « adaptation » s'inscrit comme un « enjeu ». A l'échelle des discours stratégiques des PLUi, la majorité des mots-cibles repérés sont associés à la classe « social » ; le mot-cible « climatique » est logiquement attaché à la classe « environnement ». Dans le cadre des discours politiques des PCAET, les mots-cibles repérés sont principalement associés à la classe « climat » ; le mot-cible « vulnérabilité » se distingue en étant attaché à la classe « énergie ». Dans les discours stratégiques, les mots-cibles retenus sont principalement associés à la classe « climat » et/ou aux classes relatives aux stratégies et actions du PCAET.

## Conclusion

Les discours politiques et stratégiques des documents de planification en urbanisme et en environnement des treize métropoles étudiées montrent tous une inscription de la question « climat ». La concomitance des procédures d'élaboration sur chacun des territoires, dans un contexte législatif et réglementaire récent, semble avoir favorisé la percolation de cette question et de l'enjeu d'agir, par adaptation ou transition. Pour autant, cette question « climat » semble conserver une dimension principalement environnementale, peu associée à des considérations sociales. L'approche croisée, suivant ces deux dimensions, des enjeux de vulnérabilité ou de résilience vis-à-vis de l'aléa « climat » n'émerge pas. La question des inégalités potentiellement induites est quasiment absente des discours. Tout n'apparaît pas dans un document de planification, notamment les éventuels désaccords entre acteurs (Reigner et Hernandez 2007) ; ce document n'est alors pas considéré comme une synthèse de l'ensemble des discours des acteurs en présence, mais on peut émettre l'hypothèse qu'il est représentatif du consensus accepté et/ou souhaité par ces derniers (Buhler et al. 2018). L'enquête auprès d'acteurs urbains, envisagée en poursuite de cette étude, vise à mieux cerner les enjeux et les freins des acteurs à doter l'enjeu climatique d'une dimension sociale.

## Bibliographie

- ADGER W Neil et al, 2007, « Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change », *IPCC*, 2007, p. 717-743.
- BERTRAND François et RICHARD Elsa, 2015, « La délicate existence locale de l'adaptation aux changements climatiques : avec, sans, ou à côté de l'atténuation », *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie*, 18 décembre 2015, **Vol. 6**, n°3.
- BERTRAND François, ROCHER Laurence et MELÉ Patrice, 2007, « Le changement climatique, révélateur des vulnérabilités territoriales ? : Action publique locale et perceptions des inégalités écologiques. », [*Rapport de recherche*] UMR CITERES; Université François Rabelais - Tours; programme " Politiques territoriales et développement durable " (D2RT), 2007, p. 125.
- BUHLER Thomas, BENDINELLI Marion, LETHIER Virginie et HE Yuting, 2018, « La textométrie pour révéler évolutions et oppositions dans les discours des politiques urbaines. Le cas des PDU français (2000-2015) », *Flux*, 5 octobre 2018, N° 113, n° 3, p. 93-110.
- COMBY Emeline, 2016, « L'analyse de données textuelles et l'acceptation sociale », 2016, p. 131.
- HAOUËS-JOUVE Sinda et HIDALGO Julia, 2016, *Villes et climat : au carrefour de la recherche, de l'action et de la participation Cahier des Ateliers de dialogue Recherche-Action-Expertise*, s.l.
- LARRÈRE Catherine, 2017, *Les inégalités environnementales*, 1re édition., Paris, La vie des idées.fr: PUF (coll. « La vie des idées »), 97 p.
- LEBART Ludovic et SALEM André, 1994, « Statistique textuelle », [http://lst-iiep.iiep-unesco.org/cgi-bin/wwwi32.exe/\[in=epidoc1.in\]/?t2000=018897/\(100\)](http://lst-iiep.iiep-unesco.org/cgi-bin/wwwi32.exe/[in=epidoc1.in]/?t2000=018897/(100)), 1 janvier 1994, 1.
- PEYRACHE-GADEAU Véronique et PECQUEUR Bernard, 2011, « Villes durables et changement climatique : quelques enjeux sur le renouvellement des « ressources urbaines » », *Environnement Urbain / Urban Environment*, 9 septembre 2011, **Volume 5**.
- REIGNER Hélène et HERNANDEZ Frédérique, 2007, « Les projets des agglomérations en matière de transport : représentations, projets, conflits et stratégie de « détournement » des réseaux », *Flux*, 2007, n° 69, n° 3, p. 21-34.
- REINERT Max, 1997, *Les « mondes lexicaux » et leur « logique » à travers l'analyse statistique de divers corpus*, <http://lexicométrica.univ-paris3.fr/article/numero0/MRmondlex.html>, 1997, consulté le 24 janvier 2021.
- RICHARD Elsa, 2014, « L'épreuve de l'adaptation », *Urbanisme*, 2014, n° 395, p. 46-47.
- SIMONET Guillaume et LESEUR Alexia, 2016, « Rapport Final - Projet de recherche ABSTRACT-courba 2014-2015 », 2016.

## RÉSEAU DE MESURES ET ANALYSES SPATIO-TEMPORELLES DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN GRENOBLOIS : L'ÉTÉ 2020

**Xavier FOISSARD<sup>1</sup>, Sandra ROME<sup>1</sup>, Sylvain BIGOT<sup>1</sup>, Anne-Cécile FOUVET<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Université Grenoble Alpes, IGE UMR 5001 CNRS, CS 40700 38058 Grenoble Cedex 9, France

[xavier.foissard@univ-grenoble-alpes.fr ; sandra.rome@univ-grenoble-alpes.fr ;

sylvain.bigot@univ-grenoble-alpes.fr]

<sup>2</sup> Ville de Grenoble, 11 Bd Jean Pain 38000 Grenoble, France [anne-cecile.fouvet@grenoble.fr]

**Résumé :** Une première étude menée à Grenoble a permis de mettre en évidence l'intensité, l'étendu et la fréquence de l'îlot de chaleur urbain (ICU) notamment lors d'épisodes de chaleur intense. Un réseau d'observation composé de 2 stations météorologiques et de 30 capteurs de température est mis en place à partir de l'été 2020. L'ICU grenoblois est défini par l'analyse des facteurs météorologiques conditionnant sa présence dans un contexte topographique spécifique. A partir de ces premiers résultats, une cartographie de l'ICU est réalisée mettant notamment en évidence le caractère advectif de l'ICU à Grenoble associée à des brises thermiques.

**Mots-Clés :** îlot de chaleur urbain, brises de montagne, réseau de mesures, Grenoble.

**Abstract :** The measurement network and the analysis of urban heat island in Grenoble, summer 2020. A first study showed intensity, spread and frequency of the urban heat island (ICU) especially during intense heat wave. A network composed by 2 weather stations and 30 thermal sensors were installed through the 2020 summer. The analysis of weather factors leads to define the ICU occurrence in a specific topographic context. According to these first results, we map the ICU and its advective aspect linked to thermal breezes. Titre + texte 8 lignes maximum ; Calibri 11 ; espace 18 points avant, 6 points après.

**Keywords :** urban heat island, mountain breezes, measurement network, Grenoble

### Introduction

À ce jour, l'année 2020 est l'année la plus chaude enregistrée en France depuis le XX<sup>ème</sup> siècle avec 14,1°C de température moyenne annuelle (+1,5°C au-dessus de la normale 1981-2010). Plus localement, à l'aéroport Grenoble-Saint-Geoirs en Isère, cette même année est la seconde la plus chaude depuis l'installation de la station météorologique en 1973. Ces records illustrent l'augmentation moyenne des températures constatée dans le contexte du changement climatique de l'échelle globale aux échelles fines. Cette augmentation se traduit notamment par l'accroissement du nombre de vagues de chaleur et leur intensification dont les impacts en ville sont renforcés car associés au phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) (Rousseau, 2005).

Face à ces enjeux, les collectivités territoriales souhaitent développer la connaissance climatique de leur territoire afin de mettre en œuvre des stratégies d'adaptation. L'étude est menée à Grenoble et a pour but d'identifier et d'analyser le phénomène de l'ICU. Un réseau de mesures de haute densité spatiale est déployé. Les types de temps associés à l'ICU sont analysés ; l'objectif vise d'une part, à établir les conditions favorables à la mise en place de l'ICU et, d'autre part, à pointer les spécificités liées au contexte topographique de la ville (Hidalgo *et al.*, 2018 ; Dubreuil *et al.*, 2020). L'objectif est d'évaluer la variabilité spatiale des gradients thermiques associés à l'ICU grenoblois et de les spatialiser.

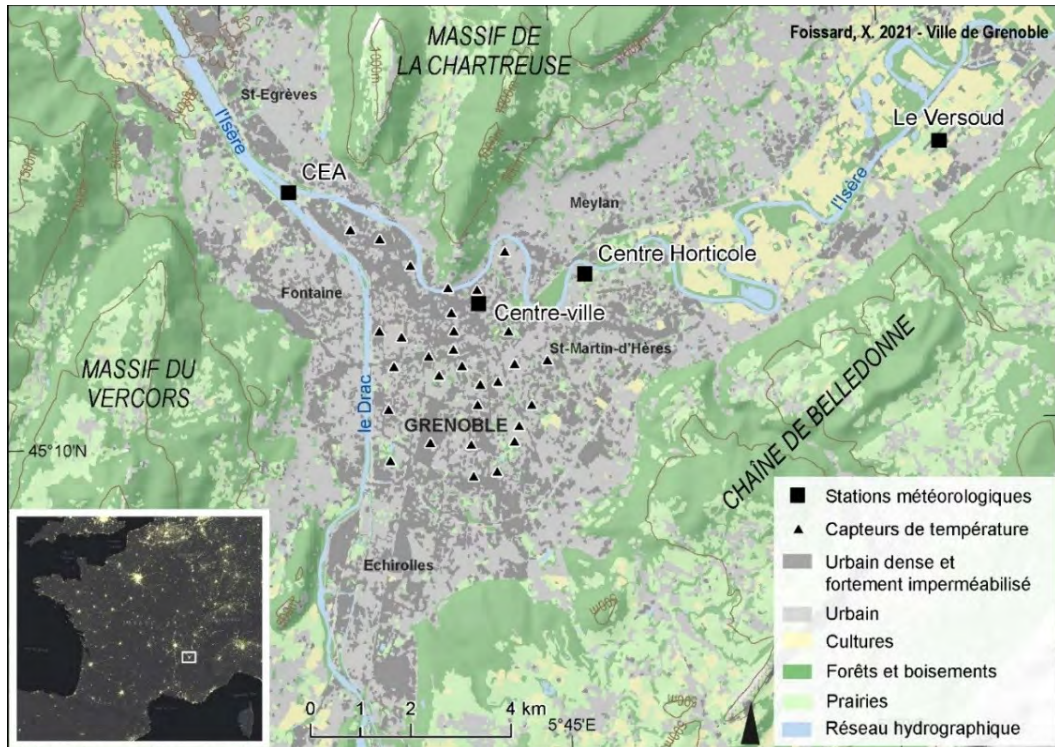
## 1. Observation de l'îlot de chaleur urbain grenoblois

### 1.1. Mise en place d'un réseau de mesures adaptés

L'ICU est un phénomène topoclimatique local dont l'échelle d'influence varie d'une centaine de mètres à 1 km environ (Oke *et al.*, 2017). Le réseau d'observation synoptique de Météo-France n'est pas adapté à l'observation de ce phénomène dans le contexte grenoblois. Ce réseau de mesures préexistant est composé d'une station périurbaine au nord-est de Grenoble à 12 km et d'une station urbaine située au nord-ouest de la commune de Grenoble à la confluence du Drac et l'Isère (Rome *et al.*, 2020). Elles sont respectivement nommées en figure 1 : *Le Versoud* et *CEA*. La Ville de Grenoble prend place à la jonction de trois vallées, formant un « Y » entre les massifs de la Chartreuse au nord, du Vercors à l'ouest et de Belledonne au sud-est. Ces reliefs imposants culminent à plus de 1000 m d'altitude, offrant un contexte topographique complexe aux communes présentes dans la vallée. Ainsi les stations météorologiques *Le Versoud* et *CEA* sont localisées dans deux portions distinctes de la vallée du Grésivaudan.

Au sein de ces éléments topographiques, l'observation de l'ICU requiert un réseau de mesure complémentaire et adapté afin d'observer les gradients de température à l'échelle des quartiers. Deux stations météorologiques de modèle *Vantage Pro 2* (Davis Instruments®) ont été implantées, l'une dans le centre de Grenoble (*Centre-Ville*) et la seconde au *Centre Horticole* à l'est de Grenoble. Elles ont pour but de qualifier l'état de l'atmosphère par l'enregistrement au pas de temps horaire de la température, de l'humidité relative, des précipitations, du vent (intensité et direction) et de la pression. Le choix du lieu d'implantation a été défini afin de mesurer l'amplitude maximum de l'ICU entre le centre et la périphérie ainsi que la présence éventuelle de brises orientées selon le sens des vallées.

Associé à ces deux stations météorologiques, un réseau de 30 capteurs de température a été implanté sur l'ensemble de la commune de Grenoble afin de mesurer les gradients de température relatifs à l'ICU. A partir de l'occupation du sol (bâtiments, surfaces imperméabilisées et végétation) et des principaux indicateurs de formes urbaines influant sur l'ICU ont été calculés, la cartographie des « Local Climate Zones » a permis de définir et de qualifier les différents quartiers (Stewart, 2012). La décision du lieu d'implantation des capteurs a été élaborée selon les différents types de LCZ en présence dans la ville et selon le gradient potentiel de l'ICU. Le modèle des capteurs retenu est *Tinytag Talk2* (Gemini®), monté avec un abri RS3 (Onset®) ; il présente l'avantage d'être économique, compact et d'être facile à installer sur le mobilier urbain ; chaque capteur est installé à environ 3 m du sol afin de prévenir d'éventuels risques de dégradations.

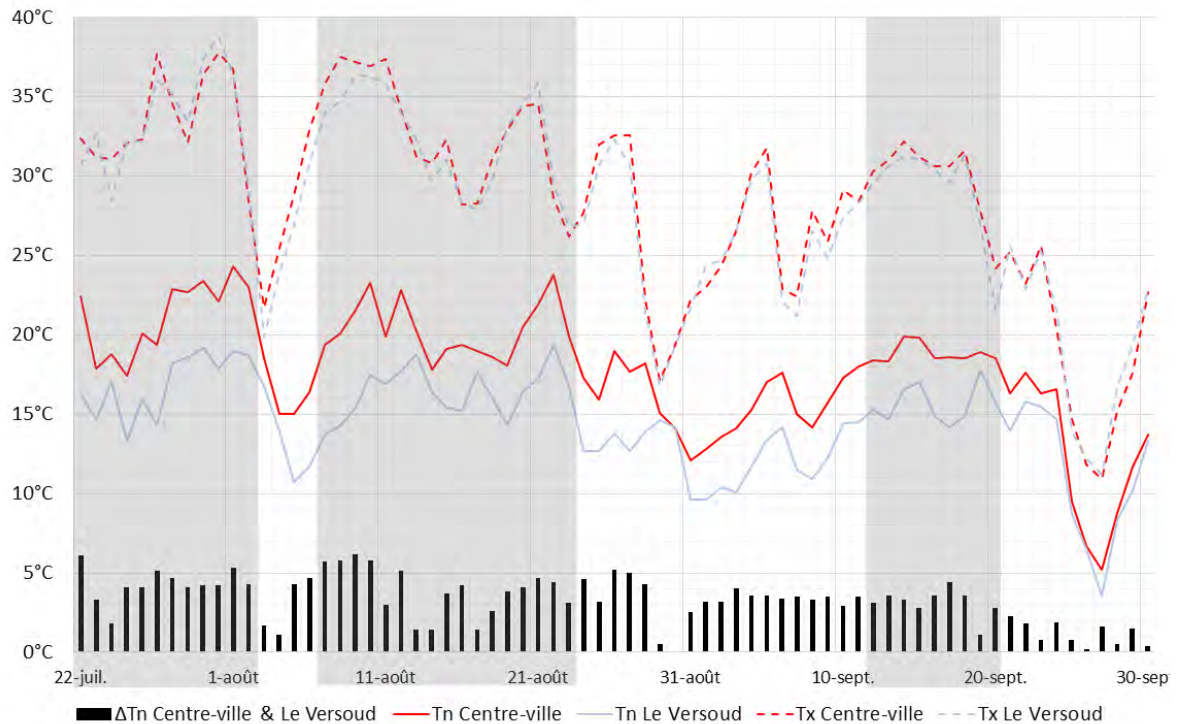


**figure 1.** Le réseau d'observation de l'ICU à Grenoble. Les stations *Le Versoud* et *CEA* sont gérées par Météo-France.

## 1.2. Caractéristiques de l'été 2020 à Grenoble

L'ensemble des points d'observation du réseau est opérationnel à dater du 22 juillet 2020 ; la période d'analyse de l'ICU s'étend jusqu'au 30 septembre 2020 afin de couvrir l'ensemble des vagues de chaleur estivales. Durant ces premiers mois d'enregistrements, plusieurs vagues de chaleur successives sont relevées (figure 2). Celles-ci peuvent être dénombrées en trois périodes pour lesquelles la température maximale ( $T_x$ ) relevée est supérieure à  $30^{\circ}\text{C}$  et la température minimale ( $T_n$ ) relevée en ville est supérieure à  $19^{\circ}\text{C}$  (voir les trois bandes grisées en figure 2). L'intensité de l'ICU s'exprime par la différence des  $T_n$  relevées entre les stations météorologiques *Centre-ville* et *Le Versoud* (notée  $\Delta T_n$ ). La figure 2 montre la variabilité de  $\Delta T_n$  dont la présence associée aux vagues de chaleur engendre une exposition des citoyens à des températures nocturnes élevées à la suite d'une journée chaude. Ainsi la station *Centre-ville* dénombre 16 nuits tropicales (nuits où  $T_n \geq 20^{\circ}\text{C}$ ) contre aucune pour la station *Le Versoud* pour la même période. Cet écart traduit l'empreinte de l'ICU sur cet indicateur thermique. Un pic nocturne a été relevé le matin du 1<sup>er</sup> août 2020, la  $T_n$  relevée à 7h (heure locale) était de  $24,3^{\circ}\text{C}$  dans le centre-ville de Grenoble contre  $19,0^{\circ}\text{C}$  dans la campagne avoisinante (*Le Versoud*). Ce pic fait suite à une  $T_x$  de  $38,8^{\circ}\text{C}$  relevée la veille. Au cours de la période analysée, on dénombre 34 « journées chaudes » (où  $T_x \geq 30^{\circ}\text{C}$ ) dont 9 « journées très chaudes » (où  $T_x \geq 35^{\circ}\text{C}$ ).





**figure 2.** Températures maximales (Tx) et minimales (Tn) quotidiennes observées par la station météorologique urbaine (Centre-ville) et extra-urbaine (Le Versoud) du 22 juillet au 30 septembre 2020 à Grenoble. La différence entre les Tn des deux stations est exprimée par  $\Delta Tn$ . Les bandes grises indiquent à la période des trois épisodes de chaleur identifiées.

### 1.3. Définition de l'îlot de chaleur urbain grenoblois selon les types de temps

Dans ce contexte estival chaud, la variabilité de l'ICU est analysée en fonction des conditions météorologiques. L'intensité de l'ICU est estimée par  $\Delta Tn$ , cependant elle dépend de situations radiatives avec un vent faible (Cantat, 2004). La relation entre la vitesse du vent observé au moment de l'enregistrement de la Tn et la présence d'un gradient de température nocturne ville/campagne ( $\Delta Tn$ ) est illustrée en figure 3a. Seules 3 nuits enregistrent un  $\Delta Tn \geq 3^\circ\text{C}$  avec un vent supérieur à 2 m/s, soit seulement 6% des nuits. En moyenne le vent observé au moment de la mesure de la Tn est de 1 m/s pour  $\Delta Tn \geq 3^\circ\text{C}$ .

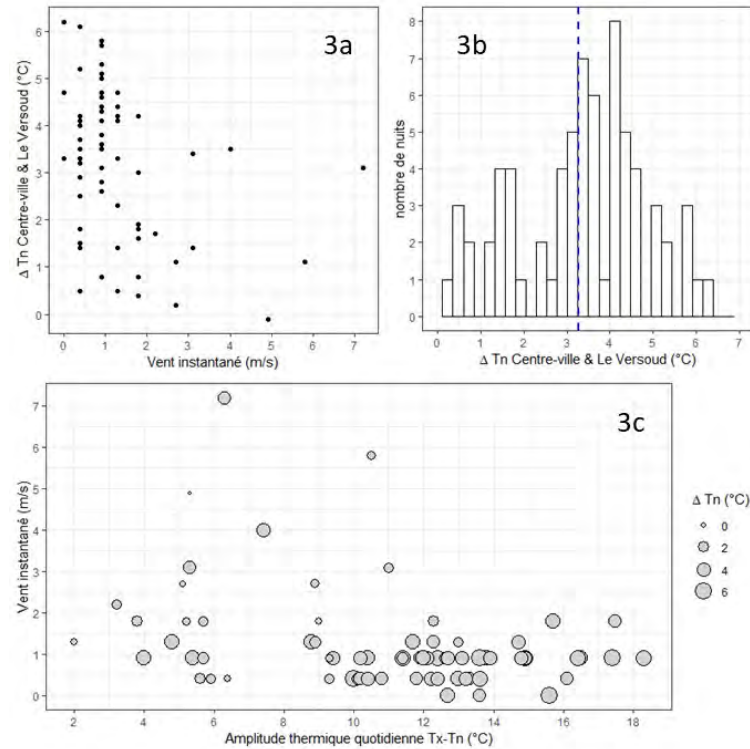
La distribution de  $\Delta Tn$  (figure 3b) montre une distinction entre deux groupes au seuil de  $3^\circ\text{C}$ , où les 2/3 des enregistrements sont supérieurs à ce seuil. Ne disposant pas de mesures de l'état du ciel pour cette période d'enregistrement, l'amplitude thermique quotidienne (Tx-Tn) permet indirectement d'associer les fortes amplitudes à un ciel clair. La figure 3c présente la combinaison résultante entre l'intensité du vent et l'amplitude thermique avec  $\Delta Tn$ . Pour une amplitude thermique  $>10^\circ\text{C}$  avec un vent inférieur à 2 m/s, 83% des nuits où l'écart  $\Delta Tn$  est supérieurs ou égal à  $+3^\circ\text{C}$  est relevé. Ainsi l'ICU est défini comme présent avec un seuil  $\Delta Tn \geq 3^\circ\text{C}$  et un vent  $\leq 2$  m/s, soit un total de 44 nuits d'observation pour un ICU moyen de  $+4,2^\circ\text{C}$  avec un ICU maximum de  $+6,2^\circ\text{C}$ .

## 2. La variabilité spatiale de l'îlot de chaleur urbain

### 2.1. Spatialisation de l'îlot de chaleur urbain moyen

A partir de ces 44 nuits où l'ICU est présent, l'intensité moyenne de l'ICU est définie pour l'ensemble des points d'observation (figure 4). L'étape de spatialisation des gradients thermiques est réalisée à partir de plusieurs indicateurs de formes urbaines : la fraction bâtie, le « Sky View Factor » (l'effet de canyon urbain, SVF), la part de surfaces imperméabilisées, la fraction de végétation haute et basse. Le modèle de spatialisation est construit en établissant les échelles les plus corrélées à l'ICU pour

l'ensemble des paramètres (Foissard *et al.*, 2019). Pour la modélisation de l'ICU, en figure 4, deux paramètres ont été employés : la fraction de végétation dans un rayon de 400 m, associée à l'indice SVF calculé pour un rayon de 300 m. Le modèle obtenu explique 83% de la variabilité spatiale de l'ICU (pour une validation croisée de 10%) avec une RMSE (racine carrée de la moyenne des erreurs) de 0,32 et une MAE (moyenne de l'erreur absolue) de 0,24°C.



**figure 3.** Relation entre  $\Delta T_n$  et le vent (3a) et combiné à l'amplitude thermique (3c). Distribution de  $\Delta T_n$  (3b).

L'ICU le plus intense est observé dans les quartiers du centre-ville composé d'un tissu bâti dense (compris entre 40% et 50%) avec en moyenne 10% de fraction de végétation. Cependant le gradient de température du centre vers la périphérie ne forme pas une structure concentrique. Au nord du centre un abrupt de 300 m de hauteur surplombe la ville (nommée La Bastille). Il est très largement couvert par une végétation arborée (80%). Ce relief escarpé n'est pas pris en compte par la modélisation. Le point de mesure situé au pied de La Bastille est situé au bord de l'Isère, où l'intensité de l'ICU relevé diminue de -1,5°C par rapport au centre. Cette relative fraîcheur peut s'expliquer par l'ouverture liée à la plus faible présence de bâtiments et par la proximité de ladite rivière en contre-bas. L'effet de canyon (SVF) est de 0,73 pour ce site contre 0,60 en moyenne dans le centre.

La cartographie de l'ICU met en évidence les principaux parcs de Grenoble avec les îlots de fraîcheurs associés (en moyenne +2°C par rapport à la station *Le Versoud*). Les îlots de fraîcheur les plus remarquables sont le parc Paul Mistral à l'est du centre (35 ha), le parc des Champs Elysées au sud-ouest de la ville (29 ha), le parc Jean Verlhac au sud-est (14 ha).

L'ICU maximum observé sur l'ensemble de la période analysée est atteint pour l'un des sites à l'ouest du centre-ville (à une distance inférieure à 1 km) avec +6,8°C le 8 août, soit +1°C par rapport au centre-ville cette nuit-là. Cette situation met en évidence un déplacement potentiel de l'ICU malgré un vent faible (0,9 m/s).

## 2.2. Un déplacement intermittent de l'îlot de chaleur urbain estival associée à des brises de montagne ?

Associé à l'ICU moyen des gradients de température spécifiques se distinguent dont la situation mentionnée précédemment illustre un déplacement de l'ICU vers le nord-ouest du centre-ville de

Grenoble. Une analyse est menée à partir des écarts de température constatés entre les stations météorologiques *Centre-ville*, *CEA* et *Le Centre Horticole* et avec le vent associé. L'extension de l'ICU vers le nord-ouest est estimée quand l'écart entre les stations *Centre-ville* et *CEA* (au N-W) est inférieure à 1,5°C. Le tableau 1 récapitule ces situations. Il apparaît que pour 52% des nuits l'ICU s'étend vers le nord-ouest de Grenoble. Les points de mesure situés au nord-ouest du centre observent une augmentation de l'ICU et dans le même temps une faible diminution de l'ICU pour les sites situés à l'est et au sud de Grenoble (figure 5a). Le vent mesuré au *CEA* pour l'ensemble des nuits avec cette situation est orienté au sud-est (en moyenne 1 m/s). La situation, où l'ICU est centrée, représente 48% des nuits observées (figure 5b). Les vents associés à cette situation n'ont pas d'orientation prédominante, en revanche le vent est plus faible avec une moyenne de 0,4 m/s. Par ailleurs, la modélisation de cette situation est meilleure avec 87% de la variabilité spatiale de l'ICU expliquée contre seulement 79% pour la situation avec un déplacement de l'ICU.

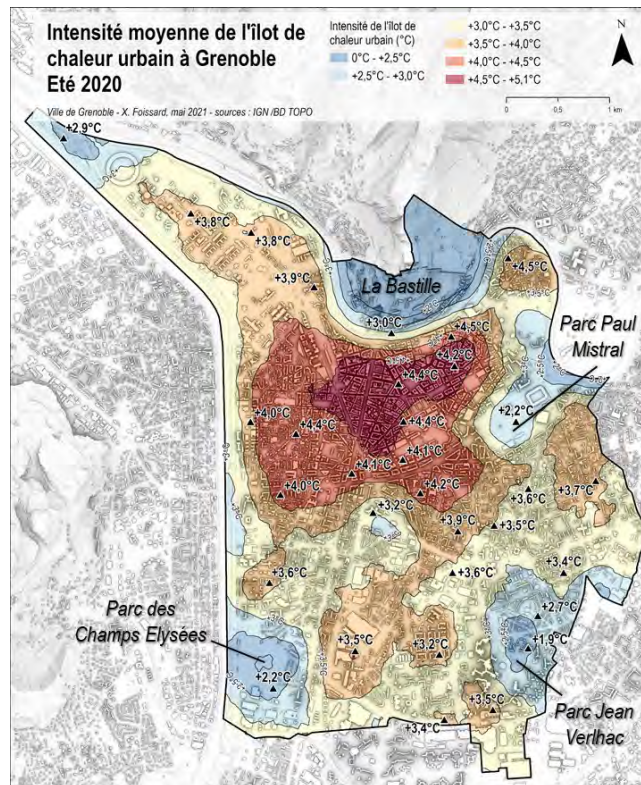


figure 4. Intensité moyenne de l'ICU à Grenoble observée lors de l'été 2020 pour 44 nuits.

Tableau 1. Décomposition des situations avec ou sans déplacement de l'ICU

Situation	Fréquence	CEA	Centre-Ville	Centre-Horticole
ICU moyen (toutes situations)	100%	+2,9°C	+4,2°C	+2,0°C
ICU « extension vers l'ouest »	52%	+3,4°C	+4,0°C	+1,8°C
ICU « centré »	48%	+2,3°C	+4,5°C	+2,1°C

## Conclusion

L'étude a permis de réaliser une première évaluation de l'ICU grenoblois et d'établir son intensité, sa fréquence et son extension spatiale. La cartographie révèle les quartiers les plus exposés à l'ICU et dans le même temps les îlots de fraîcheur à l'échelle des quartiers. Les résultats ont également permis d'expliquer les causes de la présence de l'ICU par la caractérisation du tissu urbain à l'aide des



indicateurs de formes urbaines. Les produits issus de cette étude apportent des outils à la Ville de Grenoble pour l'analyse du territoire au regard de l'ICU. Ces premiers résultats révèlent aussi la complexité de l'ICU et suscitent la poursuite de l'analyse de ces situations afin de mieux appréhender cette variabilité spatiale. Les travaux menés dans le cadre du projet de recherche CASSANDRE (2021-2025) permettront ces développements mais également de croiser ces résultats avec les problématiques de la santé en ville lors des épisodes de chaleur.

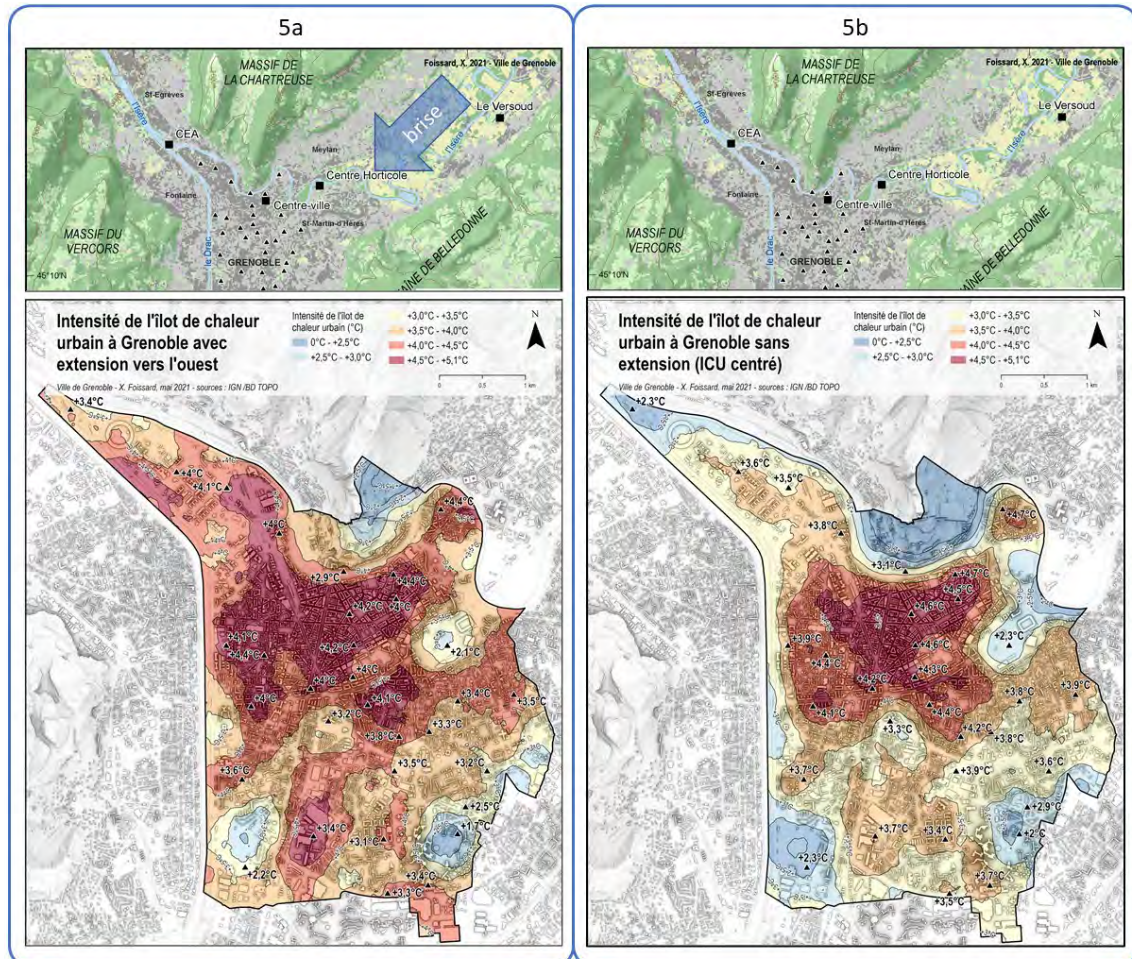


figure 5. Intensité de l'ICU avec déplacement associé à une brise de nord-est (5a) et en l'absence d'advection (5b).

**Remerciements :** La poursuite de cette étude est réalisée dans le cadre du projet CASSANDRE (CANiculeS, SANTé et Densité de REseaux météorologiques sur le territoire grenoblois) financé par l'APR PACT2e (Planifier et Aménager, face au Changement climatique, la Transition des Territoires) de l'ADEME.

## Bibliographie

- Cantat O., L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*. 2004. **191**, 75-102.
- Dubreuil V., Foissard X., Nabucet J., Thomas A., Quénoel H., 2020. Fréquence et intensité des îlots de chaleur à rennes : bilan de 16 années d'observations (2004-2019). *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **17**, 17.
- Foissard X., Dubreuil V., Quénoel H., 2019. Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city: Rennes (France). *Urban Climate*, **29**, 100490.
- Hidalgo, J., Jouglu, R., 2018. On the use of local weather types classification to improve climate understanding: An application on the urban climate of Toulouse. *PLoS One* **13**, 1–21.
- Oke T.R., Mills A., Christen A., Voogt J.A., 2017 : *Urban Climates*. Cambridge University Press, 519 pages.

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.

Rousseau D., 2005. Analyse fine des surmortalités pendant la canicule 2003. *La Météorologie*, **51**, 16-22.

Stewart I. D., Oke T. R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **93**, 1879-1900.



## IMPACTS D'UNE MEILLEURE DESCRIPTION DE LA VÉGÉTATION URBAINE SUR DES SIMULATIONS DU CLIMAT URBAIN AVEC SURFEX-TEB

**Mélissa POUPELIN<sup>1,2</sup>, Julien PERGAUD<sup>2</sup>, Damien ROY<sup>1</sup>, Julita DUDEK<sup>2</sup>, Ludovic GRANJON<sup>3</sup>, Nadège MARTINY<sup>2</sup>, Julien CRÉTAT<sup>2</sup>, Mario REGA<sup>2</sup>, Yves RICHARD<sup>2</sup>, Thomas THEVENIN<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup> Laboratoire ThéMA - UMR CNRS 6049, Université de Bourgogne-Franche-Comté, Dijon et Besançon ([poupelinmelissa.pro@gmail.com](mailto:poupelinmelissa.pro@gmail.com))

<sup>2</sup> Centre de Recherches de Climatologie - Laboratoire Biogéosciences - UMR CNRS 6282, Université de Bourgogne-Franche-Comté, Dijon.

<sup>3</sup> Maison des Sciences de l'Homme de Dijon - MSH de Dijon, UAR 3516 CNRS, Université de Bourgogne-Franche-Comté, Dijon.

**Résumé :** Le modèle de climat urbain Méso-NH couplé à la plateforme de modélisation de la surface SURFEX est mobilisé pour simuler la variabilité spatio-temporelle des températures horaires de Dijon Métropole lors d'un épisode de canicule et estimer l'impact de la description de la végétation sur la température. Cet impact est variable au cours de la journée en fonction des caractéristiques topographiques et morphologiques du territoire.

**Mots-Clés :** Modélisation ; Végétation urbaine ; îlot de chaleur urbain ; Dijon Métropole.

### Introduction

La modélisation dynamique est une des solutions pour étudier les dynamiques du climat à l'échelle de la ville, notamment les phénomènes d'îlots de Chaleur Urbains (ICU) qui correspondent au différentiel de température observé entre la ville et les espaces ruraux adjacents (Oke, 1982). Il est désormais possible de modéliser à fine échelle les différents éléments qui peuvent influencer le climat urbain (végétation, eau, sols) grâce aux développements des modèles de climat tels que Méso-NH (Schoetter et al., 2020 ; de Munck et al., 2018). Afin de proposer des scénarii ancrés dans la réalité du territoire étudié et d'étudier l'impact de ces solutions de rafraîchissement, il faut réaliser une simulation initiale qui servira de « témoin ». Cette simulation initiale doit être basée sur des paramètres d'occupation du sol proches de la réalité. Pour cela, il est nécessaire de disposer de bases de données qui renseignent correctement l'occupation du sol : or, la végétation urbaine est un élément très mal renseigné dans les bases de données d'occupation du sol. C'est pourquoi (1) un travail de recensement de la végétation urbaine grâce à des images satellites PLÉIADES et des données LiDAR (Light Detection And Ranging) s'est révélé nécessaire. Puis, (2) un travail d'étude de la sensibilité du modèle à cette nouvelle base de données permet de vérifier son impact sur les résultats de simulation. (3) Les données d'observation du réseau MUSTARDijon (Measuring Urban Systems Temperature of Air Round Dijon (Richard et al., 2018)) sont utilisées comme référentiel dans cette étude de sensibilité.

### Données et Méthodes

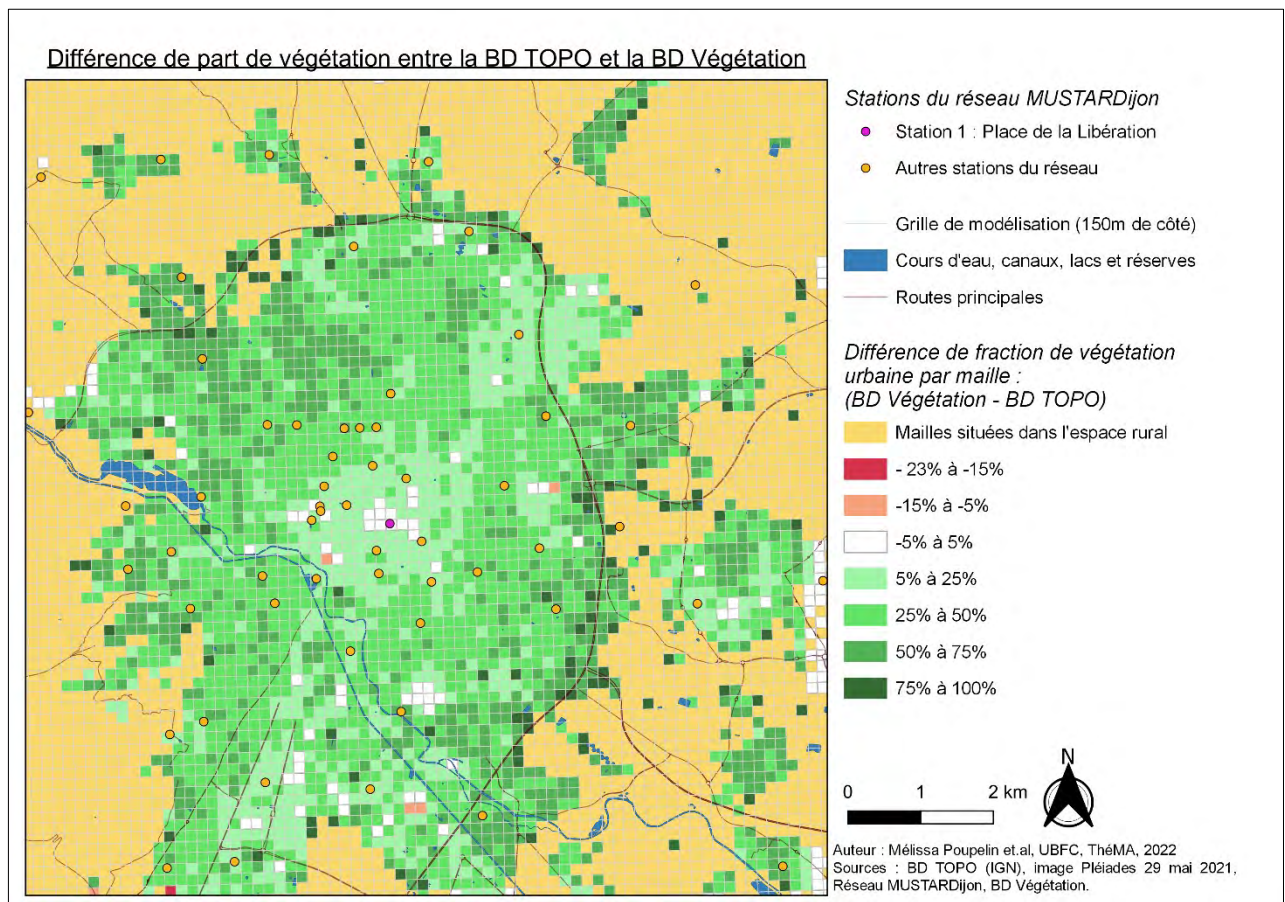
#### Les données nécessaires pour simuler le climat urbain de Dijon Métropole

La période choisie pour effectuer les simulations correspond à des jours de canicule de l'été 2020, soit du 6 août 2020 au 9 août 2020 : ces jours sont propices au développement du phénomène d'ICU (Richard et al., 2021). Les réanalyses ERA-5 produites par l'European Center for Medium-range Weather Forecasts (ECMWF) sont utilisées pour forcer le modèle en entrée et toutes les six heures (Hersbach et al., 2020). Les données d'observations utilisées pour évaluer les simulations obtenues sont issues du réseau MUSTARDijon. Ce réseau capture les conditions thermiques toutes les heures à 3 mètres au-dessus du sol depuis le 6 juin 2014 (De Lapparent et al., 2015). Il est doté de 67 stations en 2022 (Figure 1) ce qui permet d'avoir une information riche et dans des espaces diversifiés (parcs urbains, espaces résidentiels peu denses, centre-ville dense, périurbain, zones d'activités, etc).

Pour simuler les conditions du climat urbain de Dijon Métropole, la plateforme de modélisation de la surface SURFEX v8.1 (Masson et al., 2013) couplée au modèle de climat Méso-NH (v5.4.4) a besoin d'informations réduites sous forme de fractions au sein de chaque maille constituant sa grille de simulation. Pour ce cas d'étude, la grille choisie couvre une superficie d'environ 576 km<sup>2</sup> (24km de côté) ce qui permet d'intégrer les 23 communes qui composent Dijon Métropole. Cette grille est composée de mailles de 150 mètres de côté, soit environ 22 500m<sup>2</sup> chacune. Les fractions de surface de bâti, d'eau et de végétation sont nécessaires pour simuler les états de surface. Hormis pour les surfaces de végétation urbaine, toutes les informations nécessaires sont disponibles au sein de la BD TOPO (IGN). Dans cette base de données la végétation urbaine représentée est très différente de la réalité puisque seuls certains arbres hauts et placés dans les espaces publics (rues, squares, parcs publics) sont représentés. Manquent les espaces privés (végétation basse et végétation haute), ainsi que la végétation haute présente dans l'espace public et les haies. Par défaut, le modèle attribue les espaces "vides", i.e. le reste de la maille sans fraction de bâti, d'eau ou de végétation, à de la route.

## 1.2. Intégrer une couche de données de végétation urbaine aux simulations

Un travail sur des données de télédétection a permis de développer une méthode originale d'inversion de la végétation urbaine permettant d'obtenir une couche de végétation plus détaillée que celle disponible dans la BD TOPO et ce à l'échelle de la ville de Dijon et des alentours. Cette couche est issue du traitement d'une image provenant du satellite PLÉIADES (29 mai 2021) équipé d'un capteur THR (très haute résolution spatiale) et de données LiDAR (5, 6 et 14 février 2019, issues de la campagne « Côte viticole 2020 - L'association des Climats, DRAC BFC, DREAL BFC, Maison des Sciences de l'Homme de Dijon CNRS-uB 3516, 2020 »). Cette couche de végétation plus détaillée (appelée « BD



**figure 1.** Différence de part de végétation entre la BD TOPO et la BD Végétation à Dijon et alentours. La station n°1 (Place de la Libération) est différenciée pour situer le centre. En dégradé rouge : les mailles pour lesquelles la BD Végétation renseigne une part de végétation plus faible que dans la BD TOPO, en blanc : les mailles où la BD végétation est égale à la BD TOPO, en dégradé vert : les mailles où la BD Végétation renseigne une part de végétation plus importante que la BD TOPO.

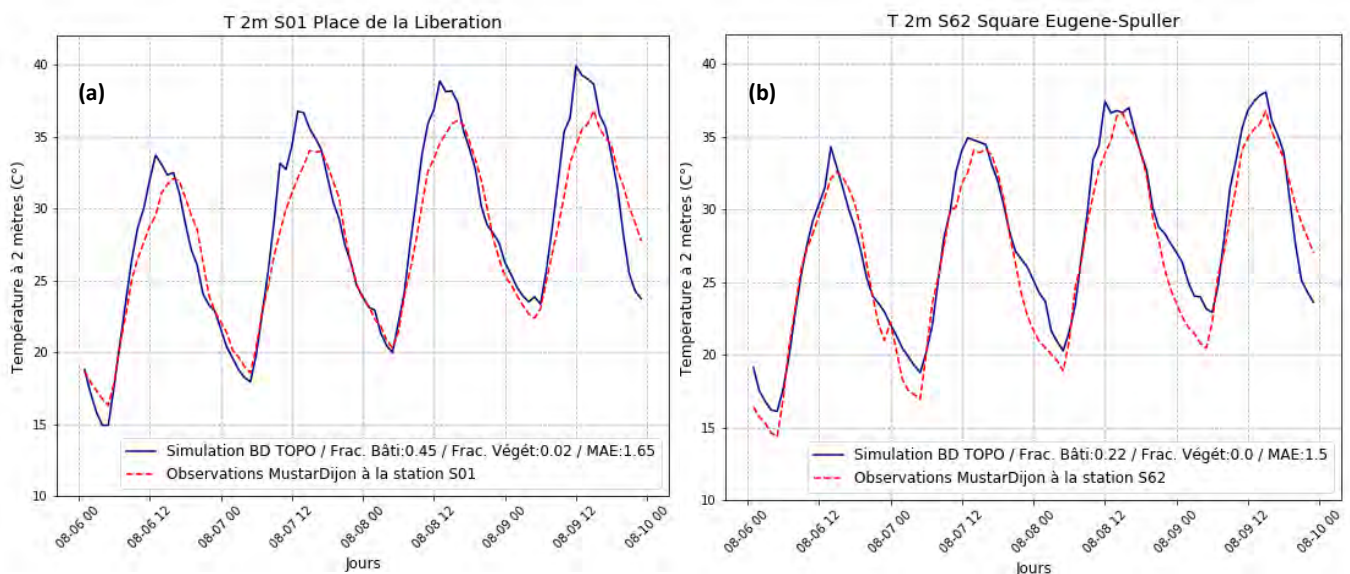
Végétation ») permet de renseigner les fractions de surfaces végétalisées en milieu urbain et ainsi de compléter la base de données de l'IGN sur la surface couverte par l'image PLÉIADES.

L'objectif est de réaliser une étude de sensibilité quant aux modifications apportées à la caractérisation de la végétation. Deux simulations sont réalisées : une première (Simulation « BD TOPO ») avec uniquement les données de la BD TOPO pour renseigner l'occupation du sol et une seconde (Simulation « BD TOPO & PLÉIADES ») qui intègre à la BD TOPO la couche de végétation construite à partir de l'image PLÉIADES. La construction et le calcul des fractions dans les grilles ont été effectués avec QGIS ; la même grille a été utilisée pour les deux simulations. Ce qui les différencie c'est la quantité de végétation par maille car la seconde simulation s'appuie sur les données de la couche de végétation urbaine qui présente un écart remarquable avec la végétation présente dans la BD TOPO. Sur le territoire étudié, la végétation urbaine référencée par la BD TOPO représente une surface de 754 hectares alors que la couche de végétation obtenue recense 3296 hectares. Ainsi, les mailles urbaines de la simulation « BD TOPO » contiennent en moyenne 9% de végétation, tandis que celles de la simulation « BD TOPO & PLÉIADES » sont en moyenne végétalisées à 50%. Dans l'espace, le gain de végétation n'est pas uniforme (Figure 1) : on retrouve un effet de centre-périphérie, où le centre-ville de Dijon a gagné moins de surfaces de végétation par mailles que les quartiers plus résidentiels situés autour. Le centre-ville de Dijon est en effet moins végétalisé et plus imperméabilisé que les quartiers résidentiels qui, eux, comportent des jardins privés qui n'étaient pas présents dans la BD TOPO. Les parcs, bien représentés dans la BD TOPO expliquent l'absence de différence entre les deux bases de données dans d'autres espaces de la ville.

## Résultats

### Quels résultats de simulation avec uniquement la BD TOPO pour caractériser l'occupation du sol ?

Afin d'étudier l'apport de la couche issue de la télédétection de végétation urbaine il faut d'abord s'intéresser à la simulation réalisée avec uniquement la BD TOPO. Ce travail d'analyse consiste dans un premier temps à comparer les résultats de simulation aux observations. Pour pouvoir traiter l'ensemble des 67 stations, il est nécessaire de pré-classer les stations en fonction des paramètres d'occupation du sol des mailles dans lesquelles sont placées les stations. Ce pré-classement s'est basé sur la catégorisation en Local Climate Zone (LCZ) des stations du réseau MUSTARDijon et sur la représentativité réelle des mailles de leur station associée. Trois classes ont été obtenues : les stations « végétalisées » (situées dans des parcs, des squares, des champs), les stations « minérales » (situées dans des rues, sur des places, dans des quartiers peu végétalisés) et les stations « mixtes » (situées dans des quartiers mêlant bâti et végétation, souvent des espaces résidentiels avec pavillons



**figure 2.** Evolutions des températures : comparaison des observations aux stations n°01 (a) et 62 (b) du réseau MUSTARDijon et de la simulation « BD TOPO » sur la période du 06 août 2020 à 0h au 10 août 2020 à 0h. Focus sur une station « minéralisée » (a) et une station « végétalisée » (b).



individuels). Ce classement est croisé avec une analyse à plus fine échelle qui prend en compte la représentativité de la maille pour la station. Dans le cas de la simulation « BD TOPO », il faut également prendre en compte l'absence de végétation.

La simulation « BD TOPO » reproduit plutôt bien les températures observées par le réseau MUSTARDijon qui servent de référence. La comparaison des températures simulées et observées présente toutefois une erreur moyenne absolue généralement comprise entre 1.4 et 2°C sur l'ensemble des heures de la journée. Sur les évolutions temporelles tracées (Figure 2), le cycle diurne est bien retranscrit. Ce sont essentiellement les températures maximales et minimales journalières simulées qui sont éloignées des valeurs de référence : en milieu urbain, les températures maximales ont tendance à être plus élevées que les observations (en moyenne 2.5°C). Les températures minimales sont également plus élevées que les observations, en particulier sur la nuit du 9 août. Ces différences peuvent être liées à plusieurs éléments parmi lesquels le manque de surfaces végétalisées qui pourrait expliquer pourquoi les températures des simulations ont tendance à être plus élevées que celles observées.

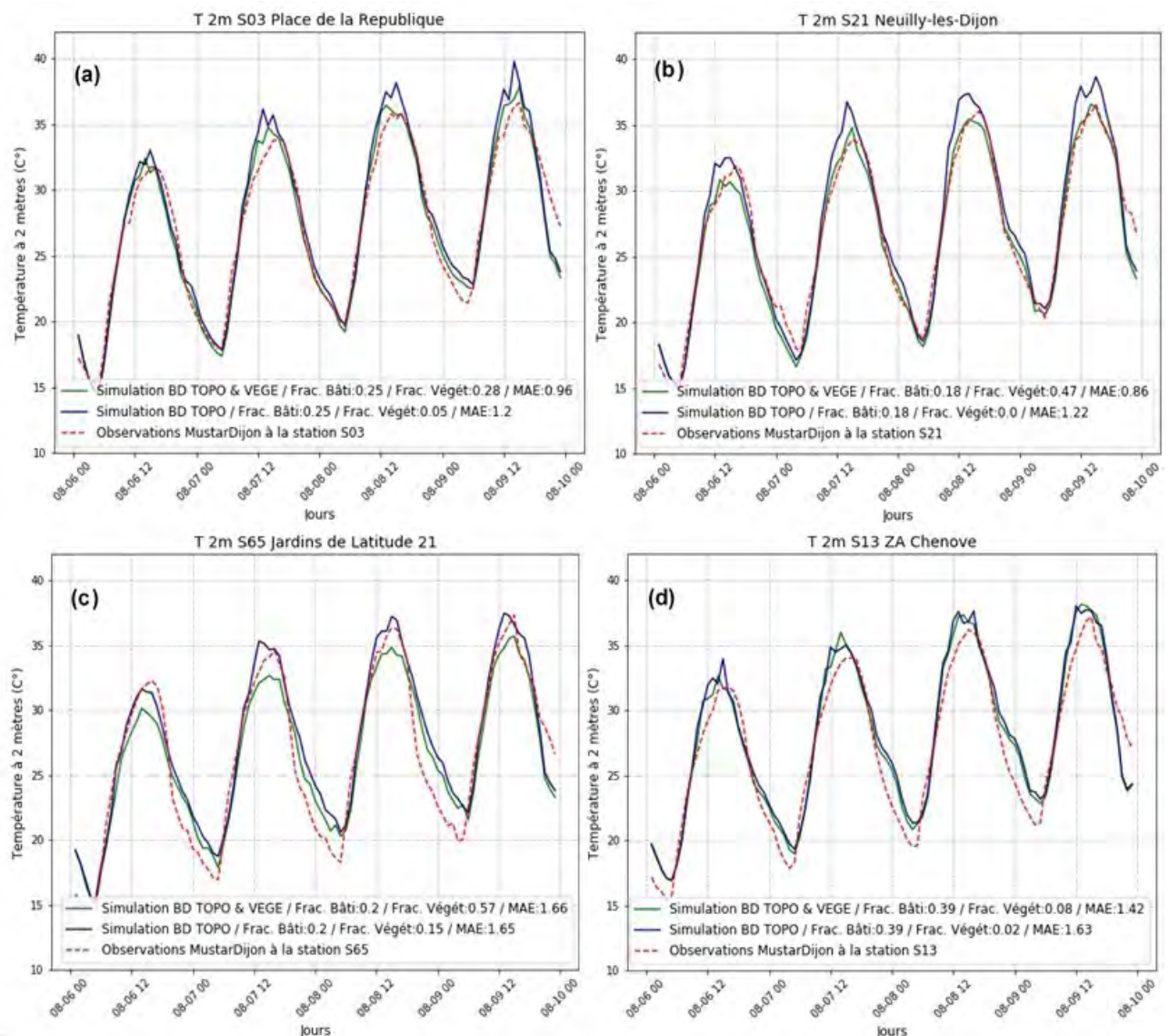


figure 3. Évolutions des températures : comparaison des observations aux stations n° 03 (a), 21 (b), 65 (c) et 13 (d) du réseau MUSTARDijon, de la simulation « BD TOPO » et de la simulation « BD TOPO & PLÉIADES » sur la période du 06 août 2020 à 0h au 10 août 2020 à 0h.

### **Quel impact de la couche de végétation urbaine sur les simulations ?**

La simulation « BD TOPO & PLÉIADES » contient en moyenne 5,5 fois plus de part de végétation dans les mailles situées en milieu urbanisé (i.e. avec plus de 5% de part de bâti). Cette augmentation de la part de surfaces végétalisées a essentiellement un impact sur les températures maximales (Figure 3). Sur l'ensemble du domaine de simulation les maximales journalières baissent en moyenne de 2°C, avec localement jusqu'à 4.5°C de moins que dans la simulation « BD TOPO ». En revanche, les températures minimales ne semblent pas fortement varier d'une simulation à l'autre, environ 0.5°C pour la plupart des stations. La simulation « BD TOPO & PLÉIADES » est plus proche de la référence que la simulation « BD TOPO », avec des valeurs d'erreurs moyennes absolues plus proches de 0 (Figure 3.a,b,d). Cette amélioration des résultats s'observe en particulier pour les stations situées dans des mailles où la couche de végétation urbaine augmente remarquablement la fraction de végétation : on passe de 5% à 28% de végétation pour la maille de la place de la République (figure 3.a) et de 0% à 47% pour la maille de Neuilly-les-Dijon (figure 3.b). Cet impact sur les températures maximales semble être valable pour l'ensemble du territoire et pas uniquement dans les mailles qui gagnent une fraction de végétation importante (Figure 3.d). On observe un rafraîchissement moins important lorsque la différence de fraction de végétation entre les deux simulations est plus faible. Néanmoins, on remarque que la simulation « BD TOPO & PLÉIADES » n'est pas toujours plus proche des observations ; c'est le cas pour la station des jardins de Latitude 21 (figure 3.c) où cette simulation présente des températures plus basses que les observations sur les températures maximales. La comparaison des deux simulations aux observations station par station offre une première approche des résultats et permet de poser plusieurs hypothèses quant aux possibles biais des simulations.



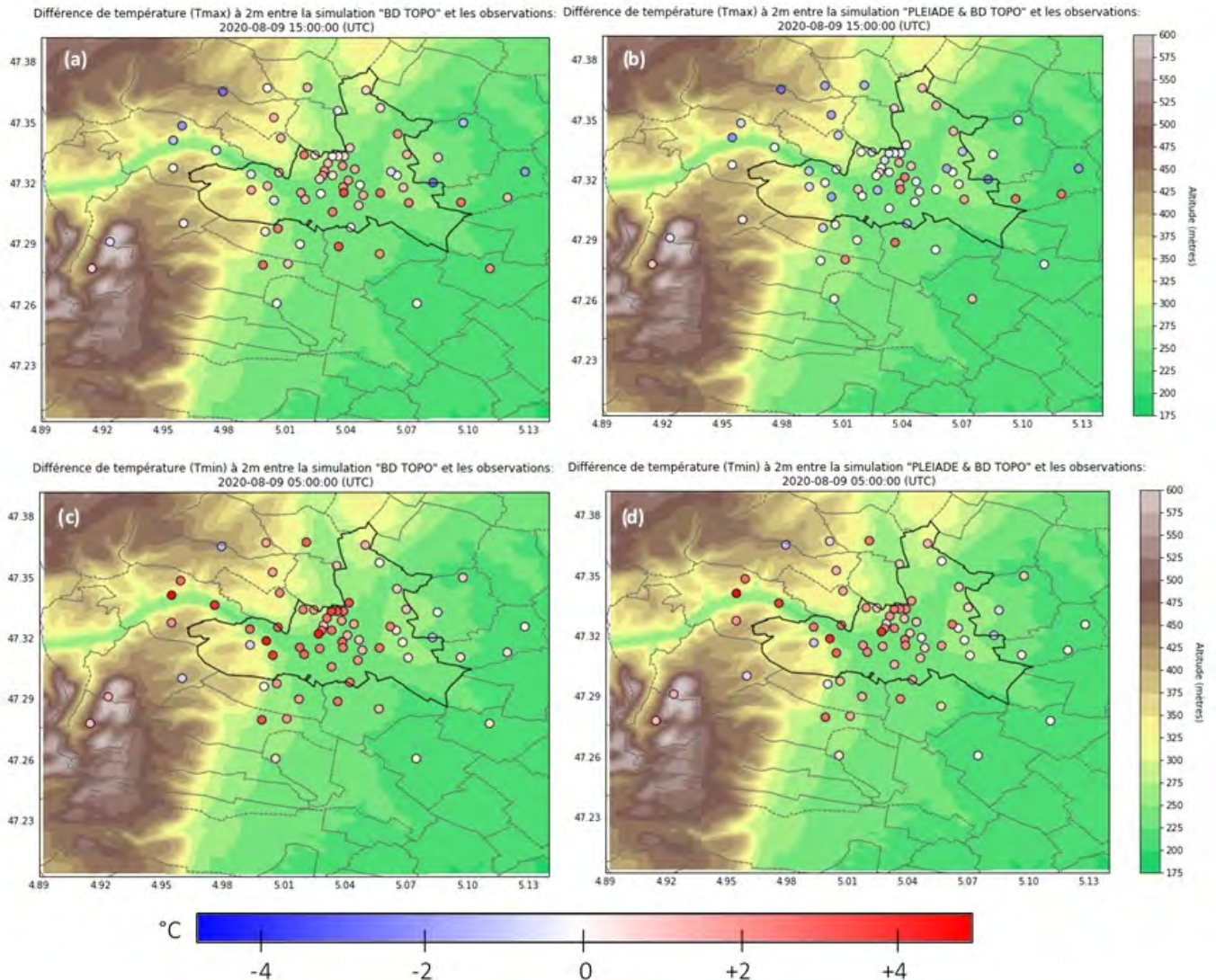


Figure 4. Différence de température à 2m entre les simulations « BD TOPO » (a,c) ou « BD TOPO & PLEIADES » (b,d) et les observations aux stations du réseau MUSTARDijon le 09 août 2020 sur les températures maximales à 15h UTC (a,b) et sur les températures minimales à 05h UTC (c,d). Le gradient de température qui colore les stations (du bleu ou rouge) correspond à la différence entre la simulation et les observations.

L'étude de la distribution spatiale de la différence de température entre les simulations et les observations permet d'identifier les stations pour lesquelles les différences sont les plus fortes. En ce qui concerne les températures maximales, la simulation « BD TOPO » (Figure 4.a) présente généralement des valeurs supérieures aux observations, en particulier en centre de Dijon. En revanche, pour les stations situées à l'extérieur de la ville et qui ne sont pas en milieu bâti, cette simulation a tendance à être plus froide que l'observation. Les données de végétation urbaine permettent de réduire l'écart entre les observations et la simulation (Figure 4.b), surtout dans les quartiers résidentiels de Dijon (figure 4.b). Certaines stations de Dijon conservent toutefois une différence d'environ 2°C sur les températures maximales du 9 août: ce sont des stations situées dans des environnements peu végétalisés ou le long de l'Ouche. Au nord-est de Dijon Métropole, la simulation « BD TOPO & PLÉIADES » est plus froide que la référence (environ -1.8°C) alors qu'elles sont plus chaudes (environ 1.5°C) avec la simulation « BD TOPO » : ces différences entre les simulations et les observations concernent essentiellement les stations situées sur les versants de la Vallée de l'Ouche. Pour ce qui est des températures minimales, l'apport de végétation a pour effet de réduire l'écart entre les observations et la simulation mais il reste toujours un biais chaud, en particulier pour les stations situées dans la Vallée de l'Ouche, au nord-ouest (Figure 4.b,c). Les températures des stations situées

sur la plaine à l'est et au sud sont bien restituées par les deux simulations. Ces résultats posent question quant à l'impact de l'altitude et de la topographie sur les résultats de simulation.

## Conclusion

La production d'une base de données de végétation urbaine a permis de modifier structurellement les bases de données d'occupation du sol utilisées pour simuler le climat urbain de Dijon Métropole ; l'étude de l'impact de l'augmentation majeure de la part de végétation dans les simulations revêt deux intérêts; elle permet de valider l'utilisation d'une base de données de végétation urbaine qui caractérise beaucoup mieux l'occupation du sol et aussi d'étudier les différents biais du modèle quant à la simulation des paramètres du climat à l'échelle d'une métropole française. L'étude de ces biais offre la possibilité de trouver des solutions pour les réduire ou bien pour les intégrer à l'analyse des résultats des scénarii futurs. Les premiers résultats étudiés montrent que l'apport de végétation ne génère pas forcément un refroidissement des températures de façon uniforme; l'altitude, la topographie, la distance au centre sont des paramètres qui pourraient influencer les résultats de simulation. L'étude plus approfondie de ces hypothèses va permettre de mieux comprendre le fonctionnement du modèle et d'adapter une grille d'interprétation des résultats de simulation. Ce travail pourra aboutir à la formulation d'une typologie adaptée aux mailles du domaine de simulation qui sera utilisée pour élaborer les scénarii de végétalisation.

**Remerciements :** Les auteurs remercient Météo-France pour la mise à disposition des données de la station de Dijon Longvic (convention avec l'université de Bourgogne), la Région Bourgogne-Franche-Comté pour leur soutien ainsi que les équipes GMME et GAME du Centre National de Recherches Météorologiques.

## Bibliographie

De Lapparent B., Roux J., Richard Y., Pohl B., Bientz S., et al., 2015 : Mesures de la température et spatialisation de l'Ilot de Chaleur Urbain à Dijon. *Actes de l'Association Internationale de Climatologie*, **28**, 257–262.

Masson V., Le Moigne P., Martin E., Faroux S., Alias A., et al., 2013 : The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, **6(4)**, 929–960.

Munck C. de, Lemonsu A., et al., 2018 : Evaluating the impacts of greening scenarios on thermal comfort and energy and water consumptions for adapting Paris city to climate change. *Urban Climate*, **23**, 260–286.

Oke T.R., 1982 : The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **108(455)**, 1–24.

Richard Y., Emery J., Dudek J., Pergaud J., Chateau-Smith C., et al., 2018 : How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. *Urban Climate*, **26**, 258–274.

Richard Y., Pohl B., Rega M., Pergaud J., Thevenin T., et al., 2021 : Is Urban Heat Island intensity higher during hot spells and heat waves (Dijon, France, 2014–2019)? *Urban Climate*, **35**, 100747.

Schoetter R., Kwok Y.T., et al., 2020 : Multi-layer coupling between SURFEX-TEB-v9.0 and Meso-NH-v5.3 for modelling the urban climate of high-rise cities. *Geoscientific Model Development*, **13**, 5609–5643.

Hersbach, H., Bell B., Berrisford P., et al., 2020 : The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **146(730)**, 1999–2049.

## BENEFITS OF WELL-WATERED TREES ON STREET MICROCLIMATE: WHAT IS THE INFLUENCE OF METEOROLOGICAL CONDITIONS?

Sophie HERPIN<sup>1,2</sup>, Souleymane MBALLO<sup>1,2</sup>, Julien THIERRY<sup>1,2</sup>, Dominique LEMESLE<sup>1,2</sup>, Lydia BRIALIX<sup>1,2</sup>, Fabrice RODRIGUEZ<sup>2,3</sup>, Sabine DEMOTES-MAINARD<sup>4</sup>, Pierre-Emmanuel BOURNET<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Institut Agro, EPHOR, 49000 Angers, France ([sophie.herpin@agrocampus-ouest.fr](mailto:sophie.herpin@agrocampus-ouest.fr))

<sup>2</sup> IRSTV, FR CNRS 2488, 44321 Nantes, France

<sup>3</sup> Université Gustave Eiffel, GERS, LEE, 44344, Bouguenais, France

<sup>4</sup> Univ Angers, Institut Agro, INRAE, IRHS, SFR QUASAV, F-49000 Angers, France

**Abstract :** The microclimate benefits of well-watered street trees were investigated in a reduced scale (1:5) North-South oriented canyon street over 120 summer days, comprising a wide range of meteorological conditions. Statistical analysis showed that the trees significantly decrease air temperature and heat stress under their crown at midday. Daily global radiation is the meteorological variable having the strongest influence on Mean Radiant Temperature and UTCI reduction by the trees. Finally, the level of thermal comfort improvement can be predicted from daily global radiation thanks to a simple empirical linear relationship derived from the present data.

**Keywords:** thermal comfort, canyon street, tree benefits, urban microclimate

### Introduction

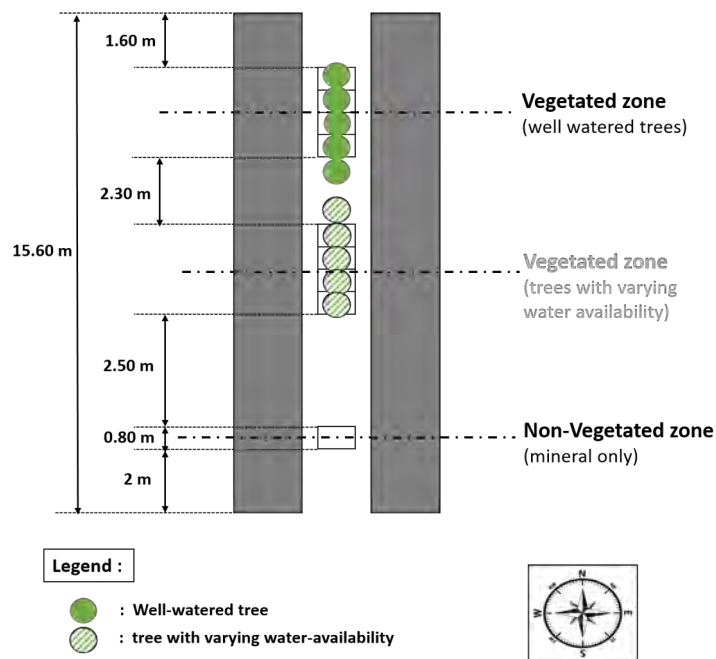
In a context of more frequent and intense heatwaves, cities are looking for adaptation strategies to reduce thermal stress during summer time. Urban trees, thanks to the combined effect of their shade and transpiration are promising solutions. Bowler et al. (2010) carried out a review on urban vegetation benefits, and found multiple evidence of air temperature reduction by trees during daytime, which amplitude depends on the surrounding urban environment, background climate, and trees characteristics (specie, planting density, leaf-area index...). Shashua and Hoffman (2000) investigated the reduction of air temperature provided by street trees at the beginning of the afternoon during a couple of summer days with low wind conditions in Tel-Aviv. An average reduction of 3K was found, which increased with partial shaded area and background air temperature. In Melbourne city, Coutts et al. (2016) showed that, the lower the sky view factor (thanks to the trees and buildings), the lower the thermal stress in the street during daytime. The trees were found to induce a maximum reduction of 7°C in Universal Thermal Climate Index (UTCI). Urban trees benefits, and especially transpiration, also depend on water availability, which is rarely reported and even less controlled in in-situ experiments. Reduced-scale experiments on model streets allow to standardize the urban configuration and its environment, but only few of them are vegetated to allow the study of tree benefits. For instance, in Mballo et al. (2021), a reduction of 8°C of UTCI by well-watered trees was evidenced during one individual sunny day in a 1:5 reduced-scale canyon street.

In the present contribution, we propose to analyze the microclimate benefits of well-watered urban trees with two summers of data acquisition in a reduced-scale canyon street in Angers, France. The variability of these benefits is assessed, and the influence of meteorological conditions on the climatic variables involved in human thermal comfort is investigated. Finally, the available information on tree leaf area index is also put in relation with the variation of UTCI reduction by the trees.

## 1. Material and Methods

### 1.1 Measurements

The microclimate data were acquired over two summers (2020 and 2021) in the canyon street facility of Institut Agro in Angers, France (47° 28' N, 0° 33' E). This facility consists in a 15.6 m long and 2 m wide canyon street, bordered by 2 m high buildings, resulting in an aspect ratio of 1 and a reduced scale of 1:5 (compared with a full-scale reference building height of 10 m). The street is North-South oriented, with white walls and asphalt on the ground. It is organized in three zones: a purely mineral area at the South of the street, and two treed areas, each comprising an alignment of 5 ornamental apple trees (*Malus Coccinella*® 'Courtarou'), in the center and North of the street. The soil was sealed and all trees were planted in individual containers and irrigated with drippers. The soil water availability was monitored with tensiometers and soil moisture sensors. The Northern row was always kept in well-watered conditions, while the center row was occasionally submitted to water-stress conditions during summer 2021. This study focuses on the well-watered zone.



**figure 2:** Top view of Institut Agro Canyon street, with the position of the different areas (treed or mineral)

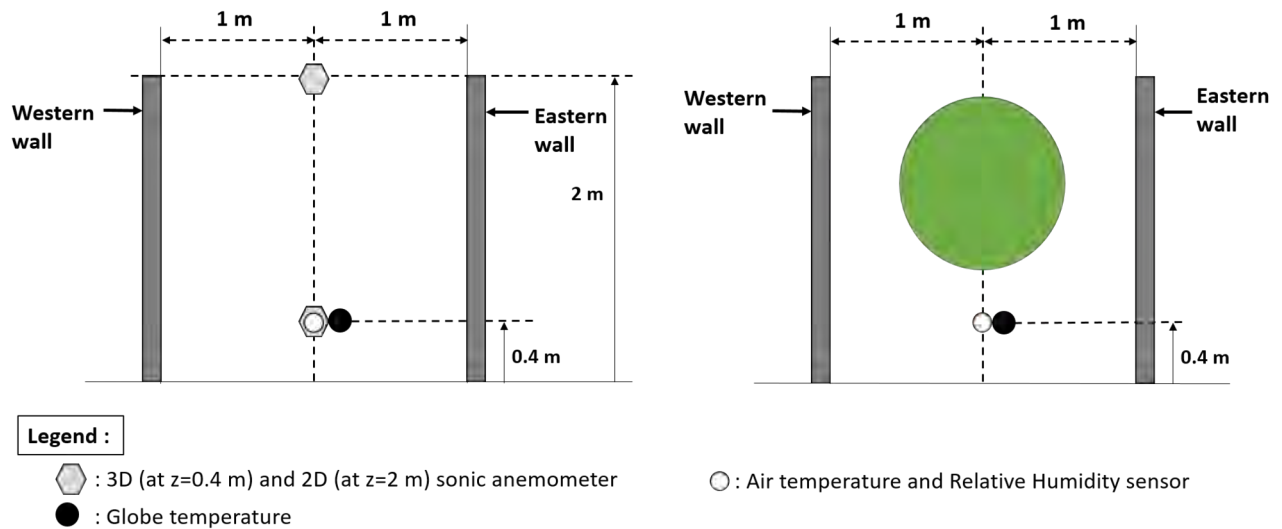


**figure 1:** Photography of the street and ornamental apple trees, taken from the south of the street on 2020-09-04

Once every summer, in July, the trees were trimmed at the height  $z=1.6$  m and at a width of 1.2 m to contain their development within the street dimensions. The leaf area of the three central trees in each zone was measured just before and after these trimmings by an allometric procedure, as well as the dimensions of the crown bounding volume (approximated to a parallelepiped). The values measured before trimming were assumed to be valid over the whole preceding week, and those after trimming over the two following weeks (tree aerial development stopped over this period after trimming). This resulted in 4 sub-periods with distinct LAI values comprised within the range [2.5,3.3] on average for the Northern row of trees.

In each of these two zones (the well-watered treed and the mineral one), the air temperature ( $T_a$ ), relative humidity (RH) and globe temperature were measured at 40 cm from the ground (corresponding to a full-scale height of 2 m, relevant for human height) using Vaisala HMP sensors ( $\pm 0.2^\circ\text{C}$  and  $\pm 2\%$  for RH in [0%;90%]) and a Pt100 sensor ( $\pm 0.15^\circ\text{C}$ ) in a 15 cm diameter copper black-painted sphere, respectively. The Mean radiant temperature (MRT) was derived from globe temperature using a correction for convective heat loss. The absolute humidity (AH) was derived from

RH and  $T_a$ , using an analytical function for water vapor saturation pressure. In the street, the wind speed was measured in the mineral area only, with a CSAT3 3D sonic anemometer ( $\pm 0.08$  m/s) at  $z=40$  cm, and a LCJ CV7 2D sonic anemometer ( $\pm 0.13$  m/s) at  $z=2$  m, assuming that the average wind speed at these two heights (being strictly below and above the tree crown) would not be much impacted by the trees. The UTCI thermal comfort index (Bröde et al., 2012) was then calculated in each zone from these variables.



**figure 3:** Sensor positions in the non-vegetated (left) and vegetated (right) zones of the street

The meteorological conditions on the experimental site were retrieved in two ways: at first, from the Météo-France weather station of Beaucozé located 400 m from the canyon street, and secondly in the immediate outer environment of the street from two meteorological masts, equipped with 2D sonic sensors at 2 m and 10 m from the ground and air temperature, humidity, and globe temperature sensors at 40cm, 1.5m and 2m from the ground. All sensors were scanned every 10 seconds by data-loggers, and average values were recorded every 10 minutes.

## 1.2 Methods

The final microclimate database finally consists in:

- 120 days of valid microclimate data, during summers 2020 and 2021.
- 39 days (among the 120 days cited hereinabove) with leaf surface information

The benefits of well-watered trees are analyzed by comparing the microclimate and thermal comfort in the vegetated and non-vegetated zones of the street under the tree crown at  $z=40$ cm (corresponding to human height at full scale), and also with the outer environment. After looking at mean daily evolution, a focus is realized on solar noon (between 11h and 13h UTC) when maximum benefits were observed. The role of background meteorological variables is then investigated using Principal Component Analysis (PCA).

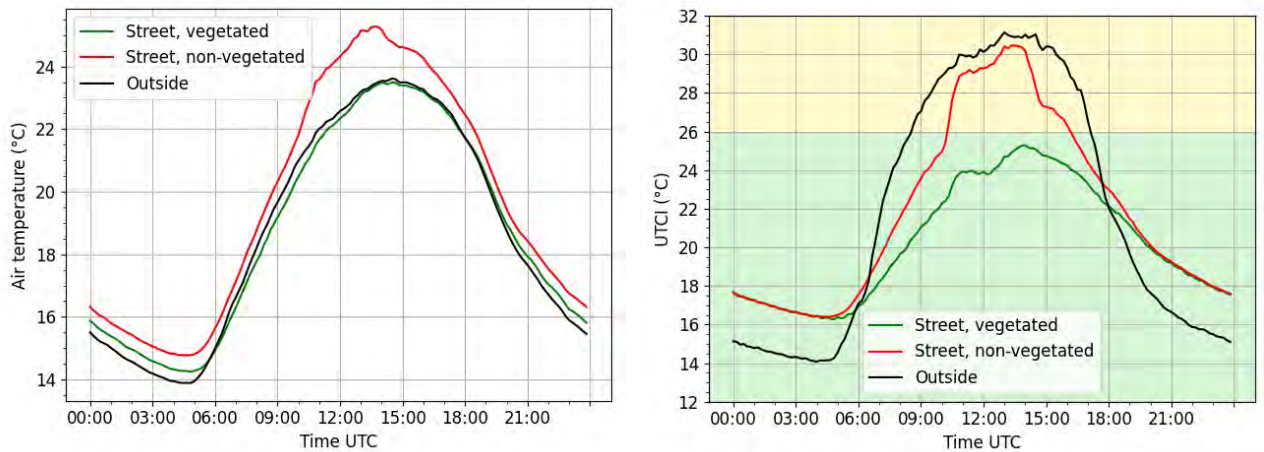
## 2. Results

### 2.1. Mean daily evolution of Air temperature and UTCI

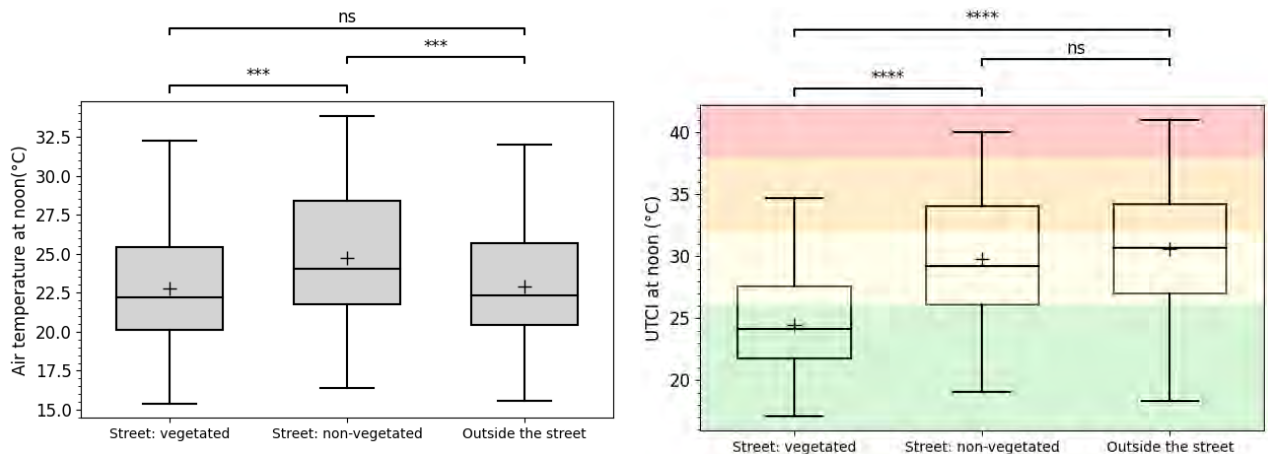
Overall the qualitative evolution of the average air temperature and UTCI shown in Figure 4 in the three modalities over the 120 days investigated is consistent with the findings of Mballo et al. (2021) conducted on a single sunny day, with differences in absolute values since all meteorological conditions are averaged here.



At night, the air temperature is higher in the street than in the outside environment, indicating an urban over-heating, especially in the non-vegetated zone. No effect of radiative trapping from the trees is visible. During daytime, the shadowing effect of the walls of our North-South oriented street is clearly visible in the morning and afternoon, with the UTCI being lower inside than outside the street. Around solar noon, the street does not benefit from the shadowing of the walls anymore, but the vegetated modality is shadowed by the tree crowns. The tree benefits are maximum at this period of the day, maintaining the street in the no-thermal stress zone, while moderate heat stress is experienced in both other modalities. This average evolution of street thermal stress is consistent with the findings of Coutts et al. (2016) over one summer month in Melbourne city.



**figure 4:** Mean daily evolution over 120 days of air temperature (left) and UTCI (right) in the vegetated and non-vegetated zones of the street at  $z=40\text{cm}$ , compared to outside of the street. Color bands on UTCI graph: green: no thermal stress (9-26 °C), yellow: moderate heat stress (26-32 °C).



**figure 5:** box-plot of air temperature (left) and UTCI (right) in the vegetated and non-vegetated zones of the street, and outside the street between 11h and 13h UTC. Kruskal-Wallis test ( $N=120$ ): ns:  $0.05 < p \leq 1.0$ ; \*\*:  $1.0e-3 < p \leq 1.0e-2$ ; \*\*\*:  $1.0e-4 < p \leq 1.0e-3$ ; \*\*\*\*:  $p \leq 1.0e-4$ . Color bands on UTCI graph: green: no thermal stress (9 to 26 °C); yellow: moderate heat stress (26- 32 °C); orange: strong heat stress (32-38 °C); red: very strong heat stress (38-46°C)

## 2.2. Analysis of air temperature and UTCI variability

As shown in figure 5, between 11h and 13h UTC (when maximum benefits were observed in section 2.1), the air temperature in the non-vegetated zone of the street ("NV") is significantly higher than in the outer environment ("Out") ( $\Delta T_{\text{NV-Out}} \in [0.6;3.9]$ , mean=1.8°C), but without significant difference

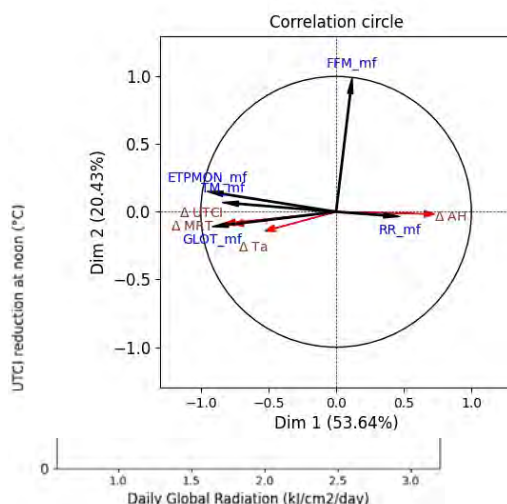
on UTCI. The trees ("V") significantly decrease the air temperature compared to the non-vegetated zone ("NV") of the street ( $\Delta T_{aV-NV} \in [-3.6;-0.7]$ , mean=-2°C) and improve thermal comfort ( $\Delta UTCI_{V-NV} \in [-9.2;-1.3]$ , mean= -5.3°C). The order of magnitude of the maximum benefits is consistent with the findings of Coutts et al. (2016) and Mballo et al. (2021). At solar noon, the vegetated zone is significantly more comfortable than both the non-vegetated zone and the outside environment, without a single day in 'very strong thermal stress' level (contrary to the two other zones). These findings confirm the strong benefit of urban trees on daytime microclimate, for a wide range of meteorological conditions.

## 2.2. Influence of meteorological conditions on trees' benefits

The influence of meteorological conditions on tree microclimate benefits at noon was investigated using a Principal Component Analysis (figure 7) on daily meteorological variables from Meteo-France weather station: global radiation ("GLO\_mf"), mean wind speed ("FFM\_mf"), mean air temperature ("TM\_mf"), precipitations ("RR\_mf"), and reference evapotranspiration ("ETPMON\_mf"). The microclimate and UTCI differences between 11h and 13h UTC between the non-vegetated and vegetated zones at z=40cm are then used as illustrative variables ( $\Delta UTCI$ ,  $\Delta T_a$ ,  $\Delta AH$ ,  $\Delta MRT$ ).

**figure 6:** UTCI reduction from the trees as a function of daily global radiation (N=120) and Leaf Area Index (LAI) (N=39)

The first component (Dim 1) is linked to global radiation, and the second component (Dim 2) is linked to wind speed. The third component (not shown here) is linked to precipitations. MRT and UTCI differences created by the trees are strongly correlated with daily global radiation, and there is very little impact of wind speed. For MRT, it is logical as this variable represents radiative exchanges to the human body, and for UTCI, it can be explained by its strong dependence on MRT (Kantor and Unger, 2011). However, in our experimental setup, the UTCI in both mineral and vegetated zones of the street are calculated from the same 3D sonic anemometer, which surely tends to minimize the influence of this factor on UTCI difference. The absolute humidity difference ( $\Delta AH$ ) between the non-vegetated and vegetated zones of the street is negatively correlated with global radiation, due to the effect of tree transpiration. For air temperature difference ( $\Delta T_a$ ), the correlation level in this plane is weak.



**figure 7:** PCA analysis (N=120) of daily meteorological conditions (blue, explanatory variables) and microclimate difference between the non-vegetated and vegetated zones of the street (red, illustrative variables)

The UTCI reduction by the trees at solar noon is now analyzed as a function of daily global radiation (figure 6), since the two variables are

strongly correlated. We find again the range of UTCI reduction at noon [1.3; 9.2] already mentioned in the previous section. A linear regression of the data shows it can be approximated by the relation:  $\Delta\text{UTCI}_{\text{NV-V}} = 2.76 \text{ GLO} + 0.0$ , with GLO the daily global radiation in  $\text{KJ}/\text{cm}^2/\text{day}$ , with  $R^2=0.75$ , and  $p < 10^{-4}$ . The 0 value of the intercept (which was not forced) indicates that the tree benefits become negligible in the absence of global radiation, as expected since shading and transpiration both require global radiation.

In an attempt to explain the remaining variability of UTCI, the LAI information was added on figure 6 on the 39 days when it was available. As it can be seen, a trend showing an increase of UTCI reduction with LAI is visible, but the range of LAI values is quite narrow. More frequent measurements of leaf surface areas over the whole growing period would be required to further investigate the influence of this variable.

## Conclusion

Microclimate data acquired over two summers in a reduced-scale canyon street for a wide range of meteorological conditions showed that well-watered trees significantly improve human thermal comfort in the street at midday. The UTCI reduction is strongly correlated to global radiation, and the level of benefit at noon can be predicted from daily global radiation using a linear regression of the data. It can reach up to  $9^\circ\text{C}$  under sunny conditions. As a next step of this study, the impact of leaf area index will be further investigated, and the influence of water-restriction will be addressed.

**Acknowledgment:** This work was funded by ADEME, Paris City, and ANRT. It was conducted in the framework of the regional programme "Objectif Végétal, Research, Education and Innovation in Pays de la Loire", supported by the French Region Pays de la Loire, Angers Loire Métropole and the European Regional Development Fund. We would like to thank for their participation in data acquisition: Melvin Manteau and Loli Maturana, interns in EPHor research unit, as well as Agathe Boukouya and Maxime Brindeau, interns in IRHS. The support of Phenotic platform and IRHS staff is also acknowledged. The nurseryman Jacques Briant provided the trees used in this study.

## Bibliography

- Bowler, D. E., Buyung-Ali, L., Knight, T. M., & Pullin, A. S. (2010). Urban greening to cool towns and cities: A systematic review of the empirical evidence. *Landscape and Urban Planning*, 97(3), 147–155. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.05.006>
- Bröde, P., Fiala, D., Błażejczyk, K., Holmér, I., Jendritzky, G., Kampmann, B., Tinz, B., & Havenith, G. (2012). Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, 56(3), 481–494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>
- Coutts, A. M., White, E. C., Tapper, N. J., Beringer, J., & Livesley, S. J. (2016). Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments. *Theoretical and Applied Climatology*, 124(1–2), 55–68. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1409-y>
- Kántor, N., & Unger, J. (2011). The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment—The mean radiant temperature. *Open Geosciences*, 3(1). <https://doi.org/10.2478/s13533-011-0010-x>
- Mballo, S., Herpin, S., Manteau, M., Demotes-Mainard, S., & Bournet, P. E. (2021). Impact of well-watered trees on the microclimate inside a canyon street scale model in outdoor environment. *Urban Climate*, 37, 100844. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100844>
- Shashua-Bar, L., & Hoffman, M. E. (2000). *Vegetation as a climatic component in the design of an urban street An empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees*. 15.

## MODÉLISATION CLIMATIQUE RÉGIONALE À HAUTE RÉOLUTION POUR L'ÉTUDE DU CLIMAT URBAIN : ÉVALUATION DU MODÈLE CNRM-AROME SUR 12 VILLES FRANÇAISES

Yohanna MICHAU <sup>1</sup>, Aude LEMONSU <sup>1</sup>, Philippe LUCAS-PICHER <sup>1,2</sup>, Cécile CAILLAUD <sup>1</sup>,  
Antoinette ALIAS <sup>1</sup>

<sup>1</sup> CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, France, [yohanna.michau@meteo.fr](mailto:yohanna.michau@meteo.fr)

<sup>2</sup> Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère, Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada

**Résumé :** Les villes sont le siège d'un microclimat spécifique dont l'évolution, couplée aux changements globaux, pourrait notamment exacerber les problématiques déjà existantes de stress thermique des populations urbaines. Ces évolutions restent mal connues car les effets urbains sont peu pris en compte par les modèles de climat actuels. Cette étude analyse le climat urbain simulé sur une échelle de temps climatologique pour 12 villes situées en France métropolitaine. Pour cela, le modèle régional de climat à convection profonde résolue (CP-RCM, Convection-Permitting Regional Climate Model) CNRM-AROME couplé à TEB a été utilisé à 2.5 km de résolution horizontale afin d'évaluer l'habileté du modèle à reproduire des champs atmosphériques et à simuler l'îlot de chaleur urbain nocturne (ICUN). Le modèle présente certains biais systématiques sur les forçages atmosphériques comme le rayonnement solaire incident et les précipitations, qui peuvent engendrer des biais sur les températures en surface. Néanmoins, CNRM-AROME simule de manière réaliste la variabilité saisonnière et les intensités minimales et maximales de l'ICUN sur la plupart des villes, et pourrait donc être appliqué désormais en climat futur.

**Mots-Clés :** Modélisation climatique à haute résolution, Climat urbain, Îlot de chaleur.

**Abstract : High-resolution regional climate modelling for urban climate studies: evaluation of the CNRM-AROME model on 12 French cities** - Cities have a specific microclimate whose evolution, coupled with global changes, involves several uncertainties. In particular, it could exacerbate problems of thermal stress of urban populations. These evolutions are little known because the urban effects are poorly taken into account by the current climate models. This study analyzes the urban climate simulated by a model on 12 cities located in metropolitan France. For this purpose, the Convection-permitting Regional Climate Model (CP-RCM) CNRM-AROME coupled to TEB was used at 2.5 km resolution to evaluate the model's ability to reproduce atmospheric fields and to simulate the nighttime Urban Heat Island (UHIN). The model has a few systematic biases on atmospheric forcings such as incident solar radiation and precipitations, which can lead to biases on surface temperatures. However, CNRM-AROME realistically simulates seasonal variability and minimum and maximum intensities of the UHIN over most cities, and could be applied in future climate.

**Keywords :** High-resolution climate modelling, Urban climate, Heat island.

### Introduction

La spécificité du domaine urbain provient de sa morphologie tridimensionnelle complexe et des matériaux artificiels qui le composent. Les constructions et infrastructures urbaines constituent des obstacles en surface qui perturbent d'une part les écoulements d'air et les échanges turbulents, et d'autre part l'interception du rayonnement incident et les interactions radiatives entre les différents éléments de l'environnement urbain (Oke et al. 2017). Ces processus donnent naissance à un microclimat spécifique au domaine urbain, caractérisé notamment par l'apparition d'îlots de Chaleur Urbain (ICU). Le climat urbain diffère selon les caractéristiques des villes (taille, densité urbaine, caractéristiques architecturales, population etc.), les contextes géographiques et les conditions atmosphériques. Son évolution dans le temps est conditionnée par de multiples facteurs sociétaux,

économiques et environnementaux (croissance démographique, modification de la ville et du bâti, changements du mode de vie et d'usage de l'énergie, etc.) et est incertaine sous l'effet du changement climatique. L'étude combinée du climat urbain local et des effets régionaux liés au changement climatique requiert des outils de modélisation adaptés permettant le couplage des processus. Les modèles régionaux de climat à convection profonde résolue (CP-RCM, Convection-Permitting Regional Climate Model) sont particulièrement intéressants pour simuler les zones urbaines (Shu et al., 2021), car leur haute résolution leur permet de simuler explicitement plusieurs phénomènes de petites échelles comme les ICU. Dans ce cas, en raison des particularités de l'environnement urbain, la simulation du climat urbain dépend du couplage du modèle atmosphérique avec un modèle de canopée urbaine (UCM, Urban Canopy Model) comme le Town Energy Balance (TEB) (Masson, 2000).

Dans cette étude, le CP-RCM CNRM-AROME couplé à TEB a été utilisé à 2.5 km de résolution sur un domaine qui couvre la France sur la période 2000-2018. Ce domaine est idéal pour étudier le climat urbain d'un ensemble de villes de France métropolitaine. Ainsi, 12 grandes et moyennes villes ont été sélectionnées dans 4 zones climatiques : le climat continental (Dijon, Nancy et Strasbourg), le climat méditerranéen (Montpellier, Nice et Nîmes), le climat océanique (Bordeaux, Lille, Nantes et Rennes) et le climat semi-océanique (Paris et Toulouse).

L'objectif est (1) d'évaluer la performance globale du modèle afin d'avoir un premier aperçu des capacités de CNRM-AROME à reproduire les champs atmosphériques et, sans doute, mieux comprendre les résultats obtenus dans les analyses suivantes, et (2) d'évaluer la capacité du modèle à simuler les ICU nocturnes (ICUN) par rapport aux observations.

## 1. Matériels et méthodes

### 1.1. Configuration des simulations climatiques

CNRM-AROME est un modèle non-hydrostatique à résolution kilométrique développé par Météo-France pour la prévision numérique du temps (Seity et al., 2011). Il est maintenant utilisé en mode climat à 2.5 km de résolution horizontale (Caillaud et al., 2021). Dans le cadre de cette étude, CNRM-AROME a été utilisé sur le domaine Nord-Ouest de l'Europe comptant  $720 \times 900$  points de grille. L'atmosphère est discrétisée selon 60 niveaux verticaux, ces derniers étant plus concentrés près de la surface. Les simulations ont été produites pour la période allant du 01 janvier 2000 au 31 décembre 2018 (après 2 ans de spin-up) en suivant une configuration dite d'évaluation. Le modèle est forcé à ses frontières latérales par le modèle de climat régional CNRM-ALADIN de résolution horizontale 12.5 km, lui-même contraint par les réanalyses globales ERA-Interim de résolution horizontale 80 km.

CNRM-AROME est couplé à la plateforme SURFEX (Masson et al., 2013) pour la modélisation des surfaces continentales et leurs interactions avec l'atmosphère. Chaque point de grille du domaine de simulation est décrit comme la combinaison de quatre types de couverts : les surfaces naturelles continentales, les zones urbaines, les eaux continentales (lacs, fleuves...) et les eaux océaniques (mer ou océan). Les échanges entre la surface et l'atmosphère de chaque type de couverts sont calculés indépendamment par différents modèles (dont TEB, Masson (2000) et ISBA 3-L, Boone et al., 1999). La description de la surface s'appuie sur la base de données globale d'occupation et d'usage des sols ECOCLIMAP I (Champeaux et al. 2003).



## 1.2. Longues séries d'observations météorologiques

Le produit ANASTASIA est un jeu de données sur grille de température minimale (TN) et maximale (TX) à résolution horizontale kilométrique sur la France métropolitaine (Besson et al., 2019) couvrant la période 1947-2016. Les données quotidiennes sont déterminées à l'aide d'une méthode de régression-krigeage (Hengl et al., 2007) combinant des TN et TX journalières enregistrées par les stations du réseau Météo-France et une climatologie mensuelle.

COMEPHORE est un jeu de données composé par la fusion des observations des radars de précipitation et des mesures des pluviomètres du réseau météorologique français. Il fournit des précipitations cumulées horaires sur grille à une résolution horizontale de 1 km pour la période 1997-2018.

Les données de stations du réseau GEBA (Global Energy Balance Archive) produites par l'ETH Zurich en Suisse (Wild et al., 2017) et les stations de surface du réseau Météo-France fournissent de longues séries temporelles du rayonnement solaire entrant mensuel provenant de stations à la surface de la Terre.

Enfin les données météorologiques du réseau opérationnel de Météo-France ont été utilisées pour compléter l'évaluation des simulations CNRM-AROME. Pour chaque ville étudiée, deux (ou trois) stations ont été sélectionnées afin de disposer systématiquement de deux longues séries de températures quotidiennes, l'une dans la ville (station urbaine) et l'autre dans l'environnement naturel proche (station rurale). Cette méthodologie vise à évaluer l'îlot de chaleur urbain, c'est-à-dire la différence de température entre la ville et la campagne, sur une échelle de temps climatologique.

## 2. Évaluation générale de CNRM-AROME

Le climat urbain, et en particulier l'ICU, évolue quotidiennement en fonction des conditions météorologiques locales (ensoleillement, vent, précipitation, etc.). La qualité de la simulation de l'ICU par CNRM-AROME dépend, entre autres facteurs, de sa capacité à simuler des conditions climatiques réalistes. La première étape de l'évaluation générale se concentre donc sur l'analyse de la précipitation, du rayonnement solaire incident et de la température, dont les résultats sont disponibles dans le Tableau 1.

**Tableau 1.** Biais moyens saisonniers calculés entre le modèle CNRM-AROME et la base de données COMEPHORE (pour les précipitations, **PR**, en %), les observations issues des stations GEBA ou Météo-France (pour le rayonnement solaire incident, **GLO**, en %), la base de données ANASTASIA (pour la température minimale et maximale, **TN** et **TX**, en °C) sur la période 2000-2018 pour PR et GLO ou 2000-2016 pour TN et TX.

Biais	DJF				MAM				JJA				SON			
	PR (%)	GLO (%)	TN (°C)	TX (°C)	PR (%)	GLO (%)	TN (°C)	TX (°C)	PR (%)	GLO (%)	TN (°C)	TX (°C)	PR (%)	GLO (%)	TN (°C)	TX (°C)
BORDEAUX	+20.3	+13.6	+0.9	-0.7	+31.0	+9.8	+0.8	-1.9	-30.7	+14.4	+2.3	+1.0	+7.6	+15.0	+1.6	0.0
LILLE	+32.9	+10.9	+0.3	-0.4	+54.7	+5.6	-0.2	-1.5	+1.1	+14.3	+0.2	+0.0	+11.8	+13.0	-0.1	-0.2
NANTES	+27.6	+6.7	+0.5	-0.7	+35.5	+3.9	-0.0	-2.0	-16.1	+12.7	+0.8	+0.5	+12.5	+12.2	+0.4	-0.4
RENNES	+26.2	+6.7	+0.2	-0.7	+43.6	+6.9	-0.1	-1.8	-10.3	+14.0	+0.4	+0.3	+14.4	+10.9	+0.1	-0.4
DIJON	+24.3	+30.7	+0.6	-0.4	+35.1	+12.5	+0.5	-1.8	-5.5	+16.3	+1.8	+0.6	+0.58	+21.8	+0.9	+0.3
NANCY	+24.4	+27.1	+0.8	-0.3	+46.1	+14.8	+0.7	-1.7	+4.4	+15.9	+1.7	+0.2	-1.4	+24.7	+0.8	+0.2
STRASBOURG	+63.5	+35.5	-0.0	-0.5	+72.9	+17.0	-0.1	-2.0	+22.3	+16.7	+1.3	-0.1	+21.4	+27.2	+0.5	0.0
MONTPELLIER	-11.3	+12.0	+2.6	-0.6	+15.0	+10.1	+1.9	-2.0	-44.0	+8.9	+3.3	-0.6	+1.8	+6.7	+2.4	-0.9
NICE	-1.7	+17.7	+3.6	+0.2	+18.8	+11.2	+2.5	-1.2	-21.6	+6.3	+3.5	-0.6	+0.1	+10.6	+3.3	-0.1
NÎMES	-12.1	+11.5	+1.4	-0.8	+13.6	+10.1	+1.2	-1.4	-45.5	+9.1	+3.1	+1.0	-2.0	+7.0	+1.6	-0.6
PARIS	+28.7	+22.8	+0.5	-0.6	+52.8	+6.0	+0.2	-1.8	+2.3	+15.0	+1.2	+0.1	+10.7	+17.0	+0.5	-0.1
TOULOUSE	+21.7	+13.7	+1.1	-0.6	+37.9	+9.3	+0.3	-1.8	-20.8	+16.1	+1.8	+1.8	+14.8	+18.4	+1.0	-0.0

Les scores sur la précipitation (PR) soulignent la variabilité saisonnière et géographique du modèle. De manière générale, pour les villes océaniques, semi-océaniques et continentales, la précipitation est surestimée par CNRM-AROME en DJF (hiver, de +20 à +33 %), MAM (printemps, de +31 à +56 %) et SON (automne, de +15 % maximum), tandis qu'elle est sous-estimée en JJA (été, de -21 % maximum).

Les ordres de grandeur donnés ici n'incluent pas les résultats de Strasbourg, qui montrent des performances locales particulièrement dégradées avec une surestimation de la précipitation tout au long de l'année de +21 à +73 %. Pour les villes méditerranéennes qui connaissent une climatologie régionale particulière en matière de précipitation, CNRM-AROME présente des performances différentes avec une tendance à sous-estimer les précipitations déjà faibles. En DJF et surtout en JJA, un déficit de précipitations est constaté (jusqu'à -45 % pour Nîmes en JJA). À noter que Bordeaux et Toulouse, situées dans la moitié sud de la France, présentent des résultats similaires avec respectivement -30.7 et -20.8 % en JJA. Enfin, sur la zone méditerranéennes, les précipitations simulées sont très proches de celles observées en SON. Elles restent surestimées en MAM comme sur le reste des villes, mais avec des biais beaucoup plus faibles (supérieurs à +20 %).

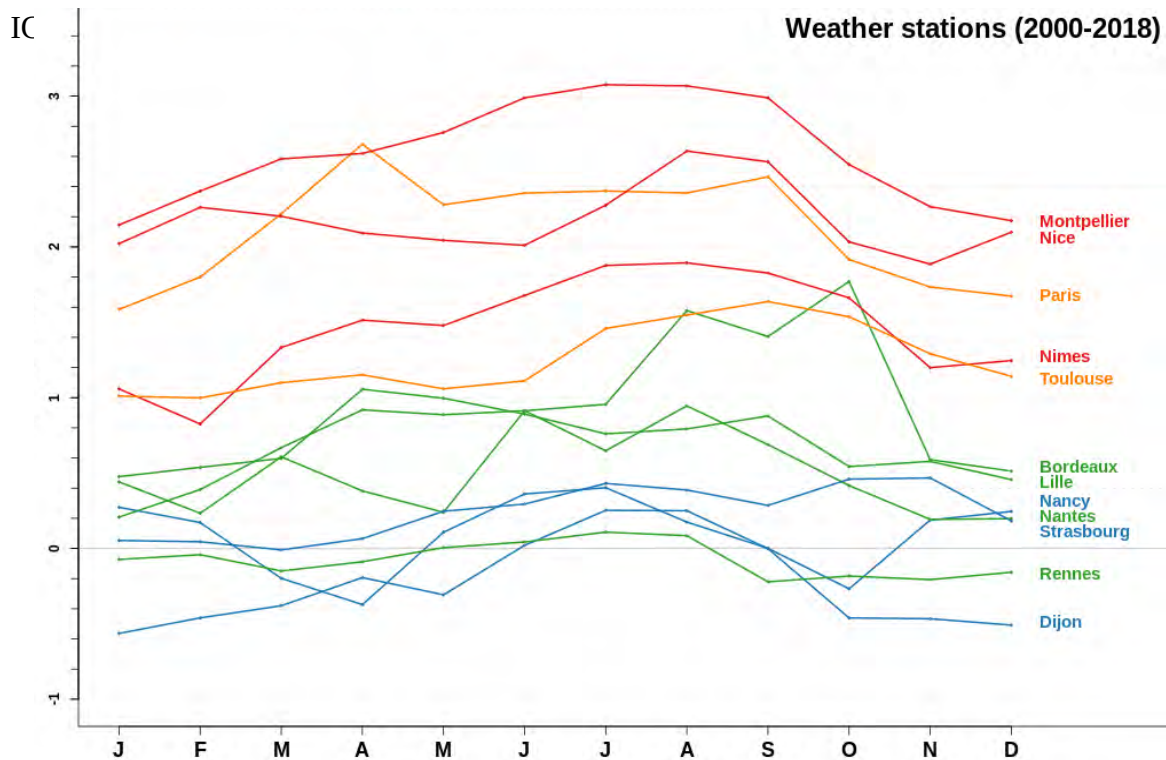
CNRM-AROME surestime le rayonnement solaire incident pour toutes les saisons et dans l'ensemble des villes. Les biais les plus importants sont calculés pour les villes continentales (Dijon, Nancy et Strasbourg). Le rayonnement solaire incident est fortement surestimé par le modèle en DJF (de +27 à +36 %) et en SON (de +22 à +27 %), et plus modérément en MAM et JJA (de +13 à +17 %). Pour les villes océaniques, les biais varient de +4 à +15 %, de +6 à +23% pour les villes semi-océaniques et de +6 à +18 % pour les villes méditerranéennes.

Le modèle CNRM-AROME reproduit un TN saisonnier réaliste dans les villes du nord-ouest, en particulier en MAM et SON. À Lille et à Rennes, les biais moyens sont inférieurs à  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  à toutes les saisons. Le modèle fonctionne bien pour Nantes et Paris, sauf en JJA. Il surestime la TN dans les autres villes à toutes les saisons, mais avec une variabilité géographique. Les villes situées sur la diagonale Strasbourg-Toulouse ont des biais inférieurs à  $1^{\circ}\text{C}$  en DJF, MAM, SON, et des biais plus élevés en JJA (entre + 1.3 et + 1.8 $^{\circ}\text{C}$ ). Les biais sont maximaux pour Bordeaux, Montpellier, Nice et Nîmes (supérieurs à + 0.5 $^{\circ}\text{C}$  pour toutes les saisons). Cette surestimation des TN simulées par CNRM-AROME est particulièrement forte en été où les biais dépassent  $3^{\circ}\text{C}$  dans les villes méditerranéennes. En ce qui concerne les TX, les villes du sud comme Bordeaux, Dijon, Nîmes, et Toulouse, présentent des biais forts en été (entre + 0.6 et + 1.8 $^{\circ}\text{C}$ ). Autrement, le modèle CNRM-AROME a tendance à sous-estimer les TX pour les autres saisons. Ces biais froids sont très faibles en SON, un peu plus forts en hiver (inférieurs à - 1 $^{\circ}\text{C}$  pour toutes les villes) et en MAM (entre - 1.2 et - 2 $^{\circ}\text{C}$ ).

### 3. Modélisation des îlots de chaleur urbains

Cette étape vise à évaluer la capacité du modèle à simuler spécifiquement le climat urbain pour chaque ville. Une attention particulière est accordée à l'ICU nocturne (ICUN), dont l'intensité est fortement déterminée à la fois par les particularités de la ville elle-même (taille, densité de construction, matériaux, etc.) et par les conditions atmosphériques du jour précédent.

La figure 1 montre les moyennes mensuelles des ICUN calculées à partir des 19 années de données.



**figure 1.** ICUN nocturnes (en °C) sur la période 2000-2018 provenant des stations météorologiques rurales et urbaines. Les couleurs définissent chaque zone climatique : vert pour Océanique, orange pour Semi-Océanique, bleu pour Continentale et rouge pour Méditerranéenne.

Une dispersion des intensités des ICUN d'environ 3°C est constatée entre les 12 villes étudiées, de -1°C à +2.2°C pour les ICUN d'hiver et de 0 à +3.1°C pour les ICUN d'été. Le cycle annuel diffère d'une ville à l'autre, mais présente des intensités maximales entre avril et septembre et minimales entre décembre et janvier. Les similitudes entre les ICUN de certaines villes sont soulignées en relation avec les zones climatiques auxquelles elles appartiennent.

Les villes méditerranéennes présentent les ICUN les plus fortes peu importe la saison, mais avec une variabilité saisonnière se traduisant par des intensités maximales d'ICUN en JJA (+3.0, +2.6, +1.8°C pour Montpellier, Nice et Nîmes respectivement) et minimales en DJF (autour de +1 et +2°C). Les villes océaniques (Lille, Nantes et Rennes) présentent des ICUN très comparables, avec à la fois de faibles intensités et une variabilité saisonnière. Les intensités sont autour de 0°C à Rennes et autour de +0.7°C pour Lille et Nantes sans jamais dépasser +1°C. Bordeaux, également classée en tant que ville océanique présente des ICUN sensiblement différents, principalement dues à des valeurs plus élevées entre août et octobre (jusqu'à +1.7°C en octobre). Les villes continentales de Dijon, Nancy et Strasbourg ont les ICUN les plus faibles, variant entre -0.5 et +0.5°C tout au long de l'année. Dans les deux villes semi-océaniques (Paris et Toulouse), les intensités et les variabilités saisonnières des ICUN sont comparables à celles des villes méditerranéennes.

La figure 2 montre les moyennes mensuelles des ICUN simulés par CNRM-AROME sur la période d'étude.

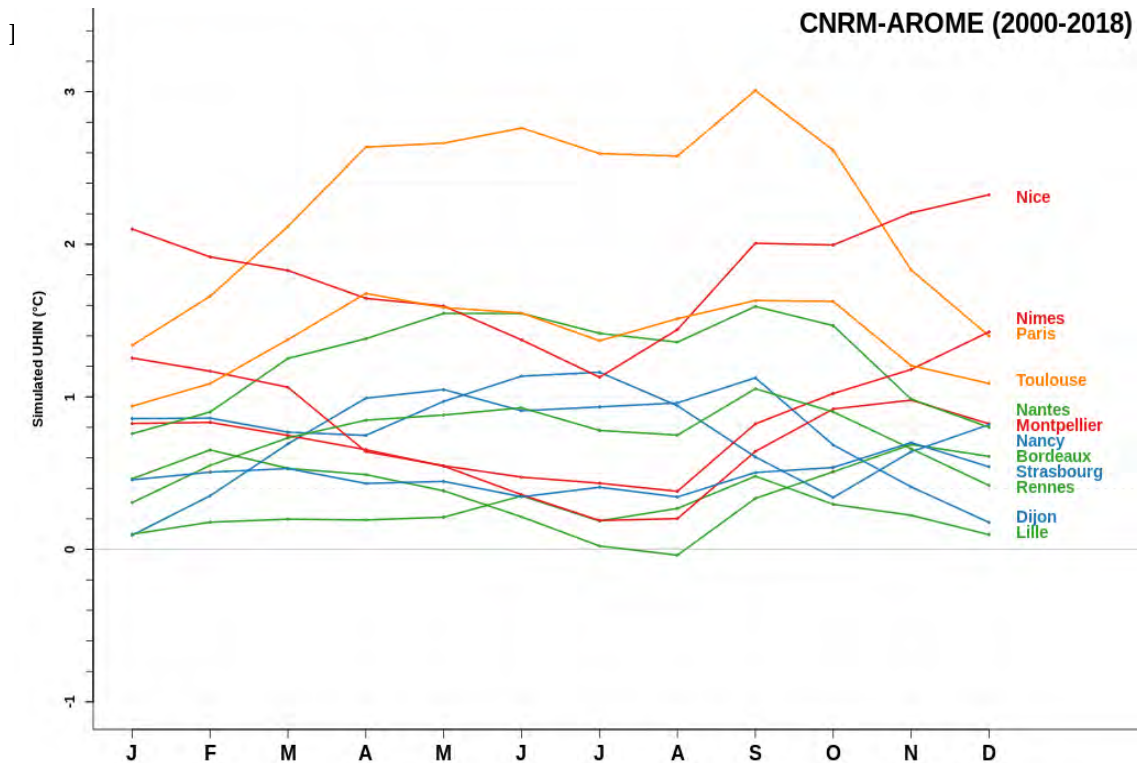


figure 2. ICU

nocturnes (en °C) sur la période 2000-2018 simulés par CNRM-AROME au point de grille correspondant aux stations de surface rurales et urbaines. Les couleurs définissent chaque zone climatique : vert pour OCEANIQUE, orange pour SEMI-OCEANIQUE, bleu pour CONTINENTAL et rouge pour MÉDITERRANÉEN.

CNRM-AROME simule des ICUN réalistes peu importe la saison pour les villes soumises au climat semi-océanique (Toulouse et Paris) avec des biais inférieurs à  $\pm 0.5^\circ\text{C}$ . À Dijon, Nancy et Strasbourg, le modèle surestime l'ICUN quel que soit la saison, même si la saisonnalité est justement reproduite. Ces résultats sont cohérents avec les éléments mis en avant dans l'évaluation générale. La surestimation des précipitations autour de ces villes peut engendrer un rafraîchissement trop important du milieu rural dans le modèle par l'évaporation des sols et la transpiration de la végétation. D'autre part, la surestimation du rayonnement solaire incident peut favoriser un réchauffement plus important en ville. À l'inverse pour les villes situées sur la côte méditerranéenne, CNRM-AROME sous-estime l'ICUN et présente en particulier un affaïssement de son intensité en été. Cette région présente la particularité d'un déficit en précipitation en été combiné à une surestimation du rayonnement solaire incident. Ces éléments pourraient entraîner un assèchement important des sols autour des villes et ainsi expliquer l'affaiblissement de l'ICUN à cette période.

## Conclusion

Les simulations du modèle CNRM-AROME réalisées à 2.5 km de résolution horizontale sur le Nord-Ouest de l'Europe pour la période de 2000 à 2018 ont permis de produire une analyse multi-villes originale du climat urbain en France métropolitaine. L'étude visait à évaluer la capacité du modèle à simuler les particularités du climat urbain de plusieurs villes françaises dans des contextes climatiques et géographiques contrastés.

L'évaluation générale a porté sur la capacité de CNRM-AROME à simuler des conditions atmosphériques réalistes à proximité des villes, dont dépend l'ICUN. Les performances du modèle pour la simulation des précipitations sont variables géographiquement et saisonnièrement. Elles sont surestimées en DJF, en MAM et dans une moindre mesure en SON, sauf dans les villes

méditerranéennes, et sous-estimées en JJA. Les analyses soulignent une surestimation systématique du rayonnement solaire incident, quelles que soient la saison et le contexte climatique. En réponse, CNRM-AROME tend à surestimer les températures minimales et à sous-estimer les températures maximales, bien que l'on constate des variations géographiques et saisonnières. Des biais positifs plus forts ont été trouvés en TN en JJA sur la côte Méditerranéenne, qui pourraient être expliqués à la fois par la surestimation du rayonnement entrant et la sous-estimation des précipitations.

La deuxième étape de l'évaluation s'est concentrée sur les aspects urbains, et particulièrement sur l'évaluation des ICUN simulés, d'un point de vue climatologique, par CNRM-AROME pour les 12 villes sélectionnées. Finalement, l'analyse a montré que le modèle simule des ICUN assez proches des observations, surtout à Paris et Toulouse. Les ICU nocturnes sont surestimés dans les villes continentales, sous-estimés sur le domaine océanique et également sur la côte Méditerranéenne. Le choix des stations utilisées pour l'analyse peut influencer les résultats obtenus et une méthode alternative est actuellement en cours d'évaluation. D'autre part, ces travaux seront prochainement étendus en mode scénario pour étudier l'évolution du climat urbain des villes françaises dans un contexte de changement climatique.

## Bibliographie

Besson F., Dubuisson B., Etchevers P., Gibelin A-L., Lassegues P., Schneider M. and Vincendon B., 2019 : Climate monitoring and heat and cold waves detection over France using a new spatialization of daily temperature extremes from 1947 to present. *Advances in Science and Research, Copernicus GmbH*, **16**, 149-156.

Boone, A., Calvet J-C. and Noilhan J., 1999 : Inclusion of a third soil layer in a land surface scheme using the force-restore method, *Journal of Applied Meteorology*, vol. **38**, n o 11, doi : 10.1175/1520-0450(1999)038<1611, p. 1611-1630.

Caillaud, C., Somot S., Alias A., Bernard-Bouissières I., Fumière Q., Laurantin O., Seity Y. and Ducrocq V., 2021 : Modelling mediterranean heavy precipitation events at climate scale, an object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model , *Climate Dynamics*, vol. 56, no. **5-6**, doi :10.1007/s00382-020-05558-y, p. 1717-1752.

Champeaux J. L., Masson V., and Chauvin F., 2005 : ECOCLIMAP, a global database of land surface parameters at 1 km resolution , *Meteorological Applications*, vol. 12, n o **1**, doi : 10.1017/s1350482705001519, p. 29-32.

Hengl T., Heuvelink G.B.M and Rossiter D.G., 2007 : About regression-kriging, from equations to case studies, *Comput. Geosci.*, 33, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.05.001>, p. 1301-1315.

Masson V., 2000 : A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 94, no. **3**, doi :10.1023/a :1002463829265, p. 357-397.

Masson V., and coauthors, 2013 : The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes , *Geoscientific Model Development*, vol. 6, no. **4**, doi :10.5194/gmd-6-929-2013, p. 929-960.

Oke T.R., 2017 : Urban climates. *Cambridge University Press*.

Seity Y., Brousseau P., Malardel S., Hello G., Bénard P., Bouttier F., Lac C. and Masson V., 2011 : The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, vol. 139, no. **3**, doi :10.1175/2010mwr3425.1, p. 976-991.

Shu C., Gaur A., Wang L., Bartko M., Laouadi A., Ji L. and Lacasse M., 2021 : Added value of convection permitting climate modelling in urban overheating assesments. *Building and Environment, Elsevier BV*, 207, 108415.

Wild, M., A. Ohmura, C. Schär, G. Müller, D. Folini, M. Schwarz, M. Z. Hakuba et A. Sanchez- Lorenzo. 2017 : The global energy balance archive (GEBA) version 2017, a database for worldwide measured surface energy fluxes , *Earth System Science Data*, vol. 9, n o **2**, doi : 10.5194/essd-9-601-2017, p. 601-613.



## LES BRISES DE MER ET L'ÎLOT DE CHALEUR À FLORIANÓPOLIS – BRÉSIL

Geisa ROCHA<sup>1</sup>, Vincent DUBREUIL<sup>2</sup>, Francisco MENDONÇA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Laboclima, UFPR, Curitiba, Brésil, geisarochageo@gmail.com

<sup>2</sup> LETG-COSTEL, UMR 6554 CNRS, Université Rennes 2, France, vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr

<sup>3</sup> Laboclima, UFPR, Curitiba, Brésil, chico@ufpr.br

**Résumé :** Cet article étudie la relation entre les vents et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU) dans l'agglomération de Florianópolis, sur la côte sud du Brésil. L'ICU a été mesuré au cours d'une année (d'août 2018 à juillet 2019) à partir de stations météorologiques et de capteurs de température. Même s'il s'agit d'une région à vents constants, les résultats montrent que les brises marines sont plus intenses et rendent difficile la formation de l'ICU. Au contraire, les vents d'ouest d'intensité plus faible ont tendance à favoriser la formation d'ICU de magnitudes plus élevées.

**Mots-Clés :** îlot de chaleur urbain ; ville côtière ; brise de mer ; Brésil.

**Abstract:** This article studies the relationship between winds and the intensity of the urban heat island (UHI) in the agglomeration of Florianópolis, on the south coast of Brazil. The UHI was measured over one year (August 2018 to July 2019) from weather stations and temperature sensors. Even though it is a region with constant winds, the results show that the sea breezes are more intense and make it difficult for the ICU to form. On the contrary, westerly winds of lower intensity tend to favor the formation of ICUs of higher magnitudes.

**Keywords:** urban heat island; coastal town ; sea breeze ; Brazil.

### Introduction

Ce travail étudie l'agglomération de Florianópolis, dans l'État de Santa Catarina, située au sud du Brésil (figure 1). L'environnement est littoral, avec une grande partie du territoire située sur une île (figure 1), la région compte environ 1 million d'habitants, avec une augmentation significative en été en lien avec les activités touristiques.

Le climat de la région est de type subtropical de l'hémisphère sud, classé comme Cfa selon Koppen (Dubreuil *et al.*, 2018). Malgré sa position côtière exposée au flux océanique, la présence d'un îlot de chaleur urbain supérieur à 6°C a déjà été observée dans des travaux antérieurs (Rocha *et al.*, 2020, 2021). À l'instar d'autres villes insulaires ou proches de la mer, la rugosité du tissu urbain interfère avec les flux des vents et des systèmes de brises, ce qui peut intensifier ou atténuer l'ICU (Papanastasiou *et al.*, 2010 ; Anjos, 2017).

Les systèmes atmosphériques qui agissent dans la région d'étude ont une dynamique et une saisonnalité différentes, reflétant la variabilité des vents. De plus, les vents synoptiques sont également modifiés par les caractéristiques physiques locales de l'environnement, telles que l'orographie, la rugosité du sol et la proximité de la mer, qui provoquent la dynamique des brises. L'urbanisation et les types de construction sont également des aspects à considérer, car les vents peuvent varier en direction et devenir plus ou moins intenses selon les formes urbaines.

Dans ce type d'environnement, il faut également tenir compte les brises de mer et de terre qui sont des vents locaux qui constituent la circulation locale dans les bas niveaux de l'atmosphère. Ce phénomène est dû à la différence de comportement de surface entre la mer et la terre, qui, lorsqu'elles sont exposées à la même quantité de rayonnement solaire, provoque un réchauffement plus important de la zone continentale au détriment de la masse d'eau (Mendonça et Dani-Oliveira, 2007). Le différentiel thermique génère un gradient de pression qui permet à un flux de s'établir de la mer vers la terre.

Dans ce contexte, le but de cet article est d'étudier la relation entre la vitesse et la direction du vent avec l'ICU, afin d'identifier les flux qui favorisent la formation d'ICU de plus haute intensité, ainsi que la période au cours de laquelle les ICU se produisent.

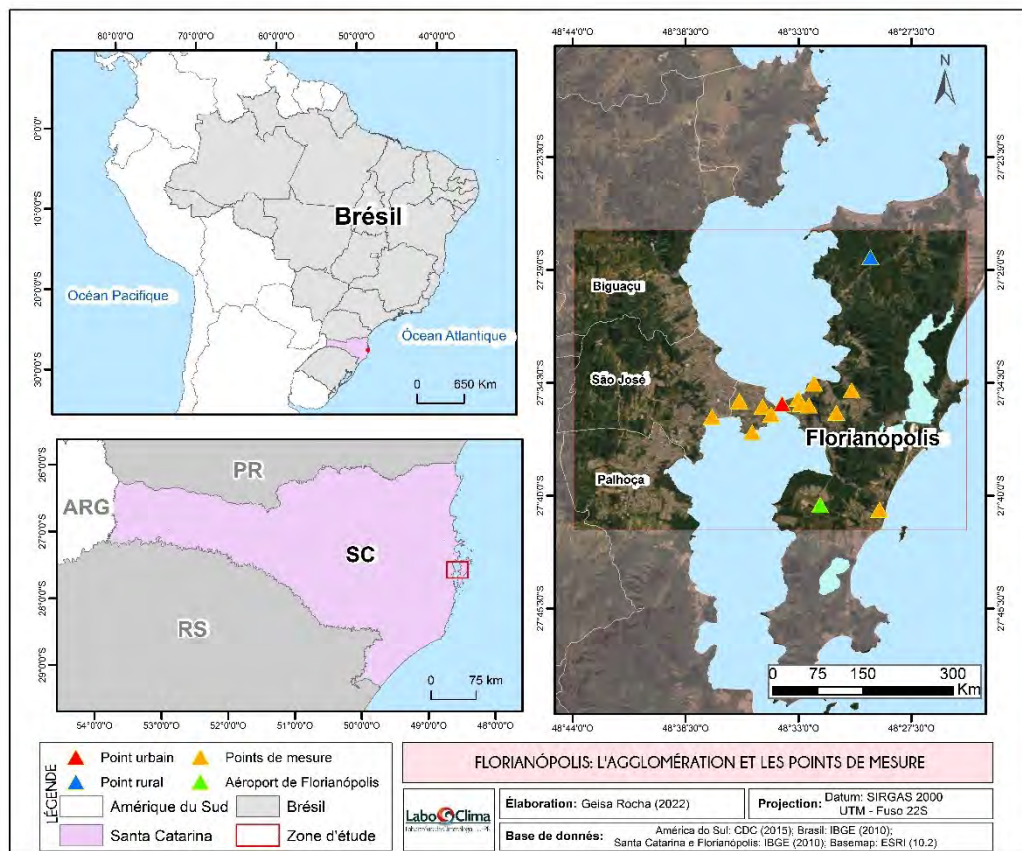


figure 1. Localisation de la zone d'étude et des points de mesures météorologiques.

## 1. Données et méthodes

Un suivi des variables météorologiques a été effectué sur la période entre août 2018 et juillet 2019. Au total, il y avait 15 points de suivi de l'ICU, composés de six stations automatiques Davis Vue et cinq capteurs TinyTag, en plus des stations existantes appartenant à des organismes institutionnels (figure 1). Cinq points de mesure sont situés sur le continent et dix dans la partie insulaire de l'agglomération.

Pour déterminer l'intensité de l'ICU, deux stations de référence ont été choisies, l'une insérée dans un environnement majoritairement urbain (figure 1, en rouge) et l'autre en milieu rural (figure 1, en bleu) en tenant compte des facteurs locaux qui interfèrent avec le climat local (Rocha *et al.*, 2020, 2021). Les températures minimales journalières et horaires du point de référence rural ont été soustraites à celles du point urbain, c'est-à-dire :  $\Delta T = T_n \text{ Urbain} - T_n \text{ Rural}$ . L'échelle d'intensité ICU définie par Fernández García (1996) a été utilisée (tableau 1).

Tableau 1. Classification de l'intensité de l'ICU.

Classe	Intervalle d'intensité (°C)
Faible	0 à 2°C
Moyenne	2 à 4°C
Forte	4 à 6°C
Très forte	> 6°C

Pour les données de vent, la station météorologique de l'aéroport de Florianópolis (figure 1) a été utilisée car cette station est la plus éloignée des principaux obstacles qui pourraient modifier les flux de vent. Les données horaires utilisées sont les bulletins METAR avec la direction en degrés et la vitesse du vent convertie de nœuds (kt) en m/s.

Oke et Hannell (1970) ont proposé une équation pour calculer la vitesse critique du vent, c'est-à-dire la vitesse à partir de laquelle l'intensité de l'ICU diminuerait de façon significative. Pour la ville de Vancouver (Canada), par exemple, Oke (1976) a trouvé que cette valeur était d'environ 9 m/s. La vitesse critique du vent pour la zone d'étude a été calculée selon l'équation proposée par Oke et Hannell (1970) :

$$V_{cv} = 3,4 * \log P - 11,7$$

Où :  $V_{cv}$  est vitesse critique du vent ; P est la population de la zone d'étude, ici de 971 621 habitants, qui est l'estimation de la population en 2018 faite par l'Institut brésilien de géographie et de statistique. Pour la zone d'étude, la valeur de  $V_{cv}$  est donc de 8,8 m/s, valeur qui a été utilisée par la suite de l'étude comme seuil de vent fort.

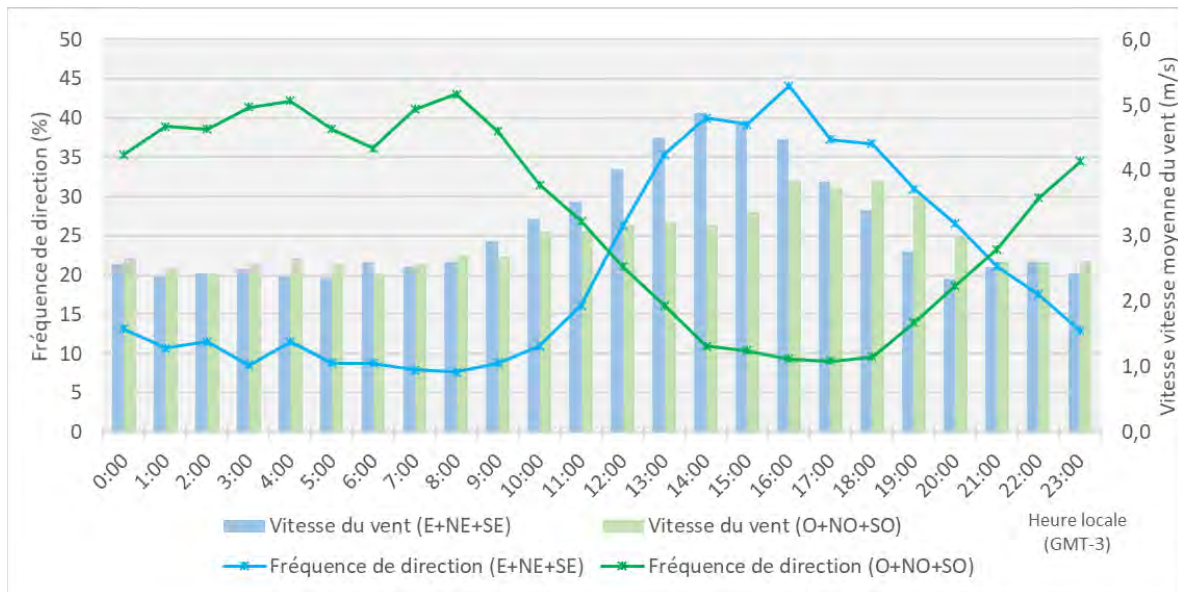
Considérant la localisation de la zone d'étude, côtière et insulaire, l'analyse des brises a été réalisée sur la base des flux, avec les données de l'aéroport. Nous avons considéré le regroupement des flux venant du quadrant est (du sud-est au nord-est) comme brise de mer et de l'ouest (du sud-ouest au nord-ouest) comme brise de terre.

## 2. Résultats

Il est important de souligner que la circulation de l'anticyclone semi-permanent de l'Atlantique Sud (ASAS) provoque la prévalence des directions des vents du nord-est/nord et de l'est pour la région sud du Brésil. Cependant, il a été observé que le vent prédominant pour la zone d'étude provenait du quadrant nord en raison de la position géographique, avec 30,6% des occurrences. La deuxième direction la plus fréquente était le sud, avec une fréquence de 15,5%, principalement liée au passage de fronts froids.

Concernant la vitesse, la période a été marquée par une fréquence plus élevée des vents entre 3,6 et 5,7 m/s, représentant 32,6% du total. Les enregistrements inférieurs à 0,5 m/s ont été classés comme calmes et représentaient 6,4% des observations.

L'analyse des flux de mer et de terre a montré que les vents d'est étaient plus fréquents le jour et ceux d'ouest la nuit, les courbes de fréquences des deux séries de données se croisant vers 13h et 22h heure locale (10 et 19 UTC) (figure 2). La brise de mer commence à se faire sentir à partir de 11h, devient plus fréquente à 16h (44,1%), son action diminuant avec le début de la nuit.

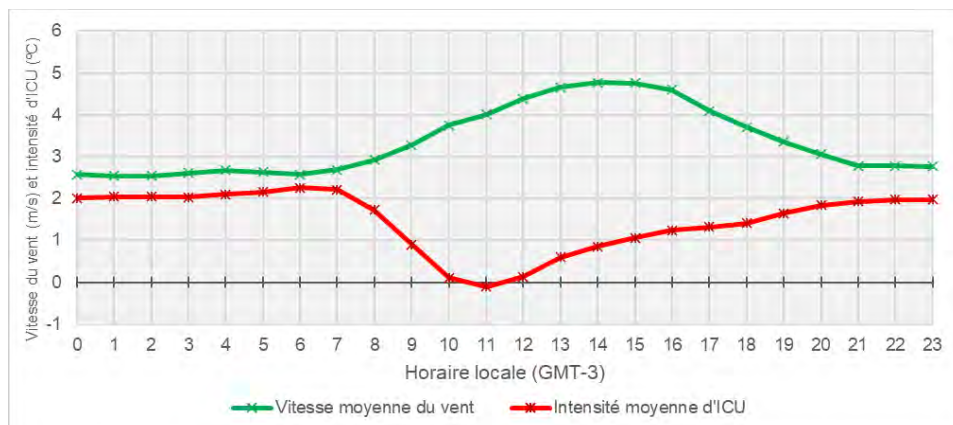


**figure 2.** Fréquence horaire (%) de la direction et de la vitesse du vent d'est et d'ouest pour l'aéroport de Florianópolis - d'août 2018 à juillet 2019.

En revanche, les vents venant de l'ouest, représentant la brise de terre, ont été plus fréquents à partir de 19h et se maintiennent au niveau de 35 à 45% des observations entre 1h et 9h du matin. Après l'aube (6h locale), ces flux deviennent moins dominants avant d'être remplacés par la brise de mer.

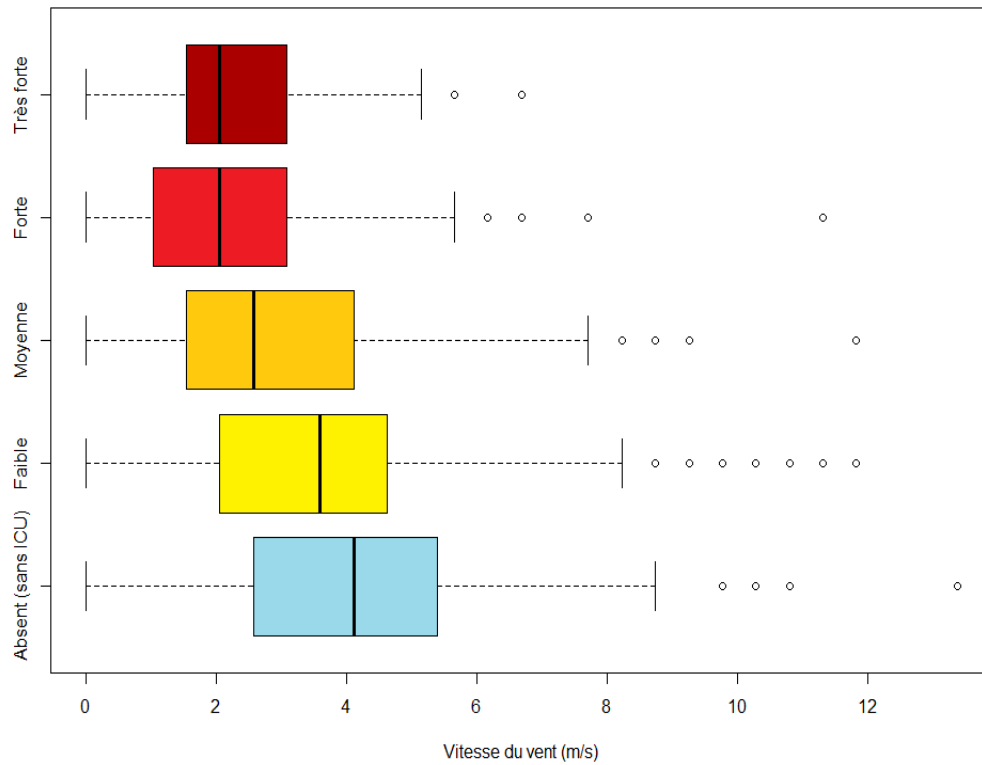
En termes de vitesse, les vents d'est ont été plus rapides que ceux venant de l'ouest, surtout pendant la journée où la brise de mer se cumule souvent avec l'alizé austral. Pour le flux d'est, la vitesse moyenne horaire la plus élevée a été enregistrée à 15h avec une moyenne de 5 m/s tandis que, pour le quadrant ouest, elle était de 3,1 m/s (figure 2). Les vitesses de vent moyennes les plus faibles se sont produites de 21 h à 6 h. Cependant, à 6h du matin, lorsque l'ICU est encore présent (figure 3), la fréquence des brises de terre (représenté par les flux de l'ouest) est supérieure à celle des flux venant de la mer, 31% contre 8,8%, (figure 2) indiquant une relation favorable entre les flux d'ouest et la formation de l'ICU dans cette période.

La moyenne de l'écart thermique horaire entre les points de référence urbains et ruraux a été calculée (figure 3), ce qui permet de constater qu'il existe une relation inverse entre l'intensité de l'ICU et la vitesse du vent (moyenne générale pour toutes les directions). Après le lever du soleil, à partir de 9h, le vent commence à dépasser 3 m/s, alors l'ICU, qui était au-dessus de 2°C les heures précédentes, diminue, ne revenant au même niveau qu'après 21h lorsque la vitesse du vent diminue.



**figure 3.** Moyennes de données horaires d'intensité de l'ICU et la vitesse du vent à l'aéroport de Florianópolis.

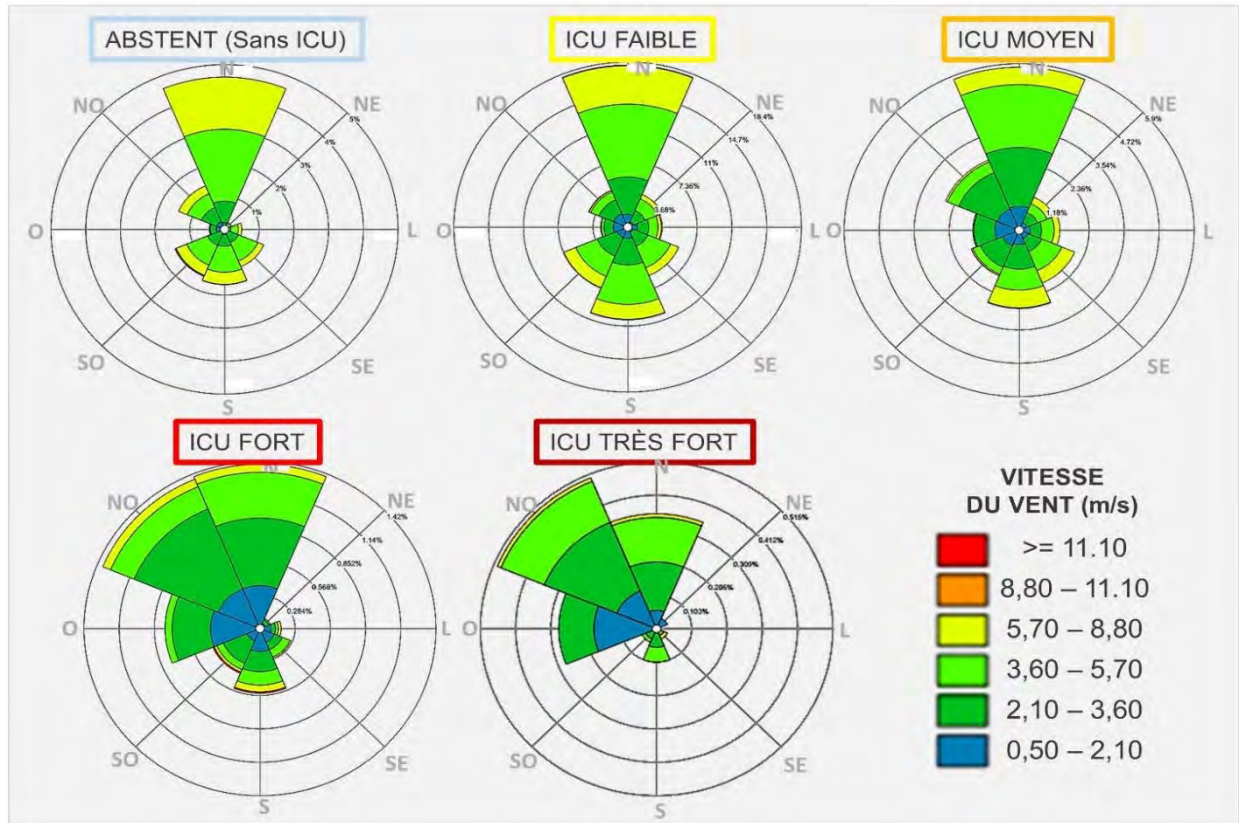
La corrélation statistique entre l'ICU et la vitesse du vent a été calculée : la valeur de  $r = -0,26$  est très faible, mais indique que plus la vitesse du vent est élevée, plus la magnitude de l'ICU a tendance à être faible. Pour poursuivre l'analyse, la vitesse du vent a été représentée (figure 4) selon les classes d'intensité (tableau 1) de l'ICU horaire.



**figure 4.** Boxplot de la vitesse du vent (m/s) selon les classes horaires d'intensité de l'ICU (°C) à Florianópolis.



La figure 5 confirme le lien entre les ICU de forte intensité et les flux en provenance de l'ouest et du nord-ouest, liés à l'action de la brise de terre. On observe pour la rose des vents de la classe ICU « très fort » que la plus grande partie des vents provient du nord-ouest, alors que pour les « faibles » ICU, par exemple, la même direction n'apparaît pas comme l'une des plus fréquentes. De même, les flux d'est sont pratiquement absents dans les occurrences des classes d'ICU fort et très fort.



**figure 5.** Direction et vitesse du vent (moyenne horaire à l'aéroport) selon les classes de magnitude de l'ICU horaire à Florianópolis.

On constate donc que la période d'action des brises de mer, généralement pendant la journée et avec des vents plus forts, entre autres facteurs tend également à ne pas favoriser la formation d'ICU. Souvent pendant cette période il n'y a pas d'ICU, et les contrastes entre urbain et rural sont même négatifs, indiquant la formation d'îlots de fraîcheur (Rocha *et al.* 2020, 2021). Pendant la nuit, avec l'inversion des flux et leur moindre intensité, l'ICU se forme et ne se dissipe que difficilement.

## Conclusion

L'étude a révélé que l'ICU se forme dans toutes les directions de vent, cependant, comme elle est typiquement nocturne, elle finit par être favorisée par les flux de moindre vitesse et de direction nord-ouest, ouest et sud-ouest. Pendant la journée, la proximité de la mer et la dynamique des brises de mer se présentent comme des facteurs atténuant les écarts thermique urbain/rural, mais pendant la nuit les conditions s'inversent et redeviennent favorables à la formation de l'ICU. Ainsi, plus la vitesse du vent augmente, plus les chances de produire une classe d'ICU forte et très forte sont faibles et inversement. Bien que la relation entre vent et ICU soient significatives, l'explication de la configuration de l'ICU dépasse l'analyse isolée des vents et il est nécessaire de considérer d'autres facteurs, comme les précipitations, la nébulosité et l'amplitude thermique. L'analyse de l'ICU nécessite ainsi une étude intégrée des facteurs qui provoquent sa formation, les brises n'en sont qu'une partie mais elles sont essentielles lorsque la zone d'étude est située sur la côte.

**Remerciements** : Les auteurs tiennent à remercier la CAPES (Coordination de l'amélioration du personnel de niveau supérieur) pour la bourse de doctorat, EPAGRI-CIRAM pour les données de la station rurale ainsi que le Projet CAPES-COFECUB, CiCIAMEn, Sh 941/19 (Cities, Climate And vegetation: Modeling and Environmental public policies).

## **Bibliographie**

Anjos M.W.B. dos, 2017 : Orientações climáticas para o planejamento urbano numa cidade costeira do nordeste do Brasil: Aracaju-SE. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade de Lisboa.

Dubreuil V., Fante K.P., Planchon O. et Sant'Anna Neto J.L., 2018 : Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency. *International Journal of Climatology*, **39**(3),1446-1456.

Fernández García F., 1996 : *Manual de climatología aplicada: clima, medio ambiente y planificación*. Madrid: Editorial síntesis, S.A., 285 p.

Mendonça F., Dani-Oliveira I.M., 2007 : *Climatologia: noções básicas e climas do Brasil*. São Paulo: Oficina de textos.

Oke T.R. et Hannell F.G., 1970 : The form of the urban heat island in Hamilton, Canada. *WMO Tech Note*, **108**, 113-126.

Papanastasiou D.K., Melas D., Bartzanas T. et Kittas C., 2010 : Temperature, comfort and pollution levels during heat waves and the role of sea breeze. *International Journal of Biometeorology*, **54**(3), 307-17.

Rocha G.S., Dubreuil V. et Mendonça F.A., 2020 : Caractéristiques horaire et saisonnière de l'îlot de chaleur urbain de Florianópolis (sud du Brésil). *XXXIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 589-594.

Rocha G.S., Dubreuil V. et Mendonça F.A., 2021 : La relation entre la stabilité atmosphérique (modèle PGT) et l'îlot de chaleur à Florianópolis (Brésil). *XXXIVe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, 401-406.

Rocha G.S., 2021 : *A ilha de calor entre mares: área conurbada de Florianópolis-SC*. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná.

## ÉTUDE DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN À VITRÉ (35), APPROCHÉ PAR MODELISATION DE L'OCCUPATION DES SOLS ET MESURES DE TERRAIN

Marion DELIDAI<sup>1</sup>, Vincent DUBREUIL<sup>2</sup>, Philippe LECUYER<sup>3</sup>, Annabelle LAMY<sup>3</sup>,  
Gabriel DELAUNAY<sup>2</sup>, Charlotte BRABANT<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ingénieure d'étude à AIRBREIZH 3 rue du Bosphore 35200 Rennes, mdelidais@airbreizh.asso.fr

<sup>2</sup> LETG-Rennes, Université Rennes 2, UMR 6554 CNRS, premon.nom@univ-rennes2.fr

<sup>3</sup> Vitré Communauté, a.lamy@vitrecommunaute.org, philippe.Lecuyer@mairie-vitre.fr

**Résumé :** Dans le contexte du changement climatique, cette étude s'intéresse à la potentialité d'un îlot de chaleur urbain au sein de l'aire urbaine de Vitré Communauté (Ille-Et-Vilaine - 35) en 2021. L'objectif de cette recherche est d'analyser l'étendue et l'intensité de ce phénomène à l'échelle urbaine et intra-urbaine dans une petite ville de 20.000 habitants. Pour répondre à cette question, l'ICU a été mesuré à partir d'un réseau de 26 capteurs et 7 stations météorologiques fixes mesurant en continu la température de l'air. L'ICU observé permet de mettre en lumière un ICU de l'ordre de 2°C en moyenne dans les zones urbanisées, avec des pics pouvant dépasser 4°C lors de situations favorables à l'ICU.

**STUDY OF THE URBAN HEAT ISLAND IN VITRE (35), APPROACH BY LAND COVER MODELING AND FIELD MEASUREMENTS.** In the context of climate change, this study focuses on the potential for an urban heat island in the urban area of Vitré Communauté (Ille-Et-Vilaine - 35) in 2021. The objective of this research is to analyze the extent and intensity of this phenomenon at the urban and intra-urban scale in a small town of 20,000 inhabitants. For this study, the ICU was measured from a network of 26 sensors and 7 fixed weather stations continuously measuring air temperature. The UHI observed makes it possible to highlight an UHI of the order of 2°C on average in urbanized areas, with peaks that can exceed 4°C in situations favorable to UHI.

**Keywords:** urban heat island, surface temperature, air temperature.

**Mots-Clés :** îlot de chaleur urbain, température de surface, température de l'air.

### Introduction

Cette étude a pour objectif de définir et de caractériser l'étendue, la forme et la variation d'un éventuel îlot de chaleur urbain dans la communauté d'agglomération de Vitré (35). En effet, de nombreuses études sur les îlots de chaleur urbains ont été réalisées à l'échelle des grandes villes (Oke et al, 2017 ; Dubreuil et al, 2019), néanmoins à l'échelle des petites villes, peu de choses sont connues. Or, le PCAET (Plan Climat Air Energie Territoire) de Vitré intègre un volet « adaptation au changement climatique » avec l'étude d'un îlot de chaleur urbain dans l'agglomération. Cette initiative vise à qualifier et quantifier les impacts passés et futurs du changement climatique (et notamment l'effet îlot de chaleur) et à proposer des orientations concrètes d'aménagement pour préserver la qualité de vie des habitants face à ces effets.

Dans cette étude, l'îlot de chaleur atmosphérique de basse couche est analysé pendant l'année 2021, grâce à un réseau d'observation de 26 capteurs et 7 stations Davis qui a été mis en place afin d'établir un diagnostic climatique à l'échelle fine et locale. Il s'agit de montrer quelle est la magnitude des ICU dans une petite ville et quels sont les facteurs, notamment en termes d'occupation des sols, qui y contribuent.

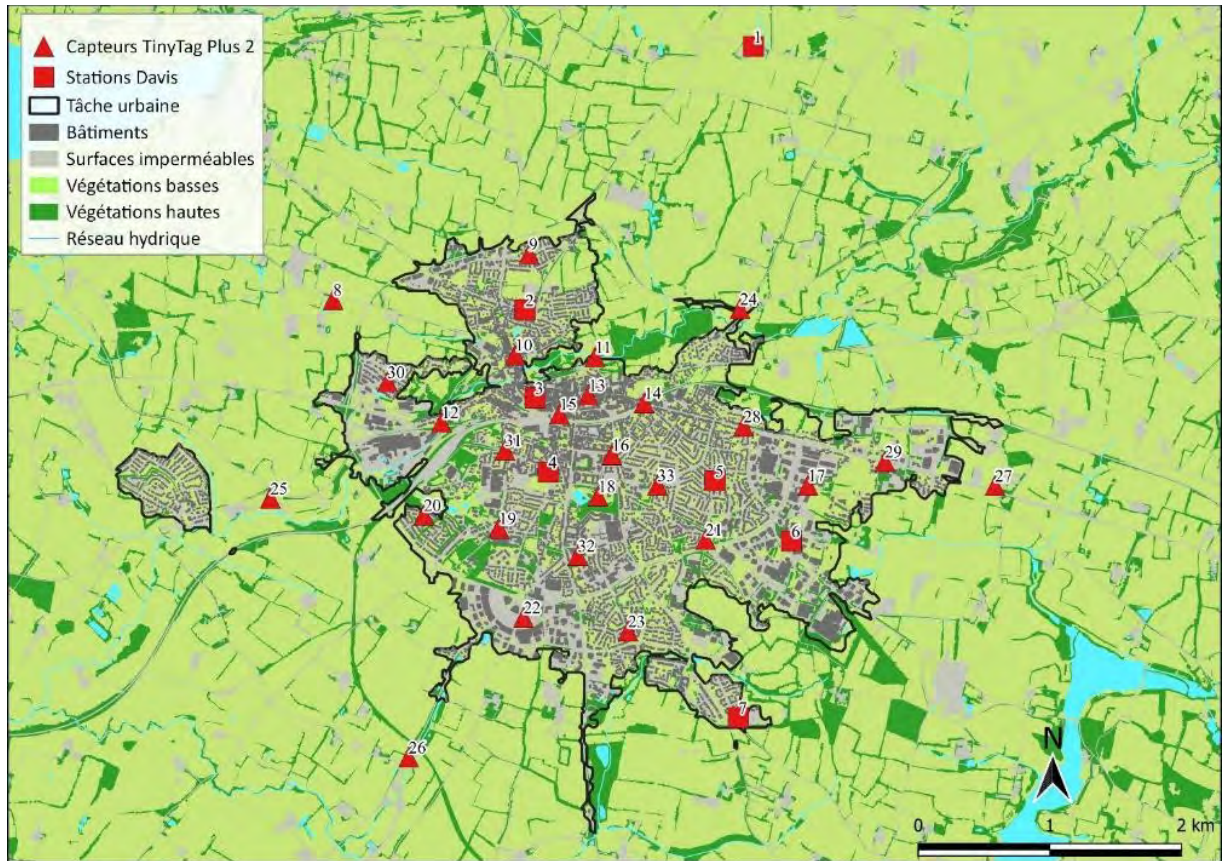
### 1. Site d'études, données et méthodes

Vitré est une commune française située dans le Nord-Ouest de la France à 35 kilomètres de Rennes, dans la région Bretagne et le département de l'Ille-et-Vilaine (35). La population de Vitré est de 18 267 habitants, soit la 13ème plus grande ville de la région en 2018. La communauté d'agglomération (Vitré

Communauté) est composée de 46 communes et de 81 205 habitants (Insee, 2018) et s'étend sur 867 kilomètres<sup>2</sup>. L'urbanisme de Vitré est caractérisé par un quartier nord résidentiel, un centre-ville historique avec un bâti ancien et une extension urbaine vers le sud composée d'activités commerciales et industrielles (PLU Vitré, 2020).

Il n'existe pas de station historique permanente sur la ville de Vitré. A proximité, on trouve la station d'Erbrée située à 8 kilomètres à l'est de Vitré, composée d'une série de précipitations mensuelles homogénéisées pour la période 1940-1990. Etreelles, située à 8,2 kilomètres au sud de Vitré, fournit des données discontinues des températures mensuelles de 1985 à 1998. La station synoptique la plus proche est celle de Rennes-Saint-Jacques située à 40 kilomètres à l'ouest. Pour la période 1950-1990, le cumul pluviométrique annuel à Erbrée est plus élevé qu'à Rennes : 630 mm de moyenne par an à Rennes et 816 mm à Erbrée. En ce qui concerne les températures moyennes observées, Rennes dispose de températures légèrement plus élevées avec 11.6°C à Rennes contre 11.5°C à Vitré pour la période 1985-1997. Pour résumer, Vitré bénéficie d'un climat de type océanique tempéré très légèrement dégradé, plus précisément de type Cfb selon la classification de Köppen (Eveno et al, 2016). Vitré est sous l'influence d'une forte humidité atmosphérique, une amplitude thermique peu marquée et une prédominance des vents de sud-ouest, typique de l'est de la Bretagne quoiqu'un peu plus humide et fraîche que le bassin Rennais. L'année 2021 a été légèrement plus chaude que la normale mais alternant période de fraîcheur (avril, mai, juillet) et de fortes chaleurs (février, juin, septembre).

L'installation d'un réseau météorologique avec 7 Stations Davis Vantage-Pro-2 et 26 capteurs TinyTag Plus 2 dans l'agglomération a été réalisée au début de l'année 2021. La température est obtenue à environ 2 mètres du sol. Les stations sont installées sur des espaces enherbés, des jardins privés ou sur des terrasses (ex : terrasse de l'école du Château). Deux stations sont placées en périphérie de Vitré afin d'obtenir une station rurale de référence, dont une au nord dans une ferme agricole à Balazé, à 4 kilomètres de Vitré Centre et une autre au sud dans la serre municipale de Vitré à 3 kilomètres de Vitré Centre (figure 1). Les capteurs sont installés sur du mobilier urbain tels que les lampadaires de Vitré, à environ 2 mètres de hauteur. Les paramètres mesurés avec les stations sont la température (C°), la pluviométrie (mm), l'humidité relative (%), la vitesse et direction du vent (m/s), la pression atmosphérique (hPa) et le rayonnement solaire incident (W/m<sup>2</sup>), à une échelle de pas de temps d'une heure. Parmi l'ensemble du réseau, 11 capteurs sont installés en zones urbaines, 11 en zones résidentielles, 5 en zones industrielles et 6 en zones rurales.



**figure 1.** Carte de la localisation des capteurs et des stations avec l'occupation du sol. Source : BD Topo 2021.

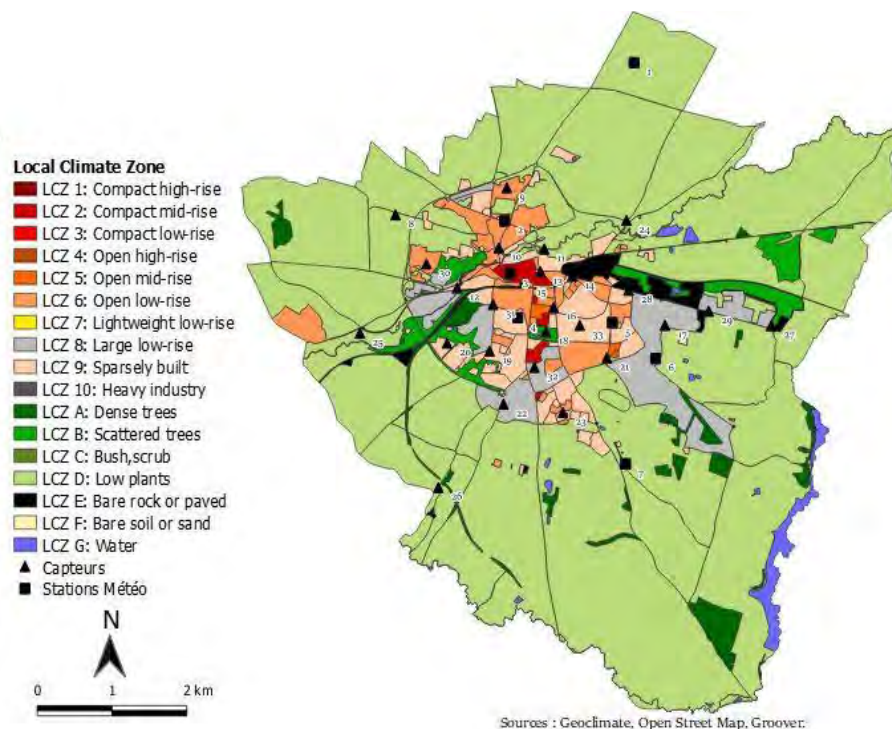
Afin de décrire précisément l'environnement des points de mesures, plusieurs bases de données ont été utilisées : BD topo de l'IGN, données de végétation du Conservatoire Botanique National de Brest 2019. La méthode des Local Climate Zone (noté LCZ) a aussi été retenue (Stewart et Oke, 2012). Ces zones climatiques sont définies comme des régions de couverture de surface uniforme, de structure, de matériaux et d'activité humaine homogènes. Chaque LCZ est nommée individuellement et ordonnée par une (ou plusieurs) propriété de surface distinctive, qui dans la plupart des cas est caractérisée par la hauteur des bâtiments et/ou la couverture terrestre dominante. Les LCZ sont divisées en "types de constructions" de 1 à 10, "types de couvertures terrestres" de A à G (sol nu, sol couvert, forêts...).

L'outil GeoClimate (<https://github.com/orbisgis/geoclimate/wiki>) a été utilisé pour cartographier ces LCZ. Cette boîte à outils est basée sur une approche vectorielle, en utilisant les données IGN BDTopo 2.2 ou des données ouvertes OpenStreetMap (OSM) pour créer les différents paramètres morphologiques (pourcentage d'imperméabilisation, de végétation haute, basse etc...), le Sky View Factor, etc. (Bocher et al, 2021 ; Hidalgo et al, 2019).



## 2. Typologie des environnements des capteurs

La classification des LCZ avec Géoclimat présente l'avantage de prendre en compte plusieurs paramètres comme la hauteur des bâtiments, la fraction de végétation et la fraction d'espace bâti (figure 2). Cette typologie a été appliquée à de nombreuses villes, à travers la France et le monde. La méthode automatique ne permet pas de réaliser une classification sur des années antérieures car elle se base sur l'occupation du sol d'Open Street Map. De plus, l'occupation du sol d'Open Street Map n'est pas régulièrement mise à jour. Ainsi, le boulevard de Laval à l'est de Vitré, apparaît en LCZ E alors que ce boulevard est constitué de maisons individuelles et de zones commerciales. Cette méthode automatique permet toutefois d'établir une première classification de LCZ pouvant être ajustée après.

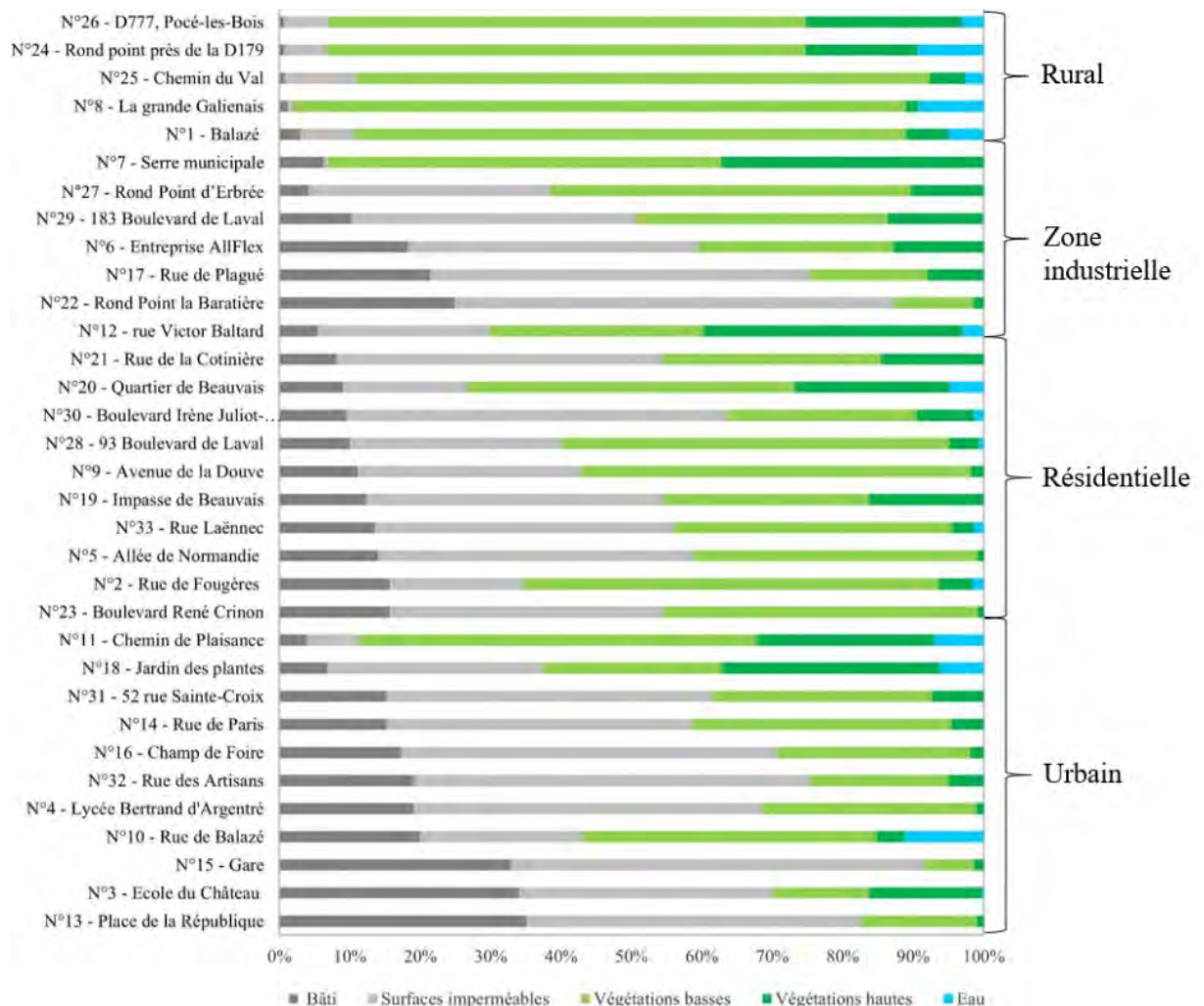


**figure 2.** Carte des LCZ à Vitré, méthode automatique de Géoclimat avec OpenStreetMap (OSM).

Les données sur Vitré montrent l'importance de l'environnement rural (LCZ D et B). Le centre-ville ancien de Vitré est classé en LCZ 3 "compact lowrise", c'est-à-dire composés de petits bâtiments denses avec peu ou aucun espace de végétation. Les sites suburbains possèdent une fraction végétale plus importante entre 30% et 50% avec une fraction de surfaces bâties inférieure à 20%. Ces quartiers correspondent aux LCZ 5 et LCZ 6, "open midrise" et "open lowrise", soit des espaces ouverts avec des immeubles de tailles moyennes et des maisons individuelles. Seul un quartier situé au sud de Vitré est classé LCZ 5 en raison des immeubles de taille moyenne (R+7). Au nord de Vitré et de la Vilaine, on retrouve la LCZ 6, caractéristiques des zones résidentielles avec des bâtiments de faibles hauteurs, une faible densité et une forte présence de végétation. Les zones industrielles et commerciales sont classées en LCZ 8, constituées de bâtiments de grandes surfaces et peu élevés (R à R+2). Ces zones au sud de Vitré ont été bien détectées par la méthode. La voie ferrée et le cimetière à l'est sont classés en LCZ E pour des sols fortement «artificialisés».

Une deuxième typologie de l'environnement des capteurs a été réalisée en considérant le pourcentage d'occupation du sol dans un rayon de 200 mètres autour de chaque point de mesure. Il s'agit ici de ne pas considérer a priori un type de quartier mais de décrire de manière objective l'environnement immédiat (Fernández García F., 1996 ; Foissard et al, 2019). La figure 3 montre ainsi de

manière hiérarchique les points de mesures ordonnés du plus végétalisé au plus urbanisé du haut vers le bas.



**figure 3.** Classement de l'environnement des stations météorologiques triées par fractions de surfaces bâties selon les quatre types d'espaces : urbain, industrielle, zone résidentielle et rurale. Le rayon choisi est de 200 mètres ; Source : BD Topo 2021 et classification de la végétation du Conservatoire Botanique National de Brest (2019).

### 3. Intensités de l'ICU à Vitré en 2021

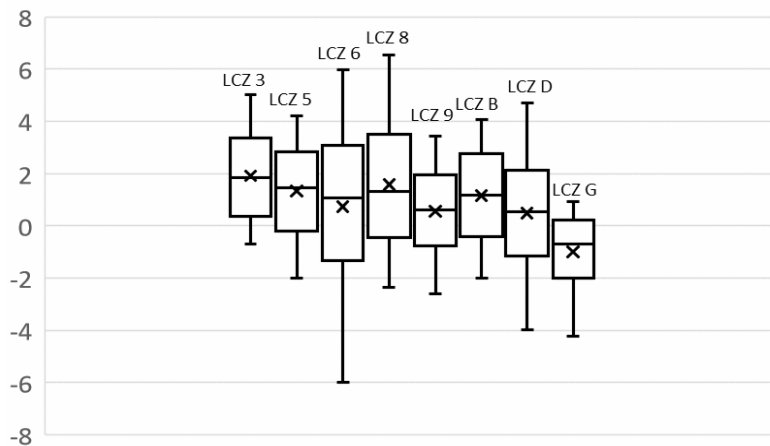
Les résultats des mesures de l'année 2021 montrent un ICU bien présent à Vitré (tableau 1). Si l'on considère l'écart entre les minimales quotidiennes entre la station de référence rurale (Balazé) et celle du centre (Château), il est compris entre 0,6 et 2°C en moyenne mais peut s'élever à plus de 4°C ! Les mois d'avril et septembre ont été les plus propices à l'observation d'ICU intenses et fréquents : près d'un jour sur deux avec un ICU modéré (supérieur à 2°C). Une étude plus détaillée sur le printemps (avril-mai) 2021 permet de préciser les relations entre l'intensité de l'ICU et l'occupation des sols et les LCZ.

Concernant les LCZ (figure 4), l'intensité de l'ICU est plus élevée pour la classe LCZ 3 avec un pic maximal à 5°C, tandis que la classe LCZ 5 ne dépasse pas les 4,2°C. Pour la classe LCZ 6, l'amplitude des ICU est très importante, en effet cette classe regroupe tous les capteurs situés en zones résidentielles plus ou moins éloignées du centre. La classe LCZ 8 est caractérisée par des ICU plus élevés avec un ICU maximal de 6,5°C. Il s'agit notamment des zones commerciales et industrielles composées d'espaces fortement urbanisés et peu végétalisés. La classe LCZ 9 correspond aux maisons éparses avec une forte proportion de végétation, l'ICU ne dépasse pas les 3,4°C. Les classes LCZ B, D et G sont celles où

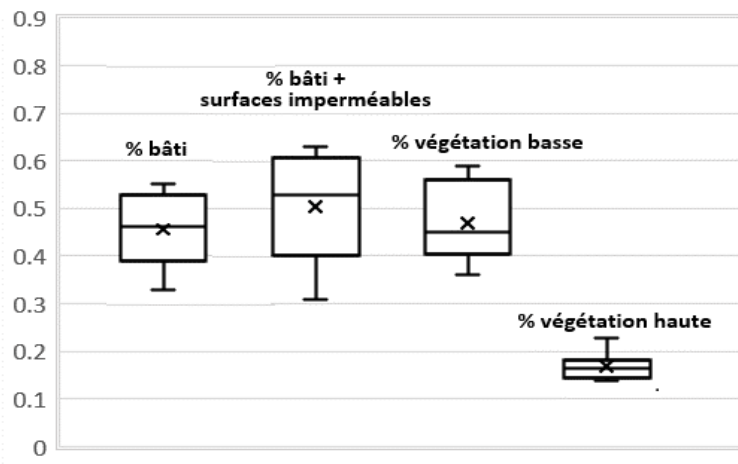
l'intensité de l'ICU est la plus faible. On constate donc que la présence de l'eau et de la végétation joue un rôle prépondérant dans l'atténuation des ICU. A l'inverse, les zones industrielles connues comme étant des espaces plus chauds en ville, ont un ICU élevé, comparable aux autres classes urbaines.

**Tableau 1.** Températures minimales (Tn), maximales (Tx) et intensités de l'ICU (°C) à Vitré en 2021

	Tn-Rural	Tn-Urbain	Tx-Rural	Tx-Urbain	ICU Moyen / Maximum	Nb. Jours ICU >2°C
Mars	3,1	4,6	14,2	14,2	1,5 - 3,8	10
Avril	2,5	4,4	15,8	16,1	2,0 - 4,0	18
Mai	7,3	8,3	17,5	18,2	1,0 - 3,0	6
Juin	12,1	13,4	22,8	23,2	1,3 - 3,6	10
Juillet	13,9	15,0	23,6	24,3	1,0 - 2,7	4
Août	13,0	13,9	22,0	22,7	0,9 - 2,6	2
Septembre	11,6	13,7	23,5	23,8	1,6 - 4,1	13
Octobre	8,1	9,5	17,5	17,8	1,4 - 3,3	10
Novembre	2,5	4,0	11,2	11,2	1,5 - 3,0	12
Décembre	4,8	5,4	9,9	9,9	0,6 - 2,4	2



**figure 4.** Boîte à moustache des ICU (en °C) pour chaque LCZ à Vitré en avril-mai 2021.



**figure 5.** Boîte à moustache du coefficient de détermination des facteurs de l'occupation du sol avec l'ICU à Vitré en avril-mai 2021.

Les résultats des régressions linéaires entre l'ICU et l'occupation du sol (figure 5) attestent que la variable du bâti et des surfaces imperméables est mieux corrélée au modèle ( $r^2$  de 0,53 dans un rayon de 200 m) que le bâti seul ( $r^2=0,45$ ). La variable fraction de végétation basse est également fortement corrélée à l'ICU avec  $r^2=0,43$  dans un rayon de 200 m et semble donc jouer un rôle prédominant dans l'atténuation des ICU à Vitré. Une seule variable apparaît comme étant peu corrélée aux ICU, la végétation haute ( $r^2$  inférieur à 0,2) : il s'agit néanmoins d'une variable peu représentée sur le territoire étudié.

## Conclusion

Dans un futur proche, l'augmentation des vagues de chaleurs provenant du changement climatique et l'urbanisation croissante vont amplifier le phénomène d'îlot de chaleur pour les habitants vivant en ville. L'étude de ce phénomène ne doit cependant pas être restreint aux grandes villes car dans une ville de taille modeste comme Vitré, ce phénomène est déjà d'actualité. Nos résultats montrent également que l'ICU n'est pas uniquement cantonné aux espaces à forte densité urbaine mais s'étend aussi aux zones d'activités périphériques. On retrouve dans ces zones de grandes surfaces artificielles (hangars métalliques, parkings, routes, etc.) à faible réflectivité solaire (forte absorption de chaleur radiative), forte diffusivité thermique (ou pouvoir stockant), ce qui explique l'important dégagement de chaleur sensible durant la nuit (Hassani et Drogue, 2020). Des actions d'atténuation des ICU dans ces secteurs doivent donc être aussi envisagées.

**Remerciements** : Les auteurs remercient Vitré Communauté pour le financement de l'étude ainsi que l'ensemble des personnes qui ont permis l'installation des stations et capteurs sur leurs propriétés.

## Bibliographie

Bocher et al., 2021 : GeoClimate: a Geospatial processing toolbox for environmental and climate studies. *Journal of Open Source Software*, **6(65)**, 3541, <https://doi.org/10.21105/joss.0354>.

Dubreuil V., Foissard X., Nabucet J., Thomas A., Quenol H., 2020 : Fréquence et intensité des îlots de chaleur à Rennes : bilan de 16 années d'observations (2004-2019). *Climatologie*, **17** (6), 1-17.

Eveno M., Planchon O., Oszwald J., Dubreuil V., Quénoel H., 2016. Variabilité et changement climatique en France : analyses au moyen de la classification de Köppen et des « types de climats annuels ». *Climatologie*, **13**, 47-70.

Fernández García F., 1996. *Manual de climatología aplicada: clima, medio ambiente y planificación*. Madrid: Editorial síntesis, S.A., 285 pages.

Foissard, X., Dubreuil, V., Quenol, H., 2019 : Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city: Rennes (France). *Urban Climate*, **29**.

Hassani, N., & Drogue, G., 2020 : Mesure et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain dans l'aire urbaine de Metz Métropole : premiers résultats de la campagne de mesure 2019. *Climatologie*, **17**, 8.

Hidalgo J., Dumas G., Masson V., Petit G., Betchtel B., Bocher E., Foley M., Schoetter R., Mills, G., 2019 : Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations. *Urban Climate*. **27**, 64–89.

Oke T. R., Mills G., Christsen A., Voogt J. A., 2017 : *Urban Climates*. Cambridge University Press. 526 pages.

Stewart I. D., Oke T. R., 2012 : Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **93**, 1879–1900.

## Sitographie

Carte des grands types de végétation en Bretagne : <http://www.cbnbrest.fr/observatoire-milieux/cartes-de-repartition/cgtv/carte-des-grands-types-de-vegetation-de-bretagne>

## INFLUENCE DE LA TAILLE DE TACHE URBAINE SUR L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN : ÉTUDE SUR DES COMMUNES D'ILLE ET VILAINE

**Charlotte BRABANT<sup>1</sup>, Vincent DUBREUIL<sup>1</sup>, Simon DUFOUR<sup>1</sup>, Gabriel DELAUNAY<sup>1</sup>,  
Jean NABUCET<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> LETG-Rennes, Université Rennes 2, UMR 6554 CNRS, France ([charlotte.brabant@univ-rennes2.fr](mailto:charlotte.brabant@univ-rennes2.fr) ;  
[vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr](mailto:vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr) ; [simon.dufour@univ-rennes2.fr](mailto:simon.dufour@univ-rennes2.fr) ; [gabriel.delaunay@univ-rennes2.fr](mailto:gabriel.delaunay@univ-rennes2.fr) ;  
[jean.nabucet@univ-rennes2.fr](mailto:jean.nabucet@univ-rennes2.fr))

**Résumé :** Les données pour 17 couples de capteurs de températures (différence urbaine-périurbaine) sont étudiées sur Rennes et ses communes périphériques. Les différences de températures entre chaque couple ont été mises en relation avec la taille de la tâche urbaine de chaque ville ainsi que leur population respective, la distance à Rennes, la longitude et la latitude de chaque capteur. Cette relation avec l'Îlot de Chaleur Urbain a permis de mettre en évidence l'influence de la taille de la tâche urbaine et de la latitude sur ce dernier. Ainsi la taille de la tâche urbaine et la latitude expliquent jusqu'à 71% des différences des ICU moyens.

**Mots-Clés :** Ilot de chaleur urbain ; tâche urbaine

### Introduction

Dans le 6<sup>e</sup> rapport du premier groupe du Groupement d'Experts International sur le Climat (GIEC), les preuves de l'action humaine sur les phénomènes extrêmes se sont renforcées (IPCC, 2021). Ces derniers peuvent être caractérisés par des vagues de chaleur, des fortes précipitations ainsi que des sécheresses et des cyclones tropicaux. Il est également attesté de l'occurrence et la magnitude croissantes des vagues de chaleur locales induites par l'homme notamment via l'urbanisation.

La croissance des zones urbaines se fait au détriment des terres naturelles ou semi-naturelles et par verticalisation des espaces bâtis. Comparativement à la campagne, ces modifications d'occupations et d'usages du sol ont pour conséquence une circulation de l'air plus hétérogène (concentration en polluants plus importante) et également une plus forte émission de rayonnement infrarouge dans les canyons urbains (Oke, 1987; Cantat, 2004). Cette modification du bilan énergétique entraîne une augmentation de la température urbaine la nuit (Oke, 1973). Cette différence, appelée Ilot de Chaleur Urbain (ICU) est plus importante lorsque la situation atmosphérique est anticyclonique et le vent inférieur à 5m/s (Dubreuil et al., 2008; Foissard, 2015), il est de ce fait, variable dans le temps et dans l'espace.

La Bretagne est caractérisée par une forte urbanisation avec une extension importante des surfaces artificialisées (+128% de 1985 à 2015). Ce processus se fait notamment autour des métropoles comme Rennes mais aussi dans tout un semi de villes petites et moyennes. D'ici 2040, la Bretagne devrait accueillir 400 000 habitants supplémentaires (SRADDET, 2019).

À partir de mesures de températures réalisées en avril 2021 par capteurs RisingHF dans 17 villes proches de Rennes, la relation « taille de tâche urbaine » et ICU est étudiée. Il est fait l'hypothèse que la taille de la tâche urbaine influence la magnitude et la fréquence de l'ICU. Cette question est relatée depuis longtemps dans la littérature (Oke, 1973; Oke et al., 2017) mais seulement sur les tailles de tâche urbaine importante ou moyenne (Vancouver, Londres, Paris, Lyon, Toulouse, Dijon, Rennes). On suppose donc que des villes de petites tâches urbaines présenteront un ICU plus modéré que les villes de tâches moyennes à grandes (dans notre étude, comprises entre 0.66km<sup>2</sup> et 36.83km<sup>2</sup>).

### Données et Méthodes :

17 communes situées dans la région de Rennes (Ille et Vilaine) ont été étudiées. Elles intègrent des tailles de tâches urbaines variées (Tableau 1). Les températures moyennes de Rennes sont de 12.1°C, les maximales de 16.4°C et les minimales de 7.9°C. Le cumul de précipitations est de 694mm avec des

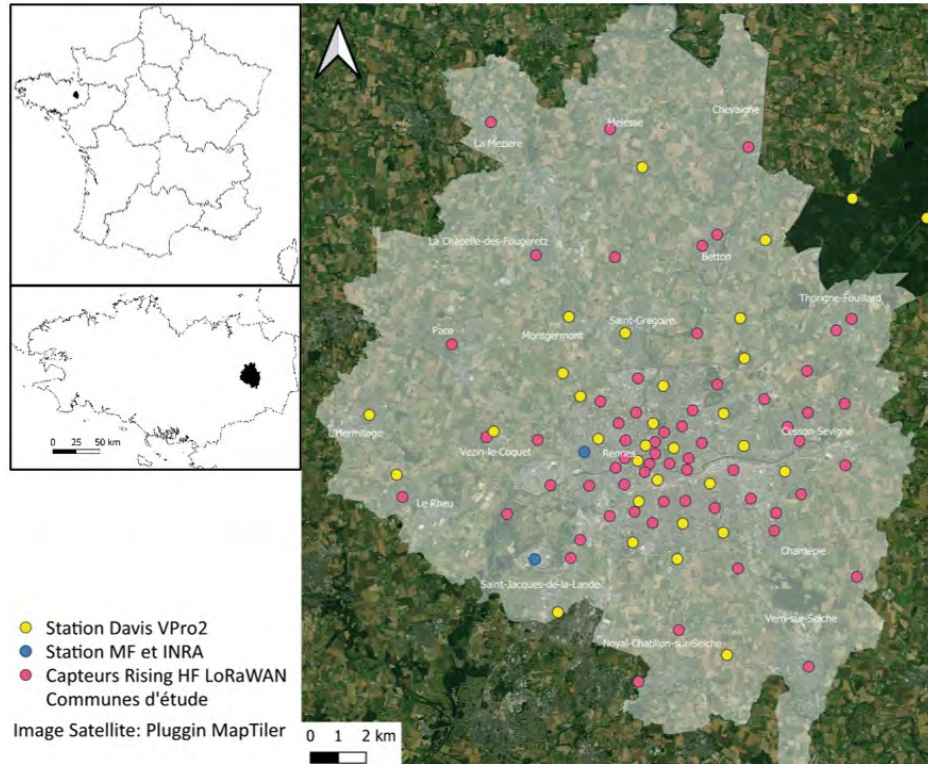


précipitations plus élevées en hiver. Toutes les communes sont sous climat Cfb (tempéré à étés frais et hivers doux) selon la classification de Köppen-Geiger (Dubreuil, 2022; Eveno et al., 2016).

**Tableau 1** Communes d'étude, leur population respective (INSEE 2017) et leur taille de tâche urbaine (en km<sup>2</sup>)

Ville	Taille	Population	Ville	Taille	Population
Rennes	36.83	216815	La-Mézière	3.27	4892
Cesson-Sévigné	10.82	17526	Thorigné-Fouillard	2.92	8463
Saint-Jacques	8.65	13087	Vezein-Le-Coquet	2.76	5727
Saint-Grégoire	5.41	9639	Melesse	2.63	6576
Vern-Sur-Seiche	5.34	7871	L'Hermitage	2.29	4437
Le Rheu	4.68	8740	La-Chapelle-des-Fougeretz	2.10	4773
Pacé	4.40	11739	Montgermont	1.76	3364
Betton	3.88	11735	Chevaigné	0.66	2265
Chantepie	3.82	10435			

Différentes organisations et morphologies urbaines sont étudiées : Centre-ville historique, résidentiel individuel, collectif, centre commerciaux etc... Un réseau dense de 95 capteurs connectés RisingHF et de 35 stations Davis Vantage pro 2 ont été installés sur l'ensemble du territoire d'étude. L'ensemble constitue le RUN : Rennes Urban Network. Les données de 2 stations (INRA et Météo-France) sont également utilisées (Figure 1). Chaque emplacement a été déterminé selon l'occupation du sol à proximité afin de représenter le plus fidèlement possible la température du quartier dans lequel les capteurs et stations sont implantés (Dubreuil et al., 2008, 2020).



**figure**

Localisation des capteurs Rising HF et des stations météorologiques sur le territoire d'étude

10.

Ainsi, les stations permettent de relever un ensemble de mesures complet (températures, vents, humidité, radiation globale, vitesse et orientation du vent, etc...) à un pas de temps d'une heure pouvant déterminer un ensemble de conditions synoptiques qui seront ou non favorables au développement de l'ICU. De leur côté, les capteurs connectés vont permettre de mesurer plus finement les températures à un pas de temps de 15 minutes, à l'échelle du quartier ou de l'ilot urbain. L'installation de l'ensemble du réseau a été finalisé fin mars. Du 1<sup>er</sup> avril au 31 décembre 2021, les données manquantes représentent moins de 1% du jeu de données.

Les données d'ICU présentées par la suite, ont été obtenues à partir des capteurs connectés. Il s'agit de la simple différence entre urbain (capteur de référence de chaque centre-ville) et périurbain (capteur rural de référence) pour chaque commune d'étude.

En 2021, les mois de mars et d'avril ont été les plus propices à la formation de l'ICU (Tableau 2), la situation synoptique était favorable car anticyclonique, de plus le vent était faible et l'ensoleillement important. Cependant, seul le mois d'Avril sera présenté par la suite, du fait de l'installation encore incomplète de l'ensemble du réseau en mars. Le mois d'Avril 2021 ne présente pas d'écart à la moyenne de températures important mais les précipitations sont largement déficitaires. D'après la station météorologique de Météo-France de Rennes-Saint-Jacques seulement 3 jours de pluies sont

Heure	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy/Heure
0	2,1	1,9	3,2	3,3	2,5	2,6	2,2	2,2	2,8	2,5	2,4	1,5	2,4
1	2,1	1,9	3,2	3,5	2,5	2,5	2,2	2,2	2,8	2,4	2,4	1,6	2,4
2	2,2	1,8	3,3	3,6	2,4	2,5	2,1	2,2	2,8	2,3	2,4	1,6	2,4
3	2,1	1,7	3,4	3,5	2,4	2,4	2,0	2,2	2,8	2,3	2,3	1,7	2,4
4	2,0	1,7	3,4	3,5	2,4	2,3	2,1	2,1	2,7	2,2	2,3	1,6	2,4
5	2,1	1,7	3,2	3,5	2,2	2,0	1,9	2,0	2,6	2,2	2,3	1,6	2,3
6	2,1	1,6	3,1	2,6	1,1	1,0	1,2	1,6	2,4	2,1	2,2	1,6	1,9
7	2,0	1,4	2,5	1,1	0,1	0,2	0,3	0,7	1,9	2,0	2,2	1,6	1,3
8	2,1	1,1	0,9	-0,1	-0,4	-0,2	-0,2	0,0	0,7	1,3	1,9	1,5	0,7
9	1,8	0,7	0,1	0,1	-0,2	0,2	0,0	0,1	0,3	0,9	1,8	1,5	0,6
10	1,5	0,5	-0,1	0,3	-0,1	0,2	0,2	0,2	0,4	0,8	1,4	1,2	0,6
11	1,0	0,4	0,0	0,6	0,0	0,4	0,3	0,3	0,4	0,8	1,0	0,8	0,5
12	0,7	0,4	0,2	0,6	-0,2	0,5	0,4	0,6	0,6	0,9	0,9	0,8	0,5
13	0,7	0,4	0,2	0,6	-0,1	0,6	0,5	0,6	0,4	0,9	0,8	0,7	0,5
14	0,7	0,3	0,1	0,4	0,1	0,7	0,7	0,6	0,0	1,0	0,7	0,7	0,5
15	0,9	0,7	0,2	0,6	0,3	0,7	0,8	0,7	0,5	1,4	0,9	1,0	0,7
16	1,2	1,1	0,8	0,9	0,7	0,9	0,8	1,0	1,2	1,6	1,3	1,3	1,1
17	1,6	1,4	1,4	1,2	0,9	0,9	1,1	1,3	1,8	2,1	1,8	1,5	1,4
18	1,9	1,8	2,1	1,7	1,3	1,4	1,5	1,8	2,3	2,4	2,1	1,5	1,8
19	2,0	1,9	2,6	2,3	1,8	1,7	1,9	2,1	2,6	2,5	2,1	1,6	2,1
20	2,1	2,0	2,8	2,4	2,1	2,1	2,2	2,2	2,7	2,5	2,2	1,5	2,2
21	2,1	2,1	3,0	2,6	2,3	2,3	2,2	2,2	2,7	2,5	2,3	1,4	2,3
22	2,1	2,1	3,1	2,8	2,4	2,4	2,2	2,2	2,8	2,4	2,4	1,5	2,4
23	2,1	2,1	3,2	3,1	2,5	2,5	2,2	2,1	2,8	2,5	2,4	1,6	2,4
<b>Moy/Mois</b>	<b>1,7</b>	<b>1,4</b>	<b>1,9</b>	<b>1,9</b>	<b>1,2</b>	<b>1,4</b>	<b>1,3</b>	<b>1,4</b>	<b>1,8</b>	<b>1,9</b>	<b>1,9</b>	<b>1,4</b>	<b>1,6</b>

recensés à Rennes (9-10-11 avril) ainsi il n'a plu que 26mm (normale mensuelle : 51mm). Ce fut un mois très ensoleillé avec 261.5h d'ensoleillement (+60% par rapport aux normales).

**Tableau 2** Intensités moyennes mensuelles (colonnes) et horaires (lignes) de l'îlot de chaleur urbain (en °C) à Rennes en 2021 (différence entre le capteur Griffon -référence urbaine- et La Lice -référence Rurale-)

### Une différence entre urbain et périurbain pour toutes les communes ?

Deux variables d'ICU ont été calculées, l'ICU moyen : Moyenne des différences des températures minimales moyennes horaires par nuit (entre 18h et 7h) entre urbain et rural ; l'ICU journalier : Moyenne des différences des températures minimales absolues par jour entre urbain et rural.

Les mesures du mois d'avril 2021 montrent des différences entre stations urbaines et rurales pour chaque ville. Sur les 17 villes, 15 ont un ICU journalier compris entre 1 et 3°C (Tableau 3), Rennes se détache avec un ICU journalier à 4,2°C et Melesse 3,1°C.

L'ICU journalier à Rennes pour le mois d'avril 2021 est cohérent avec les études précédentes en termes d'intensité moyenne (Foissard, 2015; Foissard et al., 2019). De plus, sur l'ensemble des 30 nuits d'avril, l'ICU reste toujours présent avec 15 jours où il est supérieur à 4°C et une nuit où il est caractérisé comme intense car supérieur à 6°C. D'autres villes ont vu également une nuit atteindre un ICU intense, notamment le 1er avril : La-Mézière, Thorigné-Fouillard, Melesse et La-Chapelle-des-Fougeretz ce qui peut être dû à une situation climatique particulièrement favorable sur ces villes toutes au Nord, Nord-Est de Rennes.

**Tableau 3.** Synthèse d'observation de l'ICU pour le mois d'avril 2021. ICU journalier (°C) ; ICU moyen (°C) ; Nombre de jours où l'ICU est faible (<2°C) ; Nombre de jours où l'ICU est modéré (entre 2°C et 4°C) ; Nombre de jours où l'ICU est fort (entre 4°C et 6°C) ; Nombre de jours où l'ICU est intense (>6°C) (Garcia, 1996)

	ICU moyen	ICU journalier	Faible	Modéré	Fort	Intense
Rennes	2.8	4.3	2	11	15	1
Cesson-Sévigné	1.6	2.7	7	23	0	0
Saint-Jacques	1.3	2.3	13	17	0	0
Saint-Grégoire	0.8	1.7	23	6	0	0
Vern-Sur-Seiche	0.6	1.4	27	3	0	0
Le Rheu	0.9	1.8	17	13	0	0
Pacé	1.1	2.0	12	18	0	0
Betton	1.4	2.3	9	21	0	0
Chantepie	1.3	2.5	12	18	0	0
La Mézière	1.1	2.6	13	10	6	1
Thorigné-Fouillard	1.3	2.5	14	12	3	1
Vezin-Le-Coquet	1.0	2.2	13	16	1	0
Melesse	1.5	3.1	10	12	7	1
L'Hermitage	0.5	1.6	21	9	0	0
La-Chapelle-des-Fougeretz	1.5	3.0	11	11	7	1
Montgermont	0.8	1.8	19	11	0	0
Chevaigné	0.9	2.0	16	13	1	0

Cependant ces 4 villes montrent des comportements inattendus puisque sur l'ensemble du mois d'avril, le nombre de jours où l'ICU est fort y est également important, ce qui semble indiquer que plusieurs facteurs concourent à expliquer l'intensité de l'ICU.

### Influence de la tâche urbaine

Modèles de Régression	ICU journalier			ICU moyen		
	R	R <sup>2</sup> (ajusté si X>1)	P-valeurs	R	R <sup>2</sup> (ajusté si X>1)	P-Valeurs
Taille de tâche urbaine	0,69	0,47	0,002	0,81	0,66	7,99E-05
Taille de tâche urbaine + Latitude	0,83	0,64	1.45E-05	0,87	0,71	1,79E-09
			0.038			0.002

Taille de tâche urbaine +	0,83	0,62	2,12E-04	0,88	0,72	2,18E-05
Latitude +			0,01			0,03
Longitude +			0,53			0,27
Taille de tâche urbaine +	0,83	0,56	0,47	0,89	0,69	0,23
Latitude +			0,04			0,04
Longitude +			0,54			0,38
Population +			0,87			0,29
Distance à Rennes			0,75			0,86

**Tableau 4.** Régression linéaire des valeurs de l'ICU journalier, ICU moyen et des différentes variables explicatives

Dans un premier temps, afin de comprendre la relation entre tâche urbaine et ICU (Tableau 4), deux régressions linéaires simples ont été faites. Elles intègrent uniquement la taille de la tâche urbaine comme facteur explicatif de l'ICU moyen et de l'ICU journalier. Ainsi la régression montre une relation linéaire forte entre les ICU moyens et la taille de la tâche urbaine (0.81), mais également une relation linéaire modérée avec les ICU journaliers (0.69). Ici, La taille de la tâche urbaine explique 66% de la variance des ICU moyens et seulement 47% des ICU journaliers. Par la suite d'autres modèles ont été réalisés en intégrant d'autres variables pouvant expliquer ces ICU comme la distance à Rennes, la longitude, la latitude et la population par commune. Les résultats obtenus montrent que le meilleur modèle expliquant ces ICU, est celui couplant la taille de la tâche urbaine et la latitude puisque le modèle explique à 71% la répartition des ICU moyens et à 64% les ICU journaliers (Tableau 4).

La campagne au sud de Rennes est plus chaude qu'au Nord. En moyenne sur l'ensemble des nuits du mois d'avril, le capteur au sud (Croix-Fleurie) est plus chaud de 0.6°C que celui du Nord (Melesse). Avec l'ICU journalier, cette différence est de 1.8°C. L'écart maximal enregistré est de 3.7°C lors de la nuit du 1<sup>er</sup> avril. D'après la station Météo-France de Rennes Saint-Jacques, les vents sont favorables au déplacement de l'ICU (faibles : < 4m/s à modéré < 8m/s). Cette station mesure le vent à 10m et relate ainsi la situation synoptique. De direction Nord-Est lors de ce mois d'avril, le vent va accentuer les contrastes locaux sur les communes au Nord de Rennes et les diminuer au sud. En effet, l'ICU rennais va se déplacer sous l'action de ce vent modéré de NE et va venir se positionner au sud sur la campagne environnante rendant ainsi les ICU des villes périphériques moins intenses.

Ainsi la latitude n'est pas l'explication directe de la dissymétrie nord-sud des ICU autour de Rennes mais correspond à une relation étroite entre la direction et la force du vent avec les « petits » ICU périurbains et l'ICU rennais. Si le concept de la formation de l'advection de chaleur urbaine et son impact sur les environnements ruraux est connu depuis longtemps (Brandsma et al., 2003; Bassett et al., 2016; Dinda & Chatterjee, 2022), notre étude confirme son impact à l'échelle des villes de taille moyenne ou des petites surfaces urbanisées (environ 1km<sup>2</sup>) (Unger et al., 2010; Bassett et al., 2017).

## Conclusion

Malgré la proximité des villes de la couronne rennais, la taille de tâche urbaine ainsi que leur position relative par rapport à Rennes ont une influence sur la répartition des ICU moyens et journaliers. Plus la taille est importante, plus l'ICU en moyenne est marqué. La latitude vient également expliquer la répartition des ICU de certaines villes en fonction de la circulation synoptique. En effet, les flux de Nord-Nord-Est dominants pendant cette période, ont provoqué des différences de températures urbaines-rurales importantes dans les villes au Nord de Rennes mais des différences moins marquées sur les villes au Sud de Rennes : cette situation résulte de l'advection de chaleur urbaine déplaçant la couche limite urbaine rennais sur la campagne environnante au sud.

## Remerciements

Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme CAPES/COFECUB Sh 941/19, CiCIAMEn (Cities, Climate And vegetation: Modeling and Environmental public policies). Elle s'intègre également au sein de la Zone Atelier Armorique et dans le SNO-Observil. Nos remerciements s'adressent aux personnes ayant participé aux campagnes de mesure, à Rennes Métropole, à la société Wi6Labs pour la récupération des données connectées ainsi qu'à la société Alkante pour la mise à disposition de ces données sur sa plateforme IoT.

## Bibliographie

- Bassett, R., Cai, X., Chapman, L., Heaviside, C., & Thornes, J. E. (2017). The Effects of Heat Advection on UK Weather and Climate Observations in the Vicinity of Small Urbanized Areas. *Boundary-Layer Meteorology*, 165(1), 181-196. <https://doi.org/10.1007/s10546-017-0263-0>
- Bassett, R., Cai, X., Chapman, L., Heaviside, C., Thornes, J. E., Muller, C. L., Young, D. T., & Warren, E. L. (2016). Observations of urban heat island advection from a high-density monitoring network. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(699), 2434-2441. <https://doi.org/10.1002/qj.2836>
- Brandsma, T., Können, G. P., & Wessels, H. R. A. (2003). Empirical estimation of the effect of urban heat advection on the temperature series of De Bilt (The Netherlands) : ESTIMATION OF URBAN HEAT ADVECTION. *International Journal of Climatology*, 23(7), 829-845. <https://doi.org/10.1002/joc.902>
- Cantat, O. (2004). L'îlot de chaleur urbain parisien selon les types de temps. *Norois*, 191, 75-102. <https://doi.org/10.4000/norois.1373>
- Dinda, A., & Chatterjee, S. (2022). Assessing the local- impacts of heat advection on urban heat islands in Kolkata Metropolitan Area. *Urban Climate*, 42, 101139. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101139>
- Dubreuil, V. (2022). Le changement climatique en France illustré par la classification de Köppen. *La Météorologie*, 116, 037. <https://doi.org/10.37053/lameteorologie-2022-0012>
- Dubreuil, V., Foissard, X., Nabucet, J., Thomas, A., & Quénel, H. (2020). Fréquence et intensité des îlots de chaleur à rennes : Bilan de 16 années d'observations (2004-2019). *Climatologie*, 17, 6. <https://doi.org/10.1051/climat/202017006>
- Dubreuil, V., Quénel, H., & Planchon, O. (2008). *Variabilité quotidienne et saisonnière de l'îlot de chaleur urbain a rennes : Premiers resultats du programme ecorurb*. 7.
- Eveno, M., Planchon, O., Oszwald, J., Dubreuil, V., & Quénel, H. (2016). Variabilité et changement climatique en France de 1951 à 2010 : Analyse au moyen de la classification de Köppen et des « types de climats annuels ». *Climatologie*, 13, 47-70. <https://doi.org/10.4267/climatologie.1203>
- Foissard, X. (2015). *L'îlot de chaleur urbain et le changement climatique : Application à l'agglomération rennaise*. 248.
- Foissard, X., Dubreuil, V., & Quénel, H. (2019). Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city : Rennes (France). *Urban Climate*, 29, 100490. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100490>
- Garcia, F. F. (1996). *Manual de climatología aplicada. Clima, medio ambiente y planificación*. adrid: Editorial síntesis, SA.
- IPCC. (2021). *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 (N° 1)*. ambridge University Press. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_Full\\_Report.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf)
- Oke, T. R. (1973). CITY SIZE AND THE URBAN HEAT ISLAND. *Atmospheric Environment*, 7(8), 11. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6)
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Routledge.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- SRADDET. (2019). *Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires*. Breizhcop. <https://www.breizhcop.bzh/wp-content/uploads/2019/12/projet-de-SRADDET.pdf>
- Unger, J., Sümeghy, Z., Szegedi, S., Kiss, A., & Géczi, R. (2010). Comparison and generalisation of spatial patterns of the urban heat island based on normalized values. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 35(1-2), 107-114. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2010.03.001>



## UN CHANGEMENT CLIMATIQUE SOUVENT OUBLIÉ : LES ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS EN AMAZONIE

Vincent DUBREUIL<sup>1</sup>, Damien ARVOR<sup>1</sup>, Vincent NEDELEC<sup>1</sup>, Jean NABUCET<sup>1</sup>, Charlotte BRABANT<sup>1</sup>, Carlos Antonio DA SILVA JUNIOR<sup>2</sup>, Laurimar VENDRUSCULO<sup>3</sup>, Bruno CARDOSO<sup>4</sup>, Marco ANTONIO Camillo de CARVALHO<sup>5</sup>, Thiago RIZZI<sup>6</sup>, Isabelle BONINI<sup>7</sup>, Luis DE ARAUJO<sup>8</sup>, Margarete AMORIM<sup>8</sup>

<sup>1</sup> LETG-Rennes, Université Rennes 2, UMR 6554 CNRS, France ([prenom.nom@univ-rennes2.fr](mailto:prenom.nom@univ-rennes2.fr))

<sup>2</sup> UNEMAT, Campus de Sinop, Brésil ([carlosjr@unemat.br](mailto:carlosjr@unemat.br))

<sup>3</sup> EMBRAPA, Sinop, Brésil ([laurimar.vendrusculo@embrapa.br](mailto:laurimar.vendrusculo@embrapa.br))

<sup>4</sup> ICV, Alta Floresta, Brésil ([bruno.cardoso@icv.org.br](mailto:bruno.cardoso@icv.org.br))

<sup>5</sup> UNEMAT, Campus d'Alta Floresta, Brésil ([marcocarvalho@unemat.br](mailto:marcocarvalho@unemat.br))

<sup>6</sup> IFMT, Campus de Sorriso, Brésil ([thiago.rizzi@srs.ifmt.edu.br](mailto:thiago.rizzi@srs.ifmt.edu.br))

<sup>7</sup> UNEMAT, Campus de Nova Xavantina, Brésil ([isabelle\\_biologa@hotmail.com](mailto:isabelle_biologa@hotmail.com))

<sup>8</sup> UNESP, Presidente Prudente, Brésil ([lf.araujo@unesp.br](mailto:lf.araujo@unesp.br), [margarete.amorim@unesp.br](mailto:margarete.amorim@unesp.br))

**Résumé :** Les données de stations urbaines et rurales sont analysées pour l'année 2020 dans quatre villes de l'État du Mato Grosso (Alta Floresta, Sinop, Sorriso et Vera), au sud de l'Amazonie brésilienne. Les villes ont des populations comprises entre 11.000 et 146.000 habitants et des surfaces urbanisées qui s'étendent entre 376 et 7861 hectares. Dans ces quatre villes, la différence de température la plus importante est observée en début de nuit pendant la saison sèche (de Mai à Septembre), montrant la dynamique horaire et saisonnière de l'îlot de chaleur urbain. L'écart ville-campagne semble augmenter également en fonction de la taille de la ville .

**Mots-Clés :** climat urbain ; Brésil; Occupation des sols.

**Abstract :** AN OFTEN FORGOTTEN CLIMATE CHANGE: URBAN HEAT ISLANDS IN THE AMAZON. Data from urban and rural stations are analyzed for the year 2020 in four cities in the state of Mato Grosso (Alta Floresta, Sinop, Sorriso and Vera), in the southern Brazilian Amazon. The cities have populations between 11,000 and 146,000 inhabitants and urbanized areas that extend between 376 and 7861 hectares. In these four cities, the most significant temperature difference is observed at the beginning of the night during the dry season (from May to September), showing the hourly and seasonal dynamics of the urban heat island. The urban-rural difference also seems to increase with the size of the city.

**Keywords :** Urban climate ; Brazil ; Land Cover.

### Introduction

Les enjeux climatiques et environnementaux en Amazonie sont nombreux : déforestation, perte de biodiversité, stockage/émission de CO<sub>2</sub>, incendies, rétroaction forêt-climat, réduction de la saison des pluies, sont autant de sujets de recherches qui occupent souvent le devant de la scène médiatique et font l'objet de très nombreuses publications (Nobre et al, 2021).

On oublie cependant que l'Amazonie est aussi une « forêt urbanisée », une région où l'essentiel de la population vit dans des villes (Becker, 1995). En effet, celles-ci ont connu un essor prodigieux depuis les programmes de colonisation notamment sur les fronts pionniers du sud et de l'est de l'Amazonie brésilienne (région aussi dénommée « Arc de déforestation »). Ainsi, le long de la route fédérale 163

(BR163) dans le Mato Grosso, plusieurs villes ont été fondées au milieu des années 1970 (Clairay et Dubreuil, 2002) et sont toujours aujourd'hui des villes en pleine croissance démographique.

L'extension spatiale de ces villes provoque, comme ailleurs, une modification des états de surface qui se répercute sur le bilan radiatif local (Oke et al, 2017 ; Amorim et Dubreuil, 2017). Augmentation des surfaces construites et imperméabilisées, réduction des surfaces en forêt et de la végétation de manière générale, produisent un réchauffement local, l'îlot de chaleur urbain (ICU). Cependant, comme ce sont des villes d'expansion récentes, elles ont peu fait l'objet de suivi climatique, l'attention étant en outre davantage tournée vers l'impact de la déforestation sur le climat. Pourtant, dans un contexte climatique déjà très chaud et en considérant les vitesses de croissance de ces villes pionnières aux formes d'habitat souvent précaires, les enjeux en termes d'ICU sont bien présents.

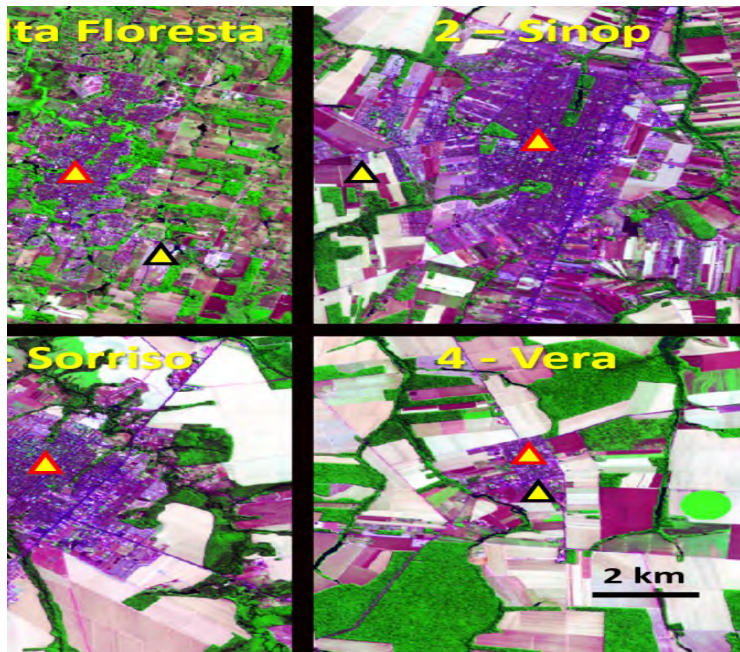
A partir de mesures réalisées en 2020 à partir de paires de stations automatiques (urbain/rural), cette étude propose de quantifier l'intensité et la fréquence des ICU dans quatre villes (Sinop, Alta Floresta, Sorriso et Vera) situées dans l'Etat du Mato Grosso, Brésil. Il s'agit aussi de vérifier si la relation entre la taille de la ville et l'intensité de l'ICU (Oke et al, 2017) se retrouve dans cette région du sud de l'Amazonie.

## 1. Cadre de l'étude, données et méthodes

L'étude du climat urbain des villes amazoniennes est encore peu développée. Les travaux pionniers de Maitelli et Wright (1996) sur Manaus, comme ceux, plus récents de Oliveira et al (2020) sur Bélem ont privilégié les grandes villes historiques. Les villes plus petites et de création plus récente n'ont fait l'objet que d'études partielles s'appuyant essentiellement sur des méthodes de transects mobiles comme à Sinop (Dubreuil et al, 2003 ; Araujo, 2021) ou Sorriso (Dubreuil et al, 2010 ; França et Gomes, 2014). Des données pérennes ont pu être utilisées dans la région d'Alta Floresta (Dubreuil et al, 2010) pour montrer l'impact des changements d'utilisation des sols sur le climat local. Cependant, de manière générale, l'absence de mesures en continu empêche de connaître la dynamique temporelle diurne et saisonnière de l'ICU et de comparer les villes entre elles.

Les villes retenues pour cette étude se situent dans la moitié nord de l'État du Mato Grosso au Brésil (figure 1). Elles ont été fondées entre 1974 (Sinop, Vera) et 1976 (Alta Floresta, Sorriso) par des compagnies privées de colonisation. Situées en bordure méridionale de l'Amazonie, ces communes ont encore une part significative de leur surface en forêt, entre 30 % à Sorriso et 47 % à Alta Floresta (Mapbiomas, 2021) ; leur occupation du sol dominante est cependant l'agriculture avec une distinction entre Alta Floresta où dominent les pâturages (49 % de la commune) et les trois autres où les cultures (de soja, coton et maïs principalement) l'emportent : 30 % à Sinop, 46 % à Vera et 60 % à Sorriso, principale commune productrice de soja du Brésil !

D'après les données de l'IBGE (2021) la population de ces communes continue à croître de manière inégale : Sinop (146.005 habitants) et Sorriso (92.769 habitants) font figure de villes très dynamiques en lien avec l'expansion de l'agrobusiness, Alta Floresta (51.959 habitants) et surtout Vera (11.402 habitants) ayant des croissances urbaines plus modestes. Les données Mapbiomas de 2020 donnent des surfaces urbanisées de 7861 hectares à Sinop, 3750 à Sorriso, 2062 à Alta Floresta et 376 hectares à Vera.



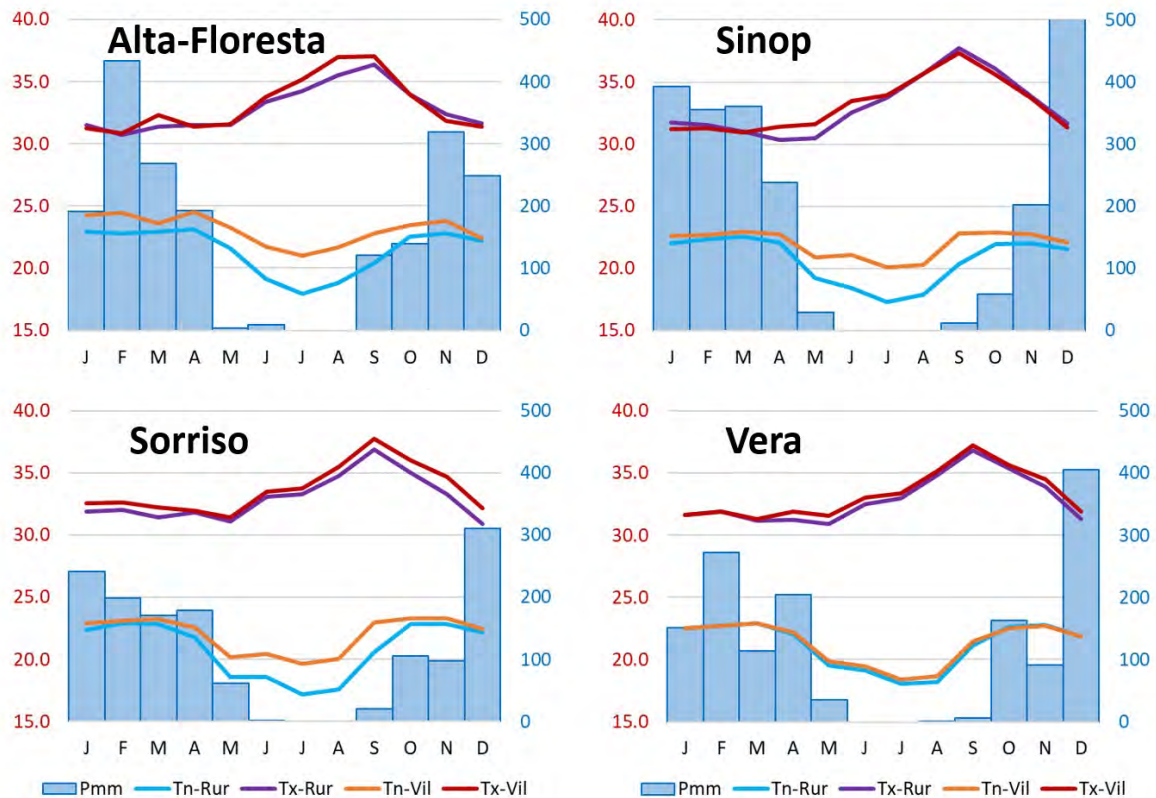
**figure 1.** Localisation des villes étudiées au Mato Grosso. A droite, occupation du sol en 2020. (Images Landsat 8 de juillet 2020, composition colorée 4, 5, 6 : forêts en vert, sols nus en blanc, villes en violet ; mêmes échelles et légendes).

Les données climatiques utilisées dans cette étude correspondent à des enregistrements réalisés tout au long de l'année 2020 par un réseau de stations automatiques de type DAVIS-Instruments, Vantage-Pro-2. Toutes les stations ont été installées de la même manière pour effectuer des mesures à pas de temps horaire à 2 mètres au dessus du sol : les paramètres mesurés sont la température, l'humidité relative, la pression atmosphérique, le vent (vitesse et direction), la pluviométrie et, pour certaines stations, le rayonnement solaire. Les données de trois stations, une urbaine et deux en périphérie rurale, sont disponibles à Vera et Sorriso, tandis qu'à Sinop et Alta Floresta, deux stations urbaines et deux stations rurales ont pu être installées : dans ce dernier cas, les données manquantes (représentant moins de 10% des observations) ont pu être comblées en utilisant les données de la station la plus proche : en effet, quelques séries ont présenté des lacunes du fait de la condition sanitaire au Brésil pendant l'année 2020 (dans cette région l'INMET n'a d'ailleurs pas pu continuer à assurer la maintenance des stations officielles !). Les distances entre les stations du centre ville et celles de la campagne sont comprises entre 4 et 5 kilomètres sauf à Vera où, du fait de la taille de la ville, elle n'est que de 1,4 kilomètre. Enfin, pour les 4 villes, la différence d'altitude entre le site urbain et le site rural ne dépasse pas 20 mètres.

Tous les sites d'études sont localisés en climat tropical à saison alternée (type Aw de Köppen selon Dubreuil et al, 2018) avec une saison sèche de mai à septembre et une saison des pluies d'octobre à avril. L'année 2020 a été une année proche des moyennes pour les précipitations à Alta Floresta et Sinop (environ 2000mm) mais déficitaire à Vera et Sorriso (1400mm). Les températures moyennes sont très proches entre les stations : entre 26 et 27°C pour les moyennes, les températures minimales moyennes annuelles étant comprises entre 20 et 21°C et les maximales entre 31 et 32°C.

## 2. Résultats : une différence ville campagne surtout marquée en saison sèche

Les mesures de l'année 2020 montrent des différences de températures entre les stations urbaines et rurales qui restent modestes quand on les regarde au niveau annuel, toujours inférieures à un degré, sauf à Sinop (1,09°C). La différence est toujours plus marquée pour les moyennes des minimales (entre 1,2 et 1,6°C) que pour les maximales (0,3 à 0,7°C) sauf à Vera où la différence ville-campagne est très légèrement supérieure pour les maximales. L'effet d'îlot de chaleur urbain est donc bien marqué mais ne s'imprime que modestement sur les valeurs annuelles.

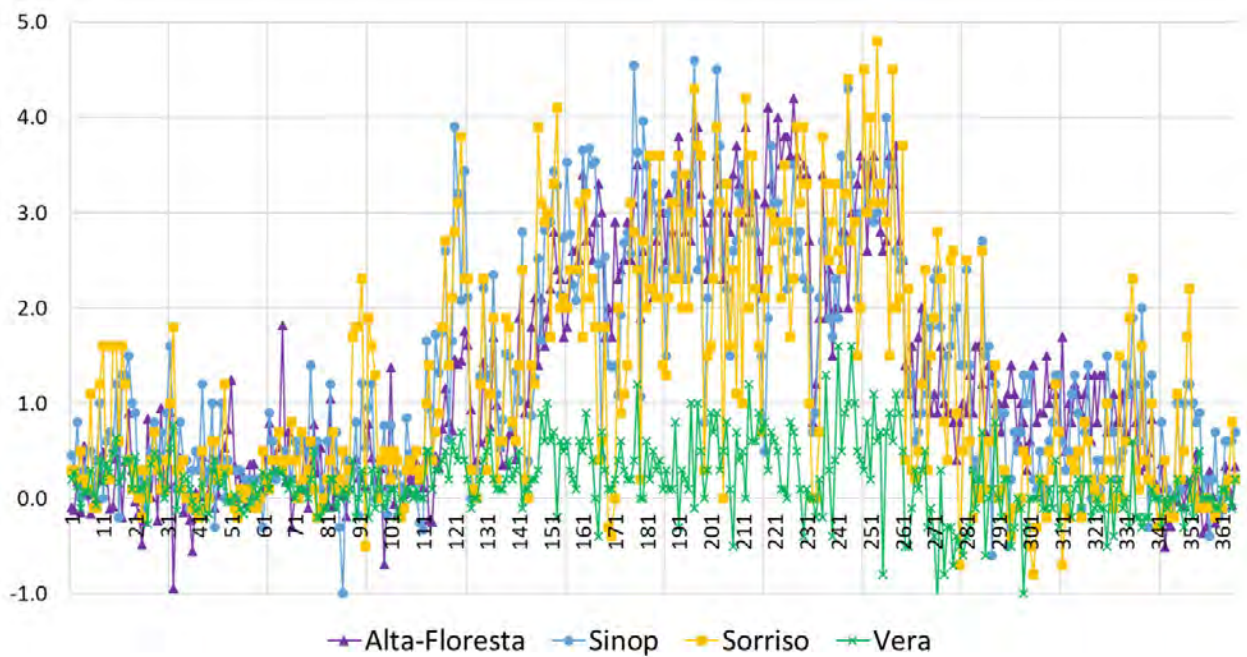


**figure 2.** Températures minimales (Tn) et maximales (Tx) moyennes et précipitations (Pmm) mensuelles en 2020 à Alta Floresta, Sinop, Sorriso et Vera ; stations urbaines (Vil) et rurales (Rur).

Le détail saisonnier apporte des nuances importantes à ce tableau (figure 2). En effet, les différences de températures ville-campagne s'estompent très nettement en saison pluvieuse pour les maximales comme pour les minimales : pour toutes les stations, l'écart n'est que de quelques dixièmes, parfois insignifiant. L'écart entre les températures minimales ne s'accuse vraiment (plus de 1,5°C) que de mai à septembre et atteint une amplitude maximale en juillet où il est compris entre 2 et 3°C (toujours à l'exception de Vera où l'écart moyen ne dépasse jamais 0,5°C). Les conditions de faibles pluviosité et nébulosité, ainsi que la moindre vitesse du vent de la saison sèche dans cette région, sont clairement des conditions favorables à l'établissement de situations d'îlot de chaleur urbain.

Les intensités quotidiennes de l'ICU permettent de préciser la dynamique saisonnière du phénomène (figure 3). Ainsi, pour les trois villes principales, les situations d'ICU modéré (plus de 2°C de différence entre la ville et la campagne) représentent une centaine d'observations qui sont toutes comprises entre mai et septembre inclus ; les situations à fort ICU (plus de 4°C soit moins de 10 observations quotidiennes pour chacune des villes) s'observent de juin à septembre à Sinop et Sorriso et seulement en août à Alta Floresta : le cœur de la saison sèche est donc bien la période de l'année la plus favorable à la mise en place d'ICU modérés à forts.





**figure 3.** Intensités quotidiennes de l'îlot de chaleur urbain (en °C) du 1<sup>er</sup> janvier au 31 décembre 2020 à Alta Floresta, Sinop, Sorriso et Vera.

### 3. Résultats : une différence ville campagne qui augmente avec la taille de la ville ?

Les tailles différentes des villes, tant par leur population que par leur surface urbanisée, amènent à se poser la question du lien entre taille de la ville et intensité de l'ICU, bien connu dans la littérature (Oke et al, 2017). Pour les quatre villes étudiées ici, la différence d'urbanisme est également à prendre en compte : dans les trois villes principales, le centre est majoritairement constitué de bâtiments à deux ou trois niveaux, alors qu'il existe très peu de bâtiments à plus de deux niveaux à Vera. Les immeubles de 6 étages et plus sont inexistantes à Vera, rares à Alta-Floresta, un peu plus nombreux à Sinop et Sorriso mais dispersés sur l'ensemble de la zone urbanisée. Dans les quatre villes, les rues sont larges, généralement asphaltées et les principales avenues dotées de petits arbres d'ornement. Enfin, les entrepôts et zones industrielles ont une forte extension en périphérie des trois villes principales, surtout à Sinop et Sorriso où les infrastructures liées à l'agrobusiness sont importantes.

Les données du tableau 1 opposent nettement Sinop et Vera en termes de taille comme de fréquence et d'intensité d'ICU ; en première approche, Alta-Floresta et Sorriso apparaissent en situation intermédiaire. Vera se distingue des autres villes car sa plus petite taille entraîne une quasi absence de situation d'ICU. La ville est légèrement plus chaude que la campagne mais de manière très marginale et aucun ICU n'atteint 2°C : peut-on alors vraiment parler d'ICU ? A l'opposé, Sinop affiche des valeurs d'ICU significatives et comparables à celles de villes de taille similaire (Amorim et Dubreuil, 2017 ; Oke et al, 2017) : près de 200 jours par an avec une différence ville-campagne supérieure à 1°C (contre 12 à Vera) et 110 jours d'ICU modéré (aucun à Vera).



**Tableau 1.** Synthèse des observations d'ICU en 2020 à Alta Floresta, Sinop, Sorriso et Vera.

	Alta-Floresta	Sinop	Sorriso	Vera
Population (habitants)	51.959	146.005	92.769	11.402
Surface urbanisée (hectares)	2.062	7.861	3.750	376
ICU moyen sur Minis quotidiens (°C)	1,26	1,35	1,16	0,18
ICU maximum observé (°C)	4,2	4,6	4,8	1,6
Nombre jours ICU > 4°C (fort)	3	5	8	0
Nombre jours ICU > 2°C (modéré)	105	110	104	0
Nombre jours ICU > 1°C (faible)	173	191	162	12

Ainsi, dans le cas de Sinop, la dynamique horaire et saisonnière de l'ICU apparaît clairement sur la figure 4 : il atteint son intensité maximale vers 00:00 UTC (1,6°C en moyenne) et au cœur de la saison sèche où il atteint une valeur de 3,2°C (juillet). Cet ICU se maintient à des niveaux élevés toute la nuit pour disparaître vers 05:00 UTC (9 heures locales). En revanche, la différence de température nocturne entre la ville et la campagne reste inférieure à 1°C de novembre à mars. Signalons également que, contrairement aux autres villes étudiées ici, la plupart des mois montrent une température légèrement plus fraîche en ville pendant la journée ; dès 22-23:00 UTC, en revanche, l'ICU se reforme très rapidement (Amorim & Dubreuil, 2017).

Heur	04:00	05:00	06:00	07:00	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00	20:00	21:00	22:00	23:00	00:00	01:00	02:00	03:00	Moy
J	0.7	0.6	0.6	0.5	0.6	0.5	0.7	1.4	1.8	1.0	0.4	-0.4	-0.1	-0.3	-0.5	-0.6	-0.6	-0.4	-0.4	0.2	0.6	0.8	0.9	0.8	0.5
F	0.7	0.6	0.5	0.5	0.5	0.5	0.6	0.8	0.9	0.5	0.1	0.0	-0.8	-0.3	-0.3	0.2	-0.1	-0.1	0.0	0.4	0.6	0.7	0.7	0.6	0.5
M	0.7	0.6	0.5	0.4	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.3	-0.4	-0.5	-0.4	-0.3	-0.1	0.4	0.8	0.4	0.3	0.7	0.9	1.0	0.9	0.8	0.4
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8	1.0	1.1	1.3	1.1	1.1	0.4	0.4	0.1	0.2	0.4	-0.1	0.0	0.8	1.1	1.1	1.1	1.1	0.9
M	1.6	1.7	1.6	1.7	1.6	1.8	1.7	2.4	2.1	1.6	1.2	1.2	1.0	0.9	0.5	0.3	0.3	-0.1	0.7	1.5	1.7	1.6	1.5	1.7	1.4
J	2.0	2.4	2.6	2.6	2.5	2.6	2.4	3.0	2.3	1.6	0.9	0.6	0.7	0.7	0.5	0.2	0.0	-0.5	0.7	1.8	2.4	2.2	2.1	1.9	1.5
J	2.7	2.7	2.6	2.9	2.8	2.5	2.6	3.1	2.4	1.1	0.2	-0.2	0.0	0.0	0.2	0.6	0.8	0.7	1.8	3.0	3.2	3.2	3.0	2.7	1.6
A	2.5	2.6	2.7	2.6	2.5	2.1	2.3	3.1	1.3	0.2	-0.3	-0.5	-0.6	-0.4	0.2	0.3	0.5	0.7	2.1	3.1	3.0	2.8	2.7	2.4	1.4
S	2.3	2.5	2.4	2.5	2.4	2.2	2.2	0.7	-0.1	-0.4	-0.4	-0.4	-0.5	-0.2	0.1	0.3	0.3	1.5	2.5	2.6	2.2	2.1	2.2	1.1	1.1
O	1.1	0.9	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.4	1.0	0.3	-0.1	-0.5	-0.5	-0.7	-0.5	-0.3	0.6	0.4	0.2	0.9	1.3	1.3	1.2	1.0	0.6
N	0.8	0.8	0.8	0.7	0.7	0.7	1.2	1.7	0.6	-0.1	-0.2	-0.5	-0.3	-0.3	0.0	0.2	0.5	0.4	0.9	0.9	1.0	1.1	0.9	0.6	0.6
D	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.8	1.0	0.8	0.3	-0.2	-0.4	-0.5	-0.4	-0.5	0.0	0.1	0.6	0.6	0.8	0.8	0.8	0.9	0.5	0.5
Moy	1.3	1.3	1.3	1.4	1.3	1.3	1.3	1.3	1.0	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.4	0.5	0.4	0.8	1.5	1.6	1.5	1.4	1.3	0.9

**figure 4.** Intensités moyennes mensuelles (lignes) et horaires (colonnes) de l'îlot de chaleur urbain (en °C) à Sinop en 2020 : heures UTC, soit 4 heures de plus que l'heure locale en 2020.

Les villes de Sorriso et Alta Floresta montrent des ICU également bien marqués la nuit pendant la saison sèche. Leur valeur est en moyenne légèrement inférieure à celle de Sinop mais, alors que leur taille est intermédiaire entre Sinop et Vera, elle est bien supérieure à celle de Vera. Il semble donc qu'un effet de seuil apparaisse entre ces villes moyennes et la plus petite. On pourrait aussi s'attendre à observer un ICU beaucoup moins marqué à Alta Floresta qu'à Sorriso, la première étant presque deux fois moins peuplée que la seconde. Pourtant, les valeurs du tableau 1 sont très proches pour les deux villes, la différence de taille ne se répercutant donc pas sur la fréquence et l'intensité de l'ICU. L'explication pourrait être liée à l'environnement rural de référence : en effet, la ville d'Alta Floresta reste entourée d'une proportion importante de pâturages et de forêts, tandis qu'en saison sèche, les alentours de Sorriso sont surtout occupés par des sols nus : la moindre présence de végétation et donc d'évapotranspiration et de dissipation de chaleur latente dans la campagne autour de Sorriso limite la baisse de température nocturne et fait donc moins apparaître la ville comme chaude ; à Alta Floresta, la plus forte présence de végétation en campagne accentue au contraire le différentiel ville-campagne ajoutant un surcroît d'effet d'ICU. En d'autres termes, la caractérisation de l'intensité de l'ICU ne

dépend pas uniquement de la taille de la ville mais aussi de son contexte et de son environnement rural qui tend à la faire ressortir de manière plus ou moins contrastée par rapport à la campagne.

### Conclusion

Les villes pionnières de l'Amazonie brésilienne participent donc également aux transformations climatiques locales : par l'extension de leurs surfaces urbanisées elles génèrent des situations d'îlot de chaleur urbain bien présentes la nuit pendant la saison sèche. Si cet ICU est presque inexistant dans les toutes petites villes comme à Vera, il devient significatif pour des villes de plus de 50.000 habitants et davantage *a fortiori* pour des villes plus grandes comme Sinop. La comparaison entre Sorriso et Alta Floresta montre que l'intensité de cet ICU ne dépend pas uniquement de la taille de la ville mais aussi de l'environnement rural et de la végétation préservée aux alentours.

**Remerciements** : Cette étude a été réalisée dans le cadre des programmes CAPES/COFECUB Sh 941/19, CiCIAMEn (Cities, Climate And vegetation: Modeling and Environmental public policies), ODYSSEA (UE-RISE, n°691053) et le soutien de Rennes Métropole (Aide à l'Installation Scientifique de Damien Arvor). Les auteurs remercient l'ensemble des institutions et personnes (trop nombreuses pour être citées ici) qui ont participé aux campagnes de mesures.

### Bibliographie

- Amorim M., Dubreuil V., 2017 : Intensity of Urban Heat Islands in Tropical and Temperate Climates. *Climate*, **91**, 1-22.
- Araujo, L. F., 2021 : *Ilhas de calor em Sinop-MT: análise das características térmicas em conjunto com os aspectos socioeconômicos e ambientais*. Dissertação (Mestrado em Geografia) - UNESP, Presidente Prudente, 167 pages.
- Becker B., 1995 : Undoing myths: the Amazon – an urbanized forest. In: CLÜSENERGODT M., SACHS I., (orgs.) *Brazilian perspectives on sustainable development for the Amazon region*. Paris: UNESCO, v. 15, 53-89.
- Clairay M., Dubreuil V., 2002 : Etude de l'évolution diachronique de la Gleba Celeste (Mato Grosso) a partir d'images Landsat. *Espaço e Geografia*, **5(1)**, 119-138.
- De Oliveira J. V., Cohen J. C. P., Pimentel M., Tourinho H. L. Z., Lôbo M. A., Sodrê G., Abdala A., 2020 : Urban climate and environmental perception about climate change in Belém, Pará, Brazil. *Urban Climate*, **31**, 100579.
- Dubreuil V., Nedelec V., Bariou R., Maitelli G. T., 2003 : Estudo da urbanização e suas consequências sobre as temperaturas noturnas em Sinop/Mato Geosso. *Revista Mato-grossense de Geografia*, **07/08**, 25-39.
- Dubreuil V., Delahaye C., Le Strat A., 2010 : Changements d'occupation du sol et leurs impacts climatiques au Mato Grosso, Brésil. *Confins*, **10**, 1-20.
- Dubreuil V., Fante K. P., Planchon O., Sant'Anna Neto J. L., 2018 : Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. *Confins*, **37**, 1-20.
- França M. S., Gomes E. S., 2014 : Indícios de ilha de calor urbana em Sorriso/MT. *Revista Monografias Ambientais – REMOA*. **14(3)**, 3366-3376.
- IBGE, 2021 : Estimativos de População 2020. <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/>
- Maitelli G.T., Wright I.R., 1996 : The climate of a riverside city in the Amazon Basin: urban-rural differences in temperature and humidity. *Amazonia, Deforestation and Climate*, Vol. 1. John Wiley & Sons: Londres; 193– 206.
- MapBiomas, 2021 : Project / plataforma MapBiomas—Collection 4.1, Dados 2020. <https://plataforma.mapbiomas.org>
- Nobre, A. et al, 2021 : *Amazon Assessment Report 2021*. Science Panel for the Amazon. United Nations Sustainable Development Solutions Network, New York, USA. 469Pages.
- Oke T. R., Mills G., Christsen A., Voogt J. A., 2017 : *Urban Climates*. Cambridge University Press. 526 pages.

## CARTOGRAPHIE DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN GRÂCE AUX THERMOMÈTRES EMBARQUÉS DANS LES VOITURES CONNECTÉES : CAS À TOULOUSE ET DIJON

Eva MARQUES <sup>1</sup>, Valéry MASSON <sup>2</sup>, Philippe NAVEAU <sup>3</sup>, Olivier MESTRE <sup>4</sup>, Vincent DUBREUIL <sup>5</sup>, Yves RICHARD <sup>6</sup>.

<sup>1</sup> [Centre National de Recherches Météorologiques, Toulouse, France, eva.marques@meteo.fr](mailto:eva.marques@meteo.fr)

<sup>2</sup> [Centre National de Recherches Météorologiques, Toulouse, France, valery.masson@meteo.fr](mailto:valery.masson@meteo.fr)

<sup>3</sup> [Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Paris, France, philippe.naveau@lsce.ipsl.fr](mailto:philippe.naveau@lsce.ipsl.fr)

<sup>4</sup> [Météo-France, Toulouse, France, olivier.mestre@meteo.fr](mailto:olivier.mestre@meteo.fr)

<sup>5</sup> [LETG-Rennes, UMR-6554-CNRS, Université de Rennes 2, Rennes, France, vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr](mailto:vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr)

<sup>6</sup> [CRC-Biogéosciences, UMR-6282-CNRS, Université de Bourgogne-Franche-Comté, Dijon, France, yves.richard@u-bourgogne.fr](mailto:yves.richard@u-bourgogne.fr)

**Résumé :** Les zones urbaines s'étendent rapidement et une part grandissante de la population mondiale s'installe en ville. L'impact de l'îlot de chaleur urbain (ICU) sur le confort thermique et la santé des citoyens préoccupe de plus en plus les décideurs locaux qui ont besoin de données climatologiques précises. Face à la difficulté de déployer des réseaux de mesure en ville, les climatologues se tournent vers de nouvelles sources de données collectées par la population. En les comparant à un réseau de stations semi-professionnelles, nous montrons que les thermomètres de véhicules connectés sont exploitables afin d'obtenir des cartes précises et fiables de l'ICU sur des zones jusqu'alors non explorées. À Dijon et Toulouse par exemple, ces nouvelles observations permettent d'analyser l'effet de l'orographie et de la météorologie sur l'ICU.

**Mots-clés :** îlot de chaleur urbain, crowdsourcing, voitures connectées

### Introduction

Plus de la moitié de la population mondiale vit désormais en ville. Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) caractérisé par des écarts de température entre la ville et la campagne environnante (Oke et al. 2017) concerne une part grandissante de la population. La température urbaine est généralement plus élevée la nuit, et l'écart s'intensifie en l'absence de nébulosité et lorsque le vent est faible. Ces conditions météorologiques sont régulièrement observées lors des vagues de chaleur, dont la fréquence et l'intensité augmentent avec le changement climatique (Perkins-Kirkpatrick and Lewis, 2020). L'ICU devient alors particulièrement préoccupant pour la santé des habitants : lors de la canicule de 2003 en Europe, Laaidi et al. (2012) ont par exemple montré que l'ICU a contribué à la hausse de la mortalité des personnes les plus vulnérables à Paris.

Face à ce constat, les villes souhaitent déployer des réseaux de mesure de température de l'air à fine échelle spatiale. Or l'implantation de stations météorologiques synoptiques en milieu urbain nécessite d'adapter les critères d'installation dictés par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) (Oke, 2004). De plus, des contraintes pratiques telles que le choix du support urbain ou les normes de sécurité freinent le déploiement de tels réseaux. En France, très peu de villes sont équipées ; nous pouvons cependant citer Dijon (Richard et al. 2018, 2021), Rennes (Dubreuil et al. 2011), ou Toulouse (Dumas et al. 2021).

Afin de pallier le manque d'observations de la température de l'air en ville, les climatologues se tournent désormais vers de nouvelles sources de données collectées par la population (Muller et al. 2015). Avec la rapide expansion des objets connectés, de plus en plus de mesures opportunes ou participatives sont récoltées par les habitants, notamment dans les zones urbaines où la densité de population est importante. Une revue de la littérature permet de cibler trois principaux systèmes d'observation dits de « crowdsourcing » pour étudier la température de l'air en ville : les smartphones, les stations météorologiques amateurs et les voitures connectées.

Les batteries de smartphones fournissent de très nombreuses mesures de température en zones denses en population (Overeem et al. 2013). Cependant, la localisation du smartphone et sa proximité avec le corps humain compliquent l'obtention d'une mesure exploitable de température de l'air dans la canopée urbaine.

Les stations météorologiques amateurs ont été plus largement exploitées pour cartographier l'ICU. En Europe, les stations connectées de l'entreprise NetAtmo ont permis d'observer l'ICU des villes de Berlin (Meier et al. 2015, Fenner et al. 2017), Londres (Chapman et al. 2017), Paris (Madelin and Dupuis 2019), Moscou (Varentsov et al. 2020), Vienne (Feichtinger et al. 2020), Toulouse (Napoly et al. 2018), Oslo (Venter et al. 2020) et Zurich (Zumwald et al. 2021). Selon ces études, un contrôle qualité rigoureux est impératif avant l'utilisation des données car les stations ne sont pas bien protégées du rayonnement solaire et leur emplacement n'est pas contrôlé. Le pourcentage d'observations écartées varie de 40 % à 75 % selon les sources.

Les véhicules connectés attirent également l'attention des météorologistes, en particulier pour l'amélioration des modèles de prévision de l'état de la route. En période hivernale, Siems-Anderson et al. (2019) ont montré que l'erreur moyenne de la température mesurée par les voitures est de 1°C. Bell et al. (2021) ont par ailleurs constaté grâce à une étude sur deux mois que l'erreur est plus importante par temps clair que lors des jours couverts ou pluvieux. En climatologie urbaine, Knight et al. (2010) ont exploré le potentiel des thermomètres embarqués dans les voitures à l'aide d'une étude participative sur Manchester. Grâce à une campagne de mesure et à l'obtention d'une base de données massive sur toute l'Europe de l'Ouest, nous approfondissons ces études en estimant l'erreur des thermomètres véhicules en milieu urbain et en période estivale, notamment lors d'une vague de chaleur favorable à l'apparition de fort ICU. Dans Marquès et al. (2022), nous quantifions l'erreur de mesure des thermomètres embarqués en comparant les températures avec un réseau dense de stations météorologiques urbaines pendant l'été 2018. Ces résultats, en partie présentés ici, permettent de faire avancer la recherche en climat urbain. Nous proposons un nouveau cas d'étude sur Toulouse, où deux configurations d'ICU nocturne sont observées par forte chaleur, avec des conditions météorologiques légèrement différentes.

## **1. Estimation de l'erreur de mesure des thermomètres embarqués**

### **1.1. Facteurs physiques dégradant la mesure des thermomètres embarqués**

Pour comprendre l'influence de la vitesse du véhicule sur la mesure du thermomètre embarqué, une campagne de mesure est effectuée à Toulouse lors de la canicule de juin 2019. Lorsque la voiture est à l'arrêt et que le rayonnement solaire est fort, l'erreur du thermomètre augmente pendant plusieurs minutes jusqu'à atteindre +7°C d'écart avec la température de l'air mesurée par une sonde sous abri. Cet écart diminue lorsque la voiture prend de la vitesse et se stabilise au bout d'une dizaine de minutes autour de +1°C. La vitesse du véhicule agit comme une ventilation sur le thermomètre embarqué.

campagne de mesure est effectuée à Toulouse lors de la canicule de juin 2019. Lorsque la voiture est à l'arrêt et que le rayonnement solaire est fort, l'erreur du thermomètre augmente pendant plusieurs minutes jusqu'à atteindre +7°C d'écart avec la température de l'air mesurée par une sonde sous abri. Cet écart diminue lorsque la voiture prend de la vitesse et se stabilise au bout d'une dizaine de minutes autour de +1°C. La vitesse du véhicule agit comme une ventilation sur le thermomètre embarqué.

Nous avons étudié plus largement l'influence du rayonnement solaire sur le thermomètre véhicule grâce à une base de données de 6,7 milliards d'observations de voitures connectées ayant circulé de juin 2016 à décembre 2018 sur toute l'Europe de l'Ouest. Les données ont été récoltées dans le cadre d'un contrat d'assurance que le constructeur automobile PSA propose à ses clients. En échange de services d'aide à la conduite, ces derniers acceptent de partager les données personnelles de leur véhicule connecté. Chaque observation est composée d'une température arrondie à 0,5°C, du relevé du jour et de l'heure de la mesure (précise à la seconde), des coordonnées GPS, de la vitesse du véhicule arrondie à 5km.h<sup>-1</sup>, de l'altitude. La répartition des données varie dans le temps et l'espace en fonction de la densité du trafic : celui-ci est plus intense en journée et notamment aux heures de pointe, en particulier dans les villes et sur les grands axes routiers. Aussi, afin de protéger la vie privée

des conducteurs, les données ont été anonymisées et il est impossible de suivre les trajets, qui n'ont pas d'identifiant.

Grâce à deux études de cas au mois d'août 2018 sur les villes de Rennes et Dijon, nous avons pu établir un lien entre le rayonnement solaire et l'erreur de mesure des thermomètres embarqués. En effet, ces deux villes sont équipées de réseaux de stations météorologiques semi-professionnelles depuis respectivement 2004 (Dubreuil et al. 2011) et 2014 (Pohl et al. 2015). Ils ont été déployés selon une méthodologie rigoureuse : la plupart des types de zones urbaines définies dans Stewart and Oke (2012) sont équipées. Le large échantillon d'un mois de données PSA a été comparé à ceux des deux réseaux météorologiques urbains. Nous avons sélectionné les observations véhicules situées à moins de 200m des stations de référence disponibles pour calculer l'écart de mesure entre les deux sources de données. Grâce aux stations synoptiques de chaque ville (situées respectivement aux aéroports de Dijon Longvic et Rennes St-Jacques) qui mesurent le rayonnement solaire incident, nous avons constaté que l'erreur des thermomètres embarqués augmente linéairement avec le rayonnement solaire.

### 1.2. Proposition de correction de l'erreur de mesure

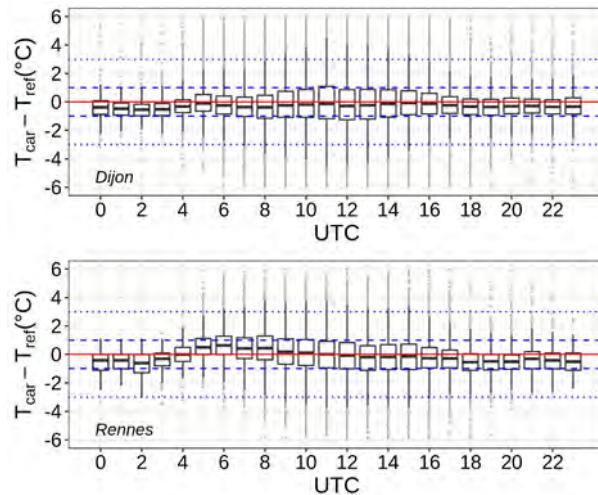
Dans la base de données de véhicules PSA, les observations ont été anonymisées et il n'y a pas d'identifiant pour le trajet. Il est impossible de connaître le temps de roulage depuis le départ. Néanmoins, nous avons supprimé par précaution toutes les observations inférieures à 10 km.h<sup>-1</sup> pour la suite de l'étude.

D'après les résultats sur l'impact du rayonnement solaire sur le thermomètre embarqué, nous proposons une modélisation de sa contribution à l'erreur de mesure  $\Delta T$  avec la relation linéaire suivante :  $\Delta T = \alpha + \beta \times SW + \epsilon$  où SW est le rayonnement solaire horaire mesuré à la station synoptique de l'aéroport, considéré par manque de données à plus fine échelle comme uniforme sur la ville ;  $\alpha$ ,  $\beta$  les coefficients de la régression estimés par moindres carrés pour chaque ville et  $\epsilon$  le terme d'erreur. La grandeur  $\Delta T$  est ensuite retranchée à la mesure pour obtenir une observation corrigée, qui est utilisée pour estimer l'erreur de mesure des thermomètres embarqués.

### 1.3. Estimation de l'erreur de mesure après correction

Après avoir appliqué les corrections précédemment citées, la moyenne et la dispersion de l'erreur de mesure sont estimées. Les intervalles de confiance asymptotiques à 95 % obtenus sont disponibles dans le Tableau 1. Grâce à la correction sur le rayonnement solaire, la moyenne de l'erreur est proche de 0°C pour les deux villes, de jour comme de nuit. L'écart-type est faible la nuit ( $\sigma \approx 1,1^\circ\text{C}$ ) mais augmente le jour, notamment lorsque le rayonnement solaire est fort ( $\sigma \approx 2^\circ\text{C}$  quand il est supérieur à  $700\text{W.m}^{-2}$ ). Les diagrammes en boîtes de la Figure 1 confirment que l'erreur est centrée et que la dispersion varie au cours de la journée, probablement avec le rayonnement solaire (dont l'effet n'a été corrigé qu'en moyenne). Aussi, l'erreur de mesure est estimée avec les voitures à moins de 200m de stations professionnelles, or ce rayon est assez grand pour observer de réelles variations de température très localement, plus probables la journée avec les ombres portées.





**figure 1.** Diagrammes en boîtes par heure de l'erreur de mesure sur l'été 2018 des véhicules connectés par rapport aux réseaux semi-professionnels déployés sur Dijon et Rennes (Marquès et al. 2022)

## 2. Cartographie de l'ICU

Les résultats sur l'erreur de mesure des thermomètres permettent d'envisager de cartographier l'ICU sur les villes couvertes par la base de données du constructeur automobile PSA.

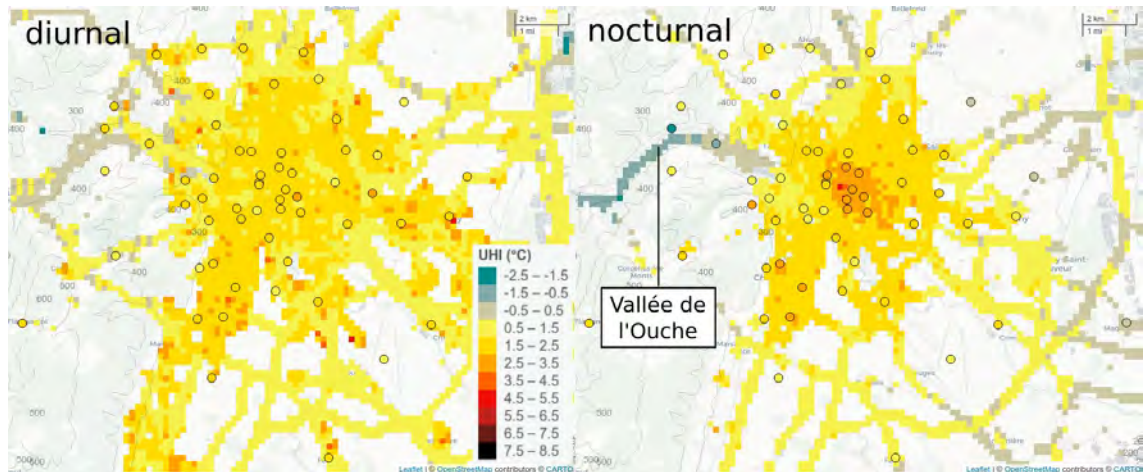
### 2.1. Calcul de l'ICU à partir de données mobiles

Les températures obtenues par les thermomètres embarqués sont des mesures mobiles opportunes. Par conséquent, il n'est pas possible de choisir un point rural fixe qui servirait de référence pour calculer l'intensité de l'ICU en tout point de la carte. Pour chaque heure, nous fixons la température de référence de l'ICU au premier décile de toutes les observations. L'ICU en chaque point est interprété en terme d'écart de température par rapport aux zones où l'ICU est nul. Sur les cartes obtenues, celles-ci correspondent à des aires rurales. Cette méthode est généralisable à n'importe quelle ville, peu importe sa topographie. Nous ajoutons 0,6°C tous les 100m d'altitude afin de s'affranchir du gradient vertical standard de température.

Pour créer les cartes, nous tirons parti de l'abondance des données et agrégeons les d'observations dans l'espace et le temps. Ceci permet d'obtenir des cartes d'ICU médian fiables à 200m de résolution.

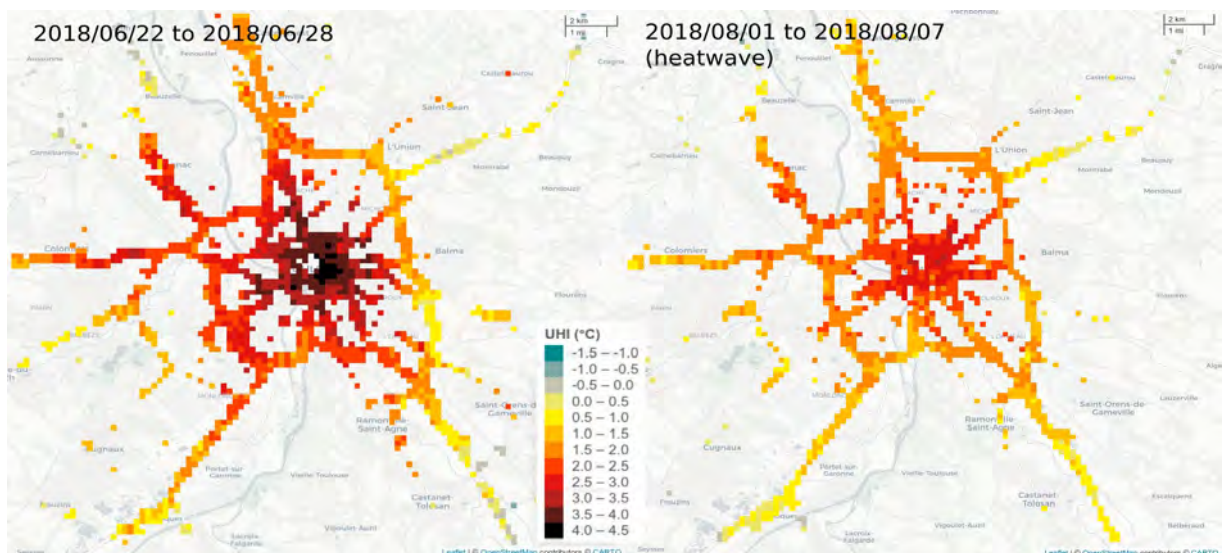
### 2.2. Cartographie à fine échelle de l'ICU grâce aux voitures connectées

À Dijon, l'ICU obtenu par les voitures connectées est conforme à celui mesuré par le réseau de stations semi-professionnelles (Figure 2). Les thermomètres embarqués fournissent des observations dans des zones non-explorées par les stations fixes. Le jour, l'ICU n'a pas de forme particulière, il est peu intense et ne varie pas beaucoup selon les zones. La nuit, l'ICU est concentrique et l'intensité maximale de 4°C est observée en centre-ville. À l'Ouest, on constate une inversion thermique de 3°C dans la vallée de l'Ouche.



**figure 2.** ICU (ou UHI en anglais) médian diurne (à gauche) et nocturne (à droite) pendant l'été 2018 sur la ville de Dijon (Marquès et al 2022). Fond de carte : données des véhicules connectés ; cercles : mesures du réseau semi-professionnel de Dijon.

À Toulouse (Figure 3), les mesures des véhicules connectés permettent de comparer l'étendue et l'intensité de l'ICU nocturne en conditions favorables (vent faible et absence de nébulosité). En période caniculaire, celui-ci s'élève à +2,5 voire +3°C dans le centre historique. Mais ce n'est pas lors de cet épisode caniculaire qu'il est le plus intense : quelques semaines plus tôt au début de l'été 2018, celui-ci atteint +4°C. En comparant les variables météorologiques sur ces deux épisodes, il apparaît que le rayonnement solaire en journée est plus intense en juin que lors de la canicule de début août 2018. Pour expliquer l'écart entre ces deux ICU, nous supposons donc que les matériaux urbains ont emmagasiné une plus grande quantité de rayonnement en juin, et l'ont ensuite restituée sous forme de chaleur la nuit. Aussi, l'intensité vent était un peu plus élevée lors de l'épisode caniculaire. Les conditions météorologiques des jours précédents, l'évolution de la végétation et l'humidité des sols des zones rurales alentours pourraient aussi expliquer cet écart.



**figure 3.** ICU nocturne médian (ou UHI en anglais) en conditions favorables hors canicule (à gauche) et lors d'une canicule (à droite) pendant l'été 2018 sur la ville de Toulouse obtenu grâce aux données des véhicules connectés.

## Conclusion

Les véhicules connectés constituent une nouvelle source de données très prometteuse en réponse aux divers freins au déploiement de systèmes d'observations de température de l'air en milieu urbain. Après correction de l'effet du rayonnement solaire, l'erreur de mesure des thermomètres embarqués est en moyenne proche de zéro, même si sa dispersion varie au cours de la journée. Les observations sont plus fiables la nuit, mais elles sont moins abondantes en raison de la diminution du trafic. Le jour, l'erreur est plus dispersée mais ceci peut être corrigé en agrégeant spatialement les observations, beaucoup plus nombreuses que la nuit.

Les véhicules connectés permettent donc d'obtenir des cartes d'ICU médian à fine échelle dans de nombreuses zones urbaines encore non explorées. Ils constituent un nouveau levier très encourageant pour continuer la recherche en climat urbain car ils ouvrent la voie à l'exploration simultanée de villes aux morphologies et environnements régionaux variés. D'autres spécialistes des sciences atmosphériques s'empareront peut-être également de ces observations, en assimilation de données ou validation de modèles par exemple.

**Remerciements** : Nous remercions Yann Guillou et Nadine Aniort, qui ont joué les rôles d'intermédiaires avec les entreprises PSA et Continental (lors de la campagne de mesures) pour l'acquisition de données de véhicules connectés.

## Bibliographie

Bell, Z., S. L. Dance, and J. A. Waller, 2021: Exploring the characteristics of a vehicle-based temperature dataset for convection-permitting numerical weather prediction. *arXiv*, 2105.12526.

Chapman, L., C. Bell, and S. Bell, 2017: Can the crowdsourcing data paradigm take atmospheric science to a new level? A case study of the urban heat island of London quantified using Netatmo weather stations. *Int. J. Climatol.*, **37** (9), 3597–3605.

Dubreuil, V., H. Quénot, X. Foissard, and O. Planchon, 2011: Climatologie urbaine et îlot de chaleur urbain à Rennes. Ville et biodiversité : les enseignements d'une recherche pluridisciplinaire, *P.Clergeau, Ed., Presses Universitaires de Rennes*, 105–122.

Dumas, G., V. Masson, J. Hidalgo, V. Edouart, A. Hanna, and G. Poujol, 2021: Co-construction of climate services based on a weather stations network: Application in Toulouse agglomeration local authority. *Clim. Serv.*, **24**, 100 274.

Feichtinger, M., R. de Wit, G. Goldenits, T. Kolejka, B. Hollósi, M. Žuvela Aloise, and J. Feigl, 2020: Case-study of neighborhood-scale summertime urban air temperature for the city of Vienna using crowd-sourced data. *Urban Clim.*, **32**, 100 597.

Fenner, D., F. Meier, B. Bechtel, M. Otto, and D. Scherer, 2017: Intra and inter local climate zone variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, Germany. *Meteorologische Zeitschrift*, **26**, 525–547.

Knight, S., C. Smith, and M. Roberts, 2010: Mapping Manchester's urban heat island. *Weather*, **65** (7), 188–193.

Laaidi, K., A. Zeghnoun, B. Dousset, P. Bretin, S. Vandentorren, E. Giraudet, and P. Beaudeau, 2012: The impact of heat islands on mortality in Paris during the August 2003 heat wave. *Environ. Health Perspect.*, **120** (2), 254–259.

Madelin, M., and V. Dupuis, 2019: Intensité et délimitation de l'îlot de chaleur urbain sur la région parisienne à partir de données participatives. XXXIIème Colloque International de l'AIC, *Le Changement Climatique, la variabilité et les risques climatiques*, 377-383.

Marquès, E., Masson, V., Naveau, P., Mestre, O., Dubreuil, V., & Richard, Y. (2022). Urban heat island estimation from crowdsensing thermometers embedded in personal cars, *Bull. Amer. Meteor. Soc.* (published online ahead of print 2022).

- Meier, F., D. Fenner, T. Grassmann, B. Jänicke, M. Otto, and D. Scherer, 2015: Challenges and benefits from crowd sourced atmospheric data for urban climate research using Berlin, Germany, as testbed. *ICUC9–9th Int. Conf. Urban Clim. jointly with 12th Symp. Urban Environ.*
- Muller, C., L. Chapman, S. Johnston, C. Kidd, S. Illingworth, G. Foody, A. Overeem, and R. Leigh, 2015: Crowdsourcing for climate and atmospheric sciences: current status and future potential. *Int. J. Climatol.*, **35** (11), 3185–3203.
- Napoly, A., T. Grassmann, F. Meier, and D. Fenner, 2018: Development and application of a statistically-based quality control for crowdsourced air temperature data. *Front. Earth Sci.*, **6**, 118.
- Oke, T. R., 2004: Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites. *Citeseer*.
- Oke, T. R., G. Mills, A. Christen, and J. A. Voogt, 2017: *Urban Climates*. Cambridge University Press.
- Overeem, A., J. R. Robinson, H. Leijnse, G.-J. Steeneveld, B. P. Horn, and R. Uijlenhoet, 2013: Crowdsourcing urban air temperatures from smartphone battery temperatures. *Geophys. Res. Lett.*, **40** (15), 4081–4085.
- Perkins-Kirkpatrick, S., and S. Lewis, 2020: Increasing trends in regional heatwaves. *Nat. Commun.*, **11** (1), 1–8.
- Pohl, B., and Coauthors, 2015: L'Ilot de Chaleur Urbain de l'agglomération dijonnaise : campagne instrumentale in situ et modélisation climatique régionale haute résolution. *Workshop MISTRALS "Modélisation climatique régionale intégrée"*, Toulouse, France.
- Richard, Y., and Coauthors, 2018: How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study. *Urban Clim.*, **26**, 258–274.
- Richard, Y., and Coauthors, 2021: Is urban heat island intensity higher during hot spells and heat waves (Dijon, France, 2014–2019)? *Urban Clim.*, **35**, 100 747.
- Siems-Anderson, A., C. Walker, G. Wiener, W. Mahoney, and S. Haupt, 2019: An adaptive big data weather system for surface transportation. *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.*, **3**, 100 071.
- Stewart, I. D., and T. R. Oke, 2012: Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **93** (12), 1879–1900.
- Varentsov, M. I., T. E. Samsonov, P. E. Kargashin, P. A. Korosteleva, A. I. Varentsov, A. A. Perkhurova, and P. I. Konstantinov, 2020: Citizen weather stations data for monitoring applications and urban climate research: an example of Moscow megacity. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, **611**, 012 055.
- Venter, Z. S., O. Brousse, I. Esau, and F. Meier, 2020: Hyperlocal mapping of urban air temperature using remote sensing and crowdsourced weather data. *Remote Sens. Environ.*, **242**, 111 791.
- Zumwald, M., B. Knüsel, D. N. Bresch, and R. Knutti, 2021: Mapping urban temperature using crowd-sensing data and machine learning. *Urban Clim.*, **35**, 100 739.

## CARTOGRAPHIER LE CLIMAT URBAIN POUR LA GESTION DU CONFORT D'ÉTÉ EN URBANISME : DE L'ANALYSE CLIMATIQUE ET LA SÉMIOLOGIE GRAPHIQUE AUX RECOMMANDATIONS

**Julia HIDALGO<sup>1</sup>, Najla TOUATI<sup>2</sup>, Sinda HAOUES-JOUVE<sup>2</sup>, Laurent JEGOU<sup>2</sup>, Geneviève BRETAGNE<sup>3</sup>, Erwan BOCHER<sup>4</sup>, Valéry MASSON<sup>5</sup>, Arnaud MAYIS<sup>3</sup>, Renaud JOUGLA<sup>1</sup>, Gwendall PETIT<sup>4</sup>, Robert SCHOETTER<sup>5</sup>, Collectif GEO-VISU<sup>6</sup>**

<sup>1</sup> National Centre for Scientific Research (CNRS), Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires (LISST), Toulouse II University, Toulouse, France ([julia.hidalgo@univ-tlse2.fr](mailto:julia.hidalgo@univ-tlse2.fr))

<sup>2</sup> Toulouse II University, Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires (LISST), Toulouse, France

<sup>3</sup> Agence d'urbanisme de Toulouse (Aua/T), Toulouse, France

<sup>4</sup> National Centre for Scientific Research (CNRS), Lab-Sticc, Vannes, France

<sup>5</sup> CNRM/Météo-France, Toulouse, France

<sup>6</sup> Françoise Bahoken (IFSTTAR AME, Nantes, France), Anne-Christine Bronner (SAGE, Université de Strasbourg), Grégoire Lecampion, Julie Pierson et Olivier Pissoat (PASSAGES, CNRS/Université de Bordeaux, France)

**Résumé :** Cette présentation propose une contribution méthodologique pour la production de diagnostics microclimatiques urbains avec un souci d'adaptation au cadre juridique, scientifique et praxéologique français. Des cartes d'analyse climatique du niveau de stress thermique diurne, des îlots de chaleur urbains nocturnes et des vents ont été effectués pour Toulouse. Sur la base de ce diagnostic climatique, des données socio-économiques et des cartes stratégiques identifiées par les experts urbains locaux sont élaborées sous forme de croquis-schéma des secteurs à enjeux, en fonction de leur comportement microclimatique, qui nécessiteront une attention particulière en matière d'urbanisme.

**Mots-Clés :** îlot de chaleur urbain, urbanisme, cartographie appliquée, cartes climatiques urbaines

**Abstract: Mapping the urban climate for summer comfort management in urban planning: from climate analysis and graphic semiology to recommendations.** This presentation proposes a methodological contribution for the production of urban microclimatic diagnoses with a concern for adaptation to the French legal, scientific and praxeological framework. Climate analysis maps of diurnal heat stress level, nocturnal urban heat islands and winds were carried out for Toulouse. On the basis of this climate diagnosis, socio-economic data and strategic maps identified by local urban experts are drawn up in the form of sketch-diagrams of the sectors at stake, according to their microclimatic behavior, which will require particular attention in terms of town planning.

**Keywords:** Urban Heat Island urbanism, applied cartography, urban climate maps.

### Introduction

En France, bien que relativement en retard par rapport aux pays pionniers dans la cartographie climatique comme l'Allemagne, Israël ou le Japon, depuis les dernières évolutions réglementaires, la lutte contre le changement climatique et l'adaptation à celui-ci deviennent des objectifs explicites des Plans Locaux d'Urbanisme (PLU)<sup>18</sup>.

A l'échelle nationale, le développement de méthodes et de techniques permettant un traitement rigoureux des questions microclimatiques dans le cadre d'un exercice d'urbanisme est très récent et le contenu relatif au microclimat urbain reste souvent très peu fourni. Bien que l'on cite souvent les

<sup>18</sup> En premier lieu, la loi Grenelle II portant engagement national sur l'environnement du 12 juillet 2010, puis la loi sur la transition énergétique pour la croissance verte n° 2015-992 du 17 août 2015.



problèmes liés à la hausse générale des températures, à l'augmentation ou à la baisse de l'intensité des précipitations et à la récurrence du phénomène de l'îlot de chaleur urbain, aucune approche quantitative et/ou spatialisée n'a été systématiquement définie.

En observant ce qui se passe dans des pays ayant déjà mené des études de climatologie urbaine appliquée, il est possible d'identifier un point commun : l'utilisation systématique des approches cartographiques permettant de spatialiser l'information climatique à l'échelle du territoire concerné. En effet, depuis près de trois décennies, des chercheurs en climatologie urbaine se sont lancés (souvent en partenariat avec les acteurs de l'urbanisme) dans l'élaboration de cartographies climatiques permettant d'enrichir le volet environnemental du diagnostic territorial et de guider, avec d'autres éléments, le processus de planification. Bien qu'apparues sous différentes appellations en fonction des pays et des échelles mobilisées, ces initiatives tendent aujourd'hui à converger autour de la dénomination générique de cartes climatiques urbaines (*Urban Climatic Map (UC-Map)*) (Ng and Ren, 2015). Le travail présenté ici s'inspire de cette série de travaux internationaux et poursuit deux objectifs principaux : adapter ce cadre méthodologique aux contextes juridique, scientifique et praxéologique français et explorer de nouvelles méthodes de représentation des données climatiques à des fins opérationnelles.

## 1. Description générale de l'approche cartographique

Les cartes climatiques représentent à la fois un outil de diagnostic microclimatique (carte d'analyse climatique de l'environnement urbain (*UC-AnMap*)) du territoire et un outil de traduction réglementaire des enjeux identifiés (la carte de recommandations pour l'aménagement urbain (*UC-ReMap*)). Les grandes lignes du contenu de ces cartes ont tendance à se normaliser à l'international en dépit d'un nécessaire ajustement aux contextes climatique, culturel, économique et urbain locaux. Plusieurs choix méthodologiques ont été effectués lors de ce travail : le premier choix consistait à se concentrer sur l'enjeu de la hausse des températures. Le deuxième choix consistait à proposer des outils pour améliorer la mise en œuvre de politiques locales de gestion du climat urbain dans une démarche méthodologique générique applicable à l'échelle nationale. L'accès à des données atmosphériques à haute résolution spatiale étant rare dans les villes françaises, le projet ANR-MAPUCE (qui a créé une base de données urbaines, architecturales et climatiques pour une cinquantaine de villes) représente un vrai saut quantitatif du point de vue de la disponibilité des données sur la description de la ville et du climat urbain. Ceci permet de proposer des méthodologies génériques (du point de vue des outils techniques) pour l'obtention de cartes climatiques qui serviront à alimenter l'étape de diagnostic d'un document d'urbanisme. Dans le cadre de cette étude, les cartes d'analyse s'appuient sur des données de modélisation numérique du climat présentées dans la section suivante mais d'autres types de données, comme celles provenant des réseaux de mesures urbains, peuvent également être mobilisées si elles sont disponibles.

## 2. Présentation du terrain et des données

La métropole toulousaine se trouve dans le sud-ouest de la France, et compte une population de plus de 750 000 habitants et se compose de 37 communes pour une surface de 118 km<sup>2</sup> (environ 16 km du nord au sud et 12 km d'ouest en est). La densité de population est d'environ 1 600 habitants/km<sup>2</sup>, faisant de la métropole toulousaine l'une des plus étendues de France. Toulouse est considérée comme l'une des métropoles les plus agréables et attractives de France. Cependant, la population de la métropole a augmenté de façon significative, avec plus de 8 000 nouveaux habitants par an au cours des vingt dernières années. La topographie de cette zone est relativement douce, allant de 102 m à 273 m d'altitude et est principalement influencée par les vallées tributaires de la Garonne. Du fait de sa situation éloignée de l'océan et de son terrain plat, le rafraîchissement apporté par les brises marines et des vallées est très limité. Toulouse bénéficie d'un climat océanique dégradé, ce qui signifie qu'il présente un contraste saisonnier marqué. En été, il y a habituellement de grandes variations de température quotidiennes accompagnées de vents chauds orientés nord-ouest ou sud-ouest. Même si la température quotidienne varie généralement entre 15 °C le matin et 30 °C l'après-

midi, des périodes de fortes chaleurs avec des températures diurnes 40 °C peuvent être atteintes. Les données décrivant la surface urbaine proviennent de la base de données MApUCE alimentée grâce à l'automatisation des indicateurs décrivant le tissu urbain et l'occupation du sol (Bocher *et al.*, 2018).

Deux catégories d'information climatique ont été mobilisées pour décrire le climat de l'agglomération toulousaine. La première catégorie fait référence à la caractérisation des situations météorologiques (amplitude thermique journalière, vent prédominant, précipitation, etc.) auxquelles sont confrontés les Toulousains (Hidalgo et Jouglu, 2018). La deuxième catégorie fait référence aux données spatialisées de microclimat issues de simulations numériques (Kwok *et al.*, 2019). L'information atmosphérique accessible à travers les simulations numériques est très riche en termes de quantité de variables, disponibilité de pas de temps et niveaux verticaux. C'est au cours de réunions d'équipe qu'ont été choisis les champs pour créer les cartes d'analyse.

#### **.Informations atmosphériques (trois types) :**

- .Le niveau de stress thermique diurne, caractérisé selon l'indicateur *Universal Thermal Climate Index (UTCI)*<sup>19</sup> car il affecte fortement le confort des citoyens et rend incontournable le recours à la climatisation dans de nombreux secteurs d'activité.
- .L'influence de la ville sur la température de l'air nocturne, caractérisée par l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU). Elle affecte la capacité des bâtiments à se refroidir pendant les heures de repos nocturne et donc la santé des habitants.
- .Les conditions aérauliques, direction et intensité du vent, permettent d'identifier les zones favorables à la ventilation naturelle et celles qui présentent un déficit de ventilation.

#### **.Niveaux verticaux (deux types) :**

Pour l'analyse thermique (stress thermique diurne et température de l'air nocturne), la moyenne pondérée des variables météorologiques à 2 m au-dessus du sol a été utilisée sur l'ensemble des tuiles SURFEX. Pour l'analyse aéraulique, sont utilisées les données issues du premier niveau du modèle atmosphérique MESO-NH situé à 10 m au-dessus du bâti.

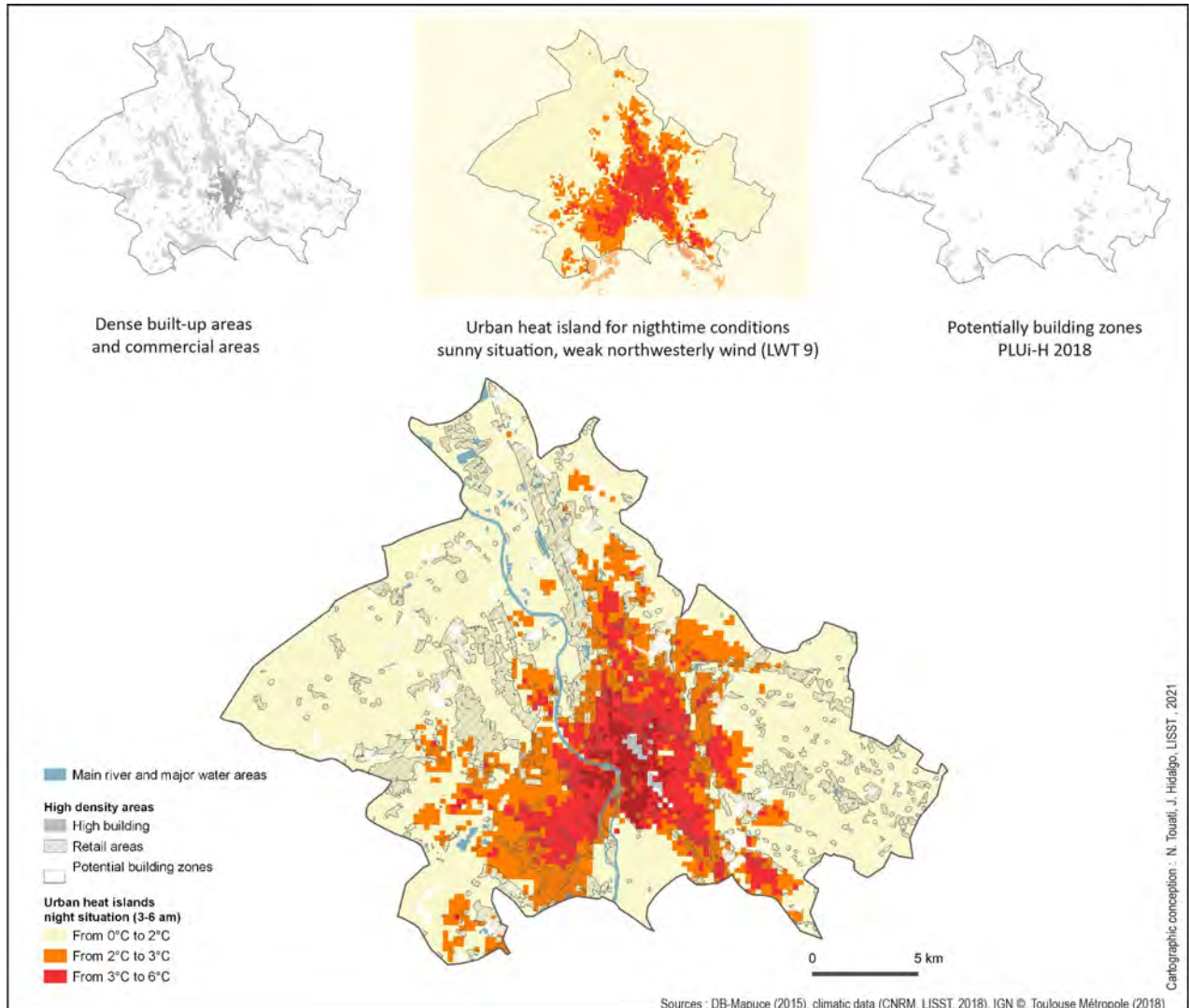
#### **.Situations météorologiques (trois types) :**

En été (juin-juillet-août), les jours appartenant à l'une des trois situations météorologiques, types de temps sensibles (TTS), propices à la formation de l'ICU où aux fortes chaleurs (TTS 7, 8 et 9, Hidalgo and Jouglu, 2018) et le jour J+1 sont isolés. Les paramètres thermiques et climatiques pour la nuit sont issus des résultats du modèle allant du jour J au jour J+1 car il est admis que ces paramètres sont principalement définis par les conditions météorologiques du jour en question. Plusieurs post-traitements statistiques ont été appliqués pour faire ressortir les zones de la ville qui présentent un comportement microclimatique différencié. Le choix a été fait de calculer, pour un type de temps donné et une tranche horaire, le niveau le plus fréquent par pixel afin d'identifier les zones particulièrement sensibles aux aléas climatiques. Ici, on s'intéresse aux effets thermiques et aérauliques. Ces zones sont ici appelées *zones de persistance*.

### 3. Exemple via les Cartes climatiques nocturnes pour Toulouse

#### 3.1 Cartes d'Analyse thermique la nuit

Dans la situation météorologique la plus favorable à la formation d'un îlot de chaleur urbain (TTS 9), l'impact de l'urbanisation sur la température de l'air nocturne dans le centre-ville de Toulouse dépasse 3 °C pour une bonne partie de cette zone (octogone et faubourgs) (figure 1).



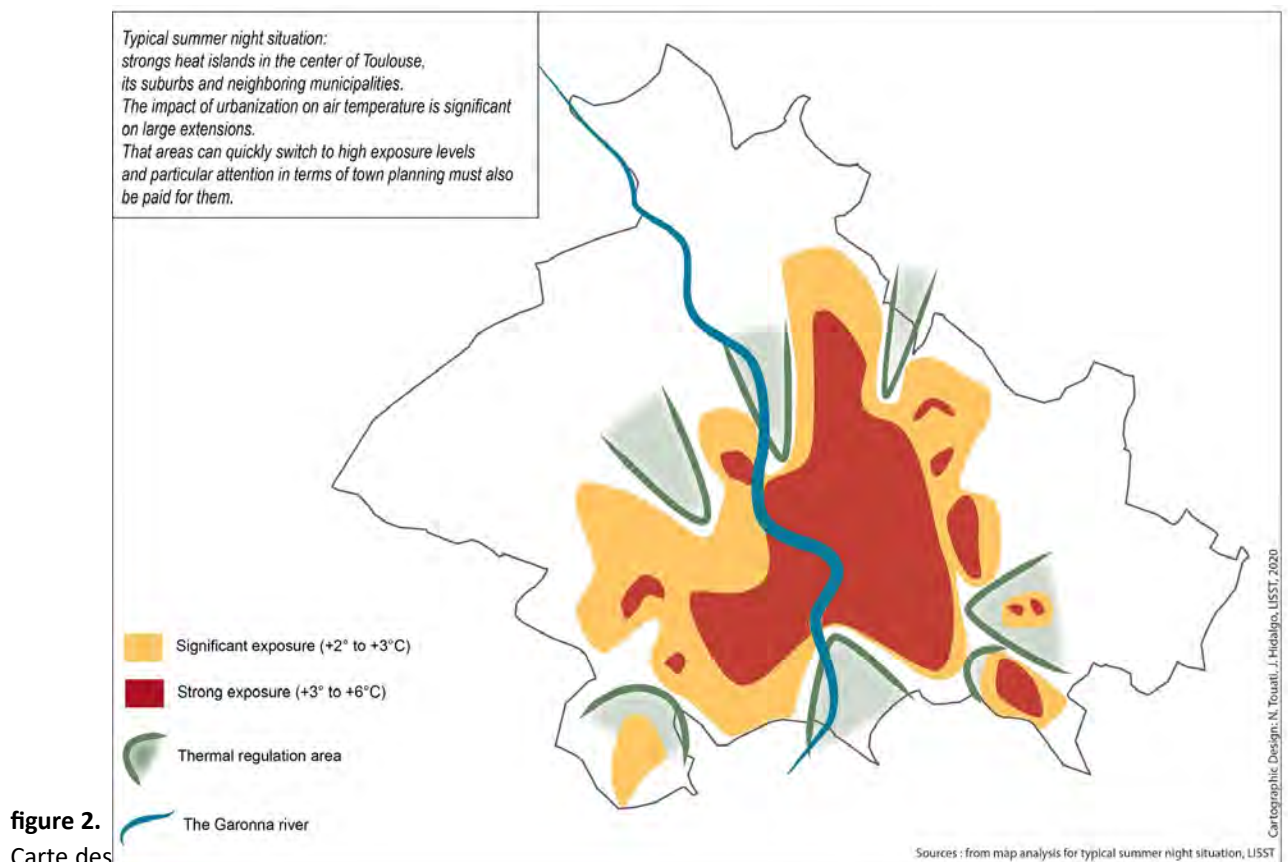
**figure 1.** Carte d'analyse de l'indicateur ICU à l'aide de simulations numériques du type de temps sensible le plus favorable à la formation de ce phénomène en été (TTS 9)

L'intensité de l'îlot de chaleur urbain peut atteindre +6°C dans les zones à l'ouest du centre ancien (entre le boulevard Antoine Carnot et le boulevard de la Gare), principalement en raison de l'advection par le vent prédominant d'air chaud du centre ancien vers l'ouest. Cet effet est plus difficile à comprendre pour le grand public lorsque la carte n'est pas accompagnée de l'explication d'un expert en climatologie. Il a donc été décidé de créer une seule classe d'exposition allant de +3°C jusqu'à l'intensité maximale d'un ICU. L'intensité varie en fonction non seulement de la situation météorologique mais également de la couverture spatiale. Les zones exposées à un ICU nocturne supérieur à +3°C varient de ~30 km<sup>2</sup> avec un TTS 9 à ~10 km<sup>2</sup> et ~0 km<sup>2</sup> avec respectivement les TTS 8 et 7 (non montré dans ce résumé). L'exposition des communes de première couronne de Toulouse (Launaget, L'Union, Balma et Saint-Orens à l'est et Blagnac, Colomiers, Tournefeuille et Cugnaux à l'ouest) à des niveaux de température élevés est moins importante que dans la commune de Toulouse

en termes de couverture spatiale. Cependant, l'impact de l'urbanisation sur la température de l'air n'est pas négligeable dans les zones étendues (en orange sur la Figure 2). Ces sont des zones qui peuvent rapidement basculer vers des niveaux d'exposition élevés. Dans cette étude, nous les appelons les *zones à basculement*, auxquelles une attention particulière doit être portée en matière d'urbanisme, notamment depuis qu'un grand nombre de nouvelles zones ont été ouvertes à l'urbanisation au nord, à l'est et au sud-est de la métropole.

### 3.2 Cartes des zones à enjeux la nuit

Grâce à cet ensemble de cartes d'analyse thématiques, il est possible de différencier les secteurs à enjeux en fonction de leur comportement microclimatique qui nécessiteront une attention particulière en matière d'urbanisme. Le choix a été fait de les représenter sous forme de croquis (figure 2).



**figure 2.**  
Carte des

zones à enjeux pour l'îlot de chaleur nocturne pour le type de temps sensible le plus favorable à la formation de ce phénomène en été (TTS 9).

Le jeu de cartes créé et les recommandations spécifiques en matière d'urbanisme ont été regroupées dans un guide de recommandations édité par Toulouse Métropole à destination de ses services et des personnels en charge de la planification et de l'aménagement urbains intitulé « Prise en compte du climat dans la construction de la métropole de demain »<sup>20</sup>. Ce guide comprend cinq sections ; dans les deux premières, sont présentées plusieurs clés pour une compréhension théorique des problématiques climatiques aux niveaux local et mondial, ainsi qu'un diagnostic microclimatique du territoire. Dans la troisième section, des recommandations détaillées sont organisées par leviers d'actions (par exemple, végétalisation, ombrage, matériaux et surfaces urbains, gestion de l'eau) et suivant les secteurs géographiques présentés précédemment (centre historique, faubourgs, centres-villes des communes de première couronne de Toulouse, zones commerciales et d'activité et actions à l'échelle de la métropole). Les deux dernières sections présentent les outils de suivi-monitoring permettant d'étudier le climat urbain de Toulouse, notamment le réseau atmosphérique urbain (Dumas *et al.*, 2021), et une liste de quatorze questions en lien avec le microclimat urbain et préalables à tout projet d'aménagement ou de planification urbaine.

## Discussion

La cartographie à visée opérationnelle est un champ mature pour un certain nombre d'enjeux environnementaux mais c'est un champ de recherche émergent pour les enjeux climatiques. Il existe en effet un standard de 2017 pour le Plan Local d'Urbanisme qui va fixer le modèle conceptuel, le catalogue de données recommandées et la description des types énumérés pour un certain nombre de thèmes environnementaux. Dans le cadre de la production de la cartographie climatique, rien n'existe pour le moment. Dans le cadre du projet ANR-MApUCE (2014-2019) nous avons testé différentes approches cartographiques. Plusieurs points peuvent être mis en avant quand nous nous interrogeons sur les conditions et limites de la répliquabilité des protocoles cartographiques développées : deux enquêtes effectuées auprès des agences d'urbanisme ont montré que l'absence ou l'insuffisance de compétences en interne combinée à un manque de formation sur les outils disponibles (notamment la base de données urbaine MApUCE dont la visibilité reste limitée), rend difficile l'intégration de ces études et méthodes scientifiques qui ne sont pas encore suffisamment connues et encore moins systématisées du point de vue opérationnel. Par ailleurs, le processus de co-construction mis en œuvre à Toulouse souligne l'importance d'un interlocuteur, un « lien » entre les chercheurs et les équipes techniques, qui peut alimenter le sujet en permanence, au sein de la collectivité ou d'une structure partenaire (ici une agence d'urbanisme). Il est également nécessaire de créer de nouveaux profils professionnels ou d'étendre les missions et compétences actuelles des professionnels du climat dans les (grandes) collectivités territoriales ou les agences d'urbanisme.

**Remerciement** : Les auteurs tiennent à remercier les Directions de la Réglementation urbaine et de l'Environnement de Toulouse Métropole et tous les agents ayant participé aux ateliers de co-élaboration des recommandations. Nous remercions également Henry Ibitolu pour son travail exploratoire sur l'analyse du vent lors de son stage de Master MURCS. Ce projet de recherche a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche sous le numéro de subvention ANR-13-VBDU-004 et par le Labex SMS qui a financé les ateliers GEO-VISU.

## Bibliographie

Bocher E., Petit G., Bernard J. and Palominos S. 2018: A geoprocessing framework to compute urban indicators: The MApUCE tools chain. *Urban Climate*, Elsevier, **24**, pp.153-174.

<sup>20</sup>[https://www.toulouse-metropole.fr/documents/10180/26954502/Guide\\_ICU\\_priseencompteclimaturbain+2021.pdf/d71ceaa2-8839-4c83-8669-cdc85545b675](https://www.toulouse-metropole.fr/documents/10180/26954502/Guide_ICU_priseencompteclimaturbain+2021.pdf/d71ceaa2-8839-4c83-8669-cdc85545b675)



Hidalgo, J. and Jouglu, R.2018c: On the use of local weather types classification to improve climate understanding: An application on the urban climate of Toulouse. PLoS ONE 1312.

Kwok Y.-T., R. Schoetter, K. Lau, J. Hidalgo, C. Ren, G. Pigeon and V. Masson 2019: How well does the Local Climate Zone scheme discern the thermal environment of Toulouse (France)? An analysis using numerical simulation data. *International Journal of Climatology*, published online, doi:10.1002/joc.6140

Ng E., & Ren C. (sous la direction de), 2015: *The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning*. Routledge, 52p.

## VARIABILITÉ ET INTERCOMPARAISON DES TEMPÉRATURES DES ZONES D'ACTIVITÉS ET COMMERCIALES, SELON DIFFÉRENTES CONDITIONS CLIMATIQUES, À TOULOUSE.

**Guillaume DUMAS**<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Centre National de Recherches Météorologiques, université de Toulouse, 42 Avenue Gaspard Coriolis Toulouse, France, guillaume.dumas@toulouse-metropole.fr

**Résumé :** Les zones industrielles et d'activités proposent de nombreuses variations urbanistiques d'un pays à un autre. Malgré une présence marquée dans l'organisation spatiale de nos territoires urbains, ces zones commerciales et d'activité ne sont pas forcément bien représentées dans les études de climatologie. Sur le territoire Toulousain, parmi les stations météo du réseau de mesure déployé ces dernières années, la zone climatique 8 « tissu d'activité » est représentée avec de multiples points de mesures dans des zones de bureaux, de commerces ou encore industrielles. Une inter-comparaison des températures de l'air de cette typologie a donc été menée sous deux angles : les différences de températures entre les différentes LCZ 8 par rapport aux références rurales et urbaines.

**Mots-Clés :** Zone climatique locale, îlot de chaleur urbain, température de l'air, zones industrielles.

**Abstract :** Industrial and activity zones offer many urban variations from one country to another. Despite a marked presence in the spatial organization of our urban territories, these commercial and activity areas are not well represented in climatology studies. In Toulouse, among the weather stations in the measurement network deployed in recent years, climate zone 8 "activity area" is represented with multiple measurement points in office, retail and industrial areas. An inter-comparison of the air temperatures of this typology was therefore carried out from two angles: the temperature difference between the different LCZ 8 compared to rural and urban references.

**Keywords :** Local Climate Zone, Urban Heat Island, Air temperature, industrial area.

### Introduction

Pour étudier la variabilité de l'îlot de chaleur urbain sur son territoire, la métropole de Toulouse s'est dotée d'un réseau de stations météorologiques (Dumas et al., 2021). Pour déployer le réseau, l'approche des zones climatiques locales -LCZ- (Stewart et Oke, 2012) couplée à d'autres thématiques comme les reliefs ou encore la Trame Verte et Bleue (TVB), a été choisie (Dumas, 2021). L'une des particularités de l'approche par LCZ est de permettre les inter-comparaisons entre tissus urbains identiques et d'aller au-delà des études classiques d'ICU, où uniquement l'urbain dense est comparé au rural. Comme la LCZ 8, tissu d'activité, est la plus présente sur le territoire toulousain (en km<sup>2</sup>) avec celle du tissu résidentiel de type pavillon individuel (LCZ 6), le réseau de stations la couvre en plusieurs points. C'est une spécificité, comparée à d'autres réseaux du même type (Dubreuil et al., 2019 ; De l'apparant et al., 2015 ; Chapman & al., 2015) ou à des réseaux basés sur d'autres technologies comme les stations amateur chez les particuliers (Fenner & al., 2017) ou dans leurs véhicules (Marquès et al., 2021) qui ne couvrent pas nécessairement bien ces LCZ. Le nombre de sites d'observations à Toulouse permet donc de réaliser une inter-comparaison des températures de l'air de cette typologie, ce qui demeure peu présent dans la bibliographie. Enfin, dernière particularité, les LCZ d'activités à Toulouse sont présentes en périphérie, comme pour d'autres réseaux disposant d'une approche par LCZ (Skarbit & al., 2017; Zhang & al., 2021), mais également proches du centre ville.

### 1. Contexte : Sites d'observation et périodes considérées

Piochant dans la diversité territoriale des LCZ 8, huit sites sont équipés de capteurs. Ils couvrent des zones industrielles typiques, comme la zone Thibaud, Fondeyre ou En Jacca. Ce sont des espaces dédiés au BTP, au fret et à la logistique. Les structures bâties ne sont pas élevées mais le taux d'imperméabilisation est important. D'autres sites concernent des zones de bureaux et/ou de commerces comme Basso Cambo, Montaudran ou Le Perget. Le bâti est principalement de type R+2 voire R+3 (10-12mètres). L'imperméabilisation est élevée mais la végétation est également présente. Les commerces sont de grandes structures bâties en métal (Decathlon, Boulanger, Truffaut, etc.). Purpan fait office de site composite, le point de mesure étant à l'intersection entre un groupe de petits commerces et de bureaux, le complexe de l'hôpital et un grand centre commercial. De plus, l'emplacement où est positionné le capteur est particulièrement traversé, avec des congestions urbaines répétées et quotidiennes, principalement dues à la jonction des périphériques et la proximité d'une artère qui mène au centre-ville. Enfin, le site de Nakache, est un espace atypique à de nombreux égards. Situé dans le centre de la ville de Toulouse sur l'île du Ramier, il se compose de grands bâtiments en métal entourés par la Garonne.

Pour comparer les températures de ces sites, deux stations rurales sont utilisées, l'une positionnée à l'orée de la forêt à l'ouest du territoire (commune de Pibrac) et la seconde sur les coteaux de l'est toulousain (commune de Mondouzil). La référence urbaine se compose de trois stations dans le centre ville.

Pour approfondir la question de la surchauffe de ces espaces, l'analyse se focalise sur l'été selon deux groupes de conditions météorologiques propices à l'ICU, à savoir les types de temps suivants (Hidalgo, 2018) :

- « très chaud/vent faible » et « chaud/SE »: les deux jours disposent de températures pouvant atteindre plus de 40°C. Le vent est faible (2m/s), soit du nord ouest, soit du sud est.

- « chaud/NO » : C'est le type de jour le plus fréquent en été avec plus de 50% des jours. La température est relativement élevée, avec une Tmax de 30°C (la Tmax moyenne est de 25°C), pour un vent de NO qui peut être relativement fort avec des pics à 4 et 6 m/s.

Afin de profiter du nombre de stations le plus grand, seul l'été 2020 et 2021 sont conservés et plus particulièrement les mois de juillet et d'août.

Les modèles de stations sont strictement identiques (DAVIS Vantage pro II), situées sur des tranches de hauteurs similaires (3,2m à 4,12m) car le gradient température est négligeable (Pigeon et al ., 2007). Enfin, l'exposition varie très légèrement voire pas du tout.

## 2. Résultats

De nuit comme de jour, quel que soit le type de temps considéré, les différentes zones d'activités étudiées révèlent des écarts de température de l'ordre d'un peu plus d'un degré entre elles (figure 1). Ainsi elles oscillent entre 1,1°C et 2,3°C d'écart avec le rural entre minuit et le lever du soleil ; entre 0°C et 1°C le jour et entre 1,7°C et 3°C un peu avant le coucher du soleil jusqu'à minuit. Quels que soient les types de temps observés, les évolutions de température suivent la même courbe que la différence urbain-rural pour chaque groupe de type de temps considéré (figure 1).

### 2.1. L'effet de la nébulosité et des durées d'exposition

Tout comme les écarts de température entre l'urbain et le rural, les différences entre les zones d'activités par rapport au rural sont moins élevées lors des type de temps « chaud été/NO » que celles des situations « chaud/SE » et « très chaud/vent faible ». En effet lors des jours « chaud/NO », la nébulosité moyenne est relativement élevée, à savoir 4,7 sur 8, l'influence du soleil est donc amoindrie. A titre de comparaison la nébulosité moyenne du groupe type de temps chaud/SE et très chaud/vent faible est de 0,87 sur 8. Nous observons ainsi des variations de températures relativement faibles entre la nuit et le jour (environ 0,6°C) puisque le couvert nuageux est plus important. En

comparaison, l'absence de nébulosité permet aux jours « chaud/SE » et « très chaud/vent faible » de disposer de variations plus marquées avec le rural, avec des maximums proches de 6°C d'écart (Purpan et Basso Cambo).

De plus les températures décroissent la nuit relativement au même rythme que l'urbain, donnant ainsi des écarts de températures similaires. Les bâtiments de ces espaces d'activités, moins élevés et dotés de matériaux différents du centre ville, comme les métaux, couplés à une disposition du bâti aérée, leur permettent donc d'avoir le même comportement de refroidissement que l'urbain. Celui-ci étant plus dense mais avec des matériaux qui emmagasinent théoriquement moins de chaleur. De plus, les activités humaines sont limitées après le coucher du soleil, ce qui facilite le refroidissement.

Une nuance est cependant à noter, avant le coucher du soleil, les températures des LCZ 8 ne décroissent pas, créant un écart de température avec le rural supérieur à celui de l'urbain par rapport au rural. Cela est dû à des expositions au soleil plus longues des LCZ 8 d'activités liées à des facteurs de vue du ciel importants dans ces espaces comparés à ceux des stations du centre-ville.

variables/nom station	Urbain-rural	LCZ 8	Nakache	Basso Cambo	Montaudran	Perget	Enjacca	Purpan	Thibaud	Fondeyre
TT	Très chaud/vent faible - chaud/SE (79)		Très chaud/vent faible -chaud/SE (79)							
Nombre de jour/Qualité	35/robuste		35/Robuste							
Tous le jeu de données	1.88	1.15	1.51	1.24	1.39	0.75	0.86	1.64	1.37	1.66
Lever du soleil (ICU classique)	2.76	1.52	2.13	1.58	1.61	1.2	1.09	2.11	1.71	2.44
Lever plus 3h	0.86	0.53	0.64	0.73	0.76	0.15	0.35	1	0.77	0.8
Zénith	0.98	0.46	0.79	0.43	0.82	0.08	0.17	0.64	0.52	0.62
Zénith plus 3h	1.04	0.57	0.74	0.58	1	0.23	0.33	0.86	0.67	0.84
Coucher du soleil	1.68	1.42	1.49	1.55	1.7	1.11	1.25	2.03	1.64	1.95
coucher du soleil plus 2h	3.23	2.16	2.69	2.29	2.37	1.61	1.84	2.93	2.51	2.74
milieu de la nuit (nadir)	2.8	1.62	2.24	1.75	1.72	1.15	1.22	2.31	1.86	2.38
jour	1.24	0.76	0.99	0.84	1.06	0.39	0.53	1.14	0.95	1.11
nuit	2.69	1.63	2.16	1.74	1.86	1.17	1.23	2.22	1.94	2.32

variables/nom station	LCZ 8	Nakache	Basso Cambo	Montaudran	Perget	Enjacca	Purpan	Thibaud	Fondeyre
TT	8	8							
Nombre de jour/Qualité	37/Robuste	27/moyen							
Tous le jeu de données	0.7	0.17	0.73	0.28	1.27	1.12	0.51	0.47	0.26
Lever du soleil (ICU classique)	0.9	0.34	0.93	0.45	1.5	1.34	0.68	0.67	0.54
Lever plus 3h	0.5	0.08	0.57	0.23	1.02	0.79	0.43	0.18	0.23
Zénith	0.52	-0.03	0.57	0.13	0.95	0.86	0.56	0.3	-0.03
Zénith plus 3h	0.57	0.08	0.65	0.13	1.02	0.98	0.48	0.35	-0.04
Coucher du soleil	0.51	0.09	0.52	0.08	0.99	0.93	0.17	0.38	0.06
coucher du soleil plus 2h	0.97	0.33	0.93	0.42	1.71	1.47	0.51	0.68	0.46
milieu de la nuit (nadir)	0.99	0.35	0.93	0.34	1.69	1.51	0.65	0.69	0.55
jour	0.55	0.07	0.6	0.17	1.04	0.92	0.44	0.31	0.1
nuit	1.03	0.39	1.02	0.61	1.68	1.5	0.61	0.82	0.53

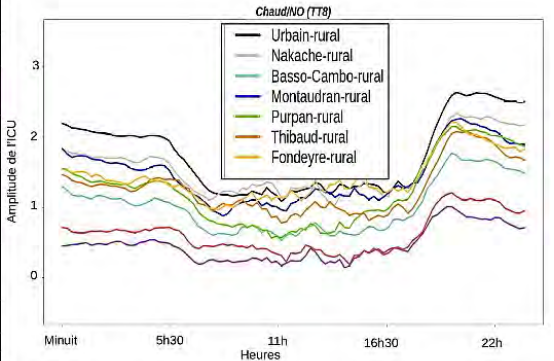
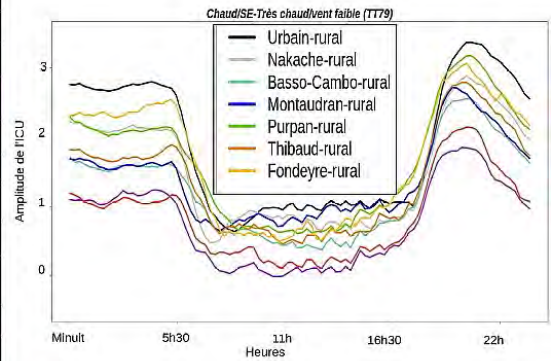


figure 1. Partie supérieure : tableaux des écarts de températures moyens (en °C), entre les stations des zones d'activités (LCZ 8) et les rurales (Bouconne et Mondouzil), selon différentes périodes du jour, sous conditions météorologiques d'été: type de temps chaud/SE et très chaud/vent faible et type de temps chaud/NO.

Partie inférieure :évolution de l'écart de température moyen sur 24 h (en °C) entre les stations des zones d'activités (LCZ 8) et les rurales (Bouconne et Mondouzil), sous conditions météorologiques d'été: type de temps chaud/SE et très chaud/vent faible et type de temps chaud/NO.

## 2.2. L'effet des espaces environnants

La station qui présente des températures les plus proches de celles du rural, et donc la plus « fraîche » des stations, est celle du Perget. Elle est située à l'ouest de Toulouse et proche de la forêt de Bouconne. Elle montre un écart de température avec le rural de respectivement de 0,47°C et 0,67°C pour le type de temps « chaud/NO » et « chaud/SE » et « très chaud/vent

faible ». Elle est suivie de près par En Jacca, elle aussi située à l'ouest du territoire, à 2km à vol d'oiseau du Perget. Les deux stations présentent des caractéristiques divergentes. En effet En Jacca est une zone d'activité du BTP et de logistique. La station est donc entourée dans un rayon de 250 mètres de petites et moyennes (moins de 100 m<sup>2</sup> d'emprise au sol) structures métalliques basses (R+1) et par des espaces très ouverts (espace entre bâti supérieur à 25m), bien que peu végétalisés et dotée de sols nus. Dans un rayon de 500 mètres autour de la station, nous observons un peu plus de variété avec des friches mais également deux entrepôts massifs de logistique (R+2 et plus de 1000 m<sup>2</sup> d'emprise au sol). La zone du Perget, quant à elle, est un espace mixte, nous énumérons dans un rayon de 250 mètres des bureaux (R+3), des bâtiments commerciaux imposants (R+2) et un espace vert doté d'un groupement d'arbres. Dans un rayon de 500 mètres nous notons du résidentiel mais également deux carrières des sites de fabrications de tuiles en terre cuite pour les toitures. Ces deux stations sont donc situées à distance équivalente de la ville à l'ouest, à altitude équivalente, dans deux espaces aux morphologies distinctes bien que de même LCZ.

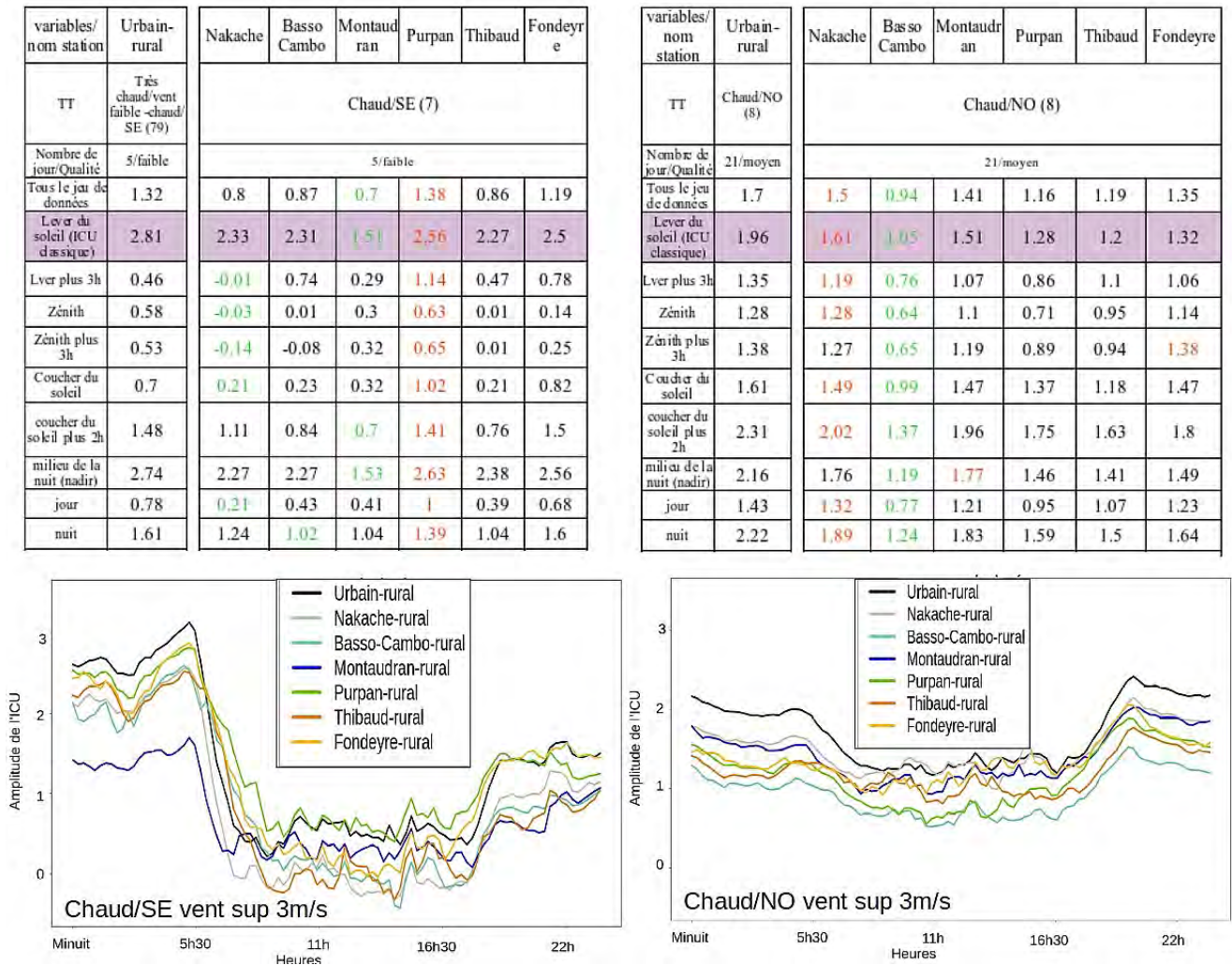
Elles disposent des températures les plus fraîches du jeu de données des LCZ8 et sont sensiblement identiques dans leurs évolution diurne l'une par rapport à l'autre, sur tout type de temps (d'été). Deux raisons sont à avancer, d'abord la distance au centre, 11 km environ, correspond à deux fois plus que les zones de Thibaud, Fondeyre, Basso-Cambo et Montaudran qui sont aux alentours de 5 km du centre. Ensuite, elles sont à l'orée de l'urbain, avec à l'ouest de ces deux espaces des espaces végétalisés. Ce sont des espaces de fortes ruptures de températures avec leurs alentours, favorisant ainsi les effets de ventilation, d'autant plus que des effets de topographie sont à envisager pour l'ouest de la station du Perget avec le passage de l'Aussonnelle (rivière).

### 2.3. L'effet des vents

Les vents impactent l'intensité de l'ICU (Balling et al., 1987), le dissipant souvent en quasi totalité à plus de 6m/s (Oke et al., 2017). Cependant peu d'études lient zones climatiques, vents et écarts de températures. Pour les zones d'activités, où le bâti est ouvert et l'indice de rugosité inférieur à l'urbain dense, il était pertinent d'aborder les écarts de températures sous ce prisme de lecture. Il en résulte que l'effet des vents est perceptible. En effet les sites d'observations situés sous l'influence du centre ville donnent des températures plus élevées que ceux situés en amont.

Pour mettre en exergue ce phénomène, sont isolés les jours avec vent du NO >3m/s pour le type de temps chaud/NO et de vent de SE >3ms selon le type de temps chaud/SE. Ceci représente un effectif respectif de 21 jours (Figure 2).





**figure 2.** Partie supérieure : écarts de températures moyens (en °C), entre les stations d'activités (LCZ 8) et les rurales (Bouconne et Mondouzil), selon différentes périodes du jour, selon des types de temps en été « chaud/SE » et « chaud/NO », avec un vent moyen supérieur à 3m/s.

Partie inférieure : évolution de l'écart de température moyen sur 24 h (en °C), entre les stations des zones d'activités (LCZ 8) et les rurales (Bouconne et Mondouzil), selon des types de temps en été « chaud/SE » et « chaud/NO », avec un vent moyen supérieur à 3m/s.

Bien que l'effectif de jours soit limité pour les conditions de vent de SE, des informations sont observables. Il ressort par exemple que sous condition de vent de SE, Montaudran, située au sud-est de la ville à 5km du centre, est clairement plus fraîche, de l'ordre de 1°C la nuit, que les autres zones d'activité. En journée, la station à l'ouest de la ville, Purpan, située à 3,5km du centre, semble être impactée par ce dernier car soumise à des températures plus élevées que l'urbain, d'où une différence de température supérieure à celle du centre par rapport au rural. L'influence est cependant faible, de l'ordre de quelques dixièmes de degrés. De plus, en condition de vent du SE, Purpan dispose quasi-systématiquement des écarts les plus élevés avec le rural, quel que soit le moment de la journée considéré. En situation de vent de NO, Purpan semble profiter des effets du vent en journée car les écarts de températures sont moins élevés que lors des situations de vent de SE, proportionnellement aux comportements des autres stations. Enfin, pour les stations Basso-Cambo et Thibaud, situées au sud-ouest, les vents impactent peu les différences de températures avec le rural, n'étant pas situés sur leurs axes par rapport à l'urbain. Fondeyre, au nord du centre, paraît impactée en milieu d'après midi.

Seules donc les stations à une distance modérée (moins de 5km) du centre-ville et dans l'axe des vents dominants voient leurs comportements thermiques influencés. Cependant les variations observées sont faibles.

### Des espaces à surveiller

Plusieurs investigations restent encore à mener pour les LCZ de tissu d'activité. En premier lieu il conviendrait d'accroître le nombre de stations positionnées sur ces espaces, afin d'approfondir ces analyses, à la fois sur la variabilité du comportement thermique entre LCZ8, mais aussi en relation avec les autres zones proches. Il reste par exemple, au nord de Toulouse, une large LCZ 8 sans point de mesure. Cet espace pourrait servir aussi de comparaison avec les zones du Perget et d'En Jacca car il est également situé à plus de 10 km du centre mais sans les espaces végétalisés dans les alentours proches. Ensuite il n'y a pas de station placée sur un centre-commercial. Plusieurs sites sont éligibles et présentent des intérêts. Nous évoquons le centre E. Leclerc de Blagnac pour pouvoir comparer avec le centre-ville de cette commune qui est particulièrement élevé en températures. Il y a également à proximité un grand espace vert avec la station des Quinze Sols (proche de la Garonne), la comparaison de ces trois points peuvent mettre en évidence un îlot de chaleur sur la commune de Blagnac.

Observer le changement d'occupation du sol représente un deuxième axe de travail à mener. En effet, certaines zones classées LCZ 8 évoluent, comme le site de Nakache qui a déjà aujourd'hui changé de visage. En effet deux bâtiments de plusieurs milliers de mètres carrés ont été détruits et un futur parc est en construction dans le cadre de la requalification de l'île du Ramier. Les stations équipées (16 sur le site et ses alentours) vont monitorer et tenter de quantifier le gain apporté par cette requalification, d'autant plus que, comme nous l'avons vu, la station Nakache est aujourd'hui un point chaud, qui ne semble donc pas tirer profit de ses espaces environnants, excepté la nuit.

Enfin, un point est à mettre en exergue, les zones d'activités sont aujourd'hui des territoires d'enjeux urbanistiques pour de nombreux territoires, malgré le taux faible d'études les concernant (Lejoux et Charieu, 2019). La direction de l'aménagement de Toulouse s'y intéresse par exemple, que ce soit par rapport aux nouvelles lois sur l'imperméabilisation des sols ou bien la quantité de foncier public disponible dans le cadre du projet 100 000 arbres de Toulouse. Ces espaces attirent aussi de nouvelles organisations territoriales (Lejoux, 2018). Par exemple, la construction de la future ligne de métro qui relie les LCZ 8 des bureaux d'Airbus du sud-est de la ville à ceux de l'ouest de la ville transforme ces espaces conçus initialement pour la voiture vers des espaces de mobilités douces. Ces modifications s'accompagnent ainsi d'interrogations sur la prise en compte du confort thermique en journée au même titre que d'autres LCZ.

**Crédit :** Le travail présenté ici est tiré du chapitre V d'une thèse soutenue en 2021 non publiée encore : Dumas G., « *Co-construction d'un réseau d'observation du climat urbain et de services climatiques associés : cas d'application sur la métropole Toulousaine* », thèse de doctorat soutenue le 23/03/2021.

**Remerciement :** Je remercie la métropole de Toulouse d'avoir financé cette recherche.

### Bibliographie :

Balling Jr, R. C., & Cerverny, R. S. , 1987, Long-term associations between wind speeds and the urban heat island of Phoenix, Arizona. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **26(6)**, 712-716.

De Lapparent, B., Roux, J., Richard, Y., Pohl, B., Bientz, S., Codet-Hache, O., ... & Thévenin, T. , 2015, Mesures de la température et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain à Dijon. *In 28ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie* (pp. 257-262). Association Internationale de Climatologie.

Dumas, G., Masson, V., Hidalgo, J., Edouart, V., Hanna, A., & Poujol, G. , 2021, Co-construction of climate services based on a weather stations network: Application in Toulouse agglomeration local authority. *Climate Services*, **24**, 100274.

Dumas G., 2021, *Co-construction d'un réseau d'observation du climat urbain et de services climatiques associés : cas d'application sur la métropole Toulousaine*, thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III.

- Dubreuil, V., Foissard, X., Nabucet, J., Thomas, A., & Quénot, H. , 2020, Fréquence et intensité des îlots de chaleur à rennes: bilan de 16 années d'observations (2004-2019). *Climatologie*, **17**, 6.
- Hidalgo, J., & Jouglà, R. , 2018, On the use of local weather types classification to improve climate understanding: an application on the urban climate of Toulouse. *PLoS one*, **13** (12), e0208138.
- Lejoux, P., & Charieau, C. , 2019, La zone d'activités économiques: objet urbain non identifié?. *Territoire en mouvement Revue de géographie et aménagement. Territory in movement Journal of geography and planning*, **43**.
- Lejoux P., 2018, Quelle place pour la zone d'activités économiques dans la fabrique de la ville contemporaine ?, in G. Baudelle, G. Gaultier, *Les nouvelles fabriques de la ville. Objets, référentiels et méthodes*, Rennes : Presses Universitaires de Rennes, pp. 25-32.
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. , 2017, *Urban climates*. Cambridge University Press.
- Marquès, E., Masson, V., Naveau, P., Mestre, O., Dubreuil, V., & Richard, Y., 2022. Urban heat island estimation from crowdsensing thermometers embedded in personal cars. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **103** (4), E1098-E1113.
- Pigeon, G. , 2007, *Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine-projets CLU-ESCOMPTE et CAPITOUL*, thèse de doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. , 2012, Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **93**(12), 1879-1900.

## CHARACTERISATION OF THE INDOOR MICROCLIMATE WITHIN THE HISTORIC ARCHIVES OF A CULTURAL INSTITUTION IN THE MEGACITY OF SÃO PAULO (BRAZIL) IN THE PERSPECTIVE OF PREVENTIVE CONSERVATION

Andrea CAVICCHIOLI<sup>1</sup>, Anna Laura CANUTO ROCHA DE ANDRADE<sup>2</sup>, Vincent DUBREUIL<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Escola de Artes, Ciências e Humanidades, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, email: andrecav@usp.br

<sup>2</sup> Museu Paulista, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil, email: annalaura@usp.br

<sup>3</sup> LETG-Rennes-COSTEL, Université Rennes 2, Rennes, France, email: vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr

**Abstract :** One of the reasons that explains the importance of developing research in the area of indoor microclimate is the concern with the conservation of cultural artefacts. This work presents and discusses the indoor microclimate of the archives of a cultural organisation located in the megacity of São Paulo, Brazil, as well as its links with the local outdoor climate. The results show that there are significant differences between the two monitored areas. The archive where a basic air-conditioning system is installed exhibits effective control on the temperature but with negative impacts on relative humidity, mainly in terms of short-term stability. The archive with no active control on T and RH displays a better performance with potentials for preventive conservation strategies aligned with the current trends toward sustainability.

**Keywords:** Indoor microclimate; Cultural heritage; Subtropical climate; Brazil.

**Résumé :** L'une des raisons de l'importance de développer la recherche dans le domaine du microclimat intérieur est le souci de la conservation des œuvres culturelles. Ce travail présente et discute le microclimat intérieur des archives d'un organisme culturel situé dans la mégapole de São Paulo, au Brésil, ainsi que ses liens avec le climat local. Les résultats montrent qu'il existe des différences significatives entre les deux zones surveillées. L'archive où un simple système de climatisation est installé a un contrôle efficace de la température, mais avec des impacts négatifs sur l'humidité relative, principalement en termes de stabilité à court terme. L'archive sans contrôle actif sur T et RH montre une meilleure performance avec des potentiels pour des stratégies de préservation préventive conformes aux standards de durabilité.

**Mots clés :** Microclimat intérieur ; Patrimoine culturel ; Climat subtropical ; Brésil.

### Introduction

The indoor microclimate has been the object of investigation for a long time. There are several reasons that explain the importance of developing research in this area, among which the predominant one is the promotion of the well-being of people, who spend a great deal of their time indoors (Nedel et al., 2015). However, the concern with environmental conditions for the conservation of cultural artefacts is also a particularly relevant question in museums, archives and, in general, all the institutions that deal with this kind of matter. The materials from which the material heritage is made undergo, like any other substance, gradual aging, a process that can be accelerated under the effect of environmental factors that affect the rate of chemical, mechanical and biological transformations (Thomson, 1986).

The need to minimize this effect, which is inherent to the nature of cultural heritage, has been the subject of debate for a long time and a vast literature has developed on the role of atmospheric pollutants (Hatchfield, 2002), of airborne biological agents (Allsopp et al., 2004; Skora et al., 2015) and light (Schaeffer, 2001), as well as air temperature and relative humidity (Bernardi, 2008). In particular, as far as the indoor microclimate is concerned, it must be stressed that both the levels of T and RH and their fluctuations over the short or the medium (i.e. seasonal) term are relevant from the point of view of heritage conservation. In fact, if on the one side air temperature and water vapour content are often decisive in determining the rate of chemical reactions involved with degradation (as well as in predisposing the development of living pests, thus promoting biodeterioration), on the other oscillations in T and RH govern the mechanical changes associated with moisture intake/release by

materials (Camuffo, 2014). This is the reason why conservators have to be aware of the actual microclimate that characterise the areas where collections are sheltered, its dynamics and the several factors involved in it: mainly, local climate, architectural aspects and forms of use and management of the spaces. In countries subject to tropical or subtropical climates, the issue becomes even more sensitive inasmuch as indoor microclimatic dynamics are, as a rule, strongly influenced by outdoor factors (Maekawa et al., 2001; Cavicchioli et al., 2017; Andrade & Cavicchioli, 2021).

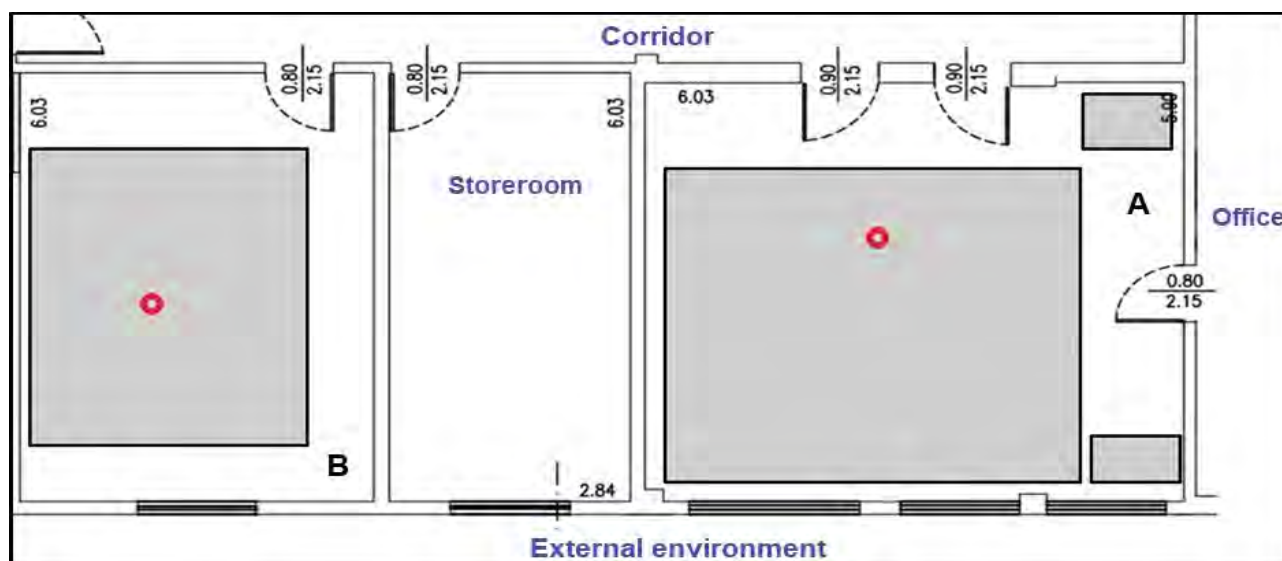
The whole matter is even more pertinent if one considers that institutions of this sort are generally located in large cities that are increasingly exposed to exacerbation phenomena like heat islands and the incoming effects of climate change (Cassar, 2009). Furthermore, the discussion about the response strategies to be designed and implemented by conservators nowadays inevitably must take into account the current trend towards sustainability (Andrade & Cavicchioli, 2021). This work presents and discusses the indoor microclimate of the repository area of the headquarters of a cultural organization located in the megacity of São Paulo, Brazil, as well as its links with the local outdoor climate.

## **Materials and methods**

The archives are located on the top floor of a four-storey building situated in the city centre. They consist of two rooms, of which one (archive A, 38 m<sup>2</sup>) contains the historic collection whereas the other (archive B, 24 m<sup>2</sup>) stores administrative documents (Figure 1). Both rooms face south-west, are provided with windows (which are 6.3-m and 1.4-m long, respectively, and are obscured by shutters) and have a ceiling height of 2.9 m. In both archives, the ceiling is made of movable gypsum panels which create, underneath the zinc roof, of a void volume approximately 1.5-m high at the roof ridge.

Archive A is provided with an air-conditioning system set at 24.5 °C (with no humidity management), whereas the microclimate in archive B is not controlled by any mechanical device.





**figure 1.** Plant of the archives of the institution that were investigated. A: historical archive, B: administration documents. The red circles indicate the position where the dataloggers were installed inside the sliding files.

The rooms are almost entirely occupied by sliding files where the actual collections are accommodated. Indoor microclimatic data (temperature and relative humidity) were collected at an hourly rate by means of dataloggers (Onset, USA) installed inside the files. The choice was made in order to get a real perception of the actual microclimate to which the artefacts are exposed. The outdoor data were measured by the same type of dataloggers installed in an external station located by the authors at a nearby site (with the exception of the pressure measurements that were retrieved from the databank of the national meteorological organization of Brazil - INMET). The water vapour mixing ratio values were calculated, as in Camuffo (2014) and Cavicchioli et al. (2017), using the empirical Magnus' formula.

It must be observed that the megacity of São Paulo has a humid subtropical climate (Cfa under the Köppen-Geiger climate classification, according to Dubreuil et al. (2015)), with an average temperature of 19.3 °C [1]. Two main seasons characterize the local climate: a rainy season (October to April, in summer the average temperature being 23 °C inside the city) and a dry one (May to September, in winter the average temperature being 17 °C).

## Results and discussion

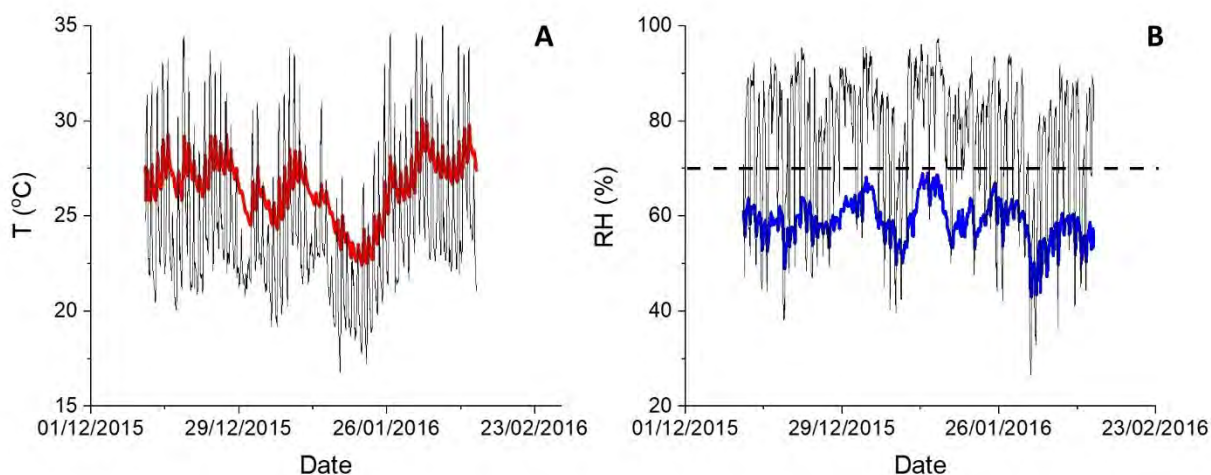
In this work, the discussion was restricted to the results of the hottest and most humid season (summer), more specifically to the two-month interval between 11/12/2015 and 11/2/2016. For these three months, rainfall and temperature were above the average for December and February and below for January. This is the time of the year when the riskiest conditions for collections take place, thus deserving special attention by conservators.

The graph showing the temperature and relative humidity profiles in archive B is displayed in Figure 2. As far as the temperature is concerned (Figure 2A), the influence of the outdoor fluctuation on the indoor microclimate is evident, although there is a clear buffering effect determined by the building shell. Owing to this, the average indoor daily  $\Delta T$  is just 1.7 °C (with a maximum of 3.4 °C) versus an outdoor average value of 8.7 °C (with a maximum of 13.6 °C), i.e. more than five times smaller inside the archive than in the external atmosphere. The buffering effect of the architectural structure is more efficient in reducing the cooling process at night than in mitigating the heating effect in the day. As a result, on average, the difference between  $T_{\max}$  outdoors and  $T_{\max}$  indoor ( $\Delta T_{\max} = 2.5$  °C) is smaller than the differences between  $T_{\min}$  ( $\Delta T_{\min} = 4.5$  °C), a fact that explains why in the time interval that

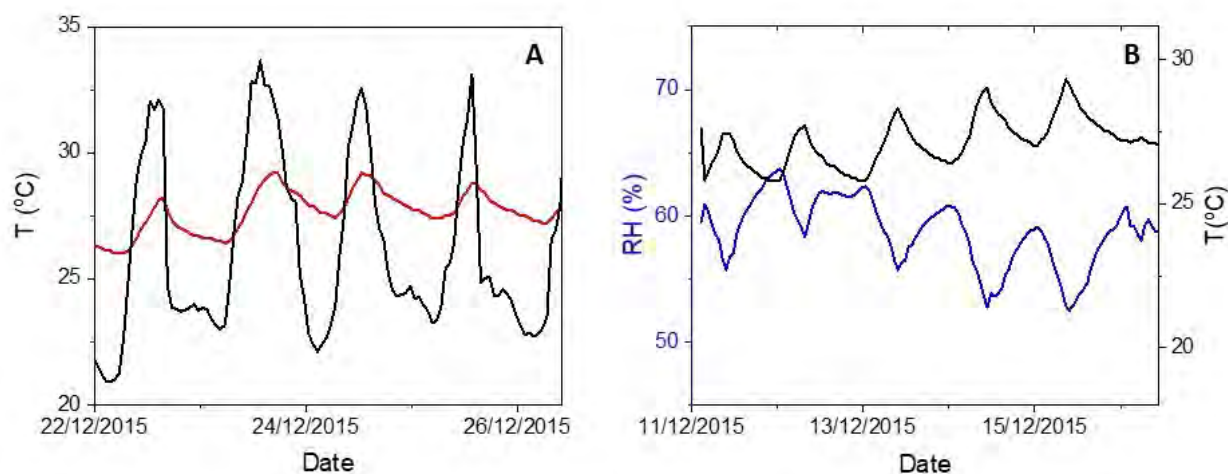
was monitored the average indoor temperature (26.4 °C) is higher than the average outdoor level of this parameter (24.5 °C). Such occurrence is connected with the fact that the heating rate is higher than the cooling rate in the indoor environment, a fact exemplified in Figure 3A for a sequence of four days with stable sunny weather. In that opportunity, the average morning heating rate amounted to 0.24 °C/h which was twice the average evening cooling rate (0.12 °C/h), thus leading to higher temperatures by the time a new heating cycle starts in the next early morning. The fact that the T measurements obtained in the same building during the same time interval at a lower level (third floor) resulted in a significantly reduced heating rate (0.10 °C/h) seems to indicate that the proximity of archive B to the zinc roof is an important factor in determining its thermal regime.

From the point of view of conservation goals, the good temperature stability is important inasmuch as it contribute to the mechanical stability of the artefacts, especially because it helps securing fluctuations in RH. On the other hand, the fact that the conservation space accumulates, in average terms, thermal energy might not be envisaged as a positive feature since it may enhance chemical degradation as well as biodeterioration. However, maintaining of a warmer indoor climate in the archives during the raining season could be a useful strategy to reduce too high levels of RH without the need of mechanical removal of excess of water vapour.

The RH profile of archive B is shown in Figure 2B. It can be noticed that RH was always maintained below the level of 70% which is considered the threshold above which biodeterioration promoted by microorganisms is likely to be triggered (Thomson, 1986). This happens despite the fact that outdoor RH<sub>max</sub> systematically reaches values closer to 100% (as a rule, before dawn when temperature reaches the minimum value), also on account of the frequent and intense raining events.



**figure 2.** Plot of indoor (red) and outdoor (black) hourly temperature **(A)** and of indoor (blue) and outdoor (black) hourly relative humidity **(B)** data in archive B from 11/12/2015 to 11/02/2016. The dotted line indicates the safety threshold for the development of microorganisms.

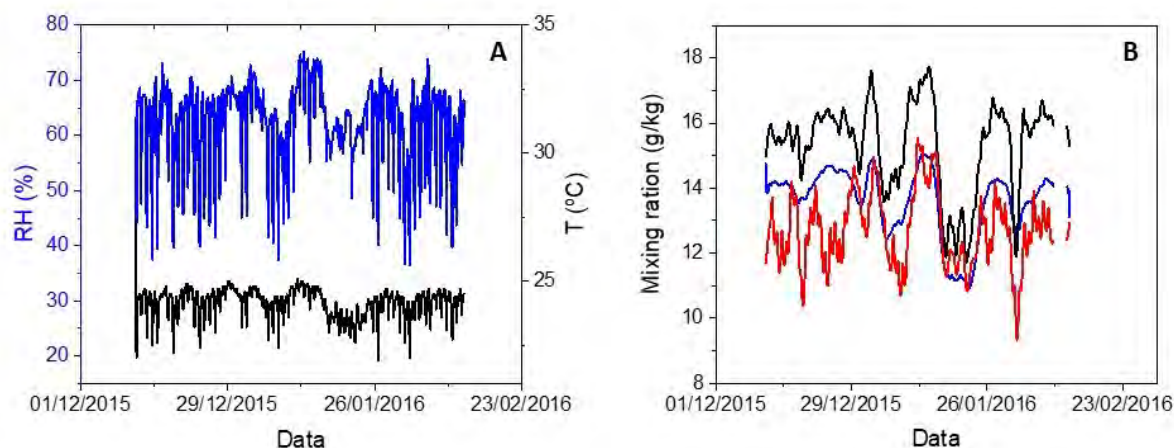


**figure 3.** Plot of indoor (red) and outdoor (black) temperature **(A)** and of indoor temperature (black) and indoor RH (blue) **(B)** data in archive B in a sequence of four stable sunny weather days (22 to 26/12/2015).

Even though the absolute amount of water vapour (water mixing ratio, expressed in g/kg) is, indeed, lower inside the archive (Figure 4B), this kind of performance is mainly associated with the higher indoor temperature levels mentioned above. In particular, as a rough estimate, it was calculated that if the temperature was restrained to a maximum level of 24.0 °C by some sort of temperature control system, RH would have overcome the biodeterioration threshold almost half of the time (all other factors held constant).

The close dependency of RH from T is exemplified in the graph of Figure 3B. In particular, it should be emphasized again that the intensity fluctuations in RH are overwhelmingly controlled by temperature and that the reduced daily variations in RH recorded in archive B are, to a large extent, the consequence of the limited changes in temperature. The average  $\Delta RH$  recorded during the monitored time interval was 6 %, with a  $\Delta RH_{max}$  of 15 %.

Finally, it is interesting to have a look at the microclimatic situation in archive A, since the conservation area is managed with the use of a mechanical air-conditioning system (figure 4A).



**figure 4.** Plot of indoor relative humidity (blue) and temperature (black) data in archive A **(A)** and of water vapour mixing ratio in outdoor atmosphere (black) and in archive B (blue) and archive A (red) data **(B)** from 11/12/2015 to 11/02/2016. In graph (B), the curves were processed and smoothed using the adjacent averaging method.

It is quite evident that hindering the raise of air temperature results in mitigation of the overall thermal regime of the room, with an average level of 24.2 °C, more than 2 °C lower than archive B. However, some degree of temperature fluctuation is still in place owing to the fact that the thermostatic cooling device does not intervene in the night temperature drop, thus leading to an average  $\Delta T$  of 1.2 °C (therefore, only 0.5 °C smaller than archive B). More important, though, is to note the average level of RH (62 %, higher than archive B where  $RH_{med} = 59$  %) as well as the intensity of RH fluctuations (18 % versus 6 % recorded in archive B), an effect that is certainly associated with the condensation inside the cooler and its drainage outside the building. That being the case, the stored collection in archive A is exposed, in summer, to a higher average RH and to intense RH daily fluctuation, despite the use of a dedicated management device and the lower absolute amount of water vapour in the indoor atmosphere, as shown in Figure 4B (red line).

## Conclusion

In tropical and subtropical areas, it is generally assumed that the priority in heritage conservation areas is the control of the surrounding air temperature. Although this is certainly a very relevant issue, this sort of approach tends to overlook the role of relative humidity in the degradation of materials. This is especially relevant in regions that are typically humid and warm for the most part of the year, since in such case biodeterioration became an important risk factor. Furthermore, as it was shown by this work, efforts made to actively improve the thermic conditions in conservation areas can worsen their performance in terms of relative humidity. This is particularly true when there is a lack of awareness of the effective microclimatic characteristics of spaces, shortage of technical staff and/or insufficient financial resources to acquire more sophisticated climate control systems. On the other hand, an indoor microenvironment that adapts itself to the outdoor climate with passive buffer elements might sometimes exhibit a better overall behaviour.

It must be observed that in this kind of climate mild temperatures and RH values are attained in winter, a condition which the conservator might profit from in order to compensate the increased degradation rate experienced in summer, again in the perspective of naturally controlled indoor microenvironment, as shown in an earlier work (Andrade & Cavicchioli, 2021).

In summary, it seems that museums, archives and conservation institutions in general located in tropical and subtropical zones present interesting potentials for the control of indoor conservation microenvironments that, apart from following the principles of preventive conservation, can also be aligned with the current trends towards sustainability and a reduced climatic footprint. Aspects that can be exploited in that direction include the maximization of passive control measures associated with

architectonic elements (sometimes, present in historical buildings that were traditionally designed for hotter climates), optimisation of forms of access by staff and other users and the development of intelligent non-continuous microclimate adjustment, such as those described in Gonçalves (2013) in which natural ventilation and computational simulations play a predominant role.

**Acknowledgement:** Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Brazil) and Comité Français d'Évaluation de la Coopération Universitaire et Scientifique avec le Brésil (COFECUB, France) project number 88881.191765/2018-01, CiCIAMEn (Cities, Climate And vegetation: Modeling and Environmental public policies).

## Bibliography

Allsopp D., Seal K., Gaylarde C., 2004 : *Introduction to Biodeterioration*. Cambridge University Press.

Bernardi A., 2008 : *Microclimate inside cultural heritage buildings*. Il Prato.

Camuffo D., 2014 : *Microclimate for Cultural Heritage - Conservation, Restoration and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments*, Elsevier.

Cassar M., 2009 : Sustainable Heritage: Challenges and Strategies for the Twenty-First Century. *APT Bulletin: The Journal of Preservation Technology*, **40**, 3-12.

Cavicchioli A., Alegre P. D. L., Martins A. G. S., 2017 : Microambientes e conservação preventiva em áreas indoor: o caso do espaço interior não climatizado da Casa de Dona Yayá, em São Paulo (Brasil). *Anais Do Museu Paulista*, **25**, 291-340.

Cavicchioli A., Andrade A. L. C. R., 2021 : Um estudo comparativo da dinâmica microclimática em espaços adaptados para fins de conservação de acervos sob a ótica da sustentabilidade. *Anais Do Museu Paulista: História, Cultura e Material*, **29**, 1-33.

Dubreuil V., Fante K. P., Planchon O., Sant'anna Neto J. L., Os tipos de climas anuais no Brasil : uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015, *Confins*, **37**, <http://journals.openedition.org/confins/15738>.

Gonçalves W. B., 2013 : *Métricas de preservação e simulações computacionais como ferramentas diagnósticas para a conservação preventiva de coleções: estudo de caso no sítio Patrimônio Mundial de Congonhas*, PhD Thesis, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte (Brasil).

Hatchfield P., 2002 : *Pollutants in the Museum Environment: Practical Strategies for Problem Solving, Exhibition and Storage*. Archetype Publications.

Nedel, A.S., Gonçalves, F.L.T., Macedo Junior, C., Cardoso, M.R.A., 2015 : Climatology of the human thermal comfort on São Paulo metropolitan area, Brazil: indoors and outdoors, *Revista Brasileira de Geofísica*, **33**(2), 185-204.

Schaeffer T., 2001 : *Effects of light on materials in collections: data on photoflash and related sources*. The J. Paul Getty Trust.

Skora J., Gutarowska B., Pielech-Przybylska K., Stępień L., Pietrzak K., Piotrowska M., Pietrowski P., 2015 : Assessment of microbiological contamination in the work environments of museums, archives and libraries. *Aerobiologia*, **31**(3) 389-401.

Thomson G., 1986 : *The museum environment*. Butterworth-Heinemann.



## LA PLANIFICATION STRATÉGIQUE ET TERRITORIALE POUR L'INTÉGRATION DES SOLUTIONS D'ADAPTATION FONDÉES SUR LA NATURE ET LA LUTTE CONTRE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN : LE CAS DES PCAET

**Elodie BRICHE<sup>1</sup>, Baptiste SALMON<sup>2</sup>, Aurélie TAILLEUR<sup>3</sup>, Charlotte DA CUNHA<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> ADEME, 500 route des Lucioles – 06560 Valbonne Sophia Antipolis, [elodie.briche@ademe.fr](mailto:elodie.briche@ademe.fr)

<sup>2</sup> CEARC, OVSQ, UVSQ - 11 boulevard d'Alembert 78280 Guyancourt, [baptiste.salmon@uvsq.fr](mailto:baptiste.salmon@uvsq.fr)

<sup>3</sup> ADEME, 20 avenue du Grésillé – 49 004 Angers Cedex 01, [aurelie.tailleur@ademe.fr](mailto:aurelie.tailleur@ademe.fr)

<sup>4</sup> CEARC, OVSQ, UVSQ - 11 boulevard d'Alembert 78280 Guyancourt, [charlotte.da-cunha@uvsq.fr](mailto:charlotte.da-cunha@uvsq.fr)

**Résumé :** Cette proposition met en exergue la méthodologie du projet LIFE ARTISAN concernant l'intégration des Solutions d'Adaptation fondées sur la Nature (SAfN) dans les documents de planification stratégique et territoriale, tels que le Plan Climat-Air-Énergie Territorial (PCAET). Ces travaux combinent approches qualitative et quantitative pour mener une analyse multi-scalaire (nationale et régionale) des PCAET adoptés en France et évaluer la prise en compte de mesures pour lutter contre l'îlot de Chaleur Urbain (ICU). Ces résultats témoignent de la place importante de la lutte contre l'ICU dans les territoires et de la difficulté de mise en œuvre des solutions de rafraîchissement urbain comme les SAfN au sein des PCAET. Une facilitation de la mise en œuvre de ces mesures se fera par l'articulation nécessaire entre les documents de planification.

**Mots-Clés :** planification, Solutions d'Adaptation fondées sur la Nature (SAfN), îlot de chaleur urbain, rafraîchissement urbain.

**Abstract:** This proposal highlights the methodology of the LIFE ARTISAN project concerning the integration of Nature-based Solutions for Adaptation (NbSA) in the urban planning documents, such as the Territorial Climate-Air-Energy Plan (TCAEP). This research combines qualitative and quantitative approaches to carry out a multi-scalar analysis (national and regional) of the TCAEP which is adopted in France and to assess an integration of measures to reduce Urban Heat Island (UHI). These results emphasize the critical role of combating UHI within the territories and the challenges of urban cooling solutions implemented as NbSA within the TCAEP. The installation of these measures will be facilitated by the required coordination from the urban planning documents.

Keywords: urban planning, Nature-based Solutions for adaptation (NbSA), Urban Heat Island (UHI), urban cooling.

### Introduction

Le dernier rapport du GIEC (GIEC, 2022) souligne la nécessité de mettre en œuvre le plus tôt des mesures d'adaptation au changement climatique. Il pointe également une intensification des aléas climatiques tels que les vagues de chaleur qui affectent les villes et les agglomérations par différents aspects (santé, qualité de l'air, fonctionnement des infrastructures). L'exposition de la population aux vagues de chaleur se poursuivra, associée à un réchauffement qui s'intensifie, avec une forte disparité géographique face à la chaleur lorsque qu'il n'y a pas de mesures d'adaptation supplémentaire. Dans un scénario « sans politique climatique » (scénario RCP 8.5 et désormais SSP5-8.5), l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur bouleverserait les territoires : elles pourraient survenir trois années sur quatre au cœur de l'été et se produire de mai à octobre (Météo-France, <http://www.drias-climat.fr/>). Celles-ci viennent intensifier l'îlot de chaleur urbain (ICU) considéré comme la différence de température entre la ville et ses alentours, réduire le confort thermique des citoyens, notamment la nuit ; des solutions de rafraîchissement (grises, vertes, bleues et douces) doivent être déployées pour lutter contre la surchauffe urbaine (Ademe, 2021a & Ademe, 2021b). Lorsque les solutions vertes ont vocation à contribuer à l'adaptation au changement climatique, elles sont définies comme des solutions d'adaptation fondées sur la nature (SAfN) (Azam. *et al.*, 2021). Elles sont souvent déployées à l'échelle de l'aménagement opérationnel et leur place au sein de la

planification urbaine est interrogée par le projet Life ARTISAN (2020-2027), notamment dans le cadre de la stratégie d'adaptation des territoires et de l'élaboration de leurs PCAET.

Le projet intégré ARTISAN (Accroître la Résilience des Territoires aux changements climatiques par l'Incitation aux Solutions d'Adaptation fondées sur la Nature) est financé par le Programme LIFE de l'Union européenne, le ministère de la Transition écologique (MTE) et le ministère de la Cohésion des territoires et des Relations avec les collectivités territoriales (MCT) et piloté par l'Office français de la biodiversité (OFB). Ce projet participe à la mise en œuvre du deuxième Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC-2) et du Plan biodiversité de la France. L'originalité du projet est de placer les Solutions fondées sur la Nature (SfN) au cœur des actions pour répondre aux enjeux de l'adaptation aux changements climatiques des territoires français. Les Solutions fondées sur la Nature (SfN) visent « à protéger, gérer de manière durable et restaurer les écosystèmes naturels ou modifiés, pour relever directement les enjeux de société de manière efficace et adaptative tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité » (UICN, 2019).

Ce travail a pour objectif d'interroger la base de données créée dans le cadre de ce projet LIFE en se focalisant sur les îlots de chaleur urbain afin de savoir si les PCAET qui les mettent en avant dans leur programme d'action et orientation stratégique établissent également des mesures en termes de rafraîchissement ; de déterminer quels types de solutions sont proposés et si le type de climat est déterminant pour le choix de ces solutions.

## 1. Données et méthodes

Le projet ARTISAN vise à établir un état des lieux de l'intégration de l'adaptation au changement climatique et des SAFN dans les PCAET. Il contribue également à l'élaboration d'une typologie de SAFN, d'une liste de mots-clefs (98 rattachés à l'adaptation et aux SAFN) et d'un cadre général d'analyse. La méthodologie repose sur :

- Une analyse dite « quantitative », à l'échelle nationale, répertoriant les occurrences de 98 mots-clés sélectionnés dans les PCAET disponibles (183) sur la plateforme Territoires et Climat de l'ADEME (<https://www.territoires-climat.ademe.fr/>).
- Une analyse dite « qualitative », à l'échelle locale, au sens de la qualification de chaque mesure, à travers la lecture de 70 PCAET et de leurs fiches actions afin d'identifier les SAFN potentielles et les mesures d'adaptation.

Ces deux analyses sont réutilisées pour cibler les îlots de chaleur urbains.

### a. Analyse nationale dite « quantitative » des PCAET

Les Plans Climat-Air-Energie Territoriaux (PCAET) ont remplacé en 2016 les Plans Climat-Energie Territoriaux (PCET). Ils déclinent, à l'échelle territoriale, les objectifs régionaux, nationaux, et internationaux en matière d'énergie, de climat, de qualité de l'air. Ils sont obligatoires pour les intercommunalités à fiscalités propres (EPCI) de plus de 20 000 habitants. Outre l'atténuation au changement climatique, ces documents doivent également fixer des objectifs en matière d'adaptation au changement climatique et de préservation de la biodiversité. Ils sont notamment constitués d'orientations stratégiques déclinées en programmes d'actions par secteur (bâtiment, transport, agriculture, industrie, énergie, déchets) contenant des fiches actions et ils sont fondés sur l'évaluation et la concertation.

Les 183 PCAET enregistrés et exploitables de l'analyse quantitative couvrent une population de 17.302.076, soit 26% de la population française totale en 2020 (66,9 millions, source INSEE). La population moyenne par EPCI représentée dans ce fichier est de 94.546 habitants ; la médiane, de 58.592. La plus petite collectivité est peuplée de 4.756 habitants, et la plus grande de 2.243.79 habitants (Paris). En moyenne, les EPCI représentés regroupent 31 communes. Une recherche de 98 mots clefs par chaîne de caractères a été effectuée en octobre 2020. Ces mots ont été sélectionnés en s'appuyant sur le comité de suivi de l'étude et sur des ressources documentaires (publications scientifiques et littérature grise). Au regard de l'information disponible sur les PCAET, une base de

données composée de programmes d'actions à exploiter statistiquement, l'analyse sémantique se justifie (Kincheloe, 2011 ; Pratt, 2020). La recherche a été menée sur les programmes d'actions des PCAET dans le fichier « en-tête ». Ces mots ont été rattachés à des catégories probables. L'objectif n'était pas de compter les occurrences d'un mot-clé dans un PCAET, mais le nombre de PCAET qui utilisaient ce mot au moins une fois dans leur programme d'actions. Parmi ces mots-clés, les entrées « îlot(s) de chaleur urbain » au singulier et au pluriel permettent d'identifier les PCAET ayant porté au sein de leurs programmes d'actions la lutte contre les ICU (figure 1).

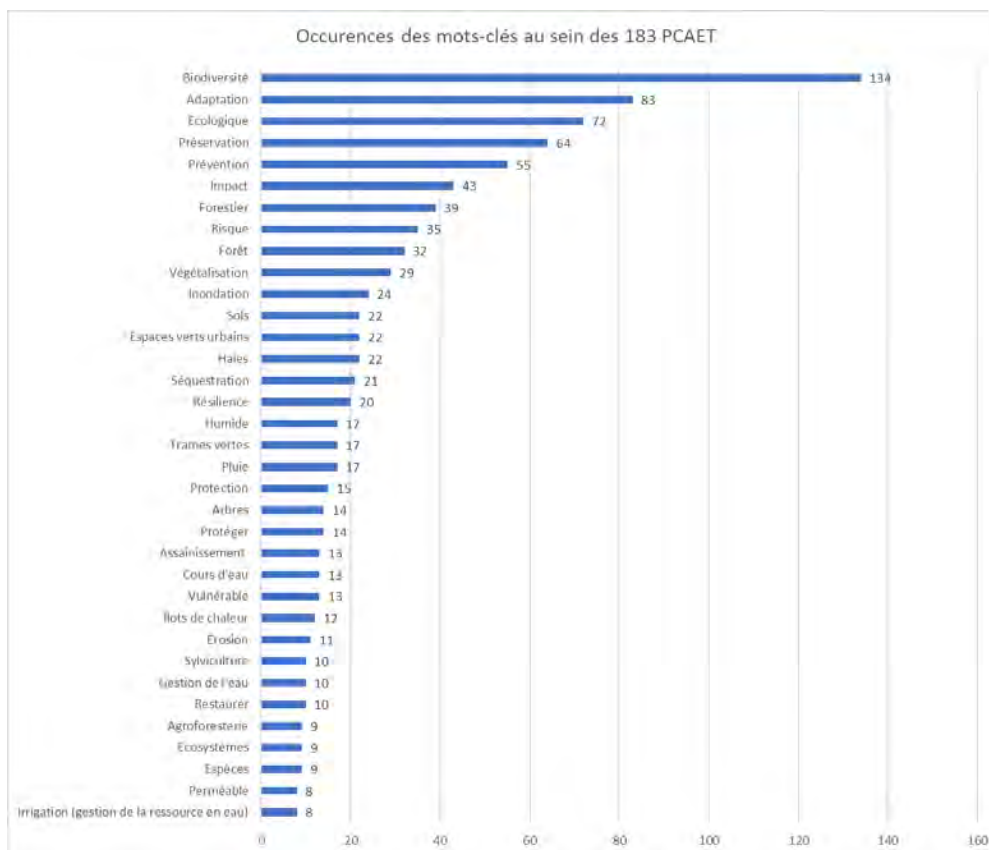


figure 1. Part des mots-clés concernant les orientations stratégiques des 183 PCAET

## b. Analyse dite « qualitative », à l'échelle locale

L'étude à l'échelle locale repose sur un échantillon de 70 PCAET issus des 183 PCAET de l'étude quantitative à l'échelle nationale (excepté 2). Au sein de cette analyse qualitative, la recherche menée au sein du Life ARTISAN vise à évaluer le niveau d'intégration des SAFN : des critères concernant les impacts du changement climatique attendus, l'exposition et la sensibilité aux aléas ont été retenus en priorité pour sélectionner les 70 PCAET. Sur cette sélection de 70 PCAET, 813 fiches actions ont été décortiquées afin de caractériser les mesures mises en place dans les collectivités et identifier les SAFN. Notre article cible les fiches actions présentant des solutions de rafraîchissement urbain pour lutter contre les ICU : cela permet d'identifier les types de solutions de rafraîchissement urbain qui seront déployées sur les territoires.

## 2. Résultats

### a. Une cohérence entre les deux échelles d'analyse

Sur les 183 PCAET étudiés dans l'analyse sémantique et quantitative, seulement 12 utilisent les mots clefs « îlot de chaleur » ou « îlots de chaleur » dans les programmes d'actions (Figure 1). Ces 12 PCAET font également partie de l'échantillonnage de l'analyse dite « qualitative » des 70 PCAET à l'échelle locale.

À la lecture détaillée de ces documents, nous constatons que ces PCAET prévoient effectivement des solutions concrètes visant à lutter contre les îlots de chaleur urbain. Ils reflètent par ailleurs la diversité des types de climat de Köppen en France (Köppen, 1900 ; Ademe, 2021b) : communauté d'agglomération (CA) de Blois (Agglopolys), CA de Nevers, CA du Pays de Saint Omer, CA du Val d'Estrel Méditerranée, communauté de communes (CC) des Hauts de Flandre, Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT) du Pôle Métropolitain de Loire-Angers, Métropole Clermont Auvergne, CA du Grand Chambéry, CA Paris, Toulouse Métropole, CC de Saône Beaujolais.

### **b. Typologie des mesures de rafraîchissement urbain déployées**

L'analyse dite « qualitative » des 813 fiches actions des 70 PCAET (lecture détaillée) montre que 33 PCAET proposent des solutions afin de lutter contre le phénomène d'ICU. Certains PCAET qui n'ont pas de programme d'actions en lien avec l'ICU déploient toutefois des solutions de rafraîchissement urbain dans les fiches actions.

Sur ces 33 PCAET, 51 solutions d'adaptation de rafraîchissement urbain sont proposées dans les fiches actions : des solutions grises (10%), vertes (33%) et douces (57%).

33% des solutions sont vertes- *impliquent le déploiement d'actions s'appuyant sur les écosystèmes* - en lien avec les SAfN telles que : des aménagements d'îlots de fraîcheur, de la renaturation ou végétalisation comme la mise en place de toitures ou façades végétalisées.

Des solutions grises liées à la typo-morphologie urbaine ou aux revêtements - *impliquent le recours à des infrastructures grises et de la technologie*- ainsi que des solutions douces - *travaillent sur l'organisation, les usages et pratiques, etc.*- sont également proposées dans les fiches actions des 70 PCAET. 10 solutions douces sur 29 répertoriées sont des solutions « amont » au déploiement de SAfN, c'est-à-dire des solutions préalables à la mise en place de solutions vertes telles que la révision des réglementations et des documents de planification comme le Plan Local d'Urbanisme intercommunal (PLUi).

Seules sont répertoriées ici les solutions grises et douces qui sont effectivement considérées comme des solutions d'adaptation au changement climatique.

### **c. Déploiement des solutions de rafraîchissement dans les territoires**

Les 33 PCAET suivants proposent des solutions de rafraîchissement urbain dans la lutte contre l'ICU (tableau 1, colonne 1).

L'analyse des solutions proposées dans ces 33 PCAET montre que 17 solutions vertes et plus particulièrement des SAfN (tableau 1, colonne 2) sont proposées dans 14 PCAET et sans différenciation selon les types de climats de Köppen (Köppen, 1900, Ademe, 2021b) – le climat océanique (Cfb) étant le plus représenté en France.

Ces solutions vertes telles que la végétalisation, la renaturation, *etc.* sont en effet des solutions considérées efficaces, pérennes et offrant divers co-bénéfices aux collectivités tels que la préservation de la biodiversité, l'apport de bien-être, *etc.* Néanmoins, il semblerait que les collectivités ne prennent pas en considération l'évolution du climat actuel prépondérant (Cfb, océanique) vers le climat méditerranéen dans le futur (horizon lointain avec le scénario RCP 8.5.) : cette évolution pose notamment la question de la ressource hydrique pour entretenir ces solutions vertes.

PCAET et type de climat actuel	SAfN proposés dans les fiches actions	Type de climat - RCP 8.5 - 2071-2100
Communauté de communes Beaugois Vallée	Renaturation, végétalisation	Csa
Communauté d'agglomération Béthunes, Bruay, Lys, Artois, Romane		Cfa
Communauté d'agglomération Grand Auch Coeur de Gascogne		Csa
Communauté de communes Chinon, Vienne et Loire		Csa
Communauté de communes de Gevrey-Chambertin et de Nuits-Saint-Georges		Cfa
Communauté de Communes de la Lomagne Gersoise		Csa
Communauté de Communes des Hauts de Flandre		Cfb
Communauté de communes Grand Sud Tarn et Garonne	Renaturation, végétalisation	Csa
Communauté de communes Pays de Lumbres		Cfb
Communauté de communes Pré-Bocage Intercom	Renaturation, végétalisation	Csb
Communauté urbaine du Grand Poitiers	Renaturation, végétalisation	Csa
<a href="#">Séols du Juraillon - Vallée agglomération</a>		Csa
Grand Besançon Métropole		Cfb
Grand Chambéry		Cfb
Lorient	Aménagement d'îlots de fraîcheur	Cfb
Métropole Clermont-Auvergne	Aménagement d'îlots de fraîcheur	Csa
Nantes Métropole	Forêts urbaines	Csa
Nice Métropole	Aménagement d'îlots de fraîcheur	Csa
Niort Agglo, communauté d'agglomération du Niortais		Csa
Paris	Zones humides, milieux humides	Csa
Pays de Gex Agglo, communauté d'agglomération du pays de Gex		Cfb
Pays de Saint Malo		Csb
Pays de Saint Omer		Cfb
Pays du Mans		Csa
Perpignan Méditerranée		Csa
Pôle d'équilibre territorial et rural (PETR) du Pays du Lauragais	Toits et façades végétalisés	Csa
Pornic Agglo Pays de Retz		Csa
Saint-Etienne Métropole	Aménagement d'îlots de fraîcheur	Csa
SCOT du Bergeracois	Aménagement d'îlots de fraîcheur	Csa
SCOT Grand Douaisis	Jardins partagés, agriculture urbaine / renaturation, végétalisation	Cfa
SCOT Pôle Métropolitain Loire Angers		Csa
Toulouse Métropole	Corridors écologiques, ceintures vertes, trames vertes Renaturation, végétalisation	Csa
Val d'Estère Méditerranée		Csa

Csb	climat méditerranéen à été tempéré ou climat charentais
Csa	climat méditerranéen
Cfb	climat océanique ou climat breton
Cfa	climat tempéré chaud ou climat breton

**Tableau 1.** 33 PCAET proposant des solutions de rafraîchissement urbain (colonne 1) et SAfN identifiées avec les types de climat actuel (colonne 1) et futur (colonne 3, issus de Ademe, 2021 et Dubreuil, 2022).

## Conclusion



À l'échelle des PCAET, les SAFN constituent l'essentiel des solutions identifiées dans la lutte contre l'ICU, indépendamment des types de climat des territoires français et de leurs évolutions possibles. L'analyse menée ne permet pas d'établir de corrélations entre les types de climats et les solutions identifiées pour la lutte contre l'ICU dans les plans d'actions des 70 PCAET étudiés dans l'étude dite « qualitative ».

Ce travail montre que des solutions douces dans les plans d'actions sont dédiées à la modification de documents d'urbanisme tels que les PLUi. Une étude parallèle est en cours sur des cas pratiques de PLUi (5) et de Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT) (5) dans des types de climat différents et présente à ce jour le même constat : l'intégration de l'adaptation au changement climatique dans les documents de planification n'est pas systématique et, pour le moment, il n'est pas répertorié de pratiques véritablement intégratrices ; il s'agit souvent d'un encouragement à la végétalisation prédominant comme pour les documents de planification de Nantes (PLUi), Toulon (PLUi), Lyon (PLU-H), Avignon (PLUi), Orléans (SCoT et PLUi).

Une facilitation de la mise en œuvre de ces mesures se fera d'une part par l'articulation nécessaire entre les différents documents de planification stratégique et territoriale, ce qui est parfois observé sur des territoires avec des démarches intégratrices comme celle du PLUi 4 en 1 de Brest Métropole, d'autre part en renforçant l'opérationnalité de ces mesures au regard des spécificités de chaque territoire dans un contexte de changement climatique. Ces spécificités appellent à une réflexion concernant les SAFN en type de climat méditerranéen où la raréfaction de la ressource en eau pourrait être problématique aux horizons 2050 et 2100. Les documents de planification territoriale et urbaine par leur nature ont un rôle majeur à jouer pour dessiner dans les territoires des trajectoires d'atténuation et d'adaptation au changement climatique visant la neutralité carbone.

## Bibliographie

- ADEME, 2021a : *Rafraîchir les villes : des solutions variées*. Collection Ils l'ont fait, Réf. 011441, 80p.
- ADEME, 2021b : *Des solutions pour rafraîchir les villes. S'inspirer d'expériences dans le monde selon la variabilité des climats d'aujourd'hui et de demain*. Collection Ils l'ont fait, Réf. 011597, 57 p.
- Azam C., Bidaud S., Delangue J., Melka P., Tailleur A., Vo Van C., 2021. Les solutions fondées sur la nature pour l'adaptation aux changements climatiques. Note de cadrage. Projet Life intégré ARTISAN. 50p
- BRICHE E. & ROZO Ariane, 2021 : Les solutions de rafraîchissement urbain : de la conception à la mise en œuvre opérationnelle, *Construction 21*, décembre 2021.
- Dubreuil V., 2022 : Le changement climatique en France illustré par la classification de Köppen, *La météorologie*, 10.37053/lameteorologie-2022-0012, 14 p.
- EEA, 2016 : *Urban adaptation to climate change In Europe 2016. Transforming cities in a changing climate change*, ISSN 1977-8449, no12/2016, 140p.
- IPCC, 2022: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press. In Press, 3676p.
- Kincheloe, J. L., 2011: *Describing the bricolage: Conceptualizing a new rigor in qualitative research*. In Key works in critical pedagogy (pp. 177-189). Brill Sense.
- Köppen W., 1900 : Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. *Geographische Zeitschrift*, 6, 593-679.
- Pratt M.G., Sonenshein S., Feldman MS, 2020 : Moving Beyond Templates: A Bricolage Approach to Conducting Trustworthy Qualitative Research. *Organizational Research Methods*. doi:10.1177/1094428120927466
- Salmon B., Da Cunha C., ADEME, 2021 : *Analyse quantitative : méthode, résultats et piste d'amélioration (Tache 2). Activité A3 - Etude du niveau d'intégration de l'adaptation aux changements climatiques et des SafN dans les PCAET - Life intégré ARTISAN*, Mai 2021. 22 pages
- UICN, 2020 : *Standard mondial de l'UICN pour les solutions fondées sur la nature. Cadre accessible pour la vérification, la conception et la mise à l'échelle des SfN*. Première édition. Gland, Suisse : UICN.).

## MODÉLISATION DES GRADIENTS THERMIQUES EN MILIEU URBAIN : COMPARAISON DE TROIS RÉGRESSIONS SUR LYON

Florent RENARD<sup>1</sup>, Lucille ALONSO<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Lyon, Université Jean Moulin Lyon 3, UMR 5600 CNRS Environnement Ville Société, 18 rue Chevreul, 69007 Lyon, florent.renard@univ-lyon3.fr

<sup>2</sup> Université de Lyon, lucille.alonso@univ-lyon3.fr

**Résumé :** L'inconfort thermique en milieu urbain touche la plupart des agglomérations. Il est ainsi nécessaire d'adapter la ville du mieux possible, avec des opérations de requalification favorisant un rafraîchissement urbain naturel. Les orientations en matière de requalification peuvent s'appuyer sur une modélisation statistique permettant de relier la température en ville et la surchauffe urbaine aux paramètres décrivant la composition de l'environnement urbain. Cependant, ces paramètres urbains peuvent présenter des phénomènes de non-stationnarité spatiale lors de la modélisation de leurs effets par rapport à la surchauffe urbaine, i. e. la variance des erreurs du modèle ne sera pas forcément la même pour toutes les observations et dépendra de leurs localisations. Cette hétéroscédasticité n'est pas perceptible par les techniques de régression globales classiques telles que les régressions par moindres carrés (OLS) ou moindres carrés partiels (PLS). Ainsi, ces techniques sont confrontées ici à la régression géographiquement pondérée (GWR) pour modéliser les températures de l'air mesurées le 30 août 2016 dans Lyon. Les techniques de régression classiques fournissent des résultats très convaincants mais la régression GWR les surpasse et permet de mettre en évidence les paramètres urbains non-stationnaires.

**Mots-Clés :** température, modélisation, GWR, hétéroscédasticité

### Introduction

La compréhension et la modélisation du climat urbain est une nécessité afin de relever les défis liés à la surchauffe urbaine en termes de santé et d'inconfort thermique. Cela est d'autant plus crucial dans le cadre du changement climatique. En effet, d'après Li et Bou-Zeid (2013) ou Perkins-Kirkpatrick et Lewis (2020), les périodes de canicules pourraient être d'autant plus exacerbées en milieu urbain par rapport aux zones rurales périphériques. Ces périodes de canicule en milieu urbain touchent déjà 3,5 milliards de personnes. En 2050, ce ne seraient pas moins de 6,7 milliards de personnes qui devraient être touchés, sous l'effet de l'augmentation de la population et des croissances urbaines (State of World Population, 2007). De ce fait, les problèmes liés à l'hyperthermie devraient se démultiplier, à moins que les villes ne s'engagent dans une transition climatique efficace afin de lutter contre la surchauffe urbaine. Dans ce contexte d'adaptation, émergent des services novateurs, proposés le plus souvent par des start-ups, comme celui de pouvoir choisir des chemins urbains climatiquement plus confortables, alternatifs au trajet le plus court, comme l'application ComforMap (disponible sur Google Play<sup>21</sup> et sur iOS<sup>22</sup>) directement issue de la recherche académique (Alonso et Renard, 2020). Il est ainsi essentiel de saisir au mieux le climat urbain et de représenter le plus finement possible les gradients thermiques afin d'y associer des formes urbaines adaptées. En conséquence, l'objectif de cette étude est d'évaluer trois différentes techniques de modélisation statistique afin de sélectionner la meilleure pour extraire les paramètres morphologiques prépondérants dans la surchauffe urbaine.

## 1. Méthodologie : mesures mobiles et modélisations

### 1.1. Mesures mobiles

Des mesures mobiles à vitesse réduite en vélo ont été effectuées le 30 août 2016 de 14h42 à 16h50 (fig. 1). Les températures mesurées ont été corrigées afin de les faire coïncider à l'heure du départ, pour s'affranchir des biais liés à l'évolution thermique diurne, à l'aide d'une régression polynomiale fondée sur les mesures de la station météorologique centrale de Lyon (ENS – 7<sup>ème</sup> arrondissement). Cette

21 <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.comformap>

22 <https://apps.apple.com/app/comformap/id1585512922>

journée a été choisie en raison de sa température élevée (27,7°C) et d'un vent relativement faible (6,8 m/s en moyenne à la station de Lyon-ENS dans le 7<sup>ème</sup> arrondissement). L'enregistreur en continu utilisé est un EL-USB-1-RGC (EasyLog From Lascar Electronic) associé à un GPS *Garmin* 64S avec GPS/GLONASS et antenne Quad Helix. Les mesures de température de l'air corrigées vont de 31,6°C à 34°C. La précision de ce capteur mobile de +/-1°C et son inertie sous abri blanc normalisé *Davis* permettent de saisir les gradients thermiques (Alonso, 2021).



figure 1. Mesures de température de l'air corrigées (°C) lors de la campagne du 30/08/2016

## 1.2. Comparaison de trois types de modélisation : OLS, PLS et GWR

Les approches par régression fondées sur la confrontation de mesures de terrain aux variables morphologiques, paramétriques et surfaciques ont montré leurs intérêts de par leurs robustesses, leurs efficacités et leurs rapidités (pour plus de détails, voir Alonso, 2021). Trois méthodes présentant des diversités d'approche ont été testées sur l'agglomération lyonnaise (Alonso et Renard, 2020) : la régression linéaire multiple par moindres carrés (OLS - Tomassone et al., 1992), la régression PLS (partial least square – Tenenhaus, 1998) et une technique de machine learning, les arbres de régression (Breiman et al., 1984). Malgré des résultats très satisfaisants, ces méthodes ont en commun de ne pas véritablement prendre en compte la distribution spatiale des variables explicatives, notamment lorsque l'on a à faire à des non-stationnarités spatiales comme dans le cas de la surchauffe urbaine. Ainsi, l'objet de cette étude est de tester pour la première fois sur le territoire lyonnais la méthode de régression géographiquement pondérée (*geographically weighted regression* – GWR – Yang et al., 2022) et de la confronter aux résultats issus des techniques statistiques non spatiales. La régression pondérée géographiquement est une formule locale de régression linéaire utilisée pour modéliser des relations variant spatialement. Elle offre une modélisation locale de la température de l'air en ajustant une équation de régression à chaque entité du jeu de données. Cette méthode a ainsi l'avantage de créer des équations distinctes en intégrant les variables dépendantes et explicatives des entités comprises dans le voisinage de chaque entité cible (Zhao et al., 2018).

### **1.3. Paramètres morphologiques utilisés pour la modélisation de la température de l'air**

Dans cette étude, 25 variables explicatives, potentiellement contributrices à l'explication des gradients thermiques, ont été utilisées (sélectionnées à l'aide du travail antérieur de doctorat de L. Alonso, 2021). Elles proviennent de sources complémentaires comme les mesures par Lidar ou les données acquises par imagerie satellitaire (Landsat 8 – tableau 1). Les zones tampons significatives sont également issues de Alonso (2021) après une étude de sensibilité fondée sur des buffers allant de 50 mètres à 1 kilomètre de rayon. Chaque point de mesure mobile est traité individuellement.



**Tableau 1.** Variables utilisées pour les modélisations (en gras : variables retenues)

Variables	Source	Zone tampon (m)
<b>Température de surface</b>	Landsat 8	500
Urban Thermal Field Variance Index (UTFVI)		500
<b>Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)</b>		1000
Soil - Adjusted Vegetation Index (SAVI)		1000
<b>Enhanced Vegetation Index (EVI)</b>		50
Tasseled Cap Transformation greenness (GVI)		1000
Normalized Difference Vegetation Index (NDWI)		500
Normalized Difference Moisture Index (NDMI)		1000
Normalized Difference Bareness Index (NDBal)		1000
<b>Bare soil Index (BI)</b>		50
Enhanced Built-Up and Bareness Index (EBBI)		1000
Emissivité		500
<b>Tasseled Cap Transformation Brightness</b>		1000
<b>Modified Normalized Difference Vegetation Index (MNDWI)</b>		500
<b>Durée d'ensoleillement</b>		LiDAR puis modélisation 3D
Radiation globale	NA (mesure directe)	
<b>Densité de végétation basse</b>	LiDAR	200
<b>Densité de végétation moyenne</b>		50
<b>Densité de végétation haute</b>		100
<b>Densité de sol nu</b>		50
<b>Densité de bâti</b>		50
Versant		50
<b>Sky View Factor</b>		NA (mesure directe)
Variation dans la hauteur du bâti (écart type de la hauteur)	Data Grand Lyon	500
<b>Densité de surface en eau</b>		100

Pour les régressions OLS et GWR, les variables colinéaires (coefficient de Pearson > |0,7| et VIF > 7) ont été filtrées, alors qu'un des intérêts de la régression PLS est de pouvoir accepter des variables colinéaires (tableau 1).

## 2. Résultats : l'intérêt de la GWR pour les variables non-stationnaires

La régression PLS est la moins satisfaisante avec un  $r^2$  (coefficient de détermination) de 0,79 et une RMCE (racine moyenne du carré des erreurs) de 0,33°C. Les trois variables les plus explicatives sont la température de surface (effet positif), le NDVI et le MNDWI (effets négatifs pour les deux). La régression OLS a un  $r^2$  de 0,89 et une RMCE de 0,23°C. Les trois variables les plus explicatives sont les mêmes que précédemment. Les résidus sont normalement distribués et ne sont pas auto-corrélés spatialement comme l'indique l'indice de Moran (Getis et Ord, 1992). Cependant, la régression OLS présente un test de Koenker statistiquement significatif de 14,8 (Koenker, 1981). Cela signifie que les variables ne sont pas stationnaires. En effet, certaines peuvent jouer un rôle déterminant à certains endroits mais pas à d'autres. Cela confirme ainsi l'utilité de la régression GWR. Cette dernière présente en effet les résultats de modélisation les plus convaincants avec un  $r^2$  global de 0,93 et une RMCE de 0,19°C, pour les mêmes variables explicatives.

## Conclusion



La connaissance de la température de l'air et des paramètres d'influence est primordiale afin de lutter contre le stress thermique en milieu urbain. Même si les paramètres de morphologie urbaine susceptibles d'améliorer le confort thermique sont relativement bien identifiés maintenant, il convient d'affiner ces connaissances car ces derniers sont confrontés à des problématiques de non-stationnarité spatiale. Cela est notamment l'exemple du sky view factor qui peut avoir des incidences opposées sur la contribution à l'explication de la température de l'air (par exemple, un sky view factor faible n'est pas forcément toujours synonyme d'espace propice aux fortes chaleurs). Afin de remédier à cela, une modélisation GWR a été testée dans cette étude. Cette dernière a révélé sa meilleure performance face aux modélisations OLS et PLS et offre des perspectives d'étude intéressantes sur la non-stationnarité spatiale des indicateurs. Il convient maintenant de conforter ces résultats avec plus de cas d'étude et d'identifier précisément les variables se comportant d'une manière non stationnaire afin de prendre en compte leurs spécificités d'une manière optimale dans les opérations de requalification urbaine. La problématique de la non-stationnarité temporelle est également un enjeu pour ces opérations de requalifications.

## Bibliographie

- Alonso, 2021. Intérêt de la modélisation de la température de l'air associé à la nécessité de la caractérisation des vulnérabilités territoriales pour une compréhension systémique du risque aux fortes chaleurs en milieu urbain sur Lyon et Tokyo. Thèse de doctorat de l'Université de Lyon, Université Jean Moulin Lyon 3, 384 p.
- Alonso L. et Renard F., 2020. A New Approach for Understanding Urban Microclimate by Integrating Complementary Predictors at Different Scales in Regression and Machine Learning Models. *Remote Sens.*, 12, 2434
- Breiman L., Friedman J.H., Olshen R., and Stone C.J., 1984. *Classification and Regression Tree* Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software, Pacific California.
- Getis, Arthur et J. K. Ord. The Analysis of Spatial Association by Use of Distance Statistics. *Geographical Analysis* 24, no. 3. 1992.
- Koenker, 1981. A note on studentizing a test for heteroscedasticity. *Journal of econometrics*, volume 17, Issue 1, pp. 107-112
- Li D. et Bou-Zeid E., 2013. Synergistic Interactions between Urban Heat Islands and Heat Waves: The Impact in Cities Is Larger than the Sum of Its Parts. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52 - 9
- Perkins-Kirkpatrick S. et Lewis S., 2020. Increasing trends in regional heatwaves. *Nature communications* ; 11:3357
- State of World Population 2007. Available online: [www.unfpa.org/fr/node/5923](http://www.unfpa.org/fr/node/5923)
- Tenenhaus M., 1998. *La Régression PLS, Théorie et Pratique*. Technip, Paris.
- Tomassone R., Audrain S., Lesquoy de Turckheim E. and Miller C., 1992. *La Régression, Nouveaux Regards sur une Ancienne Méthode Statistique*. INRA et MASSON, Paris.
- Yang L., Yu K., Ai J., Liu Y., Yang W. et Liu J., 2022. Dominant Factors and Spatial Heterogeneity of Land Surface Temperatures in Urban Areas: A Case Study in Fuzhou, China. *Remote Sensing*, 14, 1266
- Zhao C., Jensen, J., Weng Q. et Weaver R. A, 2018. Geographically Weighted Regression Analysis of the Underlying Factors Related to the Surface Urban Heat Island Phenomenon. *Remote Sens.*, 10, 1428

## RUISSELLEMENT PLUVIAL ET ÉROSION DES TERRES DANS L'ARRONDISSEMENT D'AKASSATO À ABOMEY-CALAVI AU BENIN

Cyr. Gervais<sup>1</sup> ETENE<sup>1 et 2</sup> et Ayédèguê Biaou Philippe CHABI<sup>1, 3 et 4</sup>

<sup>1</sup>Laboratoire Pierre Pagny Climat, Eau, Écosystème et Développement (LACEEDE),

<sup>2</sup>Université d'Abomey-Calavi, 01 BP 526, Cotonou, Bénin

<sup>3</sup>Ecole d'Agrobusiness et de Politiques Agricoles (EAPA), Université Nationale d'Agriculture (UNA);

<sup>4</sup>Laboratoire d'Économie Rurale et Sciences Sociales pour le Développement Durable (LERSSoDD)

cyr\_gervais\_etene@hotmail.com, cyr.verane73@gmail.com; philippe\_chabi@yahoo.fr

**Résumé :** La présente recherche vise à analyser les effets de ruissellement pluvial sur le phénomène érosif dans l'arrondissement d'Akassato à Abomey-Calavi au sud du Bénin. Les données pluviométriques aux pas de temps mensuels et annuels couvrant la période de 1951 à 2020 ont été utilisées et les informations sur les systèmes de pentes ont été également collectées. Les investigations en milieu réel de même que les statistiques descriptives sont mises à contribution. Les résultats montrent que les mois de mai, juin, juillet, août et octobre enregistrent un taux supérieur à 60 % de l'érosivité de pluie. Ce phénomène s'explique par un important taux de ruissellement pluvial dans le secteur d'étude avec des conséquences néfastes à savoir, les déchaussements des infrastructures socio-urbaines de même que la vulnérabilité de l'Arrondissement à l'érosion des terres.

**Mots clés :** Arrondissement de Akassato au Bénin, ruissellement pluvial, érosion des terres, stratégies

### Introduction

La dynamique pluviométrique associée au système des pentes et à l'urbanisation accélérée est souvent citée comme facteurs responsables de ruissellement pluvial dans les villes des pays tropicaux comme le Bénin (Eténé, 2020). En effet, le ruissellement est souvent désigné comme la cause première du phénomène érosif dans le monde (Adjoussi et al, 2017; Chabaan, 2016, et Eténé, 2010). L'érosion pluviale étant un phénomène géomorphologique naturel qui a façonné la surface de la terre au cours des âges géologiques demeure la forme de dégradation physique des terres la plus importante, avec des impacts considérables sur l'environnement. Ainsi, le Bénin en général et le secteur de recherche ne sont pas exemptés dudit phénomène.

Au Bénin en général, et plus précisément dans l'arrondissement d'Akassato, l'insuffisance, le dysfonctionnement et parfois l'inexistence d'ouvrages de drainage des eaux pluviales entraîne la dégradation du site et les infrastructures socio-urbaines par le truchement du phénomène de l'érodibilité des terres. La présente étude a pour objectif d'analyser les liens entre le ruissellement pluvial et le phénomène de l'érodibilité des terres dans l'Arrondissement d'Akassato dans la commune d'Abomey-Calavi au Bénin surtout dans une perspective de gestion durable de cadre de vie de la population urbaine.

### 1. Présentation de cadre de l'étude

Situé entre 6°28'07" et 6°35'39" de latitude nord et entre 2°19'24" et 2°24'27" de longitude est (figure 1), l'arrondissement de Akassato est limité au nord par l'arrondissement de Zinvié, au sud par l'arrondissement d'Abomey-Calavi, à l'ouest par l'arrondissement de Glodigbé et à l'est par celui Sô Ava. Il est l'un des neuf arrondissements qui composent le territoire administratif de la Commune d'Abomey-Calavi.

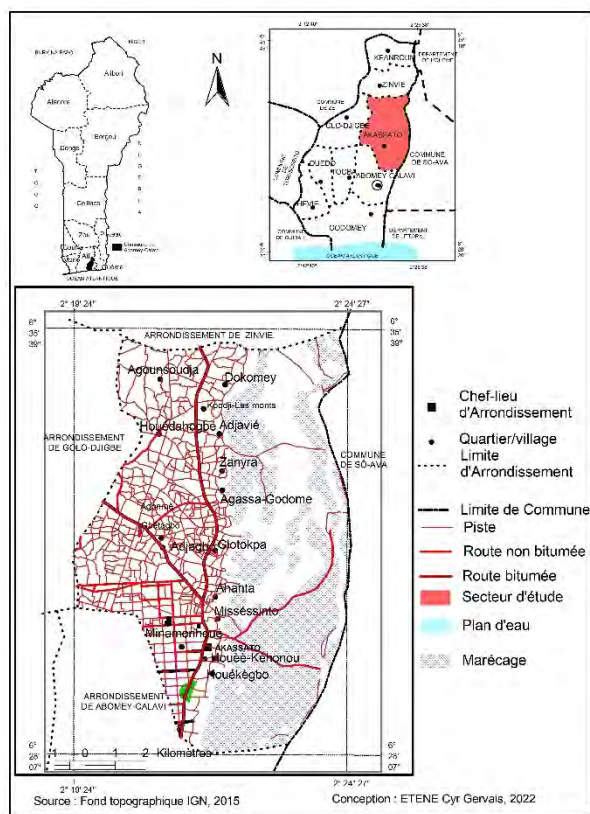


figure 1 : Situation géographique de l'Arrondissement d' Akassato

L'arrondissement de Akassato présente un relief accidenté, sous un climat subéquatorial, caractérisé par une pluviométrie (1300 mm/an) à forte variation spatiotemporelle ; ce qui favorise une vulnérabilité accrue à l'érosion pluviale dont les conséquences sont la dégradation du cadre de vie de la population et des infrastructures telles que les routes, les rues, habitations, etc.)

## 2. Données et méthodes

Les données notamment les hauteurs de pluies sur la période 1951-2020 ont été obtenues auprès du Service Climatologique de l'ASECNA à Cotonou et complétées par celles de la Direction de la Météorologie Nationale. De plus, les données concernant l'érodibilité du sol, à savoir les hauteurs et quantités de terres arrachées par les eaux de ruissellement, ont été mesurées sur le terrain par la technique du piquet d'érosion (photo 1).

Ainsi, pour l'étude de la variabilité pluviométrique, les indices pluviométriques ont été calculés par la formule :  $I = (X_i - X_{moy}) / \sigma$  où  $I$  désigne l'indice pluviométrique,  $X_i$  est la hauteur de pluie pour une année,  $X_{moy}$  la pluviométrie moyenne et  $\sigma$  l'écart-type de la période étudiée. Lorsque  $I > 0$ , l'année est considérée comme humide et quand  $I < 0$ , l'année est considérée comme sèche.



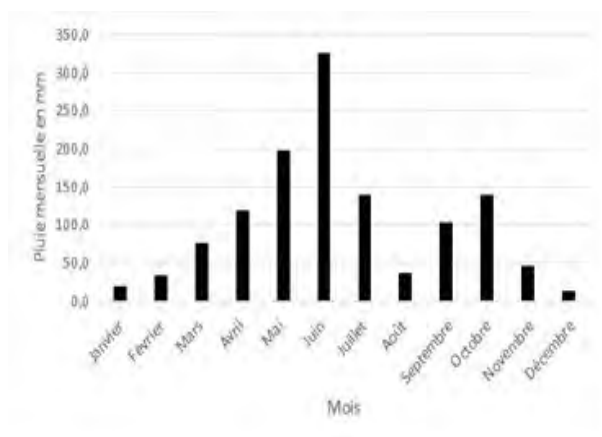
**Photo 1** : Installation d'un piquet d'érosion à Akassato. Prise de vue : Eténé, juillet 2020

S'agissant de l'érosivité des pluies, l'indice d'agressivité climatique a été calculé selon la formule de Fournier (1993)  $F = p^2/P$ , avec  $p$ , la pluviométrie mensuelle la plus élevée, et  $P$ , la moyenne pluviométrique annuelle.

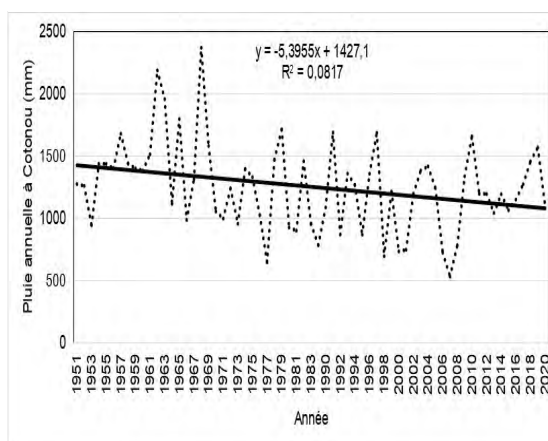
### 3. Résultats et discussion

#### 3.1. Facteurs déterminants de ruissellement et de l'érosion pluviale à Akassato

Selon Boughalem (2013), les précipitations sont reconnues depuis longtemps comme un agent essentiel de l'érosion des terres. L'impact des pluies sur le sol se manifeste soit par l'effet direct des gouttes de pluies sur les particules du sol, soit sous l'effet de lame d'eau ruisselée. Ainsi, les figures 2 et 3 présentent les caractéristiques pluviométriques d'Akassato.



**Figure 2** : Régime pluviométrique mensuel à Cotonou (1951-2020)

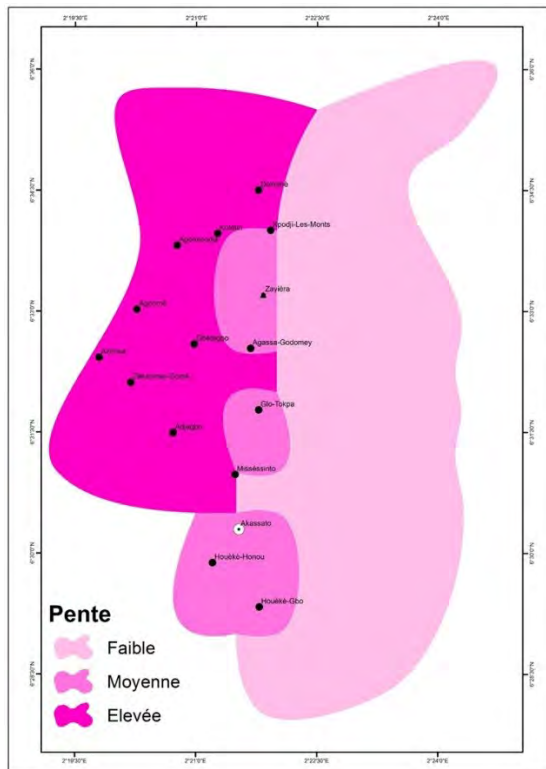


**Figure 3** : Variabilité interannuelle de la pluviométrie à Cotonou (1951-2020)

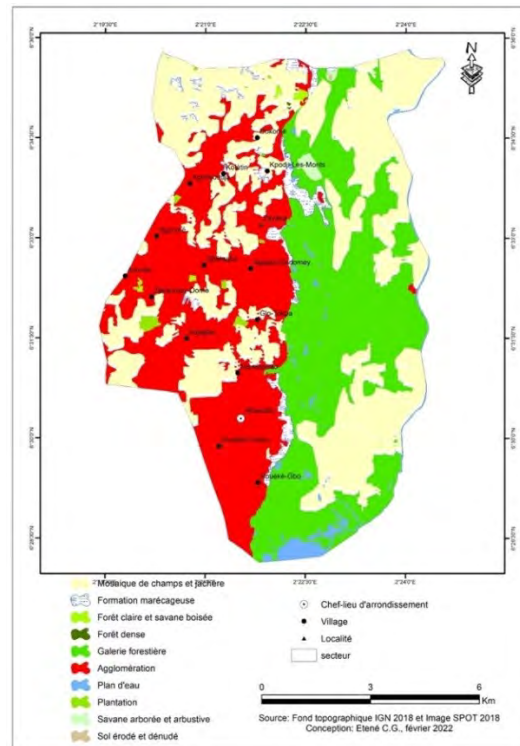
Caractérisé par un climat subéquatorial, l'Arrondissement d'Akassato présente un régime pluviométrique mensuel découpant l'année en quatre saisons à savoir : une grande saison pluvieuse ou on enregistre plus de 55 % des précipitations de l'année, une petite saison pluvieuse dont le cumul des hauteurs de pluies peuvent atteindre les 25 % du total annuel, la grande saison sèche avec 10 % des pluies totale et la petite saison sèche avec seulement 5 % du total annuel des pluies.

Le mois d'avril marque souvent un début aléatoire de l'installation de la saison pluvieuse. Avec une concentration pluviométrique saisonnière de 10 % du total annuel, cette période marque le début de la saturation du sol pour l'amorce du ruissellement donc le début du processus de l'érosion (Vissin, 2007 cité par Eténé, 2017). Le mois de juin considéré comme le cœur de la saison pluvieuse surtout du fait des pluies de la mousson, concentre environ 20 % des totaux pluviométriques annuels et les pluies deviennent continues. On enregistre pendant cette période en moyenne 17 jours de pluies et les lames d'eaux ruisselées sont devenues importantes avec moins de 10 % de taux d'infiltration. Ainsi, l'érosion pluviale est devenue très active avec des conséquences très néfastes sur la cadre de vie et des infrastructures socio-urbaines d'Akassato. Quant à la figure 3, elle montre une évolution interannuelle des cumuls pluviométriques dans le secteur d'étude. Trois périodes sont dégagées à savoir une période humide caractérisée par une hauteur des pluies supérieures à la moyenne avec une érosion pluviale très active, une période dite sèche caractérisée par un déficit des pluies avec une érosion pluviale faible et enfin, une période plus ou moins humide où la valeur des hauteurs de pluies tourne autour de la valeur moyenne et l'érosion pluviale est moins agressive.

Du point de vue morpho-topographique, le secteur d'étude est caractérisé dans son ensemble par le plateau de terre de barre (Abdoulaye, 2007). À Akassato, l'altitude des courbes de niveau varie entre 5 et 30 m, ce qui permet la détermination des différents types de pentes (figure 4).



**figure 4 :** Système des pentes dans le secteur d'étude



**figure 5 :** Occupation des terres dans le secteur d'étude

Dans le cadre de cette recherche, trois types de pente ont été définis à savoir : les pentes faibles (0-2 %), les pentes moyennes (2-5 %) et les pentes fortes (5-15 %). Ainsi, à l'est de la Route Inter Etat Cotonou-Niamey, les pentes sont faibles (0 à 2 %). Selon 60 % des enquêtés, le talus reliant le plateau à la plaine d'inondation de la Sô sont considérés comme des drains naturels qui servent à l'évacuation des eaux pluviales. En revanche la partie ouest et nord-ouest de l'Arrondissement, les pentes sont fortes et varient entre 5 à 10 %. C'est un secteur entaillé par les petites dépressions ce qui fait qu'elle a un aspect un peu plus raide. C'est à ce niveau que l'empreinte de l'érosion des terres est très visible car ce secteur est fortement urbanisé par exemple les quartiers de Missésinto, Gbétagbo, Adjagbo, Azonsa, Zèkanmey-Domè malgré les contraintes liées à la topographie.

Selon les investigations en milieu réel couplé avec les informations quantitatives, l'amplification du phénomène de ruissellement dans le milieu d'étude est surtout liée au mode d'occupation du sol favorisée par les types d'aménagement mis en place par la population (figure 5). Ainsi on note une faible proportion de l'espace liée aux forêts naturelles (30 %), les formations marécageuses et les plans d'eau sont autours de 31 % et enfin les agglomérations, sol nu et dénudé sont environ 39 %. Les conséquences qui découlent de ce type d'occupation sont entre autres la destruction du couvert végétal rempart contre l'érosion hydrique, augmentation de surface imperméabilisée, la densification du ruissellement et le faible taux d'infiltration.

### 3.2. Effets de l'érosion pluviale dans l'Arrondissement d'Akassato

La transformation de l'espace naturel en milieu anthropisé et associé à l'érosivité des pluies explique bien le phénomène de l'érosion pluviale observé dans la région d'étude. Les figures 6 et 7 présentent respectivement l'indice d'agressivité des pluies et les secteurs de vulnérabilité à l'érosion des terres à Akassato.



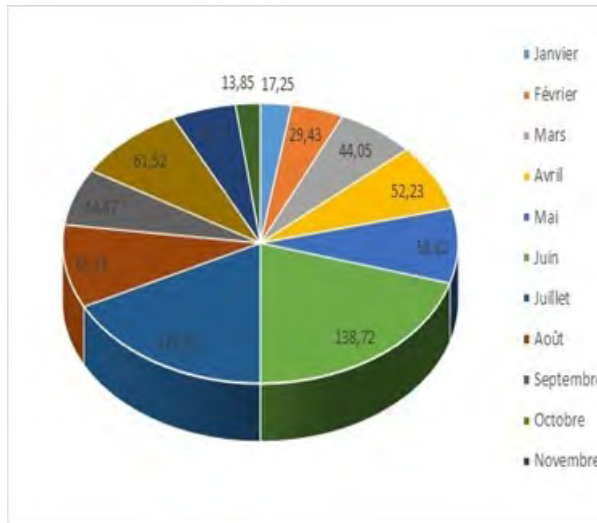


figure 6 : Indices d'érosivité des pluies

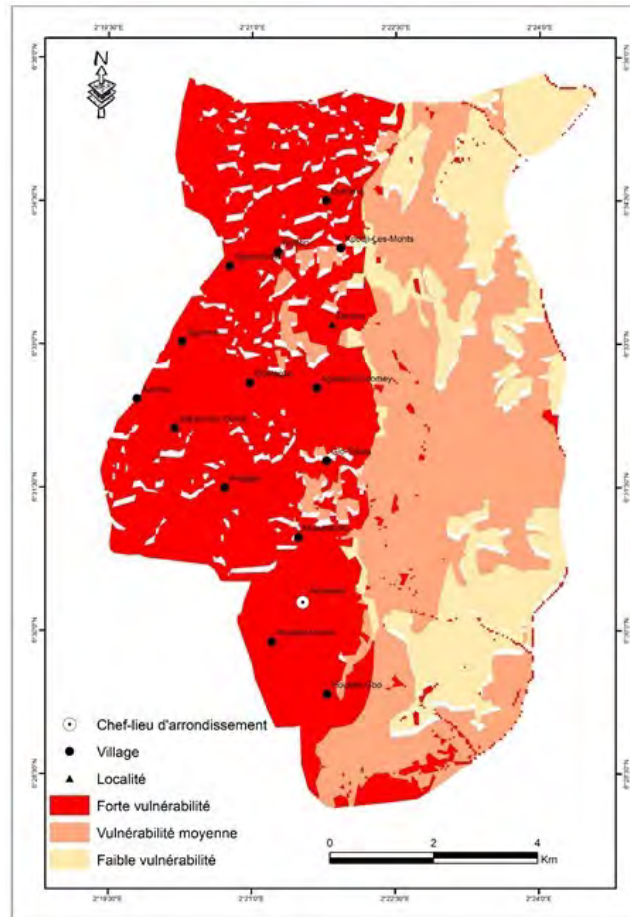


figure 7 : Situation de la vulnérabilité de l'arrondissement d'Akassato à l'érosion

L'examen de la figure 6 montre la variation mensuelle de l'indice d'érosivité de pluie dans le secteur d'étude. Ainsi, les mois de mai, de juin, de juillet et d'août considérés comme la grande saison pluvieuse présentent un fort taux d'érosivité de pluie avec respectivement 58 %, 138 %, 119 %, et 65 %. Ces mois sont considérés comme les mois où l'activité érosive est très importante à Akassato. Mais cette dégradation touche surtout les différentes infrastructures urbaines (Planche1).



Planche 1 : Poteau électrique déchaussé par l'érosion à Gbétagbo (à gauche) et déchaussement d'un système de protection par l'érosion à Akassato (à droite) (Prise de vues : Eténé, janvier 2022)

Pour 60 % des personnes interrogées, l'érosion n'affecte pas de la même manière les différents quartiers de l'Arrondissement (figure 7). Ainsi, à Gbétagbo on enregistre des ravines dont la profondeur varie de 0 à 250

m et à Missèssinto, les ravines de profondeur de 0 à 150 m. Ces ravines de tracé linéaire ont menacé plus de 300 habitations dans le secteur d'étude.

## Conclusion

L'étude de ruissellement pluvial et l'érosion des terres dans l'arrondissement d'Akassato a permis de comprendre comment le ruissellement pluvial est considéré le facteur amplificateur de l'érodibilité des terres dans le secteur d'étude. Les précipitations, le système des pentes, et les modes d'occupation du sol sont les facteurs explicatifs de ruissellement pluvial dans ledit arrondissement. Les conséquences engendrées par les forts d'érosivité de pluie dans le secteur d'étude, sont à la base de l'amplification du phénomène érosif, responsable de la dégradation des infrastructures socio-urbaines à Akassato.

## Bibliographique

Adjoussi P., N'Kéré K. et Sourou E., 2017. « *Gestion des inondations dans la basse vallée du Zio à travers l'exemple du quartier d'AgoèZongo à Lomé* », Saint-Louis, Revue de géographie du Laboratoire Leïdi « DTD », n° 17, p.17-37.

Boughalem K. M., 2013. *Impact des systèmes de gestion sur la vulnérabilité des sols à l'érosion ; cas du bassin versant de l'Isser-Tlemcen (Algérie)*. Thèse de Doctorat en Sciences Forestières de l'Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 215 p.

Chabaan Ch., 2016. Modélisation de l'érosion hydrique par le modèle SEAGIS. Cas du bassin Versant du barrage Siliana, Mémoire de master, Université de Tunis el Manar Faculté des sciences de Tunis /DEPARTEMENT DE GEOLOGIE, 83 p.

Eténé C. G., 2017. Erosion ravinante dans l'Arrondissement de Togba au Bénin. *Revue Climat et Développement*, numéro 23, pp41-56.

Eténé C. G., 2010. *Erosion pluviale dans une ville de l'Afrique tropicale humide et ses implications sociales et environnementales : cas de Bangui (RCA)*. Thèse de doctorat unique EDP-FLASH-UAC, 232 p.

Vissin W. E., 2007 : Impact de la variabilité climatique et de la dynamique des états de surface sur les écoulements du bassin béninois du fleuve Niger. Thèse de Doctorat Unique, Université de Bourgogne, 258 p + annexes.

## COOLPARKS: OBSERVATION DU RAFRAÎCHISSEMENT D'UN PARC NANTAIS AU-DELÀ DE SON ENCEINTE

Jérémy BERNARD <sup>1</sup>, Adrien GROS <sup>2</sup>, Auline Rodler <sup>3</sup>, Benjamin Morille <sup>4</sup>, Marjorie Musy <sup>5</sup>, Pascal Kéravec <sup>6</sup>, Sihem Guernouti <sup>7</sup>

<sup>1</sup> Université de Göteborg et chercheur associé au Lab-STICC, Guldhedsgatan 5a - 41320 Göteborg, jeremy.bernard@gu.se

<sup>2</sup> Soleneos et Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, 1 rue de la Noé – 44300 Nantes

<sup>3</sup> Cerema Ouest, Équipe BPE et Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, 9 rue René Viviani – 44262 Nantes

<sup>4</sup> Soleneos et Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, 1 rue de la Noé – 44300 Nantes

<sup>5</sup> Cerema Ouest, Équipe BPE et Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, 9 rue René Viviani – 44262 Nantes

<sup>6</sup> Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique, 1 rue de la Noé – 44300 Nantes

<sup>7</sup> Cerema Ouest, Équipe BPE et Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, 9 rue René Viviani – 44262 Nantes

**Résumé :** L'intensité du rafraîchissement généré par les parcs et la distance à laquelle il peut être observé varient selon la composition des parcs et la morphologie urbaine du quartier qui les entoure. Pour étudier ces phénomènes, des mesures mobiles de température d'air sont réalisées à l'intérieur et autour du parc de Procé (Nantes). Des différences de température importantes (environ 1°C pendant la journée et jusqu'à 2.5°C pendant la nuit) sont observées à la fin du printemps entre le parc et ses alentours (moins de 300 m de l'enceinte). La température de l'air des rues alentour semble dépendante de leurs caractéristiques urbaines. L'humidité des sols semble être un paramètre important sur la différenciation climatique à l'intérieur du parc mais également entre le parc et ses alentours.

**Mots-Clés :** rafraîchissement, mesures mobiles, parc urbain

**Abstract:** Parc land cover and the surrounding urban morphology of the buildings impact the cooling intensity and the distance where the cooling can be observed. This phenomenon is investigated through mobile air temperature measurements within and around the Proce Park (France). At the end of the spring, large temperature differences (about 1°C during the day and up to 2.5°C during the night) are observed between the park and its surroundings (up to 300 m from its boundary). The air temperature within the surrounding streets seems to be dependent of their morphology. The soil humidity seems to be an major parameter to observe temperature variability within the park as well as in the urban surroundings.

**Key-words :** cooling, mobile measurement, urban park

### Introduction

Rafraîchir les villes est une action d'adaptation au changement climatique permettant de limiter l'impact des canicules sur les citoyens. De nombreuses solutions sont étudiées pour améliorer le confort thermique extérieur (Santamouris et al. 2017). Certaines solutions sont relativement techniques (modification de l'albédo, arrosage de chaussées, utilisation de matériaux à changement de phase, utilisation de fontaines, d'asperseurs, de miroirs d'eau, etc.) tandis que d'autres sont fondées sur la nature et plus particulièrement sur la végétation (parcs, toitures ou façades végétalisées, arbres d'alignement, etc.). Les parcs urbains sont des cas particuliers de solutions puisqu'ils représentent des espaces aux propriétés proches de celles d'un espace rural mais sont intégrés dans le tissu urbain. Cette discontinuité géographique peut être plus ou moins prononcée selon la densité de bâtiments et de végétation du quartier dans lequel les parcs se trouvent et de fait engendrer une discontinuité

micro-climatique qui pourra elle aussi être importante. De nombreuses études ont identifié que l'air frais généré par les parcs urbains était transporté dans leur environnement bâti et qu'un rafraîchissement pouvait être mesuré au-delà de leur enceinte jusqu'à une distance équivalente à la largeur du parc (Jauregui 1990; Cao et al. 2010). L'intensité du rafraîchissement est cependant dépendante de la composition du parc et la surface bâtie impactée par le rafraîchissement est dépendante de la morphologie des rues dans lesquelles l'air va se propager (Bernard et al. 2018). Dans le cadre du projet CoolParks, des mesures mobiles de température d'air sont mises en œuvre à l'intérieur et autour d'un parc nantais pour évaluer (i) l'effet de la composition du parc sur sa température (variabilité au sein du parc) et (ii) l'effet de la morphologie du bâti alentour au parc sur le transport d'air frais.

## 1 Données

### 1.1 Cas d'étude

Le parc de Procé (Figure 1) a été choisi comme cas d'étude du fait de ses caractéristiques et également de celles de ses alentours urbains. En effet, (i) sa taille est relativement importante ( $>100'000 \text{ m}^2$ ) et ses alentours suffisamment densément bâtis pour créer une réelle discontinuité géographique et donc microclimatique, (ii) sa composition est relativement diversifiée (présence de bosquets d'arbres, de larges pelouses ouvertes au ciel, d'espaces d'eau) et (iii) plusieurs rues perpendiculaires aux limites de parc sont relativement homogènes en leur sein, permettant de minimiser les effets micro-climatiques attribuables à des variations géographiques plutôt qu'à un effet de distance au parc.

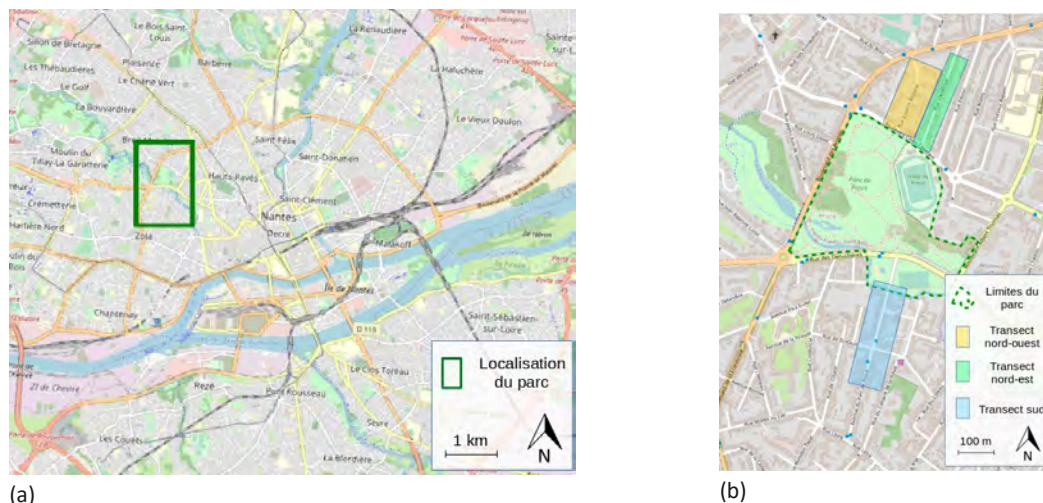


Figure 11 : Localisation (a) du site d'étude et (b) des zones (parc et transects) où les mesures mobiles sont réalisées

### 1.2 Matériel

Cinq stations de mesure mobiles ont été développées par le Laboratoire de Recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique (LHEEA) pour le besoin des campagnes de CoolParks. Elles sont composées d'un capteur de température (thermo-hygromètre Rotronic HC2S3 dont la sonde de mesure de température est de type Pt100 avec une précision de  $0.1^\circ\text{C}$ ) et d'un capteur de vitesse de vent selon ses deux composantes horizontales (anémomètre ultrasonique 2D LCJ Capteurs SONIC-ANEMO-MICRO). Le capteur de température est protégé du rayonnement solaire par l'abri Davis PN7714 qui a été choisi pour sa faible sensibilité au rayonnement (Lacombe et al. 2011; Bernard et al. 2019). Les capteurs sont reliés à un boîtier d'acquisition et l'ensemble est fixé sur un trépied permettant de régler la hauteur de mesure entre 1,1 et 3,1 m. Pour



les campagnes de mesure, le trépied a été réglé de façon à mesurer la température de l'air à 2 m (et donc le vent à environ 2,50 m).

Préalablement aux mesures, plusieurs campagnes de caractérisation du matériel ont été réalisées. Elles ont permis de (i) vérifier qu'en l'absence de rayonnement solaire, la différence de température mesurée entre deux stations situées côte à côte ne dépasse pas la précision du capteur (0.1 °C), (ii) vérifier qu'en présence du soleil et sous un vent inférieur à 1 m/s (0.77 m/s en moyenne) la différence de température mesurée entre une station à l'ombre et une station au soleil ne dépasse pas 0.2 °C (iii) évaluer la constante de temps du système {abri + capteur} à environ 3 minutes sous un vent de vitesse moyenne de 0.7 m/s.

### 1.3 Sites de mesure

Les campagnes étant des mesures mobiles, il est nécessaire de déplacer les stations puis de laisser le capteur converger à la température du nouveau site. Neuf sites de mesure situés à l'intérieur du parc de Procé ont été identifiés. Leur localisation a été choisie afin de représenter la diversité de composition du parc (surfaces d'eau, végétation basse ouverte au ciel, végétation arborée plus ou moins dense) et également sa topographie (Figure 2). Les sites ont ainsi été répartis dans des environnements de composition différente en haut et en bas du parc. La localisation précise des sites pour chaque campagne est présentée en même temps que les résultats (Figures 4 et 5).

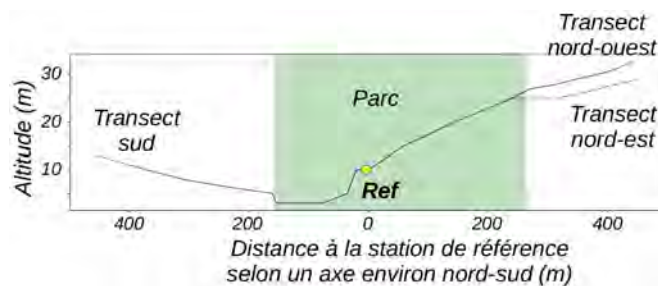


Figure 12 : Topographie du parc de Procé et de ses alentours selon un transect nord sud parallèle aux transects de mesure (cf. Figure 1)

Pour caractériser le transport de fraîcheur hors des limites du parc, trois transects ont été choisis. Ceux-ci sont situés au nord et au sud du parc et ont une direction nord/nord-est (cf. Figure 1). Le choix de ces transects a été motivé par trois raisons : (i) la direction correspond à la direction de vent principale lorsque les conditions météorologiques sont propices à l'observation d'importantes différences de température pour la ville de Nantes (Bernard, 2017), (ii) Les rues sont relativement homogènes sur toute leur longueur au vu des caractéristiques pouvant principalement influencer sur le microclimat (présence ou non d'arbres d'alignement, hauteur et distribution des bâtiments), (iii) les deux transects nord sont adjacents et ont des morphologies contrastées (une rue canyon fortement minéralisée - Figure 3a, transect nord-est - et une rue composée d'immeubles détachés et de jardins arborés - Figure 3b, transect nord-ouest). Ce dernier point permet d'appréhender l'effet de la morphologie sur le transport de fraîcheur. Le transect sud est également une rue canyon mais de rapport d'aspect supérieur au canyon situé au nord du parc et arborée de part et d'autre de la chaussée (Figure 3c).



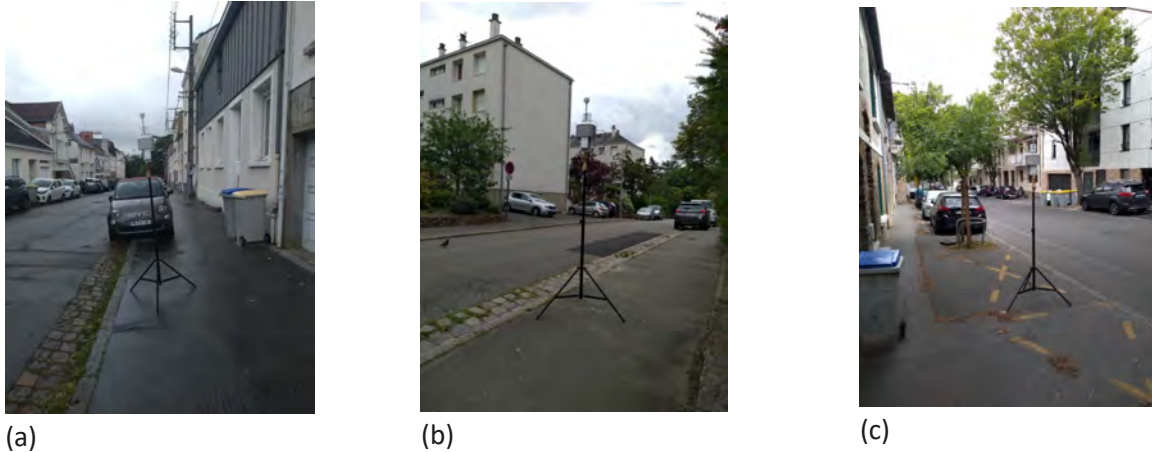


Figure 13 : Photo des trois transects (a) rue canyon du transect nord-est (b) immeubles détachés du transect nord-ouest et (c) de la rue canyon du transect sud

Chacun de ces transects est caractérisé par 6 sites de mesure uniformément répartis le long de la rue (tous les 30 à 50 m). Comme pour les sites localisés à l'intérieur du parc, leur position est sujette à modification et leur localisation exacte est présentée en même temps que les résultats des campagnes.

#### 1.4 Périodes de mesure

Les campagnes de mesures étant ponctuelles, il était nécessaire de définir les conditions météorologiques ainsi que les plages horaires diurnes et nocturnes propices à la réalisation de la mesure. Pour cela, des mesures fixes de température de l'air réalisées durant plusieurs années dans des parcs nantais et leur environnement urbain ont été analysées (Bernard et al. 2020). Plusieurs périodes diurnes d'environ deux heures ont été identifiées pour chaque saison. Pour chaque « combinaison {période, saison}, les conditions météorologiques permettant de maximiser le rafraîchissement des parcs ou la diffusion de fraîcheur dans leur environnement proche ont également été identifiées. Les campagnes sont organisées lorsque ces conditions semblent réunies.

Trois journées de mesure ont été réalisées en 2021 : les 26 et 27 mai (printemps) et le 28 août (été). La journée du 26 mai n'étant pas satisfaisante sur le plan météorologique (averses), seuls les résultats des journées du 27 mai et 28 août sont présentés ici. Au printemps, les sols étaient plutôt humides (données Météo-France et relevés visuels des observateurs), le vent était relativement faible (entre 0,3 et 1,5 m/s sur sites à 2.5 m de hauteur), de direction changeante (sud en début de journée puis nord) et le soleil était majoritairement présent bien que ponctuellement caché par quelques nuages. En été, les sols étaient plus secs, la vitesse du vent plus importante (jusqu'à 2.5 m/s) et le soleil légèrement voilé presque toute la journée.

## 2 Méthode

La valeur mesurée par chaque capteur est relevée toutes les 30 secondes. Les cinq stations sont utilisées simultanément pour couvrir les sites de mesure de tous les transects en 2h. Toutes les stations sont déplacées sauf la station de référence (station 1) qui reste au centre du parc. On distingue 3 phases pour chaque site : (i) une phase de déplacement (3 à 5 minutes) où les stations sont transportées d'un site à l'autre, (ii) une phase de stabilisation (5 à 10 minutes) : les mesures ont lieu mais les valeurs relevées pour la température et l'humidité de l'air ne sont pas considérées comme valides en raison de la constante de temps du système {abri + capteur}, (iii) une phase de mesure (5 minutes) : la valeur médiane de température et d'humidité de l'air est calculée pour les 5 dernières

minutes avant la nouvelle phase de mobilité. Le mode de la direction de vent et la vitesse moyenne sont calculés pour les 7 dernières minutes.

Pour minimiser l'effet du rayonnement sur les mesures, deux stratégies différentes ont été adoptées : lors des campagnes du 27 mai, les abris de toutes les stations devaient être soit au soleil ou soit à l'ombre en même temps. L'analyse des résultats de cette première campagne a mis en évidence que la différence de vitesse de vent entre deux sites pouvait parfois être importante, pouvant conduire à des erreurs de mesure de température plus conséquentes qu'initialement évaluées. Le protocole a donc été adapté pour les campagnes du 28 août : toutes les stations ont été placées à l'ombre, ce qui a entraîné une légère relocalisation de certains sites (déplacement inférieur à 50 m).

### 3 Résultats

#### 3.1 Journée du 27 mai 2021

Lors de cette campagne, le parc est toujours plus froid que ses rues adjacentes (Figure 4). C'est particulièrement vrai en fin de matinée (environ 1°C de différence pendant la période PJ1) et pendant la nuit (jusqu'à 2.5°C pendant PN1). L'air chaud en provenance des rues semble transporté par le vent à l'intérieur du parc. Ce phénomène est particulièrement visible sur la partie sud du parc pendant PJ1 (vent du sud) et sur la partie nord du parc pendant PN1 (vent du nord). De la même manière, l'air frais du parc semble être transporté à l'extérieur de son enceinte et ce à toutes les périodes (en s'éloignant du parc avec le vent dans le dos, la température augmente progressivement). À l'intérieur du parc, seuls les espaces boisés (à l'est et à l'ouest du parc) se distinguent légèrement thermiquement (plus frais en fin de matinée - PJ1). En-dehors du parc, les deux rues canyons (transects sud et nord-est) sont plus chaudes que la rue composée d'immeubles détachés (transect nord-ouest), sauf en PJ2.

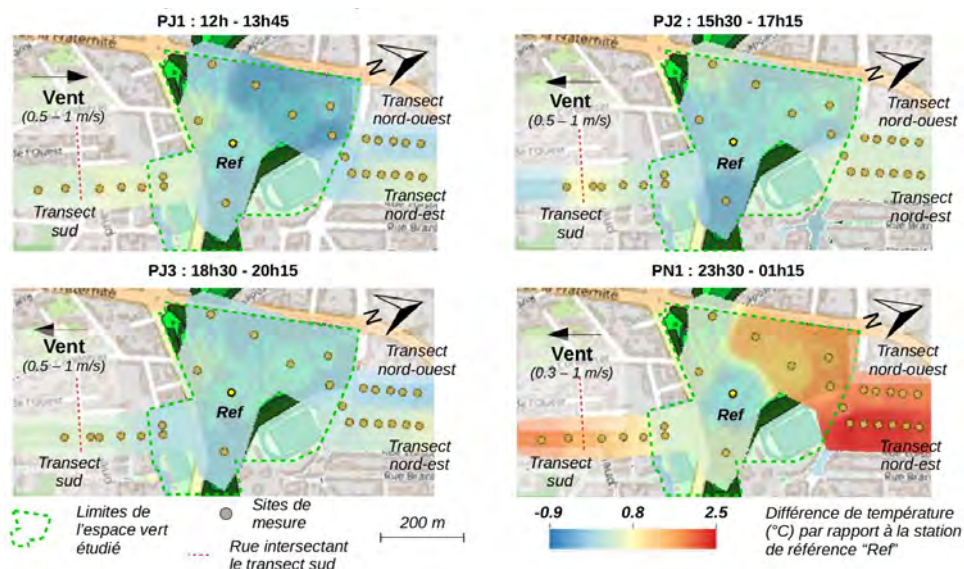


Figure 14 : Cartographie de la température de l'air à l'intérieur et autour du parc de Procé au cours de la journée du 27 mai 2021 (interpolation des points par pondération inverse à la distance à la puissance 5 - horaires UTC)

#### 3.2 Journée du 28 août 2021

Lors de cette deuxième campagne, le parc est plus frais que ses rues adjacentes seulement en fin de journée (PJ3) et pendant la nuit (PN1 - Figure 5). Il est difficile de juger qu'un réel effet de transfert d'énergie entre le parc et son environnement ait eu lieu (que ce soit en journée ou la nuit). À l'intérieur du parc, les espaces ouverts de haut de vallée (cf Figure 12) sont les plus chauds du parc en période de

fort ensoleillement (PJ1 et PJ2) tandis que les espaces boisés de fond de vallée sont les plus frais pendant la nuit (PN1). Comme lors de la précédente campagne, la rue composée d'immeubles détachés et d'espaces de végétation basse est plus fraîche que les rues canyons sauf en milieu d'après-midi (PJ2).

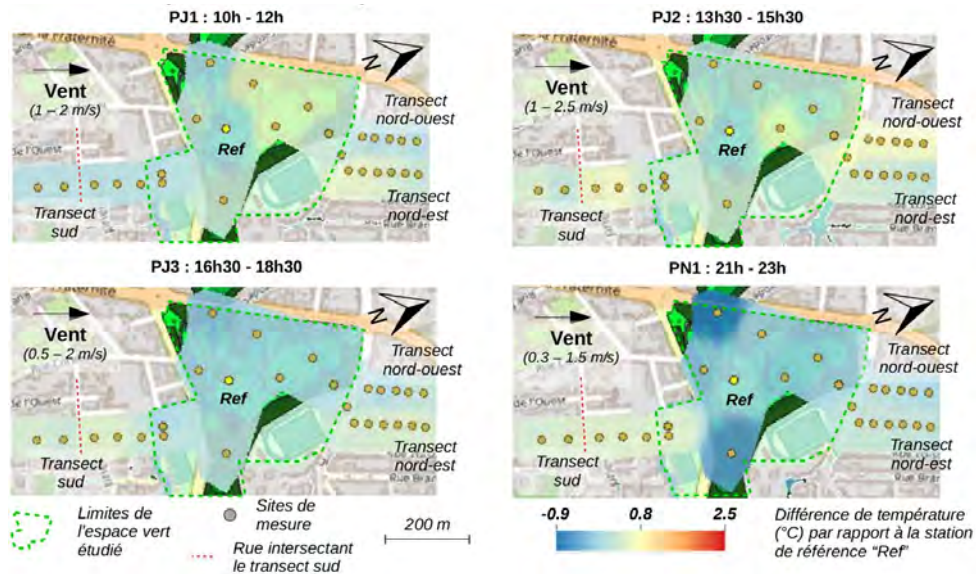


Figure 15 : Cartographie de la température de l'air à l'intérieur et autour du parc de Procé au cours de la journée du 28 août 2021 (interpolation des points par pondération inverse à la distance à la puissance 5 - horaires UTC)

### 3.3 Observation commune aux deux journées

Le transect sud est intersecté par une rue est-ouest avant le (ou les) dernier(s) point(s) de mesure (Figure 14 et 15). En fin de matinée et en début d'après-midi (respectivement PJ1 et PJ2), cette intersection rafraîchit le transect en aval du vent. Ceci est plus particulièrement visible la journée du 27 mai 2021 (Figure 4) : (i) pour la période PJ1, la température augmente avec la distance au parc (couleur jaune) puis diminue légèrement en amont de l'intersection (couleur verte), (ii) pour la période PJ2, la température augmente avec la distance au parc (couleur jaune) puis diminue plus fortement après l'intersection (couleur bleue).

### 4 Conclusion

À l'intérieur du parc, l'humidité des sols semble avoir un effet important sur la capacité du parc à refroidir tant son enceinte que son environnement urbain : (i) des différences de température plus importantes entre le parc et son environnement ont été observées au printemps lorsque les sols étaient plus humides (ii) en été, la température plus importante dans les espaces ouverts du haut de vallée en fin de matinée peut également résulter de sols plus secs et donc qui se réchauffent plus rapidement.

À l'extérieur du parc, excepté en milieu de journée (PJ2), l'organisation du bâti en immeubles détachés semble propice à une température plus basse. Deux hypothèses sont proposées pour expliquer cette observation (i) ce type de tissu urbain permet un meilleur transport d'air frais issu du parc ou (ii) un micro-climat plus frais se développe naturellement dans cette rue au facteur de vue du ciel et à la densité de végétation basse plus élevés (impliquant respectivement un rayonnement descendant plus faible et un moindre stockage de chaleur par rapport à un sol asphalté).

**Remerciements** : Ces travaux de recherche ont été produits dans le cadre du projet CoolParks co-financé par l'ADEME (N°1917C0002). Nous tenons à remercier les équipes de bénévoles qui ont pris le temps de participer aux campagnes de mesure, les agents des services de Nantes Métropoles et du SEVE de la ville de Nantes qui nous appuient dans le projet CoolParks.

### **Bibliographie**

Bernard, Jeremy. 2017. « Signature géographique et météorologique des variations spatiales et temporelles de la température de l'air au sein d'une zone urbaine ». Thèses, École centrale de Nantes. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01449935>.

Bernard, Jérémy, P. Bodenau, P. Keravec, Benjamin Morille, et Auline Rodler. 2020. « Outil d'alerte pour identifier les périodes propices au rafraîchissement des parcs ». *33ème colloque de l'association internationale de climatologie - Changement climatique et territoires*, Jul 2020, Rennes, France..

Bernard, Jérémy, Auline Rodler, Benjamin Morille, et Xueyao Zhang. 2018. « How to Design a Park and Its Surrounding Urban Morphology to Optimize the Spreading of Cool Air? » *Climate* 6 (1): 10.

Bernard, Jérémy, Pascal Kéavec, Benjamin Morille, Erwan Bocher, Marjorie Musy, et Isabelle Calmet. 2019. « Outdoor Air Temperature Measurement: A Semi-Empirical Model to Characterize Shelter Performance ». *Climate* 7 (2). <https://doi.org/10.3390/cli7020026>.

Cao, Xin, Akio Onishi, Jin Chen, et Hidefumi Imura. 2010. « Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data ». *Landscape and urban planning* 96 (4): 224–231.

Jauregui, E. 1990. « Influence of a Large Urban Park on Temperature and Convective Precipitation in a Tropical City ». *Energy and Buildings* 15 (3): 457-63. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(90\)90021-A](https://doi.org/10.1016/0378-7788(90)90021-A).

Lacombe, M, D Bousri, M Leroy, et M Mezred. 2011. « WMO Field Intercomparison of Thermometer Screens/Shields and Humidity Measuring Instruments, Ghardaia, Algeria, November 2008–October 2009 ». Instruments and observing methods report. World Meteorological Organization.

Santamouris, M., L. Ding, F. Fiorito, P. Oldfield, Paul Osmond, R. Paolini, Prasad, et A. Synnefa. 2017. « Passive and active cooling for the outdoor built environment—Analysis and assessment of the cooling potential of mitigation technologies using performance data from 220 large scale projects ». *Solar Energy* 154: 14–33.

## MODÉLISATION CLIMATIQUE RÉGIONALE À HAUTE RÉOLUTION POUR L'ÉTUDE DU CLIMAT URBAIN : ÉVALUATION DU MODÈLE CNRM-AROME SUR 12 VILLES FRANÇAISES

Yohanna MICHAU <sup>1</sup>, Aude LEMONSU <sup>1</sup>, Philippe LUCAS-PICHER <sup>1,2</sup>, Cécile CAILLAUD <sup>1</sup>, Antoinette ALIAS <sup>1</sup>

<sup>1</sup> CNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, France, [yohanna.michau@meteo.fr](mailto:yohanna.michau@meteo.fr)

<sup>2</sup> Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère, Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada

**Résumé :** Les villes sont le siège d'un microclimat spécifique dont l'évolution, couplée aux changements globaux, pourrait notamment exacerber les problématiques déjà existantes de stress thermique des populations urbaines. Ces évolutions restent mal connues car les effets urbains sont peu pris en compte par les modèles de climat actuels. Cette étude analyse le climat urbain simulé sur une échelle de temps climatologique pour 12 villes situées en France métropolitaine. Pour cela, le modèle régional de climat à convection profonde résolue (CP-RCM, Convection-Permitting Regional Climate Model) CNRM-AROME couplé à TEB a été utilisé à 2.5 km de résolution horizontale afin d'évaluer l'habileté du modèle à reproduire des champs atmosphériques et à simuler l'îlot de chaleur urbain nocturne (ICUN). Le modèle présente certains biais systématiques sur les forçages atmosphériques comme le rayonnement solaire incident et les précipitations, qui peuvent engendrer des biais sur les températures en surface. Néanmoins, CNRM-AROME simule de manière réaliste la variabilité saisonnière et les intensités minimales et maximales de l'ICUN sur la plupart des villes, et pourrait donc être appliqué désormais en climat futur.

**Mots-Clés :** Modélisation climatique à haute résolution, Climat urbain, Îlot de chaleur.

**Abstract :** High-resolution regional climate modelling for urban climate studies: evaluation of the CNRM-AROME model on 12 French cities - Cities have a specific microclimate whose evolution, coupled with global changes, involves several uncertainties. In particular, it could exacerbate problems of thermal stress of urban populations. These evolutions are little known because the urban effects are poorly taken into account by the current climate models. This study analyzes the urban climate simulated by a model on 12 cities located in metropolitan France. For this purpose, the Convection-permitting Regional Climate Model (CP-RCM) CNRM-AROME coupled to TEB was used at 2.5 km resolution to evaluate the model's ability to reproduce atmospheric fields and to simulate the nighttime Urban Heat Island (UHIN). The model has a few systematic biases on atmospheric forcings such as incident solar radiation and precipitations, which can lead to biases on surface temperatures. However, CNRM-AROME realistically simulates seasonal variability and minimum and maximum intensities of the UHIN over most cities, and could be applied in future climate.

**Keywords :** High-resolution climate modelling, Urban climate, Heat island.

### Introduction

La spécificité du domaine urbain provient de sa morphologie tridimensionnelle complexe et des matériaux artificiels qui le composent. Les constructions et infrastructures urbaines constituent des obstacles en surface qui perturbent d'une part les écoulements d'air et les échanges turbulents, et d'autre part l'interception du rayonnement incident et les interactions radiatives entre les différents éléments de l'environnement urbain (Oke et al. 2017). Ces processus donnent naissance à un microclimat spécifique au domaine urbain, caractérisé notamment par l'apparition d'îlots de Chaleur Urbain (ICU). Le climat urbain diffère selon les caractéristiques des villes (taille, densité urbaine, caractéristiques architecturales, population etc.), les contextes géographiques et les conditions



atmosphériques. Son évolution dans le temps est conditionnée par de multiples facteurs sociétaux, économiques et environnementaux (croissance démographique, modification de la ville et du bâti, changements du mode de vie et d'usage de l'énergie, etc.) et est incertaine sous l'effet du changement climatique. L'étude combinée du climat urbain local et des effets régionaux liés au changement climatique requiert des outils de modélisation adaptés permettant le couplage des processus. Les modèles régionaux de climat à convection profonde résolue (CP-RCM, Convection-Permitting Regional Climate Model) sont particulièrement intéressants pour simuler les zones urbaines (Shu et al., 2021), car leur haute résolution leur permet de simuler explicitement plusieurs phénomènes de petites échelles comme les ICU. Dans ce cas, en raison des particularités de l'environnement urbain, la simulation du climat urbain dépend du couplage du modèle atmosphérique avec un modèle de canopée urbaine (UCM, Urban Canopy Model) comme le Town Energy Balance (TEB) (Masson, 2000).

Dans cette étude, le CP-RCM CNRM-AROME couplé à TEB a été utilisé à 2.5 km de résolution sur un domaine qui couvre la France sur la période 2000-2018. Ce domaine est idéal pour étudier le climat urbain d'un ensemble de villes de France métropolitaine. Ainsi, 12 grandes et moyennes villes ont été sélectionnées dans 4 zones climatiques : le climat continental (Dijon, Nancy et Strasbourg), le climat méditerranéen (Montpellier, Nice et Nîmes), le climat océanique (Bordeaux, Lille, Nantes et Rennes) et le climat semi-océanique (Paris et Toulouse).

L'objectif est (1) d'évaluer la performance globale du modèle afin d'avoir un premier aperçu des capacités de CNRM-AROME à reproduire les champs atmosphériques et, sans doute, mieux comprendre les résultats obtenus dans les analyses suivantes, et (2) d'évaluer la capacité du modèle à simuler les ICU nocturnes (ICUN) par rapport aux observations.

## **1. Matériels et méthodes**

### **1.1. Configuration des simulations climatiques**

CNRM-AROME est un modèle non-hydrostatique à résolution kilométrique développé par Météo-France pour la prévision numérique du temps (Seity et al., 2011). Il est maintenant utilisé en mode climat à 2.5 km de résolution horizontale (Caillaud et al., 2021). Dans le cadre de cette étude, CNRM-AROME a été utilisé sur le domaine Nord-Ouest de l'Europe comptant 720 × 900 points de grille. L'atmosphère est discrétisée selon 60 niveaux verticaux, ces derniers étant plus concentrés près de la surface. Les simulations ont été produites pour la période allant du 01 janvier 2000 au 31 décembre 2018 (après 2 ans de spin-up) en suivant une configuration dite d'évaluation. Le modèle est forcé à ses frontières latérales par le modèle de climat régional CNRM-ALADIN de résolution horizontale 12.5 km, lui-même contraint par les réanalyses globales ERA-Interim de résolution horizontale 80 km.

CNRM-AROME est couplé à la plateforme SURFEX (Masson et al., 2013) pour la modélisation des surfaces continentales et leurs interactions avec l'atmosphère. Chaque point de grille du domaine de simulation est décrit comme la combinaison de quatre types de couverts : les surfaces naturelles continentales, les zones urbaines, les eaux continentales (lacs, fleuves...) et les eaux océaniques (mer ou océan). Les échanges entre la surface et l'atmosphère de chaque type de couverts sont calculés indépendamment par différents modèles (dont TEB, Masson (2000) et ISBA 3-L, Boone et al., 1999). La description de la surface s'appuie sur la base de données globale d'occupation et d'usage des sols ECOCLIMAP I (Champeaux et al. 2003).

### **1.2. Longues séries d'observations météorologiques**

Le produit ANASTASIA est un jeu de données sur grille de température minimale (TN) et maximale (TX) à résolution horizontale kilométrique sur la France métropolitaine (Besson et al., 2019) couvrant la période 1947-2016. Les données quotidiennes sont déterminées à l'aide d'une méthode de régression-krigeage (Hengl et al., 2007) combinant des TN et TX journalières enregistrées par les stations du réseau Météo-France et une climatologie mensuelle.

COMEPHORE est un jeu de données composé par la fusion des observations des radars de précipitation et des mesures des pluviomètres du réseau météorologique français. Il fournit des précipitations cumulées horaires sur grille à une résolution horizontale de 1 km pour la période 1997-2018.

Les données de stations du réseau GEBA (Global Energy Balance Archive) produites par l'ETH Zurich en Suisse (Wild et al., 2017) et les stations de surface du réseau Météo-France fournissent de longues séries temporelles du rayonnement solaire entrant mensuel provenant de stations à la surface de la Terre.

Enfin les données météorologiques du réseau opérationnel de Météo-France ont été utilisées pour compléter l'évaluation des simulations CNRM-AROME. Pour chaque ville étudiée, deux (ou trois) stations ont été sélectionnées afin de disposer systématiquement de deux longues séries de températures quotidiennes, l'une dans la ville (station urbaine) et l'autre dans l'environnement naturel proche (station rurale). Cette méthodologie vise à évaluer l'îlot de chaleur urbain, c'est-à-dire la différence de température entre la ville et la campagne, sur une échelle de temps climatologique.

## 2. Évaluation générale de CNRM-AROME

Le climat urbain, et en particulier l'ICU, évolue quotidiennement en fonction des conditions météorologiques locales (ensoleillement, vent, précipitation, etc.). La qualité de la simulation de l'ICU par CNRM-AROME dépend, entre autres facteurs, de sa capacité à simuler des conditions climatiques réalistes. La première étape de l'évaluation générale se concentre donc sur l'analyse de la précipitation, du rayonnement solaire incident et de la température, dont les résultats sont disponibles dans le Tableau 1.

**Tableau 1.** Biais moyens saisonniers calculés entre le modèle CNRM-AROME et la base de données COMEPHORE (pour les précipitations, **PR**, en %), les observations issues des stations GEBA ou Météo-France (pour le rayonnement solaire incident, **GLO**, en %), la base de données ANASTASIA (pour la température minimale et maximale, **TN** et **TX**, en °C) sur la période 2000-2018 pour PR et GLO ou 2000-2016 pour TN et TX.

Biais	DJF				MAM				JJA				SON			
	PR (%)	GLO (%)	TN (°C)	TX (°C)	PR (%)	GLO (%)	TN (°C)	TX (°C)	PR (%)	GLO (%)	TN (°C)	TX (°C)	PR (%)	GLO (%)	TN (°C)	TX (°C)
BORDEAUX	+20.3	+13.6	+0.9	-0.7	+31.0	+9.8	+0.8	-1.9	-30.7	+14.4	+2.3	+1.0	+7.6	+15.0	+1.6	0.0
LILLE	+32.9	+10.9	+0.3	-0.4	+54.7	+5.6	-0.2	-1.5	+1.1	+14.3	+0.2	+0.0	+11.8	+13.0	-0.1	-0.2
NANTES	+27.6	+6.7	+0.5	-0.7	+35.5	+3.9	-0.0	-2.0	-16.1	+12.7	+0.8	+0.5	+12.5	+12.2	+0.4	-0.4
RENNES	+26.2	+6.7	+0.2	-0.7	+43.6	+6.9	-0.1	-1.8	-10.3	+14.0	+0.4	+0.3	+14.4	+10.9	+0.1	-0.4
DIJON	+24.3	+30.7	+0.6	-0.4	+35.1	+12.5	+0.5	-1.8	-5.5	+16.3	+1.8	+0.6	+0.58	+21.8	+0.9	+0.3
NANCY	+24.4	+27.1	+0.8	-0.3	+46.1	+14.8	+0.7	-1.7	+4.4	+15.9	+1.7	+0.2	-1.4	+24.7	+0.8	+0.2
STRASBOURG	+63.5	+35.5	-0.0	-0.5	+72.9	+17.0	-0.1	-2.0	+22.3	+16.7	+1.3	-0.1	+21.4	+27.2	+0.5	0.0
MONTPELLIER	-11.3	+12.0	+2.6	-0.6	+15.0	+10.1	+1.9	-2.0	-44.0	+8.9	+3.3	-0.6	+1.8	+6.7	+2.4	-0.9
NICE	-1.7	+17.7	+3.6	+0.2	+18.8	+11.2	+2.5	-1.2	-21.6	+6.3	+3.5	-0.6	+0.1	+10.6	+3.3	-0.1
NÎMES	-12.1	+11.5	+1.4	-0.8	+13.6	+10.1	+1.2	-1.4	-45.5	+9.1	+3.1	+1.0	-2.0	+7.0	+1.6	-0.6
PARIS	+28.7	+22.8	+0.5	-0.6	+52.8	+6.0	+0.2	-1.8	+2.3	+15.0	+1.2	+0.1	+10.7	+17.0	+0.5	-0.1
TOULOUSE	+21.7	+13.7	+1.1	-0.6	+37.9	+9.3	+0.3	-1.8	-20.8	+16.1	+1.8	+1.8	+14.8	+18.4	+1.0	-0.0

Les scores sur la précipitation (PR) soulignent la variabilité saisonnière et géographique du modèle. De manière générale, pour les villes océaniques, semi-océaniques et continentales, la précipitation est surestimée par CNRM-AROME en DJF (hiver, de +20 à +33 %), MAM (printemps, de +31 à +56 %) et SON (automne, de +15 % maximum), tandis qu'elle est sous-estimée en JJA (été, de -21 % maximum). Les ordres de grandeur donnés ici n'incluent pas les résultats de Strasbourg, qui montrent des performances locales particulièrement dégradées avec une surestimation de la précipitation tout au long de l'année de +21 à +73 %. Pour les villes méditerranéennes qui connaissent une climatologie régionale particulière en matière de précipitation, CNRM-AROME présente des performances différentes avec une tendance à sous-estimer les précipitations déjà faibles. En DJF et surtout en JJA, un déficit de précipitations est constaté (jusqu'à -45 % pour Nîmes en JJA). À noter que Bordeaux et Toulouse, situées dans la moitié sud de la France, présentent des résultats similaires avec respectivement -30.7 et -20.8 % en JJA. Enfin, sur la zone méditerranéennes, les précipitations

simulées sont très proches de celles observées en SON. Elles restent surestimées en MAM comme sur le reste des villes, mais avec des biais beaucoup plus faibles (supérieurs à +20 %).

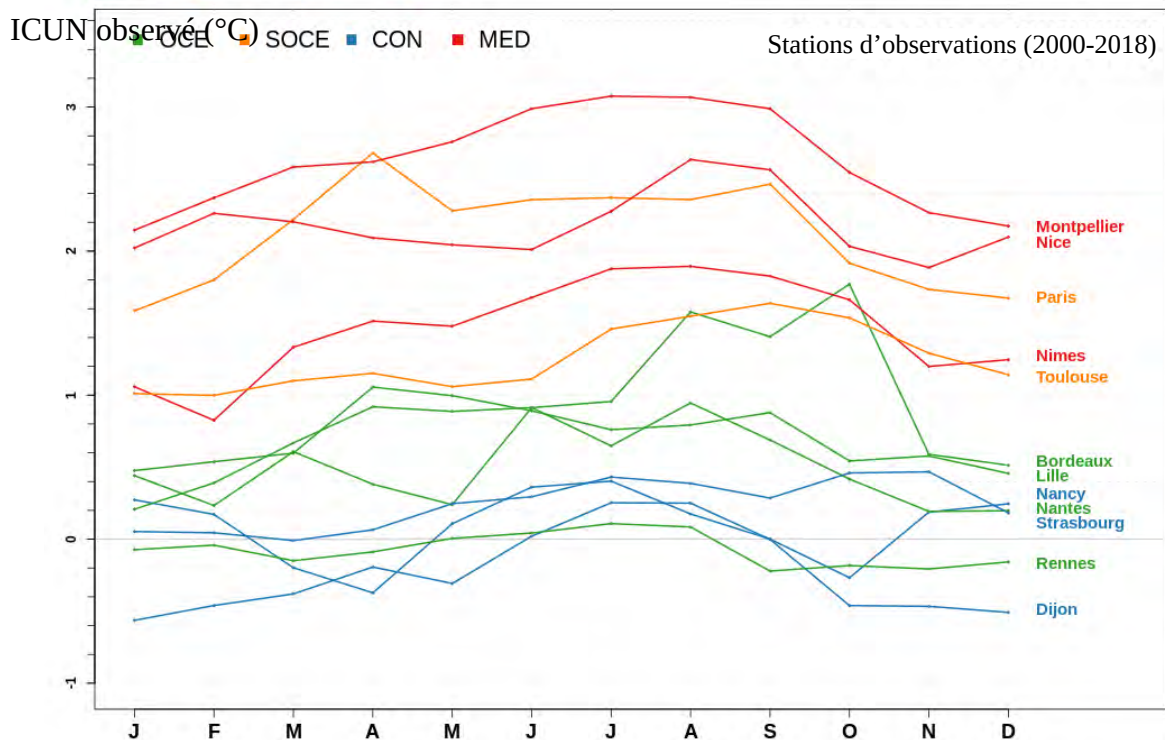
CNRM-AROME surestime le rayonnement solaire incident pour toutes les saisons et dans l'ensemble des villes. Les biais les plus importants sont calculés pour les villes continentales (Dijon, Nancy et Strasbourg). Le rayonnement solaire incident est fortement surestimé par le modèle en DJF (de +27 à +36 %) et en SON (de +22 à +27 %), et plus modérément en MAM et JJA (de +13 à +17 %). Pour les villes océaniques, les biais varient de +4 à +15 %, de +6 à +23% pour les villes semi-océaniques et de +6 à +18 % pour les villes méditerranéennes.

Le modèle CNRM-AROME reproduit un TN saisonnier réaliste dans les villes du nord-ouest, en particulier en MAM et SON. À Lille et à Rennes, les biais moyens sont inférieurs à  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  à toutes les saisons. Le modèle fonctionne bien pour Nantes et Paris, sauf en JJA. Il surestime la TN dans les autres villes à toutes les saisons, mais avec une variabilité géographique. Les villes situées sur la diagonale Strasbourg-Toulouse ont des biais inférieurs à  $1^{\circ}\text{C}$  en DJF, MAM, SON, et des biais plus élevés en JJA (entre + 1.3 et + 1.8 $^{\circ}\text{C}$ ). Les biais sont maximaux pour Bordeaux, Montpellier, Nice et Nîmes (supérieurs à + 0.5 $^{\circ}\text{C}$  pour toutes les saisons). Cette surestimation des TN simulées par CNRM-AROME est particulièrement forte en été où les biais dépassent  $3^{\circ}\text{C}$  dans les villes méditerranéennes. En ce qui concerne les TX, les villes du sud comme Bordeaux, Dijon, Nîmes, et Toulouse, présentent des biais forts en été (entre + 0.6 et + 1.8 $^{\circ}\text{C}$ ). Autrement, le modèle CNRM-AROME a tendance à sous-estimer les TX pour les autres saisons. Ces biais froids sont très faibles en SON, un peu plus forts en hiver (inférieurs à - 1 $^{\circ}\text{C}$  pour toutes les villes) et en MAM (entre - 1.2 et - 2 $^{\circ}\text{C}$ ).

### 3. Modélisation des îlots de chaleur urbains

Cette étape vise à évaluer la capacité du modèle à simuler spécifiquement le climat urbain pour chaque ville. Une attention particulière est accordée à l'ICU nocturne (ICUN), dont l'intensité est fortement déterminée à la fois par les particularités de la ville elle-même (taille, densité de construction, matériaux, etc.) et par les conditions atmosphériques du jour précédent.

La Figure 1 montre les moyennes mensuelles des ICUN calculées à partir des 19 années de données.

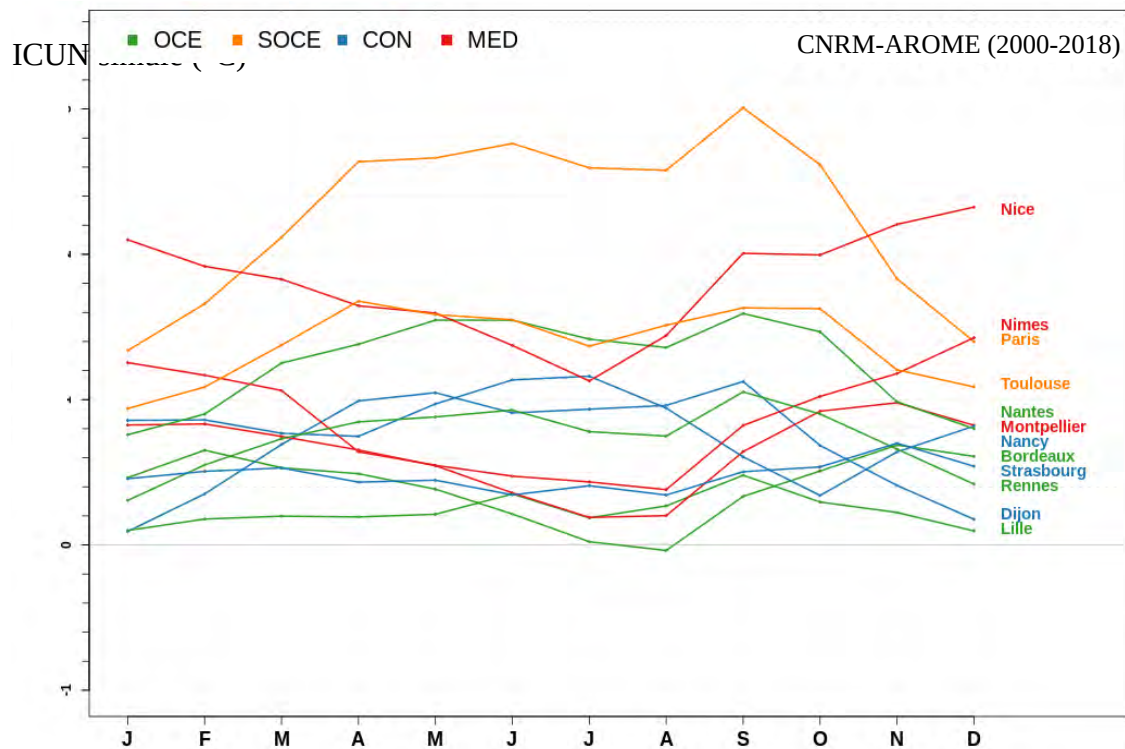


**Figure 1.** ICU nocturnes (en °C) sur la période 2000-2018 provenant des stations météorologiques rurales et urbaines. Les couleurs définissent chaque zone climatique : vert pour OCEANIQUE, orange pour SEMI-OCEANIQUE, bleu pour CONTINENTAL et rouge pour MÉDITERRANÉEN.

Une dispersion des intensités des ICUN d'environ 3°C est constatée entre les 12 villes étudiées, de -1°C à +2.2°C pour les ICUN d'hiver et de 0 à +3.1°C pour les ICUN d'été. Le cycle annuel diffère d'une ville à l'autre, mais présente des intensités maximales entre avril et septembre et minimales entre décembre et janvier. Les similitudes entre les ICUN de certaines villes sont soulignées en relation avec les zones climatiques auxquelles elles appartiennent.

Les villes méditerranéennes présentent les ICUN les plus forts peu importe la saison, mais avec une variabilité saisonnière se traduisant par des intensités maximales d'ICUN en JJA (+3.0, +2.6, +1.8°C pour Montpellier, Nice et Nîmes respectivement) et minimales en DJF (autour de +1 et +2°C). Les villes océaniques (Lille, Nantes et Rennes) présentent des ICUN très comparables, avec à la fois de faibles intensités et une variabilité saisonnière. Les intensités sont autour de 0°C à Rennes et autour de +0.7°C pour Lille et Nantes sans jamais dépasser +1°C. Bordeaux, également classée en tant que ville océanique présente des ICUN sensiblement différents, principalement dues à des valeurs plus élevées entre août et octobre (jusqu'à +1.7°C en octobre). Les villes continentales de Dijon, Nancy et Strasbourg ont les ICUN les plus faibles, variant entre -0.5 et +0.5°C tout au long de l'année. Dans les deux villes semi-océaniques (Paris et Toulouse), les intensités et les variabilités saisonnières des ICUN sont comparables à celles des villes méditerranéennes.

La Figure 2 montre les moyennes mensuelles des ICUN simulés par CNRM-AROME sur la période d'étude.



**Figure 2.** ICU nocturnes (en °C) sur la période 2000-2018 simulés par CNRM-AROME au point de grille correspondant aux stations de surface rurales et urbaines. Les couleurs définissent chaque zone climatique : vert pour OCEANIQUE, orange pour SEMI-OCEANIQUE, bleu pour CONTINENTAL et rouge pour MÉDITERRANÉEN.

CNRM-AROME simule des ICUN réalistes peu importe la saison pour les villes soumises au climat semi-océanique (Toulouse et Paris) avec des biais inférieurs à ± 0.5°C. À Dijon, Nancy et Strasbourg, le modèle surestime l'ICUN quelque soit la saison, même si la saisonnalité est justement reproduite. Ces résultats sont cohérents avec les éléments mis en avant dans l'évaluation générale. La surestimation des précipitations autour de ces villes peut engendrer un rafraîchissement trop important du milieu rural dans le modèle par l'évaporation des sols et la transpiration de la végétation. D'autre part, la

surestimation du rayonnement solaire incident peut favoriser un réchauffement plus important en ville. À l'inverse pour les villes situées sur la côte méditerranéenne, CNRM-AROME sous-estime l'ICUN et présente en particulier un affaiblissement de son intensité en été. Cette région présente la particularité d'un déficit en précipitation en été combiné à une surestimation du rayonnement solaire incident. Ces éléments pourraient entraîner un assèchement important des sols autour des villes et ainsi expliquer l'affaiblissement de l'ICUN à cette période.

## Conclusion

Les simulations du modèle CNRM-AROME réalisées à 2.5 km de résolution horizontale sur le Nord-Ouest de l'Europe pour la période de 2000 à 2018 ont permis de produire une analyse multi-villes originale du climat urbain en France métropolitaine. L'étude visait à évaluer la capacité du modèle à simuler les particularités du climat urbain de plusieurs villes françaises dans des contextes climatiques et géographiques contrastés.

L'évaluation générale a porté sur la capacité de CNRM-AROME à simuler des conditions atmosphériques réalistes à proximité des villes, dont dépend l'ICUN. Les performances du modèle pour la simulation des précipitations sont variables géographiquement et saisonnièrement. Elles sont surestimées en DJF, en MAM et dans une moindre mesure en SON, sauf dans les villes méditerranéennes, et sous-estimées en JJA. Les analyses soulignent une surestimation systématique du rayonnement solaire incident, quelles que soient la saison et le contexte climatique. En réponse, CNRM-AROME tend à surestimer les températures minimales et à sous-estimer les températures maximales, bien que l'on constate des variations géographiques et saisonnières. Des biais positifs plus forts ont été trouvés en TN en JJA sur la côte Méditerranéenne, qui pourraient être expliqués à la fois par la surestimation du rayonnement entrant et la sous-estimation des précipitations.

La deuxième étape de l'évaluation s'est concentrée sur les aspects urbains, et particulièrement sur l'évaluation des ICUN simulés, d'un point de vue climatologique, par CNRM-AROME pour les 12 villes sélectionnées. Finalement, l'analyse a montré que le modèle simule des ICUN assez proches des observations, surtout à Paris et Toulouse. Les ICU nocturnes sont surestimés dans les villes continentales, sous-estimés sur le domaine océanique et également sur la côte Méditerranéenne. Le choix des stations utilisées pour l'analyse peut influencer les résultats obtenus et une méthode alternative est actuellement en cours d'évaluation. D'autre part, ces travaux seront prochainement étendus en mode scénario pour étudier l'évolution du climat urbain des villes françaises dans un contexte de changement climatique.

## Bibliographie

- Besson F., Dubuisson B., Etchevers P., Gibelin A-L., Lassegues P., Schneider M. and Vincendon B., 2019 : Climate monitoring and heat and cold waves detection over France using a new spatialization of daily temperature extremes from 1947 to present. *Advances in Science and Research, Copernicus GmbH*, **16**, 149-156.
- Boone, A., Calvet J-C. and Noilhan J., 1999 : Inclusion of a third soil layer in a land surface scheme using the force-restore method, *Journal of Applied Meteorology*, vol. **38**, n o 11, doi : 10.1175/1520-0450(1999)038<1611, p. 1611–1630.
- Caillaud, C., Somot S., Alias A., Bernard-Bouissières I., Fumière Q., Laurantin O., Seity Y. and Ducrocq V., 2021 : Modelling mediterranean heavy precipitation events at climate scale, an object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model , *Climate Dynamics*, vol. 56, no. **5-6**, doi :10.1007/s00382-020-05558-y, p. 1717–1752.
- Champeaux J. L., Masson V., and Chauvin F., 2005 : ECOCLIMAP, a global database of land surface parameters at 1 km resolution , *Meteorological Applications*, vol. 12, n o **1**, doi : 10.1017/s1350482705001519, p. 29–32.
- Hengl T., Heuvelink G.B.M and Rossiter D.G., 2007 : About regression-kriging, from equations to case studies, *Comput. Geosci.*, **33**, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.05.001>, p. 1301-1315.
- Masson V., 2000 : A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 94, no. **3**, doi :10.1023/a :1002463829265, p. 357–397.



Masson V., and coauthors, 2013 : The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes , *Geoscientific Model Development*, vol. 6, no. 4, doi :10.5194/gmd-6-929-2013, p. 929–960.

Oke T.R., 2017 : Urban climates. *Cambridge University Press*.

Seity Y., Brousseau P., Malardel S., Hello G., Bénard P., Bouttier F., Lac C. and Masson V., 2011 : The AROME-France convective-scale operational model. *Monthly Weather Review*, vol. 139, no. 3, doi :10.1175/2010mwr3425.1, p. 976–991.

Shu C., Gaur A., Wang L., Bartko M., Laouadi A., Ji L. and Lacasse M., 2021 : Added value of convection permitting climate modelling in urban overheating assesments. *Building and Environment, Elsevier BV, 207*, 108415.

Wild, M., A. Ohmura, C. Schär, G. Müller, D. Folini, M. Schwarz, M. Z. Hakuba et A. Sanchez- Lorenzo. 2017 : The global energy balance archive (GEBA) version 2017, a database for worldwide measured surface energy fluxes , *Earth System Science Data*, vol. 9, n o 2, doi : 10.5194/essd-9-601-2017, p. 601–613.

## THE OPERATIONAL METAMATRIX OF THERMAL COMFORT FOR EUROPEAN AREAS, A GRAPHICAL METHODOLOGY FOR APPROPRIATE SELECTION OF OUTDOOR THERMAL COMFORT INDICES: APPLICATION TO AN URBAN PLANNING STUDY-CASE

Matteo MIGLIARI <sup>1</sup>, Rémi BABUT <sup>2</sup>, Camille DE GAULMYN <sup>3</sup>, Loïc CHESNE <sup>4</sup>, Olivier BAVEREL <sup>5</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Navier, UMR 8205, Ecole des Ponts, Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, CNRS, UPE, Champs-sur-Marne, France; Franck Boutté Consultants, Paris, France. E-mail: [matteo.migliari@enpc.fr](mailto:matteo.migliari@enpc.fr); [mmigliari@franck-boutte.com](mailto:mmigliari@franck-boutte.com).

<sup>2</sup> Franck Boutté Consultants, Paris, France. E-mail: [rbabut@franck-boutte.com](mailto:rbabut@franck-boutte.com).

<sup>3</sup> Franck Boutté Consultants, Paris, France. E-mail: [cdegaulmyn@franck-boutte.com](mailto:cdegaulmyn@franck-boutte.com).

<sup>4</sup> Franck Boutté Consultants, Paris, France. E-mail: [lchesne@franck-boutte.com](mailto:lchesne@franck-boutte.com).

<sup>5</sup> Laboratoire Navier, UMR 8205, Ecole des Ponts, Université Gustave Eiffel, IFSTTAR, CNRS, UPE, Champs-sur-Marne, France. E-mail: [olivier.baverel@enpc.fr](mailto:olivier.baverel@enpc.fr).

**Abstract:** In the current climate crisis, safeguarding citizens from thermal strokes without resorting to energy-intensive strategies is a crucial challenge for urban design. More than 200 calculation methods can be adopted to design thermally comfortable outdoor public spaces, but existing literature lacks selection criteria to choose appropriate ones. As resolution, an Operational Metamatrix of Thermal Comfort for European areas has been developed. It is a graphic chart that allows to compare the specificities of thermal comfort indices usable in Europe and that can be computed by available software, capable to simulate the urban climate. The Metamatrix has been applied on a European study-case, to find calculation methods to assess the citizen's thermal comfort in different configurations of the urban space during all seasons.

**Keywords:** Outdoor thermal comfort; Urban microclimate; Human-biometeorology; Urban planning.

### Introduction

In the climate change scenarios, extreme meteorological occurrences, such as heat waves, will be ever-growing (<https://meteofrance.fr/>). A calibrated coexistence between artificial and natural environments is crucial for the amelioration of urban microclimates, to protect citizens from thermal strokes without resorting to energy-intensive strategies (Kumar & Sharma, 2020). To design thermally comfortable outdoor public spaces, more than 200 calculation methods can be adopted, but selection criteria to choose the appropriate ones is lacking in existing literature. Providing a scientific answer to this problematic is crucial for the development of operational studies, such as the ongoing ADEME's MODEVAL-URBA 2019 research project "MESH 2C" by Franck Boutté Consultants, whose aim is to develop methodologies for the generation and the rapid evaluation of urban morphologies, to optimize outdoor thermal comfort. To overcome this knowledge gap, within the framework of the "MESH 2C" project, an Operational Metamatrix of Thermal Comfort for European areas has been developed. The name has been chosen by adding the prefix "meta", meaning "comprehensive", to the noun "matrix", since the objective is to produce a graphic chart that allows to comprehend and compare the specificities of the most renowned thermal comfort indices, adapted for Europe, that can be computed by the available software capable to simulate the urban climate. This pull of indices has been identified after extensive literature review of the present state of the art of thermal comfort calculation methods and tools. In the following chapters, the list of the selected indices and the description of the methodology adopted for the creation of the Operational Metamatrix are provided. Consequently, the instructions for the use of the tool are presented, with an example of application. Finally, a conclusion highlights the key issues.

## 1. Methodology

### 1.1. Examined thermal comfort indices with literature references

As mentioned by Epstein & Moran, 2006, thermal comfort studies often emphasise the academic accuracy of the different methodologies, to the detriment of their practical use. The use of thermal comfort indices outside the academic field is related to the availability of tools that can conveniently calculate them. To promote thermal comfort verification in European urban planning, an Operational Metamatrix of Thermal Comfort was developed, which only includes adapted indices that can be calculated using dedicated software that can simulate the urban climate. The defined pool of indices is presented in Table 1:

**Table 1.** Thermal comfort indices considered in the current work.

Full title	Acronym	Main publication	Software for calculation
Actual Sensation Vote	ASV	Nikolopoulou & Lykoudis, 2006	Ladybug Tools
Modified Physiologically Equivalent Temperature	mPET	Chen & Matzarakis, 2014	Rayman
Net Effective Temperature	NET	Gregorcuz, 1968 (cited by Landsberg, 1972)	Ladybug Tools
New Perceived Temperature	PT**	Staiger et al., 2012	Rayman, UBIKLIM, PALM-4U, SkyHelios
Outdoor Standard Effective Temperature	Out_SET*	Pickup & de Dear, 1999	Ladybug Tools
Physiological Equivalent Temperature	PET	Höppe, 1999	Rayman, ENVI-met, UMEP-SOLWEIG, Ladybug Tools, PALM-4U, SkyHelios
Predicted Mean Vote	PMV	Fanger, 1970	Rayman, ENVI-met, Ladybug Tools
Predicted Percentage of Dissatisfied	PPD	Fanger, 1970	Rayman, ENVI-met, Ladybug Tools
Standard Effective Temperature	SET*	Gonzales et al., 1974	Rayman, ENVI-met, Ladybug Tools
Universal Thermal Climate Index	UTCI	Jendritzky et al., 2009	Rayman, ENVI-met, UMEP-SOLWEIG, Ladybug Tools, CityComfort+, SOLENE-microclimate, PALM-4U, SkyHelios

### 1.2. Categories and features for the construction of the Metamatrix of Thermal Comfort

The Operational Metamatrix of Thermal Comfort for European areas provides different categories, starting from “CLIMATIC FACTORS”, which includes all major environmental parameters of thermal comfort: air temperature, mean radiant temperature, wind speed and relative humidity. Among the “PHYSICAL FACTORS” are gathered the physical characteristics of the person: metabolic heat production, clothing insulation, sweating and/or skin temperature, and body composition (referring to a multilayer representation of the human body). The category “METEOROLOGICAL CONDITIONS OF APPLICATION” analyses where the application of the index is suitable: hot / cold, humid / dry, highly ventilated / poorly ventilated. “SOLAR EXPOSURE” refers to the ability of the index to provide valuable

results in direct exposure to solar radiation or in the lack of direct solar radiation. The “TYPE OF ENVIRONMENT” category describes the precision of the index in different areas, such as a natural landscape, an urban settlement, or an indoor space. The “TYPOLOGY OF THE RESULT” describes the form of the result: equivalent temperature, which means that the index is expressed in a well-known temperature measurement unit (such as °C), or dimensionless value. Finally, the “USABILITY ISSUES” designate if the index is “suitable for application in human biometeorological studies” according to Staiger et al., 2019, while reporting the number of available software that can calculate it and if, among them, there is at least one that responds to the definition of “user-friendly tool to improve the urban microclimate” by Jänicke et al., 2021.

### 1.3. Interpretation of the graphics of the Metamatrix

To be able to describe each index comprehensively in regards with the categories identified in Chapter 1.2., each feature may present two graphic symbols: the cross (X) specify the impossibility to take in account the selected parameter, while the filled circle (●) indicates that the feature is considered. In addition, the Metamatrix provide a hierarchisation through different size of the filled circle:

- The large circle indicates that the corresponding feature represents one of the main objectives, according to the declared aims of the index and to the emphasis given by the scientific literature.
- The mean circle states that the analysed feature is widely considered by the index (with no to minor limitations), but it doesn't take priority over other criteria.
- The small circle defines the presence of limits of validity with respect to the analysed feature or inaccuracies in the assessment detected by the scientific literature, bringing the reader's attention to caution.

The symbols corresponding to the features' evaluation have been assigned following the information provided by the scientific community, including the author's statements about their own indices and the feedbacks provided by other researchers after their practical application. This evaluation could be somehow subjective, hence the function of the Metamatrix as a decision aid tool, which doesn't replace the study of the selected indices. No direct assessment of all the classified indices has been performed. Moreover, editable inputs (marked with an “I”) are explicitly identified, allowing the user to understand which parameters can be modified, to guide the choice of appropriate indices in relation to the objectives of the assessment.

## 2. Results

### 2.1. Operational Metamatrix of Thermal Comfort for European areas and recommendations for its application

The Operational Metamatrix of Thermal Comfort is displayed in Figure 1. It is intended to be an easily readable graphic chart that allows to quickly compare strengths and weaknesses of thermal comfort calculation methods adoptable in European countries, with respect to pre-identified features.

THERMAL COMFORT INDICES	CLIMATIC FACTORS		PHYSICAL FACTORS					RELEVANT CRITERIA / FEATURES								USABILITY ISSUES							
	Air temperature	Mean radiant temperature	Air velocity	Relative humidity	Clothing insulation	Metabolic activity	Sweating and/or skin temperature	Body composition	Hot	Cold	Humid	Dry	Highly ventilated	Poorly ventilated	Exposed to direct solar radiation	Lack of direct solar radiation	Rural or natural	Urban	Indoor	Equivalent temperature	Dimensionless value	Applicability in human biometeorological studies (Stager et al., 2015)	Number of available software for calculation
Net Effective Temperature (NET) [Gregorczyk, 1968 (apud Landsberg, 1972)]	● <sub>1</sub>	×	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	×	×	×	×	●	●	●	●	●	●	×	●	●	●	×	●	×	1	×
Predicted Mean Vote (PMV) +/- Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) [Fanger, 1970]	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	×	×	●	●	●	×	×	●	×	●	×	×	●	×	●	3	●
Standard Effective Temperature (SET*) [Gonzalez et al., 1974]	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	●	●	●	●	●	●	●	×	●	●	●	●	●	×	●	3	●
Outdoor Standard Effective Temperature (Out SET*) [Pickup & de Dear, 1999]	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	×	×	●	×	×	1	×
Physiological Equivalent Temperature (PET) [Höppe, 1999]	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	6	●
Actual Sensation Vote (ASV) [Nikolopoulou & Lykoudis, 2006]	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	×	×	×	×	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	×	●	1	×
Universal Thermal Climate Index (UTCI) [Jendritzky et al., 2009]	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	×	8	●
New Perceived Temperature (PT**) [Steiger, Laschewski & Gratz, 2012]	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	×	4	●
Modified Physiologically Equivalent Temperature (mPET) [Chen & Malvarakis, 2014]	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	● <sub>1</sub>	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	1	●

LEGEND: ● = yes, with reduced accuracy or limitations; ● = yes; ● = yes, it's the main purpose of the model; × = no; <sub>1</sub> = corresponding criteria is an input; (1) = some inputs may be related to the corresponding criteria.

Figure 1. Operational Metamatrix of Thermal Comfort for European areas.

For its application, it's recommended to define the domains of interest at first, including only the key features that are needed for a project, to retain the indices that has no cross (X), or at least the lesser number of them, in the identified domain. Nevertheless, a cross (X) isn't a necessarily a demerit: in fact, for conducting studies where few data are available (for example at the macro-scale), it is preferable to find an index that doesn't consider the unknown variables in the thermal comfort assessment. If multiple indices will be retained after this operation, a further selection can be made by the user, consulting the original literature.

### 3. Study-case and discussion

#### 3.1. Description of the requirements of the selected study-case

To better understand the application process of the Metamatrix, a study-case with the objective to analyse the link between human thermal perception and the configuration of the urban environment in Europe, both in summer and in winter, is provided. These conditions reflect the operational needs of the ongoing ADEME's MODEVAL-URBA 2019 research project "MESH 2C" by Franck Boutté Consultants. The following selection criteria were considered:

- all the environmental factors must be integrated in the calculation methodology: air temperature, mean radiant temperature, wind speed and relative humidity;
- applicability of the index at any time of the day and of the year, which implies different seasons and situations with and without direct solar radiation;
- employability in urban areas;
- the index must be appropriate for applications in human biometeorological studies and computable with at least 3 Software.

Since this study-case has the aim is to investigate thermal comfort without focusing on pedestrian physical factors, whose variability can be very high due to the multiplicity of users in urban spaces, no specific conditions were imposed in this category. Other studies that might be interested, for example, in the impact of walking speed or clothing preferences on thermal comfort, will necessarily have to select criteria on personal parameters (which should be editable inputs). Similarly, no specific



conditions were imposed on the type of the result, since its form isn't a discriminating factor for obtaining valuable assessments.

### 3.2. Application of the Metamatrix of Thermal Comfort and discussion

To select consistent comfort indices with the criteria listed in chapter 3.1, several domains of interest have been bordered on the Metamatrix by blue rectangles. The domains include all CLIMATIC FACTORS, all the features related to the METEOROLOGICAL CONDITIONS OF APPLICATION and all the possibilities of SOLAR EXPOSURE. For the TYPE OF ENVIRONMENT category, only the urban area assessment is asked to provide a valuable result. Furthermore, a selection criterion in the category USABILITY ISSUES discards indices considered inappropriate to predict the human biometric response in thermal environments and retains only the ones that can be computed by at least 3 Software. An index can be considered applicable for the purposes of the previously described study-case if there are no crosses (X) in the blue rectangles. Moreover, all climatic factors should be editable inputs in the calculation process.

In accordance with these selection criteria, all the thermal comfort calculation methodologies have been coloured according to the following legend:

- the red indices have been retained unsuitable for the proposed study-case and excluded;
- the green ones represent the final selection operated with the Metamatrix, meaning that they're all potentially applicable in the considered study-case.

The result of the application of the Operational Metamatrix of Thermal Comfort for European areas is showed in Figure 2.

THERMAL COMFORT INDICES	RELEVANT CRITERIA / FEATURES																							
	CLIMATIC FACTORS				PHYSICAL FACTORS				METEOROLOGICAL CONDITIONS OF APPLICATION				SOLAR EXPOSURE		TYPE OF ENVIRONMENT		TYPOLOGY OF RESULT		USABILITY ISSUES					
	Air temperature	Mean radiant temperature	Air velocity	Relative humidity	Clothing insulation	Metabolic activity	Sweating and/or skin temperature	Body composition	Hot	Cold	Humid	Dry	Highly ventilated	Poorly ventilated	Exposed to direct solar radiation	Lack of direct solar radiation	Rural or natural	Urban	Indoor	Equivalent temperature	Dimensionless value	Applicability in human biometeorological studies (Steger et al., 2019)	Number of available software for calculation	Compatibility with user-friendly tool for urban microclimate (Janicki et al., 2021)
Not Effective Temperature (NET) [Gregorczuk, 1968 (apud Landsberg, 1972)]	●	×	●	●	×	×	×	×	●	●	●	●	●	●	×	●	●	●	×	●	×	1	×	
Predicted Mean Vote (PMV) + Predicted Percentage of Dissatisfied (PPD) [Fanger, 1970]	●	●	●	●	●	●	×	×	●	●	●	×	×	×	●	×	×	×	●	×	●	×	3	●
Standard Effective Temperature (SET*) [Gonzalez et al., 1974]	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	●	●	●	●	×	●	3	●
Outdoor Standard Effective Temperature (Out-SET*) [Pickup & de Dear, 1999]	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	×	×	●	×	×	1	×
Physiological Equivalent Temperature (PET) [Hogge, 1999]	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	6	●
Actual Sensation Vote (ASV) [Nikolopoulou & Lykoudis, 2006]	●	●	●	●	×	×	×	×	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	×	●	1	×	
Universal Thermal Climate Index (UTCI) [Jendritzky et al., 2009]	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	●	×	●	8	●
New Perceived Temperature (PT**) [Steger, Laschewski & Gratz, 2012]	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	×	●	×	●	4	●
Modified Physiologically Equivalent Temperature (mPET) [Chen & Matzarakis, 2014]	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	×	1	●	

LEGEND: ● = yes, with reduced accuracy or limitations; ● = yes; ● = yes, it's the main purpose of the model; × = no; ● = corresponding criteria is an input; (●) = some inputs may be related to the corresponding criteria.

Figure 2. Graphical representation of the methodology for indices selection using the Operational Metamatrix of Thermal Comfort for European areas, referring to the described study-case.

Only three indices have been selected in green, as potentially suitable for the study-case: Physiological Equivalent Temperature (PET); Universal Thermal Climate Index (UTCI); New Perceived Temperature (PT\*\*). At present, the combination of these indices would allow to assess thermal comfort in each European urban area, consistently with the arbitrarily selected criteria for the described study-case. However, in future climate scenarios, where microclimatic situations that doesn't exist yet could emerge, the pertinence of these indices should be revalued, and new validity limits could be discovered.

According to Staiger et al., 2019, UTCI is the index that offers the highest level of detail with respect to the human body model, as well as the consideration of clothing insulation as a function of air temperature, to account for seasonal adaptability. In accordance with the current state of the art, UTCI has been selected as the most reliable thermal comfort index to study the variations in the citizens' thermal comfort in different configurations of the European urban space, both in summer and in winter.

Nevertheless, it should be kept in mind that UTCI has several validity limits in terms of air temperature (from -50 to +50 °C), mean radiant temperature (from -30 to +70 °C deviation from the value of air temperature), windspeed (from 0,5 to 17 m/s at 10 m from the reference ground), and water vapour pressure (up to 50 hPa maximum vapour pressure, within a relative humidity range from 5% to 100%) (Bröde et al., 2012; Jendritzky et al., 2009). For instance, areas with no wind, frequently encountered in case of dense urban fabric, must be investigated with other indices, such as PET or PT\*\*. Given these premises, a range of various thermal comfort indices might be necessary to precisely assess the complexity of all the microclimatic ambiances within an operational project, to better respond to factors' local variability. This implies the evolution of most of existing software, that focus on few specific methodologies for thermal comfort assessment, by implementing the simulation of multiple indices in the same work session.

## Conclusion

Outdoor thermal comfort is an essential aspect for sustainable urban development and citizen's safety in the ongoing climate change scenario. Studies to quantify thermal satisfaction produced more than 200 thermal comfort calculation procedures over the past 100 years. Although comprehensive reviews are provided, the existing literature lacks comparative criteria to choose appropriate ones. As resolution, the Operational Metamatrix of Thermal Comfort for European areas has been developed. This graphic chart compares 10 renowned thermal comfort indices, adapted for European climate, that can be computed by available software, capable to simulate the urban climate. Each index is qualitatively evaluated by more than 20 criteria (including physical and climatic factors, types of environments, solar exposures, meteorological conditions and so on), allowing to rapidly detect the thermal comfort calculation methods compatible to customized needs. A study-case has been described through the definition of several domains, for questioning the thermal comfort calculation procedures according to the selected features. The Metamatrix converged on the indices PET, UTCI and PT\*\*. UTCI has been selected as the more appropriate index to respond to the described study-case, jointly with the application of PET or PT\*\* for the microclimatic ambiances outside the UTCI validity domain. For a rigorous assessment of the various microclimatic ambiances coexisting in outdoor spaces, it's advisable to retain a pool of indices among the ones pre-selected by the Metamatrix. Their simultaneous application requires the evolution of most of available software, by implementing multiple simulations in the same work session.

**Acknowledgement:** The authors are grateful to Franck Boutté Consultants, to Ecole des Ponts ParisTech, to ADEME (Agence de la transition écologique) and to ANRT (Association Nationale Recherche et Technologie) for funding this research.

## Bibliography

Bröde P., Fiala D., Błażejczyk K., Holmér I., Jendritzky G., Kampmann B., Tinz B. & Havenith G., 2012 : Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, **56**, 481–494. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>.

Chen Y. C. & Matzarakis A., 2014 : Modification of physiologically equivalent temperature. *Journal of Heat Island Institute International*, **9**, 26–32.

Epstein Y., & Moran D. S., 2006 : Thermal Comfort and the Heat Stress Indices. *Industrial Health*, **44**, 388-398. <https://doi.org/10.2486/indhealth.44.388>.

Fanger P. O., 1970 : *Thermal Comfort: Analysis and applications in environmental engineering*. Danish Technical Press, **244**. [https://doi.org/10.1016/s0003-6870\(72\)80074-7](https://doi.org/10.1016/s0003-6870(72)80074-7).

Gonzalez R. R., Nishi Y. & Gagge A. P., 1974 : Experimental evaluation of standard effective temperature: a new biometeorological index of man's thermal discomfort. *International Journal of Biometeorology*, **18**, 1-15. <https://doi:10.1007/BF01450660>.

Gregorczyk M., 1968 : Biometeorological and hygienic assessment of negative effective temperatures. *Hygiene & Sanitation*, **33**, 400-403.

Höppe P., 1999 : The physiological equivalent temperature - a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. *International Journal of Biometeorology*, **43**, 71–75. <https://doi.org/10.1007/s004840050118>

Jänicke B., Milošević D. & Manavi S., 2021 : Review of User-Friendly Models to Improve the Urban Micro-Climature. *Atmosphere*, **12**, 1291. <https://doi.org/10.3390/atmos12101291>.

Jendritzky G., Havenith G., Weihs P., & Batchvarova E., 2009 : Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for Assessing the Thermal Environment of the Human Being. *Final Report COST Action 730*, 1-26.

Kumar P., & Sharma A., 2020 : Study on importance, procedure, and scope of outdoor thermal comfort: a review. *Sustainable Cities and Society*, **61**, 102297. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102297>

Landsberg H. E., 1972 :. The Assessment of Human Bioclimate: a limited review of physical parameters. *World Meteorological Organization*, **331**, 1-33.

Nikolopoulou M. & Lykoudis S., 2006 : Thermal Comfort in Outdoor Urban Spaces: analysis across different European countries. *Building and Environment*, **41**, 1455-1470. <https://doi:10.1016/j.buildenv.2005.05.031>.

Pickup J. & de Dear R. D., 1999 : An outdoor thermal comfort index (Out-SET\*): the model and its assumptions. de Dear, R., Kalma, J., Oke, T. R., & Auliciems, A., eds., *Biometeorology and Urban Climatology at the turn of the Millennium*. 279–283. World Meteorological Organization.

Staiger H., Laschewski G., & Grätz A., 2012 : The perceived temperature - a versatile index for the assessment of the human thermal environment. Part A: Scientific basics. *International Journal of Biometeorology*, **56**, 165–176. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0409-6>.

Staiger H., Laschewski G., & Matzarakis A., 2019 : Selection of appropriate thermal indices for applications in human biometeorological studies. *Atmosphere*, **10**, 1–15. <https://doi.org/10.3390/atmos10010018>.

# IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET STRATEGIES D'ADAPTATION A GRAND-BASSAM (SUD-EST DE LA CÔTE D'IVOIRE)

**SEKONGO Kalitia Fatoumata**

*Doctorante*

*Université Peleforo GON COULIBALY*

*Korhogo (Côte d'Ivoire)*

[kalitiasekongo@gmail.com](mailto:kalitiasekongo@gmail.com)

**TAPE Sophie Pulchérie**

*Enseignant-chercheur*

*Université Peleforo GON COULIBALY*

*Korhogo (Côte d'Ivoire)*

[pultap78@yahoo.fr](mailto:pultap78@yahoo.fr)

**Résumé :** Ville située sur le littoral Est de la Côte d'Ivoire, Grand-Bassam dispose, de ce fait, d'une façade sur l'océan Atlantique et une autre sur la lagune Ebrié. Cette localisation côtière la rend très vulnérable et l'expose à de nombreuses catastrophes naturelles du fait du changement climatique. Ce travail a pour objectif d'analyser l'impact du changement climatique dans la gestion durable de l'aire d'étude. La démarche méthodologique a consisté à constituer une base documentaire, à effectuer des enquêtes de terrain et à exécuter des observations directes en vue de mieux cerner les effets du changement climatique dans la ville de Grand-Bassam. Les résultats ont relevé des cas d'érosion côtière et d'inondation, ainsi que des stratégies d'adaptation pour vivre dans la localité.

**Mots-clés :** Changement climatique, impact, stratégie d'adaptation, Grand-Bassam.

**Abstract :** Located upon the east coastline of Ivory Coast, Grand-Bassam has in fact a coast on the Atlantic ocean and another on the lagune Ebrie. This coastal location makes it vulnerable and exposed it to many natural disasters because of climate change. The objective of this work is to analyse the impact of climate change in the durable management of study area. The methodological approach consisted in forming a documentary base, to make some field studies and to execute some direct observations with a view to better understand climate change effects in Grand-Bassam city. The results raised coastal erosion cases and flood together with adaptation strategies to live in the locality.

**Keywords :** climate change, impact, adaptation strategy, Grand-Bassam

## Introduction

Le changement climatique est désormais une réalité scientifique mondiale incontestable, notamment au cours de ces quatre dernières décennies, où il s'est affirmé à la fois, comme un objet scientifique, et comme une question sociale et politique (V. Marquet et D. SALLES 2014, p. 17). Le changement climatique et ses impacts sont désormais reconnus comme l'un des plus grands défis du monde, de ses peuples, de son environnement et de ses économies (Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat (GIEC), 2022 p. 13). Le littoral ivoirien n'échappe pas à cette réalité. Il subit de nombreux phénomènes naturels comme les glissements de terrains, les inondations, l'érosion côtière et l'élévation du niveau de la mer. C'est le cas de Grand-Bassam, l'espace urbain d'étude. Appartenant à la région du Sud-Comoé de la Côte d'Ivoire, cette localité est située dans la partie orientale du cordon littoral ivoirien. Elle bénéficie de la présence de quatre plans d'eau, notamment la lagune Ouladine au Nord, le fleuve Comoé et la lagune Ebrié à l'Est et l'océan Atlantique au Sud. Ville historique, universitaire, artisanale et touristique, Grand-Bassam est inscrit au patrimoine culturel mondial depuis 2012. Cependant, l'aire d'étude fait face à une variabilité pluviométrique ces dernières années (données SODEXAM). Cette réalité climatique vécue ajoutée au nombre et à la diversité des plans d'eau dans la localité l'expose, de façon permanente, à de véritables risques d'érosion et d'inondations. Des stratégies d'adaptation sont proposées pour endiguer les risques naturels découlant de ce changement climatique afin de garantir un environnement sûr aux générations futures.

## 1. Données et méthodes

La démarche méthodologique de notre étude s'est basée sur les méthodes de collecte de données quantitatives et qualitatives. En effet, cette collecte de données a d'abord débutée par la constitution d'une base documentaire. Il s'est agi concrètement de consulter et d'analyser des ouvrages généraux, thématiques et techniques (les données de la SODEXAM de 2017 à 2021 et la carte topographique de Grand-Bassam de l'INS, 2014). Les données recueillies nous ont permis d'analyser l'évolution pluviométrique, et de comprendre les risques auxquels est exposée la ville. Les enquêtes de terrain exécutées aux mois de décembre 2021, de janvier et février 2022 se sont réalisées à l'aide de questionnaires administrés dans un premier temps aux autorités administratives et municipales de la localité. Un échantillon de 100 personnes a été déterminé par le biais des méthodes de quotas et du choix raisonné (TAPE Sophie P. 2019 p 4). En effet, une sélection de 5 quartiers a été effectuée dans l'ensemble des 13 quartiers dont dispose l'aire d'étude. Ce choix s'est opéré sur la base des critères de risque et cas d'inondation dans les quartiers de Grand-Bassam. La sélection des enquêtés s'est effectuée en se fondant sur les critères du niveau d'importance du risque par quartier (Tableau 1). L'augmentation annuelle des quantités d'eau de pluie, les inondations des sites à risque qu'elles provoquent et leurs conséquences socio-économiques. Pour le traitement des données collectées, nous avons eu recours au logiciel Excel 2013 pour la réalisation des tableaux statistiques, au logiciel sphinx pour la conception des questionnaires et au logiciel Q GIS version 3.12 pour la confection des cartes.

Tableau 1: nombre d'enquêtés par quartier

Quartiers	Niveau de risque	Population enquêtée
France	Risque élevé (cas d'inondation)	20
Moossou	Risque élevé (cas d'inondation)	20
Phare	Risque moyen (partiellement inondé)	20
Oddos	Risque moyen (partiellement inondé)	20
Impérial	Risque faible (pas d'inondation)	20
Total	-	100

Source : nos enquêtes, 2021

## 2. Les déterminants des inondations dans la ville de Grand-Bassam

Plusieurs phénomènes sont à l'origine des inondations dans la ville de Grand-Bassam. Ce sont l'érosion côtière, la pluviométrie et l'absence de voies de canalisation.

### 2.1. L'érosion côtière

La localité de Grand-Bassam, première capitale de la Côte d'Ivoire, est exposée à des risques et cas d'inondations. L'une des causes est l'érosion côtière. En effet, la menace de l'érosion côtière a rendu dynamique le trait de côte sur la façade littorale de Grand-Bassam. Cette modification du trait de côte oscille, dans l'ensemble, entre des périodes d'engraissement et des périodes d'érosion. La plus grande perte a été enregistrée entre 2008 et 2012 (-4,37 m/an) (Touré M. *et al*, 2018, p 86). La perte des plages, fournissant une protection naturelle contre les inondations, a aggravé les effets des eaux qui envahissent la ville de Grand-Bassam. D'après l'Institut Maritime de Management et de communication (2009), les facteurs naturels tels que les variations du niveau marin, les tempêtes, les variations des apports sédimentaires sont responsables de cette érosion. A cela, il faut ajouter le cas d'obstruction de l'embouchure naturelle du fleuve Comoé et des lagunes Ebrié et Ouladine. Cette obstruction, en raison du phénomène d'engraissement (+7.56 m/an entre 2012 et 2016) (Touré M. *et al*, 2018, p 86), empêche les eaux de se déverser convenablement dans la mer, occasionnant ainsi le débordement des plans d'eau cités.



## 2.2. L'abondance des précipitations

Un autre déterminant des inondations de Grand-Bassam est l'abondance des précipitations. En effet, l'un des impacts du changement climatique est l'intensification de certains événements pluviométriques. La ville a enregistré une hausse des précipitations depuis ces cinq dernières années (Figure 1). La présente figure indique approximativement deux saisons pluvieuses et deux saisons sèches avec des pics significatifs en juin 2017 (661 mm) et 2019 (470 mm), et en octobre 2019 (415 mm). Le volume de précipitation moyen est passé de 1500 mm à un peu plus de 2075 mm de pluie. Cette situation démontre la fréquence des pluies extrêmes ces 5 dernières années. Ces précipitations ont contribué à une augmentation du volume annuel d'eau prélevé dans la localité. Les précipitations de l'année 2019 (2611 mm) représentent près du double de celles de l'année 2012 (1435 mm). Selon les données de la SODEXAM, la pluviométrie moyenne sur le bassin versant du fleuve Comoé de la période du 9 au 18 septembre est passée de 26.9 mm en 2020 à 91.8 mm en 2021 ; équivalant à une hausse de 241% et la troisième plus importante jamais atteinte en 39 ans (1983-2021).

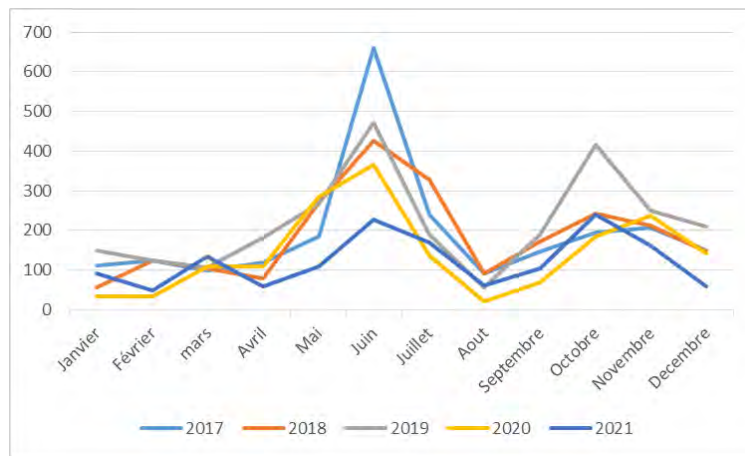


Figure 1 : courbe évolutive des précipitations de Grand-Bassam de 2017 à 2021  
Source : Sodexam, 2017 - 2021.

## 2.3. L'action anthropique

Au nombre des déterminants des inondations survenues à Grand-Bassam, se trouve l'action de l'homme. En effet, les innombrables opérations immobilières plus ou moins régulières ont créé des conditions écologiques où les eaux de pluie ne peuvent plus pénétrer dans le sol. Elles ruissellent donc vers le point le plus bas qui n'est autre que le quartier France à Grand-Bassam. De plus, la ville manque de voies de canalisation. Ainsi, les caniveaux devant servir à l'évacuation des eaux pluviales sont quasi inexistantes. Et ceux qui existent sont bouchés par les déchets ménagers des populations. Ce résultat est conforme à celui de Memel F. Armel (2015, p.64) (Photo 1).

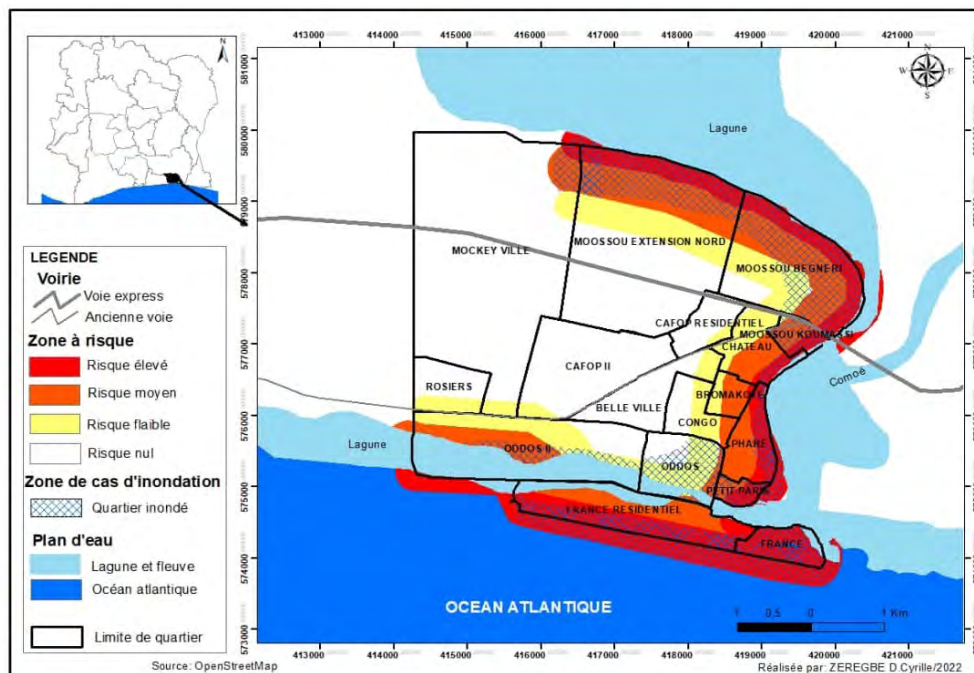


Photo 1: Caniveaux débouchés  
Prise de vue : Sekongo K. F., 2021

### 3. Les risques et cas d'inondations dans la ville

#### 3.1. Les risques d'inondation

Les quartiers à risque sont, pour la plupart, situés le long des berges lagunaires (Figure 2). Ces zones vulnérables sont les quartiers France (France et France résidentiel), Petit paris, Moossou (Extension, Begneri et Koumassi), Phare et Odoss (1 et 2), Château et Bramakoté. Le quartier France, inscrit au patrimoine mondial de l'UNESCO en 2012 en raison de ses bâtisses historiques et de ses nombreux monuments, est le point le plus bas de la localité. Par ailleurs, le fleuve Comoé et la lagune Ebrié ont une seule embouchure naturelle sur la mer, Grand-Bassam au quartier France. Quant au quartier Moossou, c'est le siège de la royauté Abouré qui accueille chaque jour de nombreux touristes pour la visite de la cour royale devenue un des lieux



touristique de la ville.

Figure 2 : Carte des risques et cas avérés d'inondations

#### 3.2. Les zones de cas avérés d'inondation

La combinaison des phénomènes naturels tels que l'érosion côtière, l'abondance des pluies, l'exceptionnel cas d'obstruction de l'embouchure, ajoutés aux activités anthropiques a conduit inévitablement à l'inondation de la ville ces dernières années (planche 1). De nombreux quartiers de la ville ont subi les assauts des eaux. Il s'agit des quartiers Phare, Oddos, Petit-paris, Moossou et le Quartier France (figure 2 et planche 1)



Planche 1 : inondation au quartier France

Cette catastrophe naturelle a occasionné 4000 personnes déplacées (Mairie) Les bâtiments coloniaux, la prison civile et le terrain de la ville sont autant de sites touchés. Il en fut pareil pour les activités économiques. Plusieurs commerces ont fermé à cause de la montée des eaux, comme ce fut le cas à Sassandra dans les travaux de Tapé S. Pulchérie (Tapé 2019, p 24). A cela s'est ajoutée une épidémie de paludisme du fait de la prolifération des moustiques qui ont trouvé en cette zone, un milieu humide très favorable à leur reproduction (KOUADUO Konan C. et al, 2020 p 1).

#### 4. Stratégies d'adaptation

##### 4.1 Au niveau local

Pour faire face aux inondations, les réponses résilientes de la municipalité ont été l'aménagement de sites pour l'accueil des déplacés climatiques, le transport de ceux-ci dans des pirogues et l'entame des travaux relatifs à l'ouverture de l'embouchure. En effet, sous la menace imminente de cette catastrophe naturelle, la municipalité a aménagé 3 sites d'accueil des populations sinistrées. Ce sont le Centre de Formation Professionnel (CFP) au quartier France, la paroisse cœur immaculée de Marie au quartier Impérial et le site du quartier Phare ayant accueilli le plus de déplacés climatiques au niveau du phare de la ville. Selon le responsable technique de la mairie, ce sont 2580 personnes sur ce dernier site qui ont trouvé refuge sous des bâches. Quant aux deux autres sites, ils ont respectivement reçu 860 et 340 sinistrés. Ce sont donc 3780 personnes recueillies sur l'ensemble des sites, auxquelles sont ajoutées 220 sinistrés qui ont trouvé refuge dans des familles, soit 4000 déplacés climatiques en 2019. La municipalité les a assistés également en vivres et non vivres. Le transport de ces déplacés du site inondé au site aménagé s'est effectué à l'aide de pirogue (planche 2). Par ailleurs, des travaux entrepris pour l'ouverture de l'embouchure débutée en fin 2019 se poursuivent (planche 2). A côté de ses travaux, il y a l'action de pompage de l'eau qui se fait à l'aide de 4 motos-pompes installés entre la mer et le fleuve. A l'aide de longs tuyaux, les eaux du fleuve sont pompées et déversées dans la mer. Aussi, la municipalité a-t-elle entrepris des travaux de construction et de nettoyage des caniveaux dans la ville. D'autres stratégies identifiées comme des réponses résilientes émanant des populations elles-mêmes sont à relever. Ayant pris conscience que les inondations feront désormais partie de leur quotidien à une période bien précise de l'année, notamment au mois de juin, les populations riveraines se déplacent.



Planche 2 : réponses résilientes au niveau local  
Prise de vue : mairie de Grand-Bassam, 2019

##### 4.2 Au niveau national

Depuis la mise en place des Objectifs de Développement Durable, la Côte d'Ivoire s'est résolument inscrite dans cette perspective avec la mise en place d'un cadre de concertation national (Ministère du Plan et du Développement, 2017) et d'un agenda 21 local. Le projet MIFMASS est un exemple de stratégie d'adaptation aux catastrophes naturelles. Initiée en 2018, c'est une initiative conjointe de

l'Union Africaine (UA) et l'Union Européenne (UE). Ce projet vise un service de surveillance des inondations à multi-échelle pour l'Afrique de l'Ouest. Il consiste en l'installation d'E-Stations qui se traduit par un réseau de capteurs numériques afin de prévoir avec précision les inondations et donc mieux anticiper les réponses et ripostes.

## Conclusion

L'Afrique participe à moins de 5 % du total des émissions mondiales de gaz à effet de serre et c'est l'une des régions du monde les plus touchées par le changement climatique. L'océan dont la montée est presque imperceptible, l'érosion côtière et la variation pluviométrique sont des bombes à retardement pour les populations littorales et plus encore pour l'économie de la Côte d'Ivoire. Les cas d'inondation observés dans la localité de Grand-Bassam ont eu des conséquences notables sur le plan socio-économiques mais surtout environnemental, qui s'y on n'y prend pas garde, détruira la ville historique. Ces résultats peuvent aider à la prise de décisions idoines dans le cadre des stratégies efficaces de résilience pour freiner ce phénomène de vulnérabilité accrue de l'aire d'étude.

## Bibliographie

Giec (2022), Impacts, adaptation et vulnérabilité *Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail II au sixième Rapport d'évaluation sur l'évolution du climat*, résumé à l'intention des décideurs, 42p .

Imc, (2009). Cote d'Ivoire : Erosion côtière, Bassam menacée de disparition, *Colloque International sur la sureté Maritime et portuaire*, 22-23 octobre, 18p.

Kouadio K.C., T. P., ANOH K.P. (2020), « *Inondation et ses conséquences dans la ville de Grand Bassam en 2019 (Sud-Est de la Cote d'Ivoire)* in Cahier du cerleshs N°65, pp.287-303.

Marquet V., Salles D., (2014), l'adaptation au changement climatique en France et au Québec. Construction institutionnelles convergentes et diffusions contrastées, *Critique internationale* N°62, pp.73-91.

Memel F. A., (2015), « *Occupation des espaces périphériques de la ville de Dabou en Côte d'Ivoire* », In *Revue Trimestrielle des Sciences Sociales « Rss-PASRES »*, 3ème Année, N°6, pp.50-66.

Tape S. P., (2019), l'impact socio-économique des inondations dans la localité côtière de Sassandra (Côte d'Ivoire), *colloque international de l'AIC*, N°3, pp.271-276.

Toure M., Ane J.N.N., Tiemele A. J et Hauhouot A. C., (2018), Etude de l'évolution du trait de côte à l'aide de l'outil MobiTC : Cas de Grand-Bassam, *European scientific Journal*, vol 14, N°18, 79p.

# VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DES JOURS PROPICES AUX ÉVÉNEMENTS DE PLUIE VERGLAÇANTE/NEIGE COLLANTE EN EUROPE

Florian RAYMOND <sup>1,2</sup>, Philippe DROBINSKI <sup>2</sup>, Nicolas ROCHE <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Université Paris 8 Vincennes-Saint-Denis, UFR LADYSS, 2 rue de la liberté 93200 Saint-Denis, [florian.raymond02@univ-paris8.fr](mailto:florian.raymond02@univ-paris8.fr)

<sup>2</sup> Institut Pierre Simon Laplace/Laboratoire de Météorologie Dynamique, Ecole Polytechnique, route de Saclay 91120 Palaiseau, [philippe.drobinski@lmd.polytechnique.fr](mailto:philippe.drobinski@lmd.polytechnique.fr)

<sup>3</sup> ENEDIS, 34 square des Corolles 92400 Courbevoie, [nicolas.roche@enedis.fr](mailto:nicolas.roche@enedis.fr)

**Résumé :** Les événements de pluie verglaçante et neige collante sont des phénomènes climatiques favorisant l'apparition de glace pouvant avoir des impacts considérables notamment sur le réseau de distribution d'électricité. Pour appréhender la variabilité spatio-temporelle historique et future de ces événements, les données quotidiennes des températures et précipitations provenant de la base de données E-OBS ainsi que des simulations régionales Euro-CORDEX sont utilisées. Sur la période historique, 47% (48%) du domaine montre une augmentation (diminution) des jours aux conditions météorologiques de surface propices à l'occurrence de ce type d'événements. Au cours du 21<sup>ème</sup> siècle, la tendance est à la baisse quasi générale du nombre de jours propice à l'échelle de l'Europe, sauf sur une partie de la Scandinavie.

**Mots-Clés :** Pluie verglaçante, Neige collante, variabilité, Europe

**Abstract :** Freezing rain and wet snow events are climatic phenomena that promote the occurrence of ice and can have considerable impacts on the electricity distribution network. To understand the historical and future spatio-temporal variability of these events, daily temperature and precipitation data from the E-OBS database and from the regional Euro-CORDEX simulations are used. During the historical period, 47% (48%) of the domain shows an increase (decrease) in days with surface conditions favourable to the occurrence of these types of events. During the 21st century, the trend is towards an almost general decrease in the number of favourable days to these events across Europe, except over a part of Scandinavia.

**Keywords :** Freezing rain, Wet snow, variability, Europe

## Introduction

L'un des enjeux du changement climatique actuel porte sur la variabilité spatio-temporelle future des événements climatiques extrêmes. Nombre d'entre eux sont notamment amenés à interférer, par exemple, avec le réseau de distribution d'électricité, pouvant causer de nombreux dégâts, priver temporairement d'énergie de nombreux usagers et nécessiter des moyens humains et matériels importants pour rétablir le réseau. C'est dans ce contexte que Enedis, en charge de la distribution de l'électricité en France, souhaite pouvoir appréhender les enjeux du changement climatique sur la résilience du réseau de distribution d'électricité face à la variabilité et aux caractéristiques futures de ces aléas climatiques. Un tel projet s'inscrit notamment dans une réflexion autour d'une possible évolution des infrastructures pour faire face au climat de demain et à ses extrêmes.

En Europe, les épisodes de pluie verglaçante et de neige collante sont des événements climatiques hivernaux qui provoquent la formation de glace/givre pouvant notamment entraîner de nombreux dégâts sur les arbres, les routes, perturber les transports, amener à la fermeture temporaire d'écoles, causer de nombreuses pertes économiques pour l'agriculture et certaines entreprises, mais également engendrer des ruptures de lignes/pylônes électriques (Call, 2010 ; Bonneli et al., 2011 ; Lambert and Hansen, 2011). A titre d'exemples, l'épisode de 2005 en Allemagne



a détérioré plus de 70 pylônes électriques et privé d'électricité près de 200 000 personnes (Broström, 2007). L'épisode qui s'est produit en 2014 en Slovénie à, entre autres, endommagé fortement plus de 174 km de lignes électriques, privant près de 25% de la population slovène d'électricité (Forbes et al., 2014 ; Kämäräinen et al., 2017). Enfin, l'événement de 2017 en Italie a privé plus de 300 000 personnes d'électricité pendant plusieurs jours.

La plupart des études qui se concentrent sur la variabilité spatio-temporelle des événements de pluie verglaçante et de neige collante sont localisées en Amérique du Nord, région qui est très régulièrement soumise à ce type d'épisodes. Il n'existe au final que très peu d'études portant sur l'Europe. Groisman et al. (2016) ont montré que l'occurrence de tels événements climatiques avait légèrement augmenté en Norvège, tout comme sur l'est de la Russie et l'ouest de la Sibérie. Kämäräinen et al. (2018) montrent que la plupart des épisodes de pluie verglaçante semblent être localisés dans l'est de l'Europe, et qu'ils devraient être de moins en moins nombreux à l'avenir (excepté en Scandinavie). Ainsi, l'objectif de cette étude est de tenter d'appréhender la variabilité spatio-temporelle historique et future des événements de pluie verglaçante et de neige collante en Europe, pour notamment participer à l'aide à la décision des institutions face au changement climatique à venir.

## **1. Données et méthode**

Cette étude se concentre sur deux périodes principales, couvrant tout d'abord de 1951 à 2018 pour explorer la variabilité historique de ces événements climatiques extrêmes. Dans un second temps, trois sous périodes sont utilisées pour appréhender leur variabilité future : (i) de 1972-2005 (période historique de référence), (ii) 2026-2059 (proche horizon) et 2065-2098 (horizon lointain). Le domaine d'étude couvre de 12°O à 42°E en longitudes et de 34°N à 72°N en latitudes.

### **1.1. Données d'observation**

Les données quotidiennes des températures minimales/maximales et des cumuls de précipitation issues des séries E-OBS v.22. de l'European Climate Assessment & Dataset (ECA&D) sont utilisées pour étudier la variabilité historique des épisodes de pluie verglaçante et de la neige collante sur la période 1951-2018. Ces données en points de grille à haute résolution spatiale (0.25° de longitude et latitude) sont issues de l'interpolation de séries d'observations provenant de 7 336/7 263/14 472 stations météorologiques (températures max/températures min/précipitations) réparties sur l'Europe, le Proche-Orient et l'Afrique du Nord (Haylock et al., 2008 ; Cornes et al., 2018). Comme mentionné par Hofstra et al. (2009), un tel jeu de données contient inévitablement des erreurs et des incertitudes qui proviennent notamment des changements d'emplacement des stations, des erreurs de mesure, des incertitudes liées à l'interpolation et à la densité du réseau de stations. Par conséquent, les données E-OBS ont été largement évaluées dans la littérature (Hofstra et al., 2009, 2010 ; Kysely et Plavcova, 2010 ; Flaounas et al., 2012 ; Prein et Gobeit, 2017). Ces études montrent que les données E-OBS restituent bien la distribution spatio-temporelle des séries des précipitations et des températures, même si les valeurs extrêmes ont tendance à être sous-estimées, notamment pour les précipitations dans les secteurs à faible densité de stations.

### **1.2. Simulations climatiques**

Pour étudier comment le changement climatique pourrait modifier la variabilité future des événements de pluie verglaçante et de neige collante, nous utilisons les données quotidiennes des températures minimales/maximales et des cumuls de précipitation issues des simulations climatiques réalisées dans le cadre de l'initiative Euro-CORDEX (Jacob et al. 2014). Deux scénarios portant sur les trajectoires des concentrations en gaz à effet de serre dans l'atmosphère (appelés scénarios RCP) sont utilisés (Moss et al. 2010) : le scénario RCP4.5 (forçage radiatif mondial de + 4,5 W.m<sup>-2</sup> d'ici 2100, par rapport à l'ère préindustrielle) ; et le scénario RCP8.5 (forçage mondial de + 8,5 W.m<sup>-2</sup> d'ici 2100, par

rapport à l'ère préindustrielle). Le tableau 1 présente les modèles régionaux du climat dont sont issues les simulations climatiques utilisées dans cette étude (ainsi que les modèles globaux qui ont forcés les modèles régionaux).

**Tableau 1.** Les différents modèles climatiques régionaux (RCM) issus de l'initiative EURO-Cordex dont les simulations quotidiennes des températures minimales/maximales et des cumuls de précipitation sont utilisés dans cette étude. La liste comprend le nom de l'institut d'origine du modèle, le nom du modèle régional ainsi que le nom du modèle climatique global (GCM) qui a servi à forcer le modèle régional.

Institut	Modèle régional	Modèle global
IPSL	WRF381P	IPSL-CM5A-MR
KNMI	RACMO22E	ICHEC-EC-EARTH
SMHI	RCA4	MOHC-HadGEM2-ES
CLMcom	CCLM4	MPI-ESM-LR
DMI	HIRAM5	NCC-NorESM1-M

### 1.3. Détection des jours propices aux événements de pluie verglaçante et/ou neige collante

Comme nous ne disposons pas d'informations précises sur les jours réellement affectés par un ou plusieurs événements de pluie verglaçante et/ou de neige collante sur l'Europe, nous nous sommes concentrés sur les jours qui présentent des conditions météorologiques de surface propices à l'occurrence d'événements de ce type (appelés "jours propices" ci-après). Sur d'autres secteurs disposant de données précises, Cortinas (2000) montre que la plupart des événements de pluie verglaçante dans la région des grands lacs d'Amérique du Nord se sont produits pour des températures de surface comprises entre -5°C et 0°C, tout comme Cortinas et al. (2004) aux États-Unis et au Canada et Carriere et al. (2000) sur l'Europe pour quelques saisons ciblées. Makkonen et Wichura (2010) indiquent qu'en Allemagne, les événements de neige collante se sont produits avec des températures de surface comprises entre 0°C et +2°C, comme Bonelli et al. (2011) en Italie. Les épisodes de pluie verglaçante ou de neige collante ne sont marquants que s'ils sont associés à des dommages pour l'environnement et/ou les sociétés. Le service météorologique national des États-Unis parle de tempête de verglas lorsqu'au moins 5 mm de pluie verglaçante sont tombés (US NWS, 2013). Comme le mentionnent Rauver et al. (1994), environ 5 mm de pluie verglaçante sont tombés les 14 et 15 février 1990 en Illinois, causant plus de 12 millions de dommages. Ainsi, les jours ayant une température comprise entre -5°C et +2°C et un cumul de précipitations supérieur ou égal à 5 mm sont ici retenus comme étant des jours avec des conditions météorologiques de surface propices aux événements de pluie verglaçante et/ou de neige collante, entraînant une potentielle accumulation de glace dommageable.

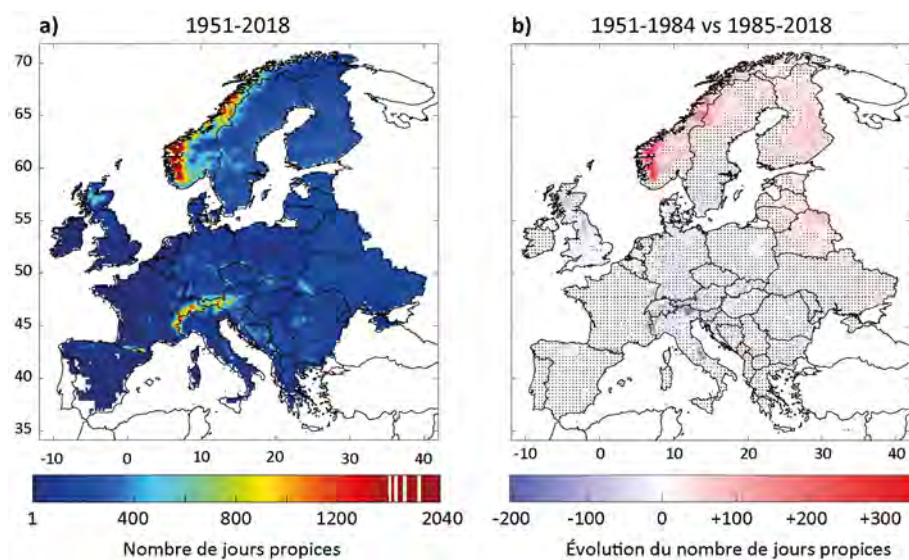
## 2. Variabilité des jours propices

### 2.1. Variabilité historique

Sur la période historique (1951-2018), certains secteurs ont été plus régulièrement exposés à des jours propices (figure 1a). C'est notamment le cas pour les régions de montagne (les massifs norvégiens, les Alpes, les Pyrénées et les massifs écossais), étant notamment plus régulièrement exposées à des températures comprises dans l'intervalle étudié, avec de 500 à jusqu'à 2040 jours propices en 68 ans. Il semble que le facteur « altitude » soit le principal facteur explicatif de la variabilité spatiale de l'occurrence des jours propices en Europe. On observe également un léger gradient longitudinal et latitudinal, avec davantage de jours propices détectés sur l'est (proche de 400 jours) que sur l'ouest de l'Europe (pas plus de 50 jours), et au nord (jusqu'à 500 jours) par rapport au sud de l'Europe (pas plus de 50 jours en moyenne). Cela s'explique notamment par l'influence du

climat océanique sur la façade ouest, avec des températures plus douces que le climat continental rencontré sur le centre et l'est de l'Europe, tout comme le climat du nord de l'Europe qui est bien plus froid que le climat méditerranéen rencontré au sud de l'Europe.

Entre les périodes 1951-1984 et 1985-2018, 47% du territoire étudié a subi une augmentation du nombre de jours propices, principalement sur l'est et le nord de l'Europe (figure 1b). Sur ces secteurs, seuls 40% des augmentations sont statistiquement significatives (test du khi<sup>2</sup>, comparaison de plusieurs proportions observées ; seuil de signification de 0,05). L'augmentation du nombre de jours propices sur ces secteurs de l'Europe s'explique par une augmentation du nombre de jours ayant des températures comprises entre -5°C et +2°C sur la période 1985-2018 par rapport à la période 1951-1984 (du fait de l'augmentation des températures pour un climat régulièrement plus froid que l'intervalle étudié ; non montré ici), et une augmentation du nombre de jours avec au moins 5 mm de cumuls de précipitations (augmentation des précipitations sur toute la moitié nord de l'Europe depuis le milieu du 20<sup>ème</sup> siècle ; non montré ici). A l'inverse, 48% du territoire étudié a subi une diminution du nombre de jours propices, cette fois-ci sur la partie centrale de l'Europe, mais également sur l'ouest et le sud. Seules 30% des diminutions observées sont statistiquement significatives. Les facteurs explicatifs quant à la diminution du nombre de jours propices sur ces secteurs sont une augmentation des températures pour un climat déjà régulièrement au-dessus de l'intervalle étudié, associé à un assèchement de la moitié sud de l'Europe (non montré ici). Enfin, 5% du territoire étudié n'a observé aucune évolution du nombre de jours propices entre ces deux périodes contemporaines. Au final, seules 32% des évolutions observées en Europe sur le nombre de jours propices sont statistiquement significatives sur la période historique.

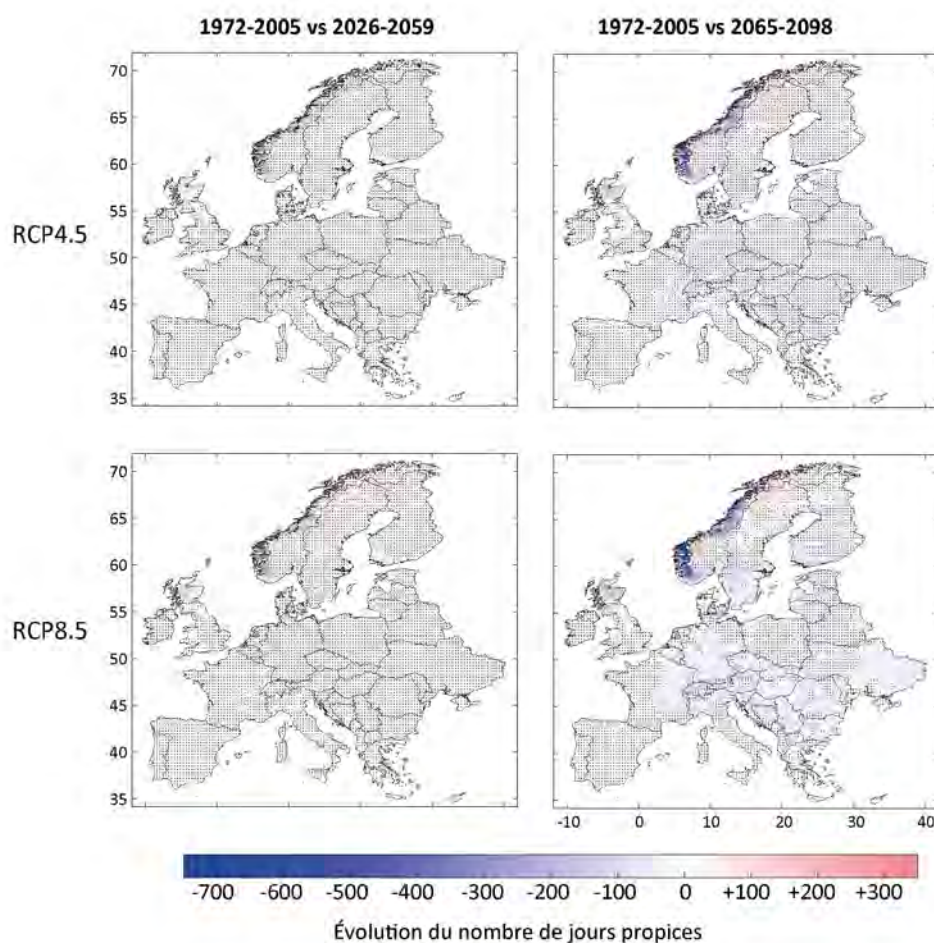


**figure 1.** a) Nombre de jours propices (température  $\geq -5^\circ$  et  $\leq +2^\circ\text{C}$  et cumuls de précipitation  $\geq 5\text{mm}$ ) en Europe sur la période 1951-2018. b) Évolution du nombre de jours propices en Europe entre les périodes 1951-1984 et 1985-2018. Les évolutions non statistiquement significatives sont indiquées en pointillés noirs (comparaison de plusieurs proportions observées avec le test de Khi<sup>2</sup> ; seuil de signification de 0,05).

## 2.2. Variabilité future

Que ce soit pour un horizon proche ou lointain, et peu importe la trajectoire d'émission de gaz à effet de serre envisagée (RCP4.5 ou RCP8.5), la grande majorité de l'Europe tendrait vers une diminution du nombre de jours propices au cours des prochaines décennies (figure 2). En effet, entre 82% et 89% du territoire étudié montre une probable diminution des jours propices à l'avenir. En revanche, la grande majorité des évolutions identifiées au cours du 21<sup>ème</sup> siècle ne sont pas robustes, c'est à dire que moins de 4 modèles sur les 5 utilisés s'accordent pour montrer des tendances statistiquement significatives du même signe (entre 83% et 93% d'évolutions non robustes, sauf pour l'horizon lointain de la trajectoire RCP8.5 qui montre tout de même 47% d'évolutions robustes à l'échelle de l'Europe). Seule une petite partie de la Scandinavie semble montrer une légère augmentation (majoritairement non robuste) sur le nombre de jours propices d'ici à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle.

figure 2. Évolution future multi-modèles du nombre de jours propices pour les trajectoires d'émission de gaz



à effet de serre RCP4.5 (panel du haut) et RCP8.5 (panel du bas), et pour les proches (panel de gauche ; 2026-2059) et lointains horizons (panel de droite ; 2065-2098), par rapport à la période historique de référence 1972-2005. Les simulations quotidiennes des températures minimales et maximales et des cumuls des précipitations issues de 5 modèles Euro-CORDEX sont utilisées : CCLM4 ; HIRAM5 ; RACMO22E ; RCA4 et WRF381P. Les évolutions non robustes sont indiquées en pointillés noirs, *i.e.* quand moins de 4 modèles sur les 5 s'accordent pour montrer une évolution statistiquement significative du même signe (test du  $\chi^2$ , seuil de 0,05).

## Conclusion

Cette étude a pour objectif d'étudier la variabilité spatio-temporelle historique et future des jours propices à l'apparition d'événements de pluie verglaçante et/ou neige collante potentiellement dommageables en Europe. Ainsi, une grande majorité de l'Europe devrait être exposée à un recul du nombre de jours propices d'ici à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle, du fait d'une augmentation des températures déjà régulièrement au-dessus de l'intervalle étudié associé à un assèchement pour la moitié sud de l'Europe (déjà peu exposé aux jours propices sur la période historique). Seule une petite partie de la Scandinavie serait davantage exposée aux jours propices, du fait de l'augmentation des températures pour un climat régulièrement plus froid que l'intervalle étudié sur ces secteurs, associé à une augmentation probable des précipitations. Dans le contexte actuel et futur du changement climatique, ces résultats sur les jours propices sont plutôt rassurants pour les gestionnaires du réseau de distribution d'électricité tel que Enedis en France, pour qui ce type d'événements climatiques extrêmes peut engendrer des dégâts et des coûts importants.

**Remerciement** : nous tenons à remercier chaudement Enedis pour son engagement et son accompagnement permettant de mener à bien ce projet de recherche portant sur la résilience du réseau de distribution d'électricité face à la variabilité et aux caractéristiques futures des aléas climatiques extrêmes, dans lequel s'inscrit cette étude.

## Bibliographie

Bonelli P., Lacavall M., Marcacci A.P., Mariani G., Stella G., 2011: Wet snow hazard for power lines: a forecast and alert system applied in Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, **11**, 2419-2431.

Broström E., 2007: *Ice Storm Modelling in Transmission System Reliability Calculations*. Thesis of the School of Electrical Engineering Electric Power Systems, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

Call D.A., 2010: Changes in Ice Storm Impacts over Time: 1886-2000. *Weather, Climate, and Society*, **2**, 23-35.

Carriere J.M., Lainard C., Le Bot C., Robart F., 2000: A climatological study of surface freezing precipitation in Europe. *Meteorological Applications*, **7**, 229-238.

Cornes R.C, van der Schrier G., van den Besselaar E.J.M., Jones P.D., 2018: An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **123**, 9391-9409.

Cortinas J., 2000 : A Climatology of Freezing Rain in the Great Lakes Region of North America. Monthly. *Weather Review*, **128**, 3574-3588.

Cortinas J., Bernstein B.C., Robbins C.C., Strapp J.W., 2004: An Analysis of Freezing Rain, Freezing Drizzle, and Ice Pellets across the United States and Canada: 1976-90. *Weather and Forecasting*, **19**, 377-390.

Flaounas E., Drobinski P., Borga M., Calvet J.C., Delrieu G., Morin E., Tartari G., Toolon R., 2012: Assessment of gridded observations used for climate model validation in the Mediterranean region: the HyMeX and MEDCORDEX framework. *Environmental Research Letters*, **7**, 024017.

Forbes R., Tsonevsky i., Hewsom T., Leutbecher M., 2014: Towards predicting high-impact freezing rain events. *ECMWF letter*, **141**, 15-21.

Groissman P.Y., Bulygina O.N., Yin X., Vose R.S., Gulev S.K., Hanssen- Bauer I., Frland E., 2016: Recent changes in the frequency of freezing precipitation in North America and Northern Eurasia. *Environmental Research Letters*, **11**, 045007.

Haylock M.R., Hofstra N., Klein Tank A.M.G., Klok E.J., Jones P.D., New M., 2008: A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950-2006. *Journal of Geophysical Research*, **113**, D20119.

Hofstra N., New M., McSweeney C., 2010: The influence of interpolation and station network density on the distributions and trends of climate variables in gridded daily data. *Climate Dynamics*, **35**, 841-858.

Hofstra N., Haylock M., New M., Jones P., 2009: Testing E-OBS European high-resolution gridded data set of daily precipitation and surface temperature. *Journal of Geophysical Research*, **114**, D21101.



Jacob D., Petersen J., Eggert B., Alias A., Christensen O., Bouwer L., Braun A., Colette A., Déqué M., Georgievski G., Georgopoulou E., Gobiet A., Menut L., Nikulin G., Haensler A., Hempelmann N., Jones C., Keuler K., Kovats S., Kröner N., Kotlarski S., Kriegsmann A., Martin E., van Meijgaard E., Moseley C., Pfeifer S., Preuschmann S., Radermacher C., Radtke K., Rechid D., Rounsevell M., Samuelsson P., Somot S., Soussana J.F., Teichmann C., Valentini R., Vautard R., Weber B., Yiou P., 2014: EUROCORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Chang*, **14**, 563–578.

Kämäräinen M., Hyvärinen O., Vajda A., Nikulin G., van Meijgaard E., Teichmann C., Jacob D., Gregow H., Jylhä k., 2017: Estimates of present-day and Futures Climatologies of freezing rain in Europe based on CORDEX regional climate models. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, **123**, 291-304.

Kämäräinen M., Hyvärinen O., Jylhä k., Vajda A., Neiglick S., Nuottokari J., Gregow H., 2017: A method to estimate freezing rain climatology from ERA-Interim reanalysis over Europe. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* **17**, 243-259.

Kysely J., Plavcova E., 2010. A critical remark on the applicability of E-OBS European gridded temperature data set for validating control climate simulations. *Journal of Geophysical Research*, **115**, D23118.

Lambert S.J., Hansen B.K., 2011 : Simulated Changes in the Freezing Rain Climatology of North America under Global Warming Using a Coupled Climate Model. *Atmosphere-Ocean*, **49**, 289-295.

Makkonen L., Wichura B., 2010: Simulating wet snow loads on power line cables by a simple model. *Cold Regions Science and Technology*, **61**, 73-81.

Moss R.H., Edmonds J.A., Hibbard K.A., Manning M.R., Rose S.K., van Vuuren D.P., Carter T.R., Emori S., Kainuma M., Kram T., Meehl G.A., Mitchell J.F.B., Nakicenovic N., Riahi K., Smith S.J., Stouffer R.J., Thomson A.M., Weyant J.P., Wilbanks T., 2010: The next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment. *Nature*, **463**, 747-756.

Prein A.F., Gobeit A., 2017: Impacts of uncertainties in European gridded precipitation observations on regional climate analysis. *International Journal of Climatology*, **37**, 305-327.

Rauber R.M., Ramamurthy M.K., Tokay A., 1994: Synoptic and mesoscale structures of a severe freezing rain event: the St. Valentine's day ice storm. *Weather and Forecasting*, **9**, 183-208.

US NWS, 2020: WFO Winter Weather Products Specification. *NWSI* **10**, 513, 51 pp.

## LES SIMULATIONS HYDRO-CLIMATIQUES DRIAS 2020 - SIM2

Fabienne ROUSSET<sup>1</sup>, flore TOCQUER<sup>2</sup>, Jean-Michel SOUBEYROUX<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Météo-France, DCSC, 42 avenue Coriolis 31057 Toulouse, [fabienne.rousset@meteo.fr](mailto:fabienne.rousset@meteo.fr)

<sup>2</sup> Météo-France, DCSC, 42 avenue Coriolis 31057 Toulouse, [flore.tocquer@meteo.fr](mailto:flore.tocquer@meteo.fr)

<sup>3</sup> Météo-France, DCSC, 42 avenue Coriolis 31057 Toulouse, [jean-michel.soubeyroux@meteo.fr](mailto:jean-michel.soubeyroux@meteo.fr)

**Résumé :** Dans le cadre des projets EXPLORE2 et LIFE EAU&CLIMAT, la chaîne de modélisation SIM2 de Météo-France a été utilisée pour produire des scénarios hydro-climatiques, basés sur le jeu de données atmosphérique DRIAS 2020. Les résultats sur les paramètres de surface ainsi que sur les débits mettent en avant la forte incertitude due à la modélisation climatique, et montrent également la gradation des évolutions induites par chaque RCP. Enfin, elles font apparaître un gradient nord-sud sur la France, avec notamment une tendance plutôt à la hausse des débits hivernaux et de l'eau du sol sur la moitié nord de la France, et un assèchement généralisé sur la moitié sud.

**Mots-Clés :** Changement climatique, modélisation hydrologique, EXPLORE 2, débit.

**Abstract :** Within the framework of the EXPLORE 2 and LIFE EAU&CLIMAT projects, the modeling chain SIM2 from Météo-France was used to produce hydrological scenarios, based on the DRIAS 2020 dataset. The future evolution of surface parameters such as soil moisture or snow cover, as well as the streamflows, show an important uncertainty due to climate uncertainty. It also depends on the RCP scenario. Moreover, we can notice a regional contrast as well as a seasonal contrast, streamflow and soil moisture tend to increase particularly in winter and over the north of France, whereas they tend to decrease especially in summer and over the southern part of France.

**Keywords :** Climate change, hydrological modeling, EXPLORE 2, streamflow.

### Introduction

La chaîne de modélisation hydro-météorologique SIM2 (Le Moigne et al. 2020) est un outil utilisé par Météo-France depuis de nombreuses années pour le suivi temps réel de l'hydro-météorologie de surface sur la France, la caractérisation climatique, la climatologie, et pour diverses applications de prévision de la ressource en eau (à moyenne échéance, à échéance saisonnière). Plus récemment, elle a été utilisée pour l'étude de l'impact du changement climatique sur l'hydrologie en France, au travers des projets EXPLORE2070<sup>23</sup> et CHIMERE 21<sup>24</sup>. Dans le cadre des projets en cours EXPLORE 2<sup>25</sup> et LIFE EAU&CLIMAT<sup>26</sup>, la chaîne SIM2 est utilisée pour réaliser des projections hydro-climatiques sur la France basées sur les projections météorologiques DRIAS-2020<sup>27</sup>.

## 1. La modélisation hydro-climatique SIM2

### 1.1. Description de la chaîne SIM2

La chaîne Safran-Isba(Surfex)-Modcou (SIM) a été développée dans le cadre d'une coopération entre Météo-France et le Centre de géosciences de Mines ParisTech. Elle simule sur la France les flux d'eau et d'énergie à l'interface sol-atmosphère-biosphère, ainsi que l'évolution du débit des rivières et des

23 <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/44>

24 <https://webgr.inrae.fr/projets/projets-acheves/chimere-21/>

25 <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1244>

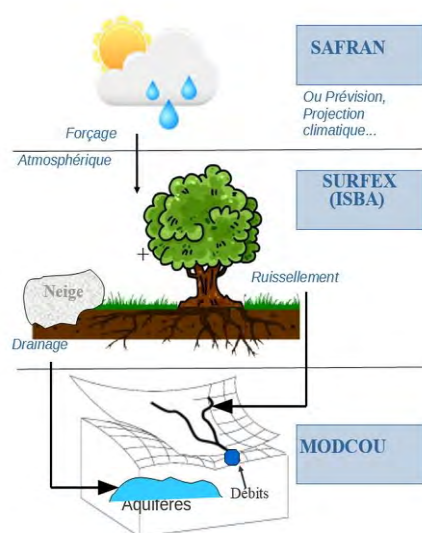
26 <https://www.gesteau.fr/life-eau-climat>

27 [drias-climat.fr](https://drias-climat.fr)

principales nappes. Ce modèle est utilisé en opérationnel depuis près de 20 ans pour le suivi temps réel de l'hydrologie de surface sur la France, la caractérisation climatique, et la prévision à différentes échéances. Il fait l'objet de nombreuses actions de recherche. La chaîne hydrométéorologique Safran-Isba(Surfex)-Modcou (SIM) a été validée sur l'ensemble de la France par Habets et al. (2008) par comparaison à des observations quotidiennes de débit, hauteurs de nappes et hauteurs de neige sur la période 1995-2005. Ces dernières années, une version 2 de la chaîne a été mise en place en y apportant de nombreuses améliorations décrites dans l'article Le Moigne et al. (2020). La version utilisée par les simulations hydrologiques réalisées dans le cadre du projet EXPLORE 2 est la version SIM2.

La chaîne SIM2 est composée de 3 modules, représentés sur la figure 1.

– Safran est un système d'analyse permettant de reconstruire des profils verticaux de l'atmosphère sur des zones climatiquement homogènes, à partir d'observations au sol et de produits de modèles de circulation générale à grande échelle. Ces profils sont projetés spatialement et verticalement sur une grille régulière de 8 km sur la France et permettent de produire une analyse en point de grille de 8 paramètres météorologiques sur la France aux pas de temps horaire et quotidien : température de l'air, précipitation liquide, précipitation solide, force du vent, humidité de l'air, rayonnement solaire direct, rayonnement solaire diffus et nébulosité. La réanalyse climatologique Safran produite par Météo-France couvre la période allant du 1er août 1958 au 31 juillet 2021 et est complétée chaque année. Dans le cadre des projections climatiques du projet EXPLORE 2, le module Safran est remplacé par les données atmosphériques issues du jeu DRIAS 2020.



**figure 1.** Schéma de fonctionnement de la chaîne SIM2

– Surfex (contenant le cœur de code Isba) est un modèle de surface développé par le CNRM en collaboration avec plusieurs laboratoires de recherche. Il est ici utilisé dans une version orientée hydrologie (version diffusion, multicouches), permettant de représenter les surfaces continentales dans les modèles atmosphériques et hydrologiques. Il comporte plusieurs modules permettant de simuler les transferts d'eau et de chaleur dans le sol, la végétation, la neige, et l'hydrologie superficielle (drainage et ruissellement).

– Le modèle hydrogéologique Modcou est un modèle développé par le Centre de Géosciences de Mines ParisTech. Météo-France a collaboré avec le Centre de Géosciences pour développer une version du modèle sur l'ensemble de la France. Cette version est utilisée dans le cadre de la chaîne SIM2. Le modèle hydrogéologique Modcou couple les écoulements de surface et les écoulements souterrains afin de simuler les débits des rivières et les niveaux piézométriques des aquifères représentés. L'eau est transportée vers les rivières ou alimente les aquifères. Modcou simule l'évolution des aquifères et des nappes, ainsi que leurs interactions avec les rivières.

## 1.2. Mise en œuvre de SIM2 pour les simulations hydro-climatiques basées sur le jeu DRIAS 2020

Dans le cadre des projets EXPLORE 2 et LIFE EAU&CLIMAT, la chaîne SIM2 a été forcée par les projections climatiques du jeu DRIAS 2020, dont la composition est détaillée sur la figure 2, et c'est la méthode de correction de biais ADAMONT<sup>28</sup> qui a été utilisée. Trois scénarios climatiques d'émission de gaz à effet de serre (RCP) sont considérés : RCP2.6 (faibles émissions), RCP4.5 (émissions modérées), RCP8.5 (forte émissions).

GCM	RCM	HISTO	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
CNRM-CM5	Aladin63 V2	■	■	■	■
CNRM-CM5	Racmo22E v2	■	■	■	■
IPSL-CM5A-MR	WRF381P	■		■	■
IPSL-CM5A-MR	RCA4	■		■	■
HadGEM2-ES	RegCM4-6	■	■		■
HadGEM2-ES	CCLM4-8-17	■		■	■
EC-EARTH	Racmo22E v2	■	■	■	■
EC-EARTH	RCA4	■	■	■	■
MPI-ESM-LR	CCLM4-8-17	■	■	■	■
MPI-ESM-LR	REMO*	■	■	■	■
NorESM1-M	HIRHAM5 v3	■		■	■
NorESM1-M	REMO**	■	■		■

\* REMO 2009; \*\* REMO 2015

**figure 2.** Les 30 simulations du climat futur (8 RCP 2.6, 10 RCP 4.5 et 12 RCP8.5) et les 12 simulations historiques du jeu DRIAS 2020 (source rapport DRIAS 2020, drias-climat.fr)

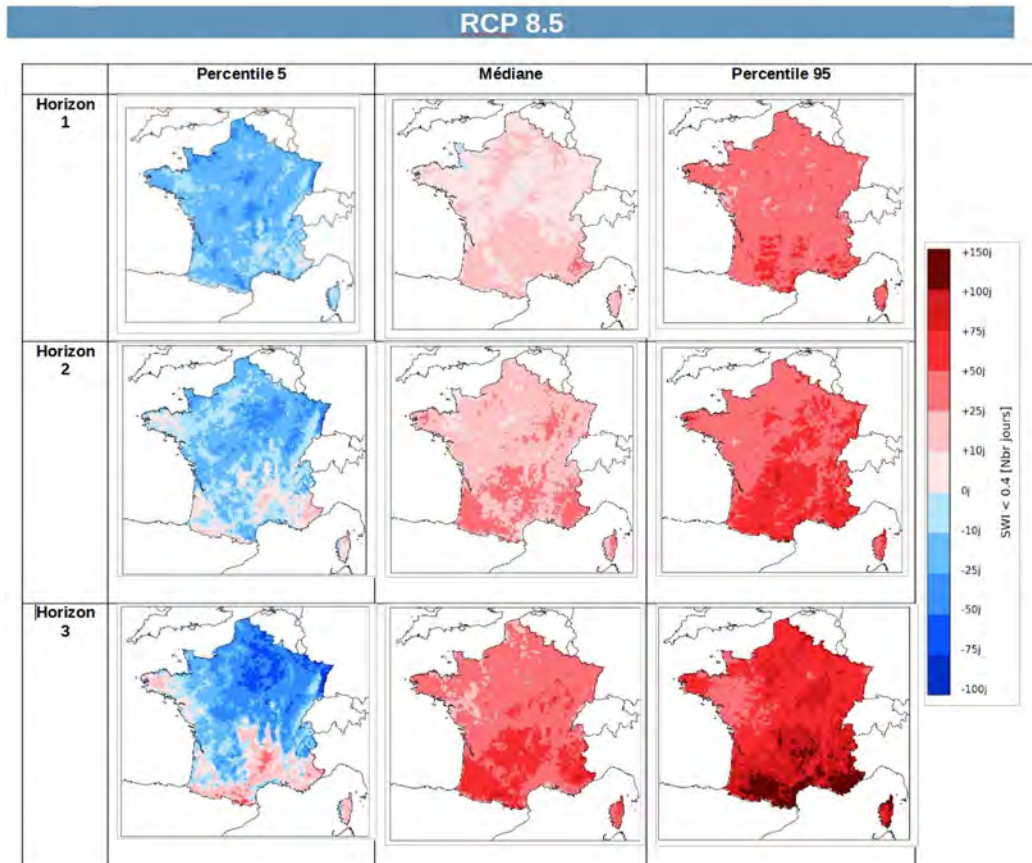
## 2. Les simulations hydro-météorologiques de surface

Le module Surfex de SIM2 tourne sur une grille régulière de 8 km de côté couvrant l'ensemble de la France métropolitaine et la Corse, et permet d'obtenir des scénarios d'évolutions climatiques de plusieurs variables de surface concernant la ressource en eau, dont les plus utilisés sont : l'évaporation réelle (eau totale restituée à l'atmosphère par le sol et les plantes en raison des processus d'évaporation – du sol nu et de l'eau interceptée par la végétation – et de transpiration des plantes), l'équivalent en eau du manteau neigeux (SWE) ou encore l'indice d'humidité du sol (SWI, qui permet de caractériser la quantité d'eau présente dans la couche racinaire, et disponible pour la végétation). En outre, on a accès aux composantes du bilan d'eau comme le ruissellement ou le drainage gravitationnel.

Afin de s'intéresser aux évolutions du climat, chaque variable est considérée sur des périodes de 30 ans : sur la période 1976-2005 d'une part, c'est la période dite « historique » des modèles de climat, et sur des horizons futurs proche (2021-2050), moyen (2041-2070) et lointain (2071-2100) d'autre part. Et ce, pour chacun des 12 couples de modèles GCM/RCM et chacun des trois RCP 2.6, 4.5 et 8.5.

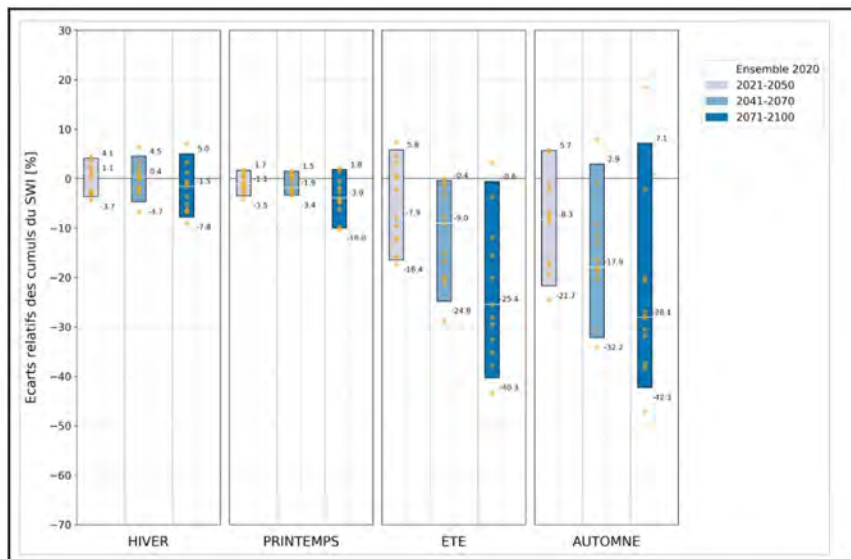
L'évolution de chaque variable peut être représentée en fonction de l'horizon futur, ou encore du RCP, et de plus à partir de ces variables des indicateurs simples ont été définis. Par exemple, afin d'avoir une première approche de l'évolution de la sécheresse du sol, nous avons calculé le nombre de jours annuel moyen pendant lesquels le SWI (indice d'humidité du sol) est inférieur à 0.4 (valeur empirique qui permet de qualifier un sol sec). L'évolution de cet indicateur est présentée sur les figures 3 et 4.

En scénario RCP 8.5 (figure 3), le nombre de jours sol sec augmente régulièrement au cours du siècle pour atteindre des valeurs entre +25 et +50 en fin de siècle pour la distribution médiane, et jusqu'à +100 jours sur le sud de la France pour la distribution extrême. Inversement, la distribution plus humide indique une diminution du nombre de jours secs sur une large moitié nord de la France. L'incertitude liée aux modèles climatiques est forte à tous les horizons temporels. Dans tous les cas, on observe une augmentation du nombre de jours sol sec plus forte au sud de la France que dans le nord.



**figure 3.** Écart de nombre de jours de sol sec (SWI<0.4) pour le RCP 8.5 par horizon et selon les paramètres de distributions multi-modèles Q05 , Q50 , Q95

L'évolution saisonnière de l'écart relatif de l'humidité du sol sous RCP8.5 (figure 4) montre un assèchement important du sol en été et en automne et des valeurs autour de la normale pour l'hiver et le printemps. Les incertitudes entre les modèles sont plus fortes en été et en automne, et augmentent avec l'horizon temporel.



**figure 4.** Écarts relatifs de l'évolution saisonnière de l'humidité du sol par horizon temporel pour le RCP 8.5

### 3. Les simulations de débit

Nous avons produit quelques analyses simples des évolutions des débits issus du modèle SIM2. Ces résultats seront enrichis dans la suite du projet EXPLORE 2, d'une part avec l'utilisation de différents



modèles hydrologiques qui permettront de mieux quantifier l'incertitude liée à la modélisation hydrologique, et d'autre part avec le calcul d'indicateurs hydrologiques plus ciblés (de type VCN ou QMNA par exemple).

### 3.1. Evolution des débits annuels

La figure 5 présente l'évolution du débit moyen annuel en fin de siècle pour les RCP4.5 et 8.5, pour l'ensemble des modèles climatiques, la robustesse du signe du changement étant soulignée par un encadré noir des symboles. Elle met en avant un gradient nord-sud marqué, avec des hausses de débits moyens sur la moitié nord de la France, surtout en RCP4.5, et des baisses sur la moitié sud, très marquées en RCP8.5. L'incertitude climatique demeure forte, en effet un grand nombre de stations ne présentent pas un signal de changement robuste.

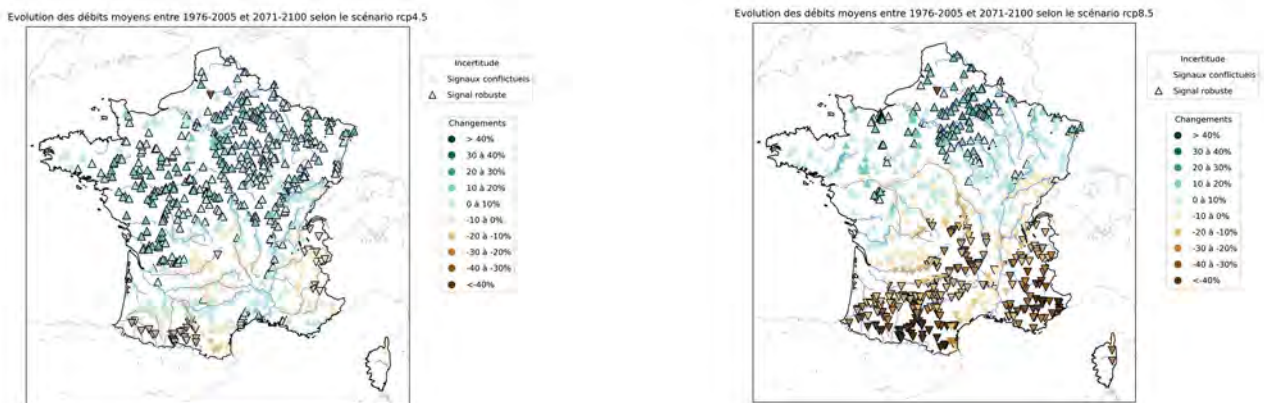


figure 5. Evolution du débit moyen annuel à l'horizon 2071-2100 pour les RCP 4.5 (à gauche) et 8.5 (à droite)

### 3.2. Evolution du cycle hydrologique annuel

La figure 6 présente l'évolution relative du cycle annuel moyen au pas de temps mensuel, en fin de siècle par rapport à la période 1976-2005, pour le RCP 8.5, pour la Seine à Paris (régime pluvial de la moitié nord de la France) et la Garonne à Portet-sur-Garonne (régime pluvio nival du sud de la France). Sur la Seine, comme sur de nombreuses stations de la moitié nord de la France, l'évolution des débits hivernaux est une tendance à l'augmentation, de 20 à 40 % pour la médiane des modèles. Les débits estivaux ont tendance à la baisse, plus largement sur la période de juin à novembre la médiane des modèles climatiques se situe à environ -10 / -20 %. Sur la Garonne, le signal est quasi unanimement à la baisse. La baisse des débits printaniers traduit une diminution du pic de fonte, lié à l'augmentation des températures et la diminution du manteau neigeux des Pyrénées, et les débits estivaux sont en forte baisse, de -40 à -60 % pour la médiane des modèles climatiques.

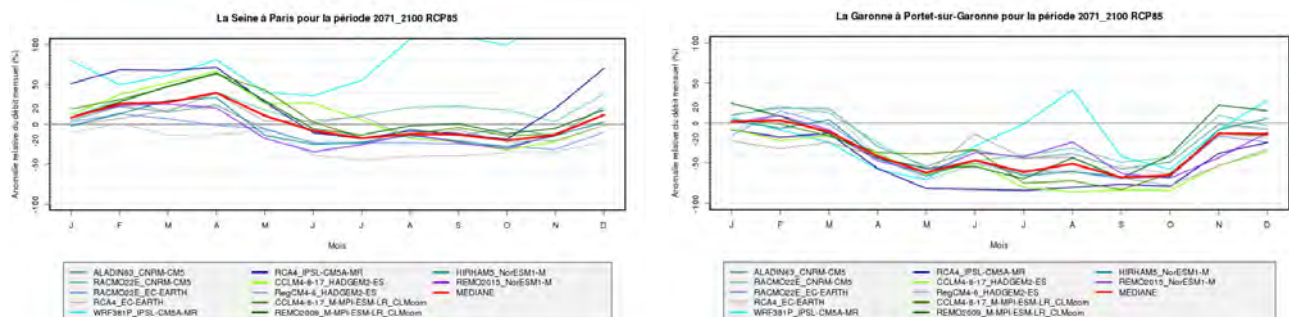
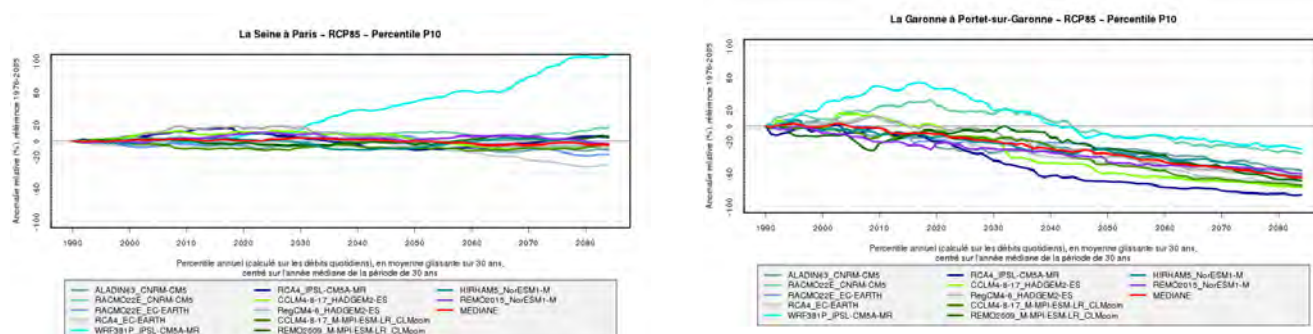


figure 6. Evolution du cycle annuel moyen à l'horizon 2071-2100 pour le RCP 8.5 pour la Seine à Paris (à gauche) et la Garonne à Portet-sur-Garonne (à droite)

### 3.3. Evolution des étiages

La figure 7 présente l'évolution des débits d'étiage pour le RCP 8.5, pour la Seine à Paris et la Garonne à Portet-sur-Garonne. Les débits d'étiage sont définis comme étant le Q10 annuel calculé sur les débits quotidiens, puis moyennés sur des périodes de 30 ans glissants (l'année portée en abscisse du graphique étant l'année du milieu de la période de 30 ans). Ces débits sont présentés en termes d'évolution par rapport à la période 1976-2005, c'est pourquoi les graphiques démarrent à zéro. Pour la Seine comme pour beaucoup de stations du nord de la France, l'évolution attendue des débits d'étiage est relativement faible, sauf pour le modèle IPSL/WRF (qui donne une augmentation marquée des précipitations convectives estivales surtout en RCP8.5). Pour la Garonne en revanche, comme pour beaucoup de stations de la moitié sud de la France, la tendance des débits d'étiage est à la baisse, cette baisse est continue avec le temps, et en fin de siècle elle s'échelonne d'environ -25 à -80 %.



**figure 7.** Evolution du Q10 annuel (calculé sur les débits journaliers), en moyenne glissante sur 30 ans, par rapport à la période 1976-2005, pour le RCP 8.5 pour la Seine à Paris (à gauche) et la Garonne à Portet-sur-Garonne (à droite)

### Conclusion

Les projections hydro-climatiques obtenues avec la chaîne de modélisation SIM2 et le jeu de données atmosphériques DRIAS 2020 mettent en avant la forte incertitude due à la modélisation climatique, avec des évolutions contrastées et parfois de signe contraire selon les paramètres sur l'ensemble des modèles climatiques du jeu DRIAS 2020. Elles montrent également une gradation des évolutions induites par chaque RCP. Enfin, elles font apparaître une variabilité saisonnière (été-hiver) et un gradient nord-sud sur la France, avec notamment une tendance plutôt à la hausse des débits hivernaux et de l'eau du sol sur la moitié nord de la France, et un assèchement généralisé sur la moitié sud avec des diminutions marquées des débits estivaux.

Ce travail donne un premier aperçu de résultats qui contribueront au projet EXPLORE 2. Ces résultats sont encore partiels, car le projet EXPLORE 2 va proposer une analyse poussée des sources d'incertitude des projections climatiques hydrologiques, et ce grâce à la mise en œuvre d'autres méthodes de correction de biais des modèles climatiques, et également l'utilisation d'un grand nombre de modèles hydrologiques. L'ensemble des résultats du projet EXPLORE 2 permettra d'avoir une analyse beaucoup plus complète et détaillée des scénarios d'évolution de l'hydrologie de surface et souterraine sur la France.

### Bibliographie

Habets, F., Boone, A., Champeaux, J. L., Etchevers, P., Franchisteguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Quintana Seguí, P., Rousset-Regimbeau, F., and Viennot, P.: The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, **113**, D06113, <https://doi.org/10.1029/2007JD008548>, 2008.

Le Moigne, P., Besson, F., Martin, E., Boé, J., Boone, A., Decharme, B., Etchevers, P., Faroux, S., Habets, F., Lafaysse, M., Leroux, D., and Rousset-Regimbeau, F.: The latest improvements with SURFEX v8.0 of the Safran-Isba-Modcou hydrometeorological model for France, *Geosci. Model Dev.*, **13**, 3925–3946, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3925-2020>, 2020.

## INTERPOLATION DES TEMPÉRATURES DE L'AIR À FINE RÉOLUTION EN ZONE DE MONTAGNE

Judith EECKMAN<sup>1</sup>, Jean-Michel FALLOT<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institut de géographie et durabilité, Université de Lausanne (Suisse), Géopolis, UNIL-Mouline, CH-1015 Lausanne, Suisse, [judith.eckman@unil.ch](mailto:judith.eckman@unil.ch), [jean-michel.fallot@unil.ch](mailto:jean-michel.fallot@unil.ch)

**Résumé :** Ce travail présente deux méthodes d'interpolation des températures de l'air à haute résolution à partir de mesures in situ dans un petit vallon alpin (vallon de Nant, canton de Vaud, Suisse). Différents produits d'estimation des températures sont comparés afin d'évaluer les performances des méthodes d'interpolation. Ce travail montre que l'interpolation des températures par inverse distance pondérée, couplée avec un gradient thermique vertical permet de bien modéliser la dynamique annuelle des températures, cependant la représentation des effets de sites locaux peut être affinée.

**Mots-Clés :** interpolation spatiale, températures de l'air, climatologie, Alpes vaudoises

**Abstract:** This work presents two methods to interpolate air temperature from in situ measurements at a high resolution in a small alpine valley (Vallon de Nant, Vaud canton, Switzerland). Different temperature products are compared in order to evaluate the performance of interpolation methods. This work shows that the interpolation of temperatures by weighted inverse distance, coupled with a vertical thermal gradient, makes it possible to model the annual dynamics of temperatures well, however the representation of the effects of local sites can be refined.

**Keywords:** spatial interpolation, air temperatures, climatology, Swiss Alps.

### Introduction

L'extrême hétérogénéité des topographies en zone de montagne influence significativement les températures à l'échelle locale. En particulier, les fonds des vallées et des dépressions favorisent des accumulations d'air froid qui influencent plus ou moins fortement les températures moyennes mensuelles et annuelles en fonction de leur morphologie (Fallot, 2012). Ces influences peuvent fausser les interpolations des températures effectuées à partir de mesures in situ et de méthodes statistiques, notamment au fond de certaines grandes vallées alpines (Frei, 2013). Il s'agit de voir si de telles influences apparaissent aussi dans des petits vallons alpins lorsqu'on souhaite interpoler les températures à une échelle fine (25 m). Le site d'étude du vallon de Nant dans les Alpes vaudoises (Suisse), particulièrement instrumenté dans le cadre de divers projets (Michelon et al., 2021), est choisi pour ce travail, car son encaissement et sa morphologie devraient favoriser des accumulations d'air froid (figure 1). La surface du bassin étudié est de 13,4 km<sup>2</sup> et les altitudes sont comprises entre 1200 m. a.s.l. et 3051 m. a.s.l.

Ce travail se concentre sur l'application d'une méthode d'interpolation à haute résolution des températures mensuelles pour le site du vallon de Nant, à partir des enregistrements de trois stations météorologiques disponibles in situ. Afin d'estimer leur performance, ces champs de température interpolés sont comparés à deux autres sources de données : les températures fournies par le produit haute résolution CHCLIM25 et par la réanalyse ERA5.

### 1. Données utilisées

#### 1.1. Mesures aux stations météorologiques du vallon

Des mesures sont disponibles au pas de temps horaire pour trois stations météorologiques installées dans le vallon de Nant (figure 1). Le tableau 1 résume les caractéristiques des enregistrements aux trois stations utilisées dans cette étude. Compte tenu de l'isolement géographique de ces stations, ainsi que des conditions auxquelles elles sont soumises (manque d'ensoleillement pour l'alimentation des panneaux solaires dédiés) les séries de mesures présentent d'importantes lacunes. L'intersection des périodes d'enregistrement aux trois stations étant courte, le choix est fait pour ce travail d'utiliser l'ensemble des

chroniques aux trois stations moyennées au pas de temps mensuel afin d'obtenir les dynamiques annuelles des températures mesurées.

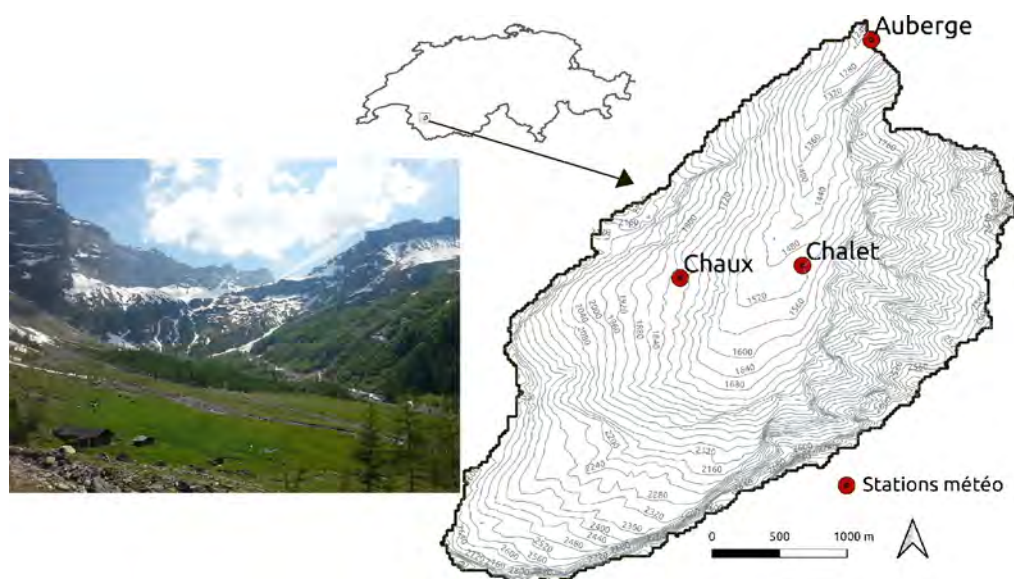


Figure 16: Situation géographique du bassin versant étudié : Le vallon de Nant, Bex, Suisse.

**Tableau 1.** Principales caractéristiques (altitudes, périodes d'enregistrement et fraction de données manquantes) des mesures aux trois stations utilisées

Station	Altitude	Période		Données manquantes
Auberge	1253 m a.s.l.	2012-01-01	2021-08-30	0.3 %
Chalet	1529 m a.s.l.	2015-08-30	2021-08-30	21 %
La Chaux	1780 m a.s.l.	2010-02-28	2021-08-30	8.6 %

## 1.2 Gradients thermiques altitudinaux

Plusieurs estimations des gradients thermiques verticaux moyens mensuels et annuels ont été proposées pour des zones de montagne. Bouët (1985) a notamment défini de tels gradients pour l'ensemble de la Suisse en distinguant deux couches d'air, une au-dessous et une au-dessus de 1500 m a.s.l. (tableau 2).

**Tableau 2 :** Gradients verticaux moyens de températures ( $^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ ) proposés par Bouët (1985) pour deux tranches d'altitude.

Tranche d'air	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	An
500-1500 m a.s.l.	0,24	0,33	0,50	0,61	0,63	0,63	0,63	0,61	0,49	0,39	0,33	0,26	0,46
1500-4000 m a.s.l.	0,54	0,56	0,58	0,61	0,63	0,63	0,63	0,61	0,59	0,57	0,55	0,54	0,59

Le gradient thermique peut également être estimé en moyenne annuelle. La valeur de  $6.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$  correspond au cas d'une atmosphère standard avec une pression atmosphérique de 1013.25 hPa et une température de  $15^{\circ}\text{C}$  au niveau de la mer selon l'Organisation de l'Aviation Civile Internationale (OACI) (Hack, 1978). Bien que cette valeur ne soit pas nécessairement adaptée pour représenter l'hétérogénéité spatiale en région montagneuse, ce travail propose d'appliquer cette valeur de gradient annuel moyen pour définir un cas de référence dans le but d'estimer l'impact du choix d'un gradient de température annuel ou mensuel.

### 1.3 Autres produits de températures disponibles

Des températures provenant de deux autres sources de données sont comparées aux températures obtenues par interpolation des mesures in situ dans le vallon de Nant.

#### 1.3.1 CHCLIM25

L'Office suisse de météorologie et climatologie MétéoSuisse fournit des estimations des variables climatiques à la résolution kilométrique au pas de temps journalier, intégrant des mesures in situ ainsi que des données satellitales et radar. Le produit CHCLIM25 est un produit à haute résolution développé par Broennimann (2018) basé sur une descente d'échelle des données kilométriques MétéoSuisse. La descente d'échelle des températures est réalisée en utilisant un gradient variable calibré par régression linéaire dans une fenêtre mobile de 25 km<sup>2</sup> (régressions locales) et en utilisant le modèle numérique de terrain SWISSTOPO à 25 m de résolution horizontale. Le produit CHCLIM25 est disponible depuis 1981 et pour le futur jusqu'en 2099. Ici, on utilise les températures moyennes mensuelles sur la période 2010-2020. En effet, les températures mesurées dans le vallon de Nant n'étant disponibles que sur cette période, on fait le choix d'utiliser les mêmes périodes pour les différents produits. On utilise ici la température moyenne mensuelle fournie par CHCLIM25.

#### 1.3.2 ERA5

La réanalyse climatique ERA5 fournit les variables climatiques au pas de temps horaire depuis 1950 à une résolution horizontale de 30 km sur l'Europe (Muñoz-Sabater et al., 2021). Le vallon de Nant est entièrement compris dans une maille ERA5 ayant une altitude moyenne de 1262 m.a.s.l. Comme pour le produit CHCLIM25, on utilise ici la température à 2 mètres du sol en moyenne mensuelle sur 2010-2020, afin de rester cohérent avec les mesures in situ disponibles sur cette période.

## 2. Méthode

Les températures mensuelles sont interpolées sur le maillage à la résolution horizontale de 25 m en utilisant la méthode d'inverse distance pondérée par un gradient altitudinal qui peut être défini au pas de temps annuel ou mensuel (Gottardi et al., 2017, Valéry et al., 2010). La pertinence de l'utilisation des gradients mensuels de Bouët est testée. Les moyennes mensuelles de températures à chacune des trois stations sont ramenées à l'altitude des deux autres stations en utilisant ces gradients, en fonction des altitudes des stations. Les séries temporelles ainsi calculées sont comparées aux mesures à la station afin de mener une validation croisée. L'analyse de ces résultats permet de déduire que l'utilisation des gradients de Bouët mène à des résultats acceptables pour l'interpolation des températures aux stations Chalet (1529 m a.s.l.) et La Chaux (1780 m a.s.l.). Cependant ils ne sont pas satisfaisants pour interpoler les températures à l'altitude de la station Auberge (1253 m a.s.l.). La station de l'Auberge présente donc une anomalie par rapport aux comportements enregistrés aux deux autres stations. En plus de l'impact de l'altitude, des facteurs additionnels dus à la topographie (ombrage du relief, accumulation d'air froid) peuvent alors être pris en compte pour modéliser les processus à cette station.

## 3. Résultats

Les températures mensuelles sont interpolées sur un maillage de résolution 25 m, à partir du modèle numérique de terrain SWISSTOPO. Le produit CHCLIM25 utilisant ce même modèle de terrain, les cartes de températures obtenues par interpolation peuvent être comparées aux températures fournies par CHCLIM25 au pas de temps mensuel.

### 3.1 Dynamique annuelle des températures interpolées

La figure 2 présente les moyennes sur le bassin versant des températures mensuelles interpolées en utilisant un gradient annuel ou les gradients mensuels de Bouët, ainsi que des températures mensuelles CHCLIM25 et des températures mensuelles ERA5. Les températures ERA5 sont globalement significativement supérieures aux autres sources de données, en particulier durant l'été. L'utilisation de ce



produit à faible résolution (30 km) semble alors peu adaptée à l'estimation des températures à haute résolution en zone de montagne. Les trois sources de données CHCLIM25, T\_interp\_FIX (interpolations en utilisant un gradient annuel) et T\_interp\_BOET (interpolations en utilisant les gradients mensuels de Bouët) présentent de faibles écarts en été. En hiver (sauf pour le mois de février), les températures CHCLIM25 sont plus proches de T\_interp\_BOET que de T\_interp\_FIX. En effet, les deux produits CHCLIM25 et T\_interp\_BOET utilisant des gradients mensuels variables, l'amplitude des dynamiques saisonnières peut alors être plus importante que lorsqu'un gradient annuel fixe est utilisé. Cependant, des observations supplémentaires sont nécessaires afin de valider les dynamiques représentées.

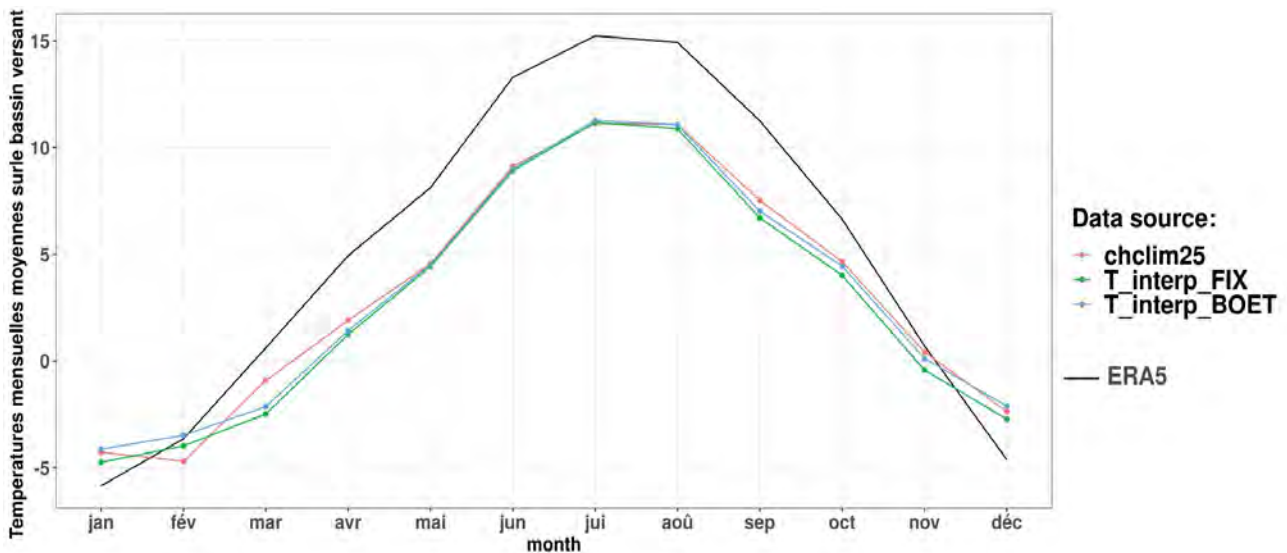
### 3.2 Répartition spatiale des températures interpolées

La figure 3 présente les cartes de la différence entre les températures mensuelles CHCLIM25 et les températures interpolées sur le bassin, en utilisant les gradients mensuels de Bouët, qui sont définies sur le même maillage. Globalement, on observe que les températures interpolées, en utilisant un gradient annuel ou bien des gradients mensuels, sont plus chaudes que CHCLIM25 dans le fond de vallée et plus froides que CHCLIM25 en haut des versants. Le résultat s'explique par deux raisons : i) Les mesures aux stations influencent localement l'interpolation par inverse distance suivant leurs biais respectifs, alors que ces mesures ne sont pas prises en compte par CHCLIM25 ; ii) Les gradients altimétriques de températures sont plus faibles dans CHCLIM25 que les gradients mensuels de Bouët. Cependant, les influences respectives de ces deux facteurs ne sont pas distinguées ici. Une source de données supplémentaire, fiable localement, serait alors nécessaire afin de déterminer lequel de ces deux produits est le plus précis localement.

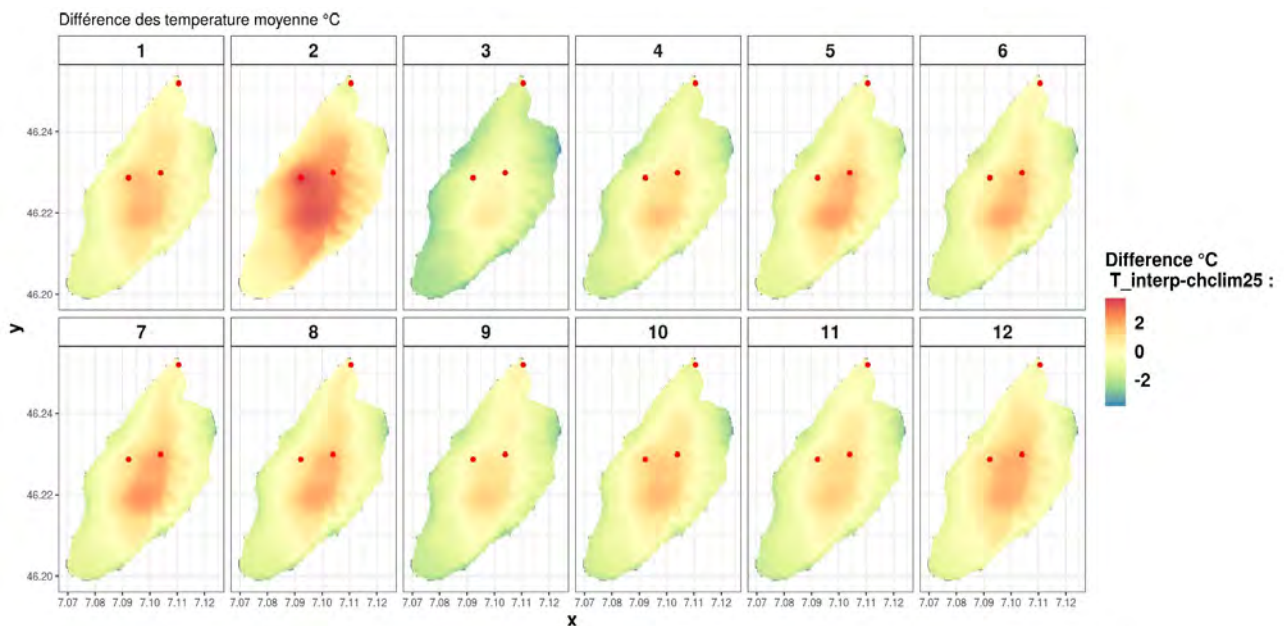
## 4. Perspectives : apport de sources de données supplémentaires

Une campagne de terrain a été mise en place à l'été 2021 afin de disposer de mesures de températures in situ, dans le but d'une part de disposer d'une source de donnée supplémentaire pour l'estimation des performances des produits d'interpolation, et d'autre part, afin de décrire les effets de sites à l'échelle locale. Une série de mini-capteurs de températures répartis dans le bassin ont été installés, en particulier dans le fond du vallon. Les enregistrements de ces mini-capteurs seront récoltés à l'été 2022 et permettront de mieux caractériser les différences de températures dans le fond du vallon par rapport au reste du bassin.

L'analyse des enregistrements aux trois stations, en particulier en situation anticyclonique, montre que l'influence du rayonnement solaire et de l'ombrage dû au relief sur les températures diurnes est non négligeable. La prise en compte de l'orographie locale peut alors permettre d'améliorer la modélisation de ces effets de site à haute résolution. Le modèle AWE-GEN-2d (Advanced WEather GENerator for a 2-dimensional grid), développé à l'Université de Lausanne par Peleg et al. (2017), est un générateur météorologique stochastique qui simule des variables climatiques maillées à haute résolution spatiale et temporelle en intégrant l'impact de l'orographie à l'échelle locale. Les températures horaires sont modélisées à une résolution horizontale de 25 m à partir des seules données d'entrée du modèle numérique de terrain, des températures horaires mesurées aux trois stations sur le bassin et des estimation du couvert nuageux fournit par ERA5 sur la zone d'étude. L'application de ce modèle représente alors une source de donnée supplémentaire pour ce travail d'inter-comparaison des différentes méthodes d'estimation des températures à haute résolution en zone de montagne.



**figure 2.** Températures mensuelles moyennes sur le bassin versant, interpolées en utilisant un gradient annuel (T\_interp\_FIX) ou les gradients mensuels de Bouët (T\_interp\_BOET), les températures mensuelles CHCLIM25 (chclim25) et les températures mensuelles moyennes ERA5.



**figure 3.** Différence entre les températures interpolées sur le bassin à partir des gradients thermiques verticaux mensuels de Bouët et les températures mensuelles CHCLIM25. Les points rouges représentent les trois stations météorologiques utilisées.

## Conclusion

Ce travail montre que les dynamiques temporelles des températures interpolées par inverse distance pondérée, couplées à l'application des gradients altitudinaux mensuels proposés par Bouët (1985) sont bien corrélées, en moyenne sur le bassin étudié, aux températures fournies par le produit haute résolution CHCLIM25. On observe également que les températures fournies par la réanalyse climatique ERA5 sont plus élevées en moyenne sur le bassin d'étude que les produits à la résolution 25 m étudiés, du fait de la faible résolution du produit ERA5 (30 km), qui ne prend pas en compte l'orographie locale. Enfin, le choix du gradient (annuel ou mensuel) dans la méthode d'interpolation n'impacte pas significativement ces résultats. En observant les répartitions spatiales des champs de température, ce travail montre que la différence principale entre les champs de température interpolés et les températures CHCLIM25 consiste en l'écart des

valeurs en fond de vallée. Ce résultat peut s'expliquer d'une part par la prise en compte des mesures in situ dans l'interpolation et d'autre part par la valeur de gradient altitudinal utilisé. Les effets de site (ombrage et accumulation d'air froid) en fond de vallée, non modélisés dans aucune de ces deux méthodes, peuvent également impacter significativement les températures à deux mètres du sol. La récolte d'enregistrements de température au niveau de nombreux points de mesure dans le bassin, fournira alors une source de donnée supplémentaire, précise localement, afin d'estimer les performances des différents produits d'interpolation étudiés. Enfin, la prise en compte de l'impact de l'orographie permettra de modéliser à l'échelle locale les effets de site.

## Bibliographie

Bouët, M. 1985 : *Climat et météorologie de la Suisse romande*. Payot, Lausanne, 171 p.

Broennimann, O., 2018 : *CHclim25: A high spatial and temporal resolution climate dataset for Switzerland. Technical report*. Ecospat laboratory, University of Lausanne, Switzerland. Available at [www.unil.ch/ecospat/files/live/sites/ecospat/files/shared/PDF\\_site/chclim25.pdf](http://www.unil.ch/ecospat/files/live/sites/ecospat/files/shared/PDF_site/chclim25.pdf)

Fallot J.-M., 2012 : Influence de la topographie et des accumulations d'air froid sur les températures moyennes mensuelles et annuelles en Suisse. *Actes du 25ème colloque de l'Association Internationale de Climatologie (AIC)*, Grenoble, France, 5-8.09.2012, p. 273-278.

Frei C., 2013 : Interpolation of temperature in mountainous region using nonlinear profiles and non-Euclidean distances. *International Journal of Climatology*, **34**, 1585-1605.

Gottardi, F., Obled, C., Gailhard, J., & Paquet, E. (2012). Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns: Application over French mountains. *Journal of Hydrology*, **432**, 154-167.

Hack, K.H., 1978 : *Météorologie pour aviateurs*. Aéro-Club de Suisse, Luzern, 233 p.

Michelon, A., Benoit, L., Beria, H., Ceperley, N., & Schaepli, B., 2021 : Benefits from high-density rain gauge observations for hydrological response analysis in a small alpine catchment. *Hydrology and earth system sciences*, **25(4)**, 2301-2325.

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., ... & Thépaut, J. N., 2021 : ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, **13(9)**, 4349-4383.

Peleg, N., Fatichi, S., Paschalis, A., Molnar, P., & Burlando, P., 2017 : An advanced stochastic weather generator for simulating 2-D high-resolution climate variables. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **9(3)**, 1595-1627.

Valéry, A., Andréassian, V., & Perrin, C. (2010). Regionalization of precipitation and air temperature over high-altitude catchments—learning from outliers. *Hydrological Sciences Journal—Journal des Sciences Hydrologiques*, **55(6)**, 928-940.

## ESTIMATION DES SÉCHERESSES AU NOUVEAU-BRUNSWICK, CANADA (1971-2020).

Guillaume FORTIN<sup>1,2</sup>, Charlotte POIRIER<sup>2</sup>, Vincent DUBREUIL<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Département d'histoire et de géographie, Université de Moncton, Canada -*

*\*guillaume.fortin@umoncton.ca*

<sup>2</sup> *Maîtrise en études de l'environnement, Université de Moncton, Canada - ecp5936@umoncton.ca*

<sup>3</sup> *LETG-Rennes, Université Rennes 2, UMR 6554 CNRS, France - vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr*

**Résumé :** Historiquement, les sécheresses estivales affectent principalement l'Ouest du Canada. La province du Nouveau-Brunswick, située à l'extrémité est du Canada, a récemment connu des épisodes de sécheresse intenses notamment à l'été 2020. Une analyse des relations entre les températures, les précipitations, les sécheresses et les vagues de chaleur pour la période de 1971 à 2020 à l'échelle du Nouveau-Brunswick est présentée dans cette étude. Il semble que les sécheresses les plus intenses ne surviennent pas nécessairement en même temps que les vagues de chaleur même si ces deux types de risques ont connu une hausse statistiquement significative depuis 1971.

**Mots clés:** indices, sécheresse, Nouveau-Brunswick, Canada

**Summary:** Historically, summer droughts have primarily affected Western Canada. The province of New Brunswick, located in the eastern part of Canada, has recently experienced intense drought events, particularly in the summer of 2020. An analysis of the relationship between temperature, precipitation, droughts, and heatwaves for the period 1971 to 2020 at the New Brunswick scale is presented in this study. It appears that the most intense droughts do not necessarily occur at the same time as heatwaves, although there has been a statistically significant increase in both since 1971.

**Keywords:** index, drought, New Brunswick, Canada

### Introduction

Les sécheresses sont susceptibles d'affecter à la fois les activités humaines (agriculture, approvisionnement en eau, tourisme...) et les écosystèmes naturels (feux de forêt, habitats aquatiques...). L'analyse des sécheresses constitue un défi important car elles sont difficiles à définir, à détecter et à suivre autant sur le plan spatial que temporel (Wilhite 2000). Il existe plusieurs indices qui permettent de quantifier leurs principales caractéristiques dont leur fréquence, leur durée, leur intensité et leur répartition spatiale. Certains auteurs (Heim 2002 ; Mishra et Singh 2010) présentent des synthèses détaillées de ces divers indices dont la majorité utilisent uniquement les précipitations. Toutefois, les précipitations ne constituent qu'une seule variable parmi plusieurs qui contrôlent le stress hydrique dans les écosystèmes et la disponibilité des ressources en eau. C'est d'ailleurs pour cette raison que certains indices utilisent, par exemple, d'autres variables comme l'évaporation ou l'évapotranspiration. La prise en compte de variables supplémentaires mais aussi d'autres types de risques, telles que les vagues de chaleur, est tout à fait pertinente en regard de la hausse prévue des températures et du fait que les risques climatiques sont souvent concomitants.

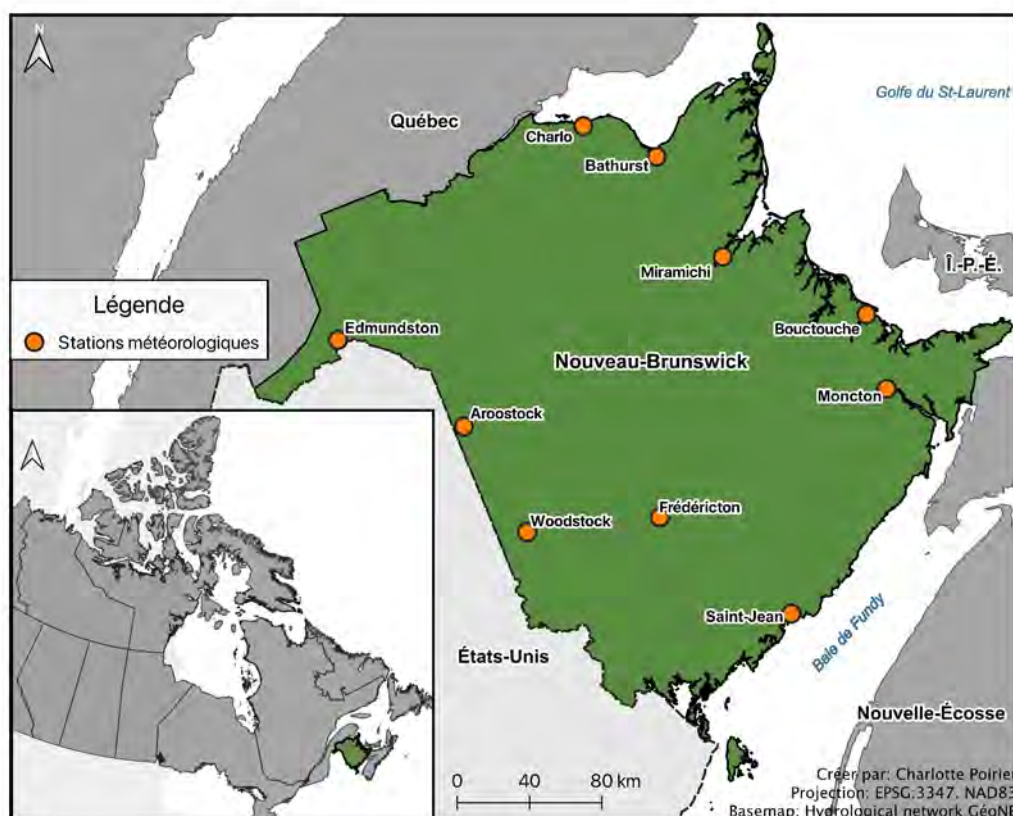
Dans le cadre de cette étude nous avons utilisé deux indices de sécheresse soit : l'indice de précipitation normalisé (SPI) et l'indice de précipitation et d'évapotranspiration normalisé (SPEI) afin de caractériser les épisodes de sécheresse depuis 1971 pour une dizaine de stations météorologiques réparties sur l'ensemble de la province du Nouveau-Brunswick (N.-B.). Il a été démontré que les risques hydroclimatiques, notamment dans le contexte du réchauffement climatique récent, peuvent se combiner et amplifier les impacts sur les écosystèmes et les sociétés (AghaKouchak et al. 2014). Dans cette étude nous présentons quelques exemples de relations possibles entre les précipitations, les températures, les indices de sécheresse et le nombre de vagues de chaleur à l'échelle de la province. Une analyse des tendances, réalisée avec le test non-paramétrique de Mann-Kendall, a également été faite pour les sécheresses. En

général, les différents types de risques sont étudiés séparément ce qui peut conduire à une sous-estimation des impacts cumulatifs et réels susceptibles d'affecter les sociétés et les écosystèmes vulnérables d'où l'intérêt de combiner les risques tels que les sécheresses et les vagues de chaleur.

## 1. Données et Méthodes

### 1.1. Zone d'étude

Le Nouveau-Brunswick couvre une superficie totale de près de 71 377,18 km<sup>2</sup> (Statistique Canada 2011) et se situe sur la côte est du Canada en bordure de l'océan Atlantique (Figure 1). Le climat régional varie principalement en fonction de l'altitude et de la distance à la mer (Fortin et Dubreuil 2020). Les normales climatiques (1981-2010) pour les précipitations totales sont réparties sur l'ensemble de l'année et varient entre 997,6 (Charlo) et 1295,5 mm (Saint-Jean) dont entre 20-30% est reçu sous forme de neige.



**figure 1.** Carte de localisation de la province du Nouveau-Brunswick et des stations retenues dans cette étude.

### 1.2. Données

Les températures minimales et maximales mensuelles moyennes et les précipitations totales mensuelles, provenant du réseau de stations météorologiques d'Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC, 2022a), sont utilisées pour calculer deux indices de sécheresses soit l'indice normalisé des précipitations (SPI) et l'indice normalisé des précipitations et de l'évapotranspiration (SPEI). Les données concernant la fréquence (nombre de jours par année) des vagues de chaleur proviennent du portail [Donneesclimatiques.ca](http://Donneesclimatiques.ca) (ECCC, 2022b). Ces données comportent des variables issues d'observations et de modèles climatiques. L'ensemble des données des modèles climatiques CMIP5 ont été ramenées à une échelle plus fine et corrigées des biais à l'aide de la méthode BCCAQv2, qui permet de réaliser une mise à l'échelle statistique des sorties de modèles climatiques (Cannon et al. 2015).

### 1.3. Méthodes



Le SPI a été décrit et utilisé abondamment (McKee et al., 1993; Labudová et al., 2017), il se base sur une distribution de probabilité des précipitations en utilisant la distribution gamma. Le package R\_SPEI a été utilisé pour calculer les indices SPI et SPEI. Des pas de temps variables (1, 3, 6 et 12 mois) ont été utilisés pour les calculs mais seuls ceux correspondant aux mois d'été (juin, juillet et août) ont été retenus aux fins d'analyse pour cette étude.

Rappelons que le SPI utilise uniquement les précipitations mensuelles, ce qui offre l'avantage d'être simple à calculer et il peut être facilement applicable dans divers types de climats. Cependant, puisqu'il n'utilise pas les températures, il ne permet pas d'estimer l'évapotranspiration et les modifications de celle-ci dans un contexte de réchauffement climatique. C'est pour cette raison que l'utilisation du SPEI peut s'avérer utile et complémentaire.

Le SPEI représente une version améliorée du SPI, il est basé sur l'équation du bilan hydrique (précipitations moins évapotranspiration potentielle) et il prend en considération la température (Beguería et al., 2014; Labudová et al., 2017; Vicente-Serrano et al., 2010).

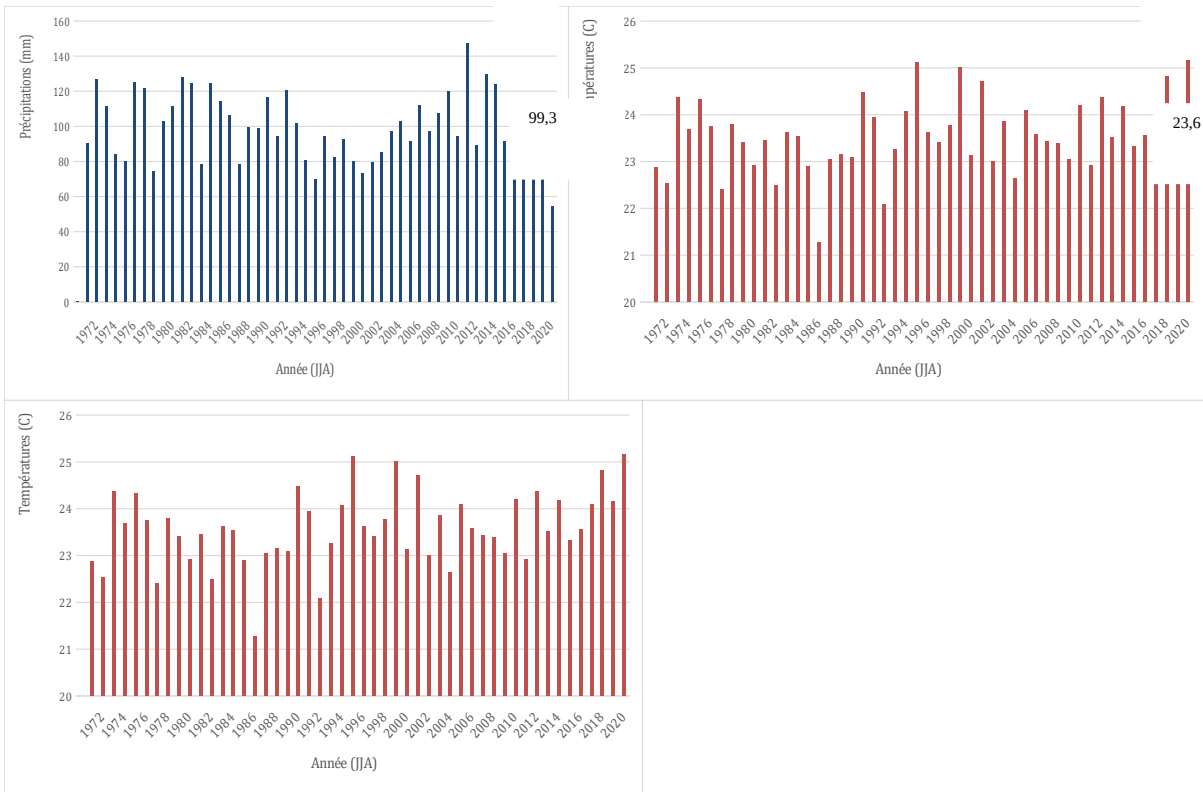
La définition des niveaux de sécheresse avec les indices SPI et SPEI peut se faire en fonction de valeurs obtenues (entre 2 et -2) qui peuvent être positives (dans le cas de périodes bien arrosées) ou négatives (dans le cas de sécheresses). Les valeurs pour les sécheresses peuvent être réparties en quatre niveaux : (1) D0 = près de la normale (entre 0 et -0,99) ; 2) D1 = modérément sec (-1,0 à -1,49) ; D2 = très sec (-1,5 à -1,99) ; D3 = extrêmement sec ( $\geq 2,0$ ).

Les vagues de chaleur peuvent être caractérisées en fonction de leur durée, leur fréquence et leur intensité en se basant sur divers seuils. Dans le cadre de cette étude nous avons retenu l'indice de vague de chaleur qui calcule le nombre de vagues de chaleur lorsque cinq jours consécutifs et plus dépassent le seuil de 30°C (Cannon et al. 2015; ECCC, 2022b). Cet indice permet ensuite de départager les données obtenues selon le 10<sup>e</sup>, 50<sup>e</sup> et 90<sup>e</sup> percentiles.

## 2. Résultats et discussion

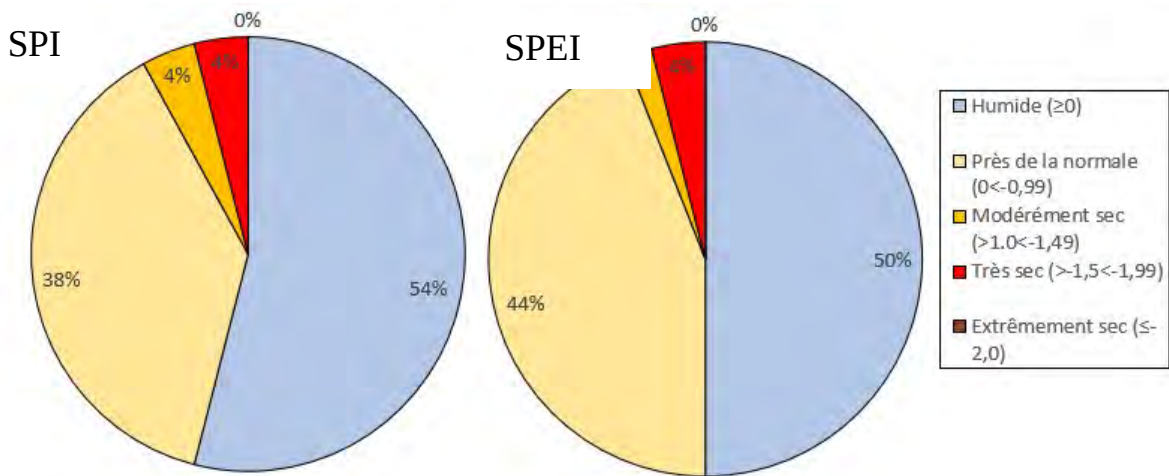
La classification en ordre croissant des données estivales pour les précipitations moyennes et les températures maximales (Tmax), tel que présenté dans les figures 2a et b, montrent que l'été 2020 se démarque car il était chaud (Tmax = 25,17°C) et sec (54,6 mm). En fait, il a reçu presque trois fois moins de précipitations que l'été 2011 qui était au contraire le plus arrosé (147,3 mm). Cependant, les températures minimales moyennes (Tmin) de l'été 2020 arrivent au 15<sup>e</sup> rang (11,43°C) et au 3<sup>e</sup> rang en ce qui concerne les températures moyennes (Tmoy, 18,3°C). À l'opposé l'année 2011, bien que très arrosée, se démarque par des températures relativement basses mais qui ne se situent pas complètement à l'extrémité de la courbe de distribution. En effet, les valeurs thermiques pour l'année 2011 se classent respectivement au 42<sup>e</sup>, 12<sup>e</sup> et 30<sup>e</sup> rangs pour les Tmax, Tmin et Tmoy (Figure 2b).

Pour les indices de sécheresse (SPI et SPEI) la figure 3 présente la proportion moyenne (il s'agit d'un indice régional qui correspond à la valeur moyenne des dix stations) du nombre de sécheresses par classe pour les deux indices (SPI et SPEI). On constate qu'il y a peu de différence entre les deux indices. Le SPEI indique qu'il y a une proportion égale entre le nombre de périodes humides et sèches tandis que le SPI compte 4% de plus de périodes humides (2 années) ainsi qu'une année supplémentaire qui est considérée comme modérément sèche (été 1985). Toutefois pour les deux indices on compte deux années pouvant être qualifiées de très sèches et aucune comme étant extrêmement sèche. Les deux années les plus sèches sont respectivement 2001 (SPI = -1,96; SPEI = -1,94) et 2020 (SPI = -1,89; SPEI = -1,93). On remarque que l'été 2001 se situe très près de la limite inférieure de la classe (-1,99) au-delà de laquelle l'été aurait été qualifié d'extrêmement sec.



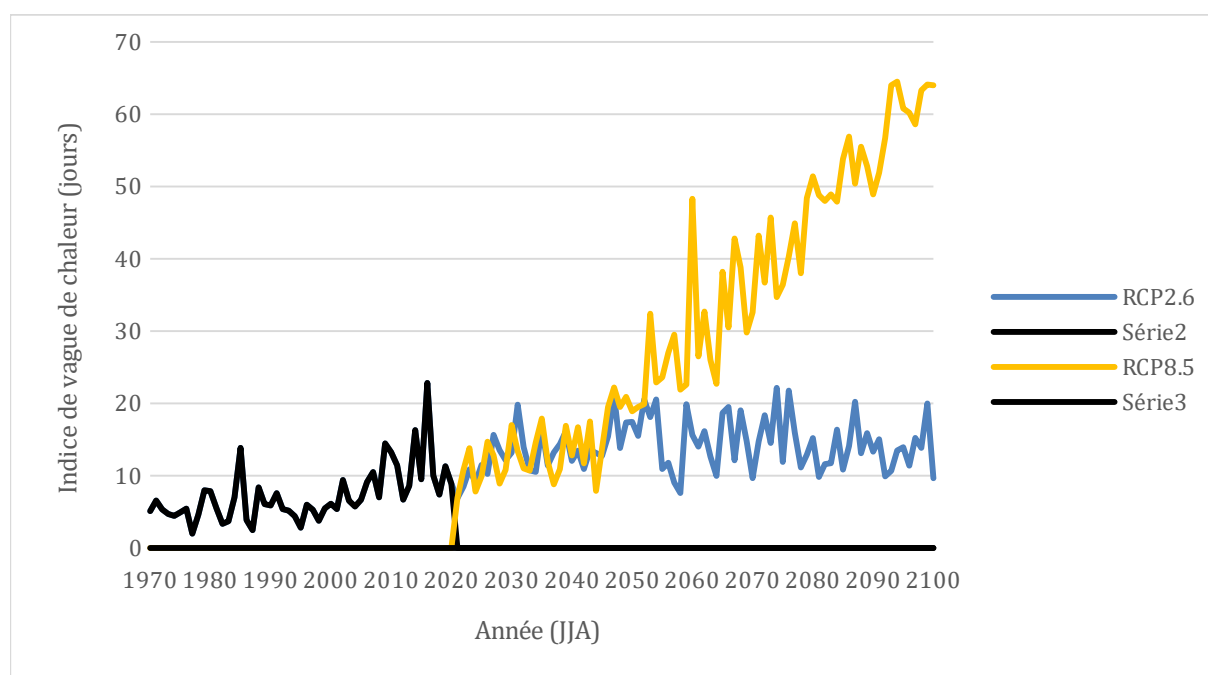
**figure 2.** Indice régional (moyenne de l'ensemble des stations) des valeurs estivales (JJA) classées en ordre chronologique pour la période de 1971 à 2020. (a) précipitations (mm) et; (b) températures maximales (°C). La ligne pointillée représente la moyenne.

Une analyse des tendances (test de Mann Kendall) réalisée sur les séries du SPI et du SPEI (calculé pour chacune des dix stations) indique que 9 des 10 stations présentent une tendance négative, dont 7 sont statistiquement significatives, entre 1971 et 2020. Une seule station indique une tendance positive qui est très faible et non significative. On remarque que les trois années les plus sèches (2001, 2020 et 2004) sont toutes survenues depuis le début du XXe siècle. Cependant, plusieurs années récentes peuvent aussi être qualifiées d'humides, par exemple 2005, 2008 et 2018, ce qui pose la question de la fréquence des événements extrêmes (secs vs humides) qui pourrait s'accroître?



**figure 3.** Distribution de la proportion de sécheresse (en %) selon les quatre classes (D0 à D3) pour les indices SPI et SPEI (pour la période de 1971 à 2020).

Concernant les vagues de chaleur on remarque que leur nombre a presque doublé entre le début des années 1971 et 2020 (Figure 4), la moyenne au cours de cette période est de 7,29 jours et le nombre maximal ayant été atteint en 2016 avec 22,8 jours en moyenne (le maximum enregistré est de 28 jours pour Fredericton). Pour les deux années les plus chaudes et sèches on constate que 2001 a compté 5,38 jours (-1,91) ce qui se situe légèrement en-dessous de la moyenne tandis que pour 2020 le nombre de jours de vagues de chaleur est de 8,88 (+ 1,59 jours) au-dessus de la moyenne pour la période historique. La hausse observée entre 1971 et 2020 devrait se poursuivre jusque vers 2050 puis se stabiliser à des valeurs légèrement supérieures à ce qui a été enregistré en 2020 (Figure 4) pour le scénario RCP2.6. Toutefois pour le RCP 8.5 la hausse prévue est quatre fois supérieure. Cela signifie que nous pourrions passer d'une dizaine de jours à la fin de la décennie 2020 à près d'une soixantaine en 2050 selon le pire scénario. Néanmoins, outre la fréquence, d'autres caractéristiques importantes des vagues de chaleur devraient également être considérées telles que la durée (longueur en jours des vagues de chaleur) ou l'intensité (la température moyenne au-dessus du seuil local durant les vagues de chaleur en °C).



**figure 4.** Nombre de vagues de chaleur (en noir = période historique, en bleu pour le RCP2.6 et en orange pour RCP8.5). Les lignes pointillées représentent les moyennes mobiles sur 10 ans.

Au cours des années à venir une hausse des températures de plus de 5°C (en 2080 selon le RCP 8.5) est prévue et elle devrait s'accompagner d'une augmentation des précipitations (moins de 5%) pour la saison estivale au N.-B. (Roy et Huard, 2016). Malgré la hausse probable des précipitations il n'est pas impossible que des épisodes de sécheresses puissent survenir au cours des années à venir. Zhao et al. (2020) ont comparé deux grands ensembles de modèles (CanESM2 et CESM1) sous le scénario RCP 8.5 pour estimer les sécheresses estivales futures, par rapport à la période de référence de 1980-2009 pour l'Amérique du Nord. Ces auteurs ont observé qu'il existe de grandes différences (voire des signaux contradictoires) pour la fréquence des sécheresses estivales futures pour la région de l'Est du Canada. De plus, la faible occurrence de ce type d'aléa peut se traduire par une mauvaise préparation de la société et par des impacts socio-économiques majeurs qui peuvent alors découler de ce manque de préparation. Ce fût le cas pour d'autres types d'aléas climatiques récemment comme pour la crise du verglas qui a durement frappé le nord-est du N.-B. en 2017 (GNB, 2017) ou les inondations majeures qui ont affectées plusieurs régions dans la province aux printemps 2018 et 2019 (Fortin et al., 2019).

## Conclusion

Dans un premier temps nos résultats indiquent qu'au cours de la période de 1971 à 2020 les années les plus chaudes (2001 et 2020) sont également les années les plus sèches en se basant sur les indices SPI et SPEI. C'est un peu moins évident pour les années bien arrosées qui, bien que présentant des températures plus froides que les moyennes ne se classent pas nécessairement à l'extrémité du spectre thermique. D'autre part, bien qu'il soit tout à fait plausible que les sécheresses et les vagues de chaleur puissent survenir en même temps, ce qui pourrait amplifier les impacts socio-environnementaux, nos résultats préliminaires n'indiquent pas que les années les plus sèches soient également celles où le nombre de vagues de chaleur soit le plus élevé. Toutefois, d'autres caractéristiques des vagues de chaleur (durée, fréquence, intensité) devraient être prises en considération dans le cadre de travaux futurs.

## Remerciements

Ce projet a été réalisé grâce à l'appui financier de l'Agence Universitaire de la Francophonie (AUF) dans le cadre du programme de *Projets interuniversitaires de solidarité dans les Amériques (PRISA)* et par le Fonds en fiducie pour l'environnement du Nouveau-Brunswick. Nous remercions toutes les étudiantes, étudiants et collègues qui ont participé au projet.

## Bibliographie

- AghaKouchak A., Cheng L., Mazdiyasn O., Farahmand A., 2014: Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: Insights from the 2014 California drought. *Geophysical Research Letters*, **41**(24), 8847-8852.
- Beguiría S., Vicente-Serrano S. M., Reig F., Latorre, B., 2014: Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, **34**(10), 3001-3023.
- Cannon A. J., Sobie S. R., Murdock T. Q. 2015: Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate*, **28**(17), 6938-6959.
- Environnement et changement climatique Canada (2022a). Conditions météorologiques et climatiques passées. [https://climat.meteo.gc.ca/historical\\_data/search\\_historic\\_data\\_f.html](https://climat.meteo.gc.ca/historical_data/search_historic_data_f.html)
- Environnement et changement climatique Canada (2022b). Portail DonneesClimatiques.ca <https://donneesclimatiques.ca/telechargement/>
- Fortin, G. Dubreuil, V. 2020: A geostatistical approach to create a new climate types map at regional scale: a case study of New Brunswick, Canada. *Theoretical and Applied Climatology*, **139**(1-2), 323-334.
- Fortin G., Poirier C., Duhamel F., Germain D. 2019 : Risques d'inondation et vulnérabilité : l'exemple du bassin versant de la rivière Kennebecasis, Nouveau-Brunswick, Canada. *IdeAs. Idées d'Amériques*, **15**, en ligne [<https://journals.openedition.org/ideas/7999>].
- Gouvernement du Nouveau-Brunswick 2017 : Analyse de la tempête de verglas Nouveau-Brunswick, janvier 2017. Fredericton, 185 p. Disponible en ligne: [ice\\_storm\\_review-f.pdf](https://www2.gnb.ca/ice_storm_review-f.pdf) (gnb.ca)
- Heim R. R. Jr., 2002: A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83**, 1149-1166.
- Labudová L., Labuda M., Takáč J. 2017: Comparison of SPI and SPEI applicability for drought impact assessment on crop production in the Danubian Lowland and the East Slovakian Lowland. *Theoretical and Applied Climatology*, **128**(1-2), 491-506.
- McKee T. B., Doesken N. J., Kleist J. 1993: The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, **17**(22), 179-183.
- Mishra A. K., Singh V. P., 2010: A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, **391**(1-2), 202-216.
- Roy P., Huard D., 2016: *Future Climate Scenarios – Province of New Brunswick*. Montréal : Ouranos. 46 p. + Appendices
- Statistique Canada (2011) *Perspectives géographiques*. Disponible en ligne : Série « Perspective géographique », Recensement de 2011 - Province du Nouveau-Brunswick ([statcan.gc.ca](https://www25.statcan.gc.ca/n1/pub/92-629-x/2011001/article/00001-eng.htm)), page consultée le 31 janvier 2022.
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. 2010: A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate*, **23**(7), 1696-1718.
- Wilhite D. A., 2000: *Drought as a natural hazard: concepts and definitions*. In Wilhite, D.A. (Ed.) *Drought: A Global Assessment*, pp. 3–18 (London: Routledge, 2000).
- Zhao C., Brissette F., Chen, J., Martel J. L., 2020: Frequency change of future extreme summer meteorological and hydrological droughts over North America. *Journal of Hydrology*, **584**, 124316.

## HOW ABRUPT CHANGE IN SURFACE TEMPERATURE IMPACT WATER CYCLE OVER FRANCE ?

Léa LAURENT<sup>1,2</sup>, Albin ULLMANN<sup>1</sup>, Claude PERROT<sup>2</sup>, Xavier AUBOUY<sup>3</sup>, Thierry CASTEL<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CRC, Biogéosciences, UMR 6282 CNRS/Université de Bourgogne Franche-Comté, 6 boulevard Gabriel, 21000 Dijon, France & Domaine Assurance Récolte ([lea\\_laurent02@etu.u-bourgogne.fr](mailto:lea_laurent02@etu.u-bourgogne.fr), [albin.ullmann@u-bourgogne.fr](mailto:albin.ullmann@u-bourgogne.fr), [thierry.castel@u-bourgogne.fr](mailto:thierry.castel@u-bourgogne.fr))

<sup>2</sup> Domaine Assurance Récolte, Groupama Rhône-Alpes Auvergne, 24 rue Charles Durand, 18020 Bourges Cedex ([lealaurent@groupama-ra.fr](mailto:lealaurent@groupama-ra.fr), [cperrot@groupama-ra.fr](mailto:cperrot@groupama-ra.fr))

<sup>3</sup> Direction Études Tarification et Pilotage Secteur Risques Professionnels Agricoles, Groupama Mutuelle d'Assurance, 8 rue d'Astorg, 75008 Paris ([xavier.aubouy@groupama.com](mailto:xavier.aubouy@groupama.com))

**Abstract:** Along with the rapid warming tendency of the last decades over France, a shift in air temperature has been detected in 1987/88, delimiting two main climate periods from 1959 to 2019. Evidence of pre- and post-shift runoff seasonal differences suggest an impact of this abrupt warming on water cycle evolution. As yearly precipitation slightly evolve during the studied period, evapotranspiration appears to be one of the main drivers of the hydrological cycle evolution. Spring is marked by a strong increase in evaporative demand, followed in summer by a rise in water stress and a drying of soil water content. Besides temporal disparities, this local water cycle evolution depicts different spatial responses over France. Modifications of climate hazard linked to water cycle is expected to impact agro-climatic risks and crop yields.

**Keywords:** climate hazard, water balance, abrupt shift, warming

**Résumé:** La tendance rapide au réchauffement des dernières décennies en France montre une rupture dans les températures en 1987/88, délimitant deux périodes climatiques de 1959 à 2019. Les différences saisonnières dans les débits pré- et post-rupture suggèrent un impact de ce réchauffement abrupt sur l'évolution du cycle de l'eau. Les précipitations évoluent peu sur la période étudiée, l'évapotranspiration apparaît alors comme le moteur principal de l'évolution du cycle hydrologique. Le printemps est marqué par une hausse importante de la demande évaporative, suivie en été par une augmentation du stress hydrique et un assèchement du contenu en eau du sol. Outre cette diversité temporelle, cette évolution du cycle de l'eau local montre des réponses spatiales différentes sur le territoire français. Les modifications de l'aléa climatique lié au cycle de l'eau est susceptible d'impacter les risques agro-climatiques et les rendements.

**Mots-clés:** aléa climatique, bilan hydrique, rupture abrupte, réchauffement

### Introduction

Since 1980s in France, the warming trend intensifies strongly, consistent with climate simulations including the anthropogenic forcing (Terray & Boé, 2013). As a result of this warming tendency, an abrupt shift is detected (Brulebois et al., 2015, Reid et al., 2016) in maximum and minimum surface air temperature around 1987/1988, delimiting two main climate periods: 1959-1987 and 1988-2009. Comparison of runoff pre- and post-shift shows significant decrease between January and July. Variations in runoff response suggest local water cycle changes with a "soil memory effect" : negative soil moisture anomalies in spring lead to drier soils in summer, inducing lower runoff at the end of summer (Boé & Habets, 2014). Which climatic variables, i.e. precipitation and/or evapotranspiration, are responsible for this local water cycle evolution? Beyond that, what are the spatial and the temporal pattern changes of water balance? As there is no necessary correlation between temperature changes and long term water cycle and water balance variations (Senevitrané, 2012), it is necessary to highlight this subtle balance.

### 1. Material and methods

#### 1.1. Study area and data

The initial dataset used for this study comes from the Safran-Isba-Modcou model (SIM2) developed by Météo France (Soubeyroux et al., 2008). This 8-km-resolution reanalysis chain combines a meteorological



analysis system, a land surface scheme and a hydrogeological model. A validation of the whole SIM chain show that the model is quite robust both in space and time, and gives a good estimation of the water fluxes (Habets et al., 2008). The quality of the SIM chain for the representation of the actual climate at a fine resolution is a major asset for climate change impact studies (Soubeyroux et al., 2011, Vidal et al., 2010b). With an 8km spatial resolution at daily time step, SIM interpolated precipitation and computed PET (Potential EvapoTranspiration) and AET (Actual EvapoTranspiration) from 1959 to 2019 data are relevant to address the complexity of processes leading to changes in local water cycle (Soubeyroux et al., 2008). Based on the surface warming abrupt shift, these data allow us to quantify the evolution of climate hazard linked to local water cycle on a continuous time-scale and over the entire French territory.

### 1.2. Agro-climatic indices

Four variables among all SIM outputs are considered here: maximal 2m-temperature (Tmax), liquid precipitation (PRELIQ), potential and actual evapotranspiration (PET and AET). These daily variables are aggregated to monthly, seasonal and annual scale and are used to compute several types of indices providing informations on the evolution of water balance and hydrological cycle components.

Potential evapotranspiration (PET) (Doorenbos & Pruitt, 1977), considered as a climatic measurement, is introduced to study the evaporative demand of the atmosphere only affected by climatic parameters (Allen et al., 1998). When cultivating crops in fields, the agronomic management and environmental conditions can differ from standard conditions, leading to an actual evapotranspiration (AET) that may vary from PET. In the SIM chain, PET and AET are computed in Isba land surface scheme using methods and equations described in Noilhan & Planton (1989) and in Noilhan & Mahfouf (1996). Isba model as it is used in the SIM chain is driven by incoming radiation, precipitation, atmospheric pressure, air temperature and humidity, and wind speed at a reference level. Along with PET and AET, two indices depicting the evolution of the water balance are computed: the difference PET - AET informs on the soil water deficiency, the ratio AET/PET depicts the efficiency of the evapotranspiration process. The study of the evolution of those two indices allows to assess the impact of temperature increase on the evolution of water balance and crops hydric stress.

### 1.3. Statistical analysis

The four daily series of the variables of interest are aggregated to monthly, seasonal (winter: December-January-February (DJF); spring: March-April-May (MAM); summer: June-July-August (JJA); autumn: September-October-November (SON)) and annual time scale. Robust statistical tests such as change point detection and distribution comparison techniques are used to assess the characteristics of the evolution in precipitation, PET and AET due to temperature evolution.

As change-points detection techniques were used in Brulebois et al. (2015), they are used here to identify shifts in climate data series. Among all techniques available to study climatic shifts, Bayesian approaches appear to be adapted to the characterization of abrupt changes (Barry et Hartigan, 1993), especially in climatic records (Ruggieri, 2013). The method assesses posterior mean and change-point probability, and quantifies the level of confidence when change-points are identified as significant.

Significant differences in mean values for liquid precipitation and PET and AET before and after 1987/1988 temperature shift are detected with a robust Bayesian test (Kruschke, 2013). This estimation is based on the Bayesian posterior probability distribution, evaluating whether the probability of a difference is high enough to matter. By using the values of the 95% Highest Density Interval (HDI) to define the confidence interval, the Bayesian method provides information about the magnitude and significance of the difference between two distributions.

## 2. Results

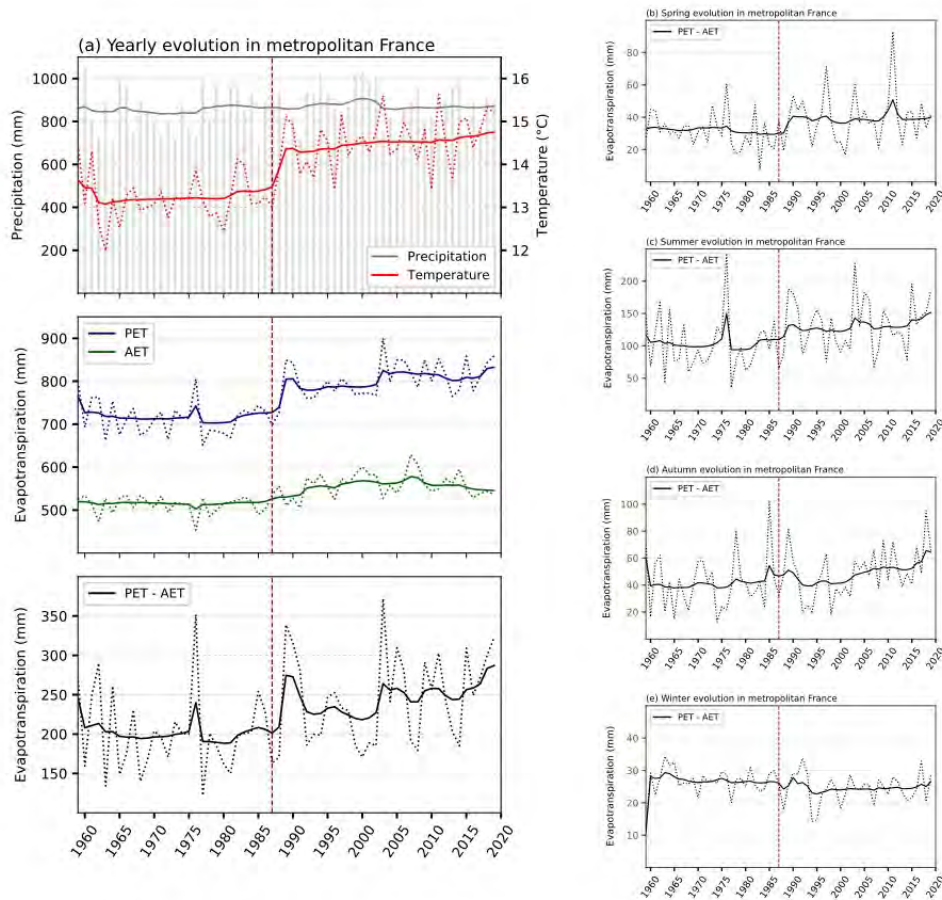
### 2.1. Detection of shift in temporal evolution of variables linked to the hydrological cycle

Temporal analysis of variables linked to the hydrological cycle depicts important shifts in PET and PET – AET at the end of the 1980s, following the evolution pattern of maximal temperature (Figure 1). Yearly, the

mean of the 1988-2019 period for PET is around 100mm higher than the mean of the 1959-1987 period (720mm) (Figure 1a). AET increases to a lesser extent than PET (+50mm in average between the two periods), resulting to an abrupt increase in PET – AET from 200mm before the 1987 shift up to 250mm after. As a result of a sharp increase in maximum air 2m-temperature in 1987/1988 over France, evaporative demand (PET) increases. Vegetation cover and soils are not able to respond to this rise at the annual scale (AET), revealing the large deficit of soil water content in the second period, implying an increase in hydric constraints (PET – AET). Yearly precipitation remain quite stable during the whole period, confirming the major influence of temperature on the evolution of water demand and soil water content.

Contrasted seasonal changes highlight a strong increase in evaporative demand in spring after 1987/1988 (Figure 1b), followed by a rise in hydric constraints. Our results show that water constraints strongly increase in summer (Figure 1c), along with the drying of soil water content. In autumn (Figure 1d) and winter (Figure 1e), water demand and hydric constraints increase more slightly or even decrease after the shift, which could be explain by the refill of soil water reservoirs with precipitation.

Since 2010 however, a new step of water constraints seems to be reach as shown with the increase of the PET – AET index values. Summer and even autumn depict the same pattern, pointing out the extension of the drying period of soils during the year.



**figure 1.** (a) Yearly and (b, c, d, e) seasonal evolution of variables linked to hydrological cycle between 1959 and 2019. PET: Potential EvapoTranspiration; AET: Actual EvapoTranspiration. Gray bars: SIM chains values; gray solid curves: Bayesian posterior mean values. Solid coloured curves: Bayesian posterior mean values; dashed coloured curves: SIM chains values. Vertical dashed line indicate 1987.

## 2.2. 1987/1988 shift: a turning point

The evolution of the means of the hydrological cycle variables before and after the 1987/1988 shift depicts annual and seasonal temporal disparities (Tables 1, 2 and 3). PET and AET means both increased significantly on the 1988-2019 period compared to the 1959-1987 period at the annual scale. This evolution is larger and more widespread for PET (+90mm, 45 % of SIM grid points) than for AET (+45mm, 9 % of stations), highlighting the rise in evaporative demand and in water stress after 1987/1988.

Spring experiences the highest percentage of stations recording a shift in 1986/1987/1988 for PET and AET (Tables 1 and 2), directly impacted by the brutal increase in air 2m-temperature in this season (Brulebois et al., 2015). Summer display the larger gap between PET and AET anomalies, rising from respectively 39mm and 8mm. Precipitation slightly increases yearly and in summer and autumn in the second period, but always to a lesser extent than PET (Table 3). These results point out an important increase in evaporative demand in spring, draining soil water content after 1987/1988 shift. Evaporative demand still rises in summer, resulting in an aggravation of water constraints between June and August, even extending into autumn. Autumn and winter are characterised by a refill of the reservoirs, although a rise in water constraints is depicted in the recent decade during autumn season.

**Table 1.** Percentage of SIM grid points recording a shift in 1986/1987/1988, anomalies ( $\Delta$ PET) and 95% confidence interval of the difference in the mean (95% HDI) at annual and seasonal scales, for potential evapotranspiration (PET).

Period	Potential evapotranspiration (PET)		
	% of stations	$\Delta$ PET (mm)	95 % HDI
year	45	+90.3*	89.8 – 90.9
DJF	31	+5.73*	5.64 – 5.81
MAM	69	+32.5*	32.4 – 32.7
JJA	16	+38.5*	38.2 – 38.8
SON	9	+13.6*	13.5 – 13.8

**Table 2.** Same as in Table 1 but for actual evapotranspiration (AET).

Period	Actual evapotranspiration (AET)		
	% of stations	$\Delta$ AET (mm)	95 % HDI
year	9	+45.7*	45.4 – 46.1
DJF	37	+8.29*	8.19 – 8.40
MAM	54	+23.2*	23.0 – 23.3
JJA	4	+7.69*	7.43 – 7.96
SON	4	+5.35*	5.25 – 5.46

**Table 3.** Same as in Table 1 but for liquid precipitation (PRELIQ).

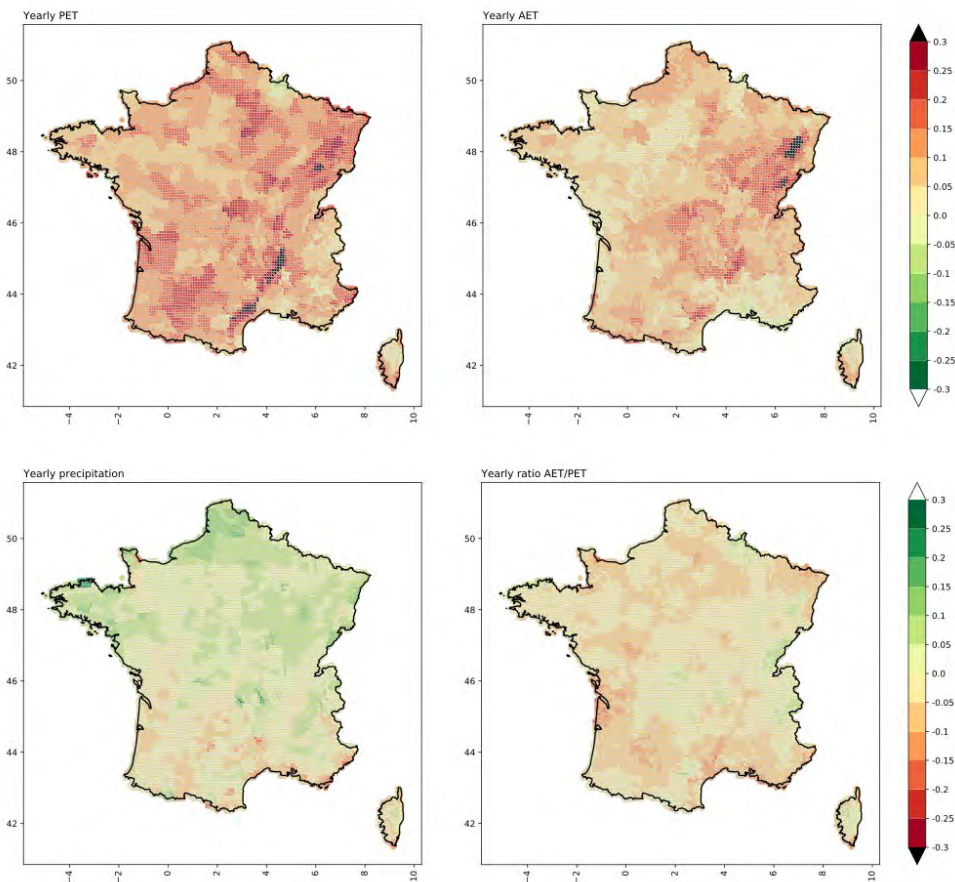
Period	Liquid precipitation (PRELIQ)		
	% of stations	$\Delta$ PRELIQ (mm)	95 % HDI
year	0	+23.2*	22.0 – 24.3
DJF	1	-3.07*	-3.60 – -2.56
MAM	3	+0.28	-0.12 – 0.69
JJA	1	+3.53*	3.08 – 3.99
SON	0	+10.4*	9.90 – 10.9

As for precipitation, the evolution of the variables linked to the hydrological cycle outlined in these results may hide geographical disparities.

### 2.3. Geographical response of water balance to temperature shift

Anomalies of the variables and indices linked to the hydrological cycle depict spatial diversity in their evolutions (Figure 2). PET is rising almost everywhere after the 1987/1988 air 2m-temperature shift, confirming the strong influence of the abrupt warming on the evolution of water demand. Vosges, Jura and Morvan massif, centre of France, Ardèche, Cévennes and Haut-Languedoc regional natural reserves and southwest of France experience the strongest increase in evaporative demand, the mean of the 1988-2019 period being around 30% higher than the mean of 1959-1987 period. AET is also almost increasing everywhere, with a 30% rise after the 1987/1988 shift in the Vosges, Jura and Massif Central. Even if some contrasted evolution are show at local scale, the south of France shows roughly a decrease of liquid precipitation whilst north part (above 45N°) shows a clear increase.

Consequently, means of the AET/PET index present contrasted territorial evolutions. On the extreme northeast, in Picardie, along the Rhône valley, on the mediterranean coast and southwest of France, PET increases more than AET, leading to a decrease of AET/PET indice of about 10 to 20% on the 1988-2019 period compared to the 1959-1987 period. On those regions, evaporative demand increases considerably after the abrupt rise in air temperature and soil dries up, intensifying hydric constraints on vegetation. Only on mountainous regions (Ardennes, Vosges, Jura, Alps and Massif Central), AET/PET ratio decreases slightly at the annual scale. On those areas, at the annual scale, hydric constraints are less impacted than previous regions by the 1987/1988 warming.



**figure 2.** Yearly relative anomalies of period 1988-2019 compared to period 1959-1987 for all variables linked to the hydrological cycle.

Seasonal evolutions of PET and AET depict various geographical changes (not shown), affecting the evolution of local hydric constraints in different ways throughout the seasons. In spring, AET/PET ratio decrease up to 20% over the entire France except mountainous regions, highlighting the beginning of the water stress increase. These hydric constraints extend on almost all the French territory in summer, AET/PET ratio decreasing up to more than 30% on some areas.

Most of the regions experiencing an important increase in hydric constraints after the 1987/1988 shift in air 2m-temperature at the annual and seasonal scales are large agricultural production areas.

## Conclusion

As expected, our results clearly point significant changes in the elements of the local water cycle. One interesting result shows that, at yearly scale, a large part of the territory has been able to follow the large increase in PET. However, subtle evolutions are shown seasonally and at local scale. Summer is particularly impacted by an increase in hydric stress, PET – AET being around 30mm higher after the 1987/1988 shift. Extreme northeast of France, Picardie, Rhône valley, Mediterranean coast and southwest of France are the most exposed territories, AET/PET ratio rising between 10 to 20% on the post-shift period at the annual scale. Furthermore, it appears that the last decade seems to experiment a new acceleration stage of the hydrological cycle that may affect water balance. This latter is of primary importance for the productivity of grass, crop and forest covers (Creed et al., 2015, Sergent et al., 2014). Since the 1990s in France, a trend towards stagnation of crop yields is observed, bread wheat being particularly affected (Schauberger et al., 2018). The evolution of climate hazard linked to the water cycle depicted in this study is thus expected to be



one of the main causes of crop yields evolution. Hence, consecutive agro-climatic risks evolution is of major concern for decision-makers, and may lead to adaptation process from managers.

## Bibliography

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. & Smith, M., 1998: *Crop evapotranspiration — guidelines for computing crop water requirements*. 333 pages.
- Barry, D. & Hartigan, J. A., 1993: A Bayesian Analysis for Change Point Problems. *Journal of the American Statistical Association* **88**, 309–319.
- Boé, J. & Habets, F., 2014: Multi-decadal river flow variations in France. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **18**, 691–708.
- Brulebois, E., Castel, T., Richard, Y., Chateau-Smith, C. & Amiotte-Suchet, P., 2015: Hydrological response to an abrupt shift in surface air temperature over France in 1987/88. *Journal of Hydrology* **531**, 892–901.
- Creed, I. F., Hwang, T., Lutz, B. & Way, D., 2015: Climate warming causes intensification of the hydrological cycle, resulting in changes to the vernal and autumnal windows in a northern temperate forest. *Hydrol. Process.* **29**, 3519–3534.
- Doorenbos, J. & Pruitt, W. O., 1977: *Guidelines for predicting crop water requirements*. (FAO).
- Habets, F. et al., 2008: The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* **113**.
- Kruschke, J. K., 2013: Bayesian estimation supersedes the t test. *Journal of Experimental Psychology: General* **142**, 573–603.
- Noilhan, J. & Mahfouf, J.-F., 1996: The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global and Planetary Change* **13**, 145–159.
- Noilhan, J. & Planton, S., 1989: A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models. *Monthly Weather Review* **117**, 536–549.
- Reid, P. C. et al., 2016: Global impacts of the 1980s regime shift. *Global Change Biology* **22**, 682–703.
- Ruggieri, E., 2013: A Bayesian approach to detecting change points in climatic records. *International Journal of Climatology* **33**, 520–528.
- Schauberger, B. et al., 2018: Yield trends, variability and stagnation analysis of major crops in France over more than a century. *Sci Rep* **8**, 16865.
- Seneviratne, S. I., 2012: Historical drought trends revisited. *Nature* **491**, 338–339.
- Sergent, A.-S., Rozenberg, P. & Bréda, 2014: N. Douglas-fir is vulnerable to exceptional and recurrent drought episodes and recovers less well on less fertile sites. *Annals of Forest Science* **71**, 697–708.
- Soubeyroux, J.-M. et al., 2008: Safran-Isba-Modcou (SIM) : Un outil pour le suivi hydrométéorologique opérationnel et les études. *Météorologie* **8**, 40.
- Soubeyroux, J.-M., Kitova, N., Blanchard, M. & Vidal, J. P., 2011: Impact du changement climatique sur la sécheresse et l'eau du sol en France : les résultats du projet CLIMSEC. *in 3èmes Rencontres de la recherche et du développement en Poitou-Charentes - Changement climatique : quelles perspectives pour l'agriculture régionale* 9–16.
- Terray, L. & Boé, J., 2013: Quantifying 21st-century France climate change and related uncertainties. *Comptes Rendus Geoscience* **345**, 136–149.
- Vidal, J.-P., Martin, E., Franchistéguy, L., Baillon, M. & Soubeyroux, J.-M., 2010b: A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology* **30**, 1627–1644.

## ANALYSIS OF TEMPERATURE CHANGES IN VALSESIA (NORTH WESTERN OF ITALY)

**Alessandro Pompeo<sup>1</sup>, Alice Baronetti<sup>2,3</sup>, Fiorella Acquotta<sup>1,3</sup>**

<sup>1</sup> *Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino, Italy (alessandro.pompeo@edu.unito.it)*

<sup>2</sup> *Institute of Geosciences and Earth Resources, National Research Council, 56124 Pisa, Italy (alice.baronetti@igg.cnr.it)*

<sup>3</sup> *Centro Interdipartimentale sui Rischi Naturali in Ambiente Montano e Collinare, University of Turin, Turin, Italy (fiorella.acquaotta@unito.it)*

**Abstract:** The aim of this study is to identify any possible temperature changes within the last 20 years in Valsesia, North Western of Italy. We considered four weather stations located from 470 m asl to 4554 m asl for the 2003–2021 period, 19 years. The daily series have on average 3% missing data corresponding to 208 days out of 6935 days. Among the available stations, we analysed the temperature series of Capanna Margherita, the weather station located at the highest altitude in Europe (4554m asl). The analysis showed an increase in temperature. The extreme maximum temperatures show an average increase of 0.012°C/year, while the extreme minimum temperature identify an average decrease of -0.035 °C/year.

**Keywords:** climate change; mountain region; maximum and minimum temperature.

**Résumé :** Analyse des changements de température en Valsesia (Nord-Ouest de l'Italie) : L'objectif de cette étude est d'identifier les éventuels changements de température au cours des 20 dernières années à Valsesia, dans le nord-ouest de l'Italie. Nous avons considéré 4 stations météorologiques situées entre 470 m asl et 4554 m asl pour la période 2003-2021, 19 ans. Les séries quotidiennes ont en moyenne 3% de données manquantes, ce qui correspond à 208 jours sur 6935 jours. Parmi les stations disponibles, nous avons analysé la série de températures de Capanna Margherita, la plus haute station météorologique d'Europe, 4554 m. L'analyse a montré une augmentation de la température. Les températures maximales extrêmes montrent une augmentation moyenne de 0,012 °C/an, tandis que les températures minimales extrêmes indiquent une diminution moyenne de -0,035 °C/an.

**Mots-clés :** changement climatique ; région de montagne ; température maximale et minimale

### Introduction

The Alpine Region is one of the most sensitive environments to climate change (Knoche 2011). Since 1996, the IPCC, International Panel of Climate Change, has underlined the need to understand and predict the effects of climate change in mountainous regions through monitoring, experimental studies and modelling. A change in the alpine climate regimes can, in fact, influence winter precipitation and the persistence of the snow cover can lead to impacts of considerable magnitude (Ronchi and Loglisci 2008) on river systems and on the socio-economic structures of the populations that live in the mountains and valleys (Hill Clarvis et al. 2013). The positive trend observed for winter temperatures is closely linked to the reduced snow cover that has been observed in recent years in the Alps (Serquet et al. 2013).

Quantifying rates of climate change in mountain regions is of considerable interest, not least because mountains are viewed as climate “hotspots” where change can anticipate or amplify what is occurring elsewhere. Accelerating mountain climate change has extensive environmental impacts, including depletion of snow reserves, critical for the world's water supply. Diaz and Bradley (1997) investigated elevational differences in long-term temperature trends, using high-elevation station records from various locations over the world, and found that the warming of the surface temperature is stronger for high-altitude sites. In more recent studies, it has been observed that the greatest temperature changes have been recorded in the cold season, when the anomalies of the daily maximum can reach 20 °C or more (e.g., December 17<sup>th</sup> 2005, Fratianni et al. 2009), compared to the increment of 10 °C observed for the summer heat waves.

The aim of this study is to identify any possible temperature changes within the last 20 years in Valsesia, North Western of Italy. In this area, snow has been abundant since the early 1980s, but due to poor winter precipitation a significant decrease in the snow pack thickness was recorded in the last two decades

(Fратиanni et al., 2014). The positive trend observed for winter temperatures is closely linked to the reduced snow cover that has been observed in recent years. Recent study on the Alps showed a correlation between the variation in temperature and altitude (Willibald et al. 2021). The warming of the surface temperature is strongest for high-altitude sites. In particular, they observed that the greatest temperature change was recorded in the cold season.

## 1. Data and Method

### 1.1. Study area

Valsesia is a group of valleys in the North-West of Italy and it lays in the southern slope of Monte Rosa on the Swiss border, reaching its highest point at Punta Gnifetti (4,559m). In the upper Valsesia, economic activities are mostly based on tourism linked to the mountains, in fact it takes part of the Monterosa Ski, one of the largest ski areas in Europe. The climate of Valsesia can vary greatly in relation to altitude. One of the most known conditions is the abundance of rainfall. The lower part of the valley is humid and rainy and the annual rainfall can be around 2,000 mm whereas, in the upper part of the territory, the phenomenon tends to decrease and to be around 1,200 mm per year. The mountain altimetry favours a good snowfall, usually more abundant in January. Thermal values can be extreme: in winter there are very low temperatures (even lower than  $-10^{\circ}\text{C}$ ) while summer can be hot and sultry.

### 1.1. Meteorological data

The climate analysis was carried out on four weather stations located in Valsesia, north-western Italy (Table 1; Figure 1). Data was collected by ARPA, (Regional Agency for the Protection of the Environment) Piedmont from 2003 to 2021. In particular, we analysed daily maximum ( $T_x$ ) and minimum ( $T_n$ ) temperature.

Manual quality control (QC) was carried out using the ClimPACT2 software (Zhang and Feng, 2004, Alexander and Herold, 2016). The programme highlights any temperature values that are obviously wrong, such as maximum temperature lower than minimum, and creates plots that allow us to visualize the behaviour of the daily series and missing data (Table 1).

Monthly indices and monthly variables are calculated if no more than 3 days are missing in a month, while annual values are calculated if no more than 15 days are missing in a year. No annual value will be calculated if any one month's data are missing (Hyndman and Fan, 1996).

The trends, of meteorological variables,  $T_x$  and  $T_n$ , and climate indices have been calculated for the monthly and annual values. The trends were computed using the TheilSen approach (TSA) (Sen 1968; Zhang et al. 2000; Toreti and Desiato 2008). The trend is removed from the series if it is significant and the autocorrelation is computed. This process is continued until the differences in the estimates of the slope and the AR (1) (autoregressive model) in two consecutive iterations are smaller than 1 %. The Mann-Kendall test for the trend is then run on the resulting time series to compute the level of significance, 10% (Mann, 1945). TSA is preferred to the linear least square that is more vulnerable to gross error of data and has a confidential interval more sensitive to the non-normality of the distributions.

The trends of meteorological variables ( $T_x$  and  $T_n$ ) and climate indices have been calculated for the monthly values. The trends were computed using the Mann-Kendall test with a level of significance equal to 10% (Mann, 1945).

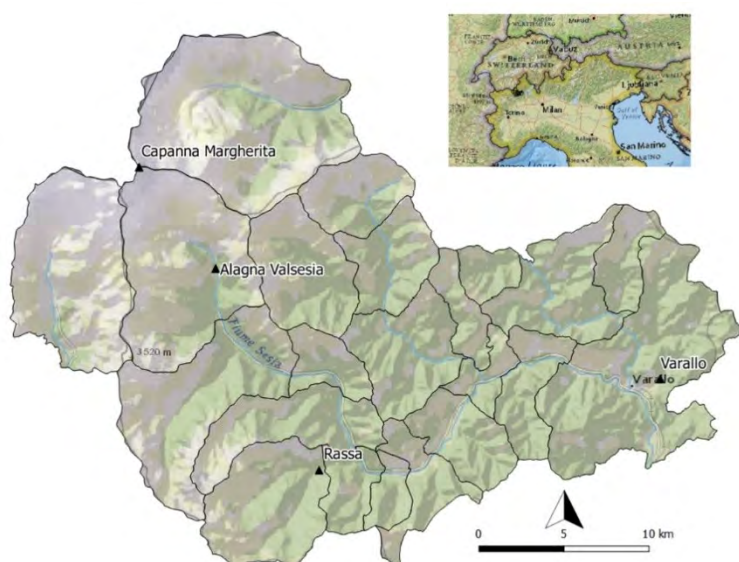
Eight temperature indices (Table 2) are selected from the list of 27 core climate extreme indices defined by the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI). For percentile indices (e.g., the number of days exceeding the 90<sup>th</sup> or 10<sup>th</sup> percentile of minimum temperature or maximum temperature), the methodology uses bootstrapping for calculating the base period values so there is no discontinuity in the indices time series at the beginning or end of the base period (Zhang et al. 2011). The selected base period for the percentile indices was 2007–2016.

Subsequently the frequency (F), number (N) and duration (D) of heat waves (HWs) (Table 2, Fortin et al. 2016) for the investigated period were calculated. A HW for minimum temperature and maximum temperature was defined as any period between May and September with three or more days during which  $T_n$  was  $>90^{\text{th}}$  percentile of  $T_n$  and  $T_x$  was  $>90^{\text{th}}$  percentile of  $T_x$ . Also, the linear regression of the mean HW

variables were then calculated. Moreover, to highlight variations in extreme events the maximum number, frequency and duration of HWs (calculated on maximum and minimum temperature) recorded in one year were investigated (Table 5).

**Table 1.** Weather stations analysed

Station	Altitude (m asl)	Latitude N (WGS84)	Longitude E (WGS84)	Daily gaps (%)
Varallo	490	454910	081626	0.4
Rassa	925	454610	080059	1.0
Alagna	1,347	455288	075610	6.7
Capanna Margherita	4,554	455538	075237	5.1



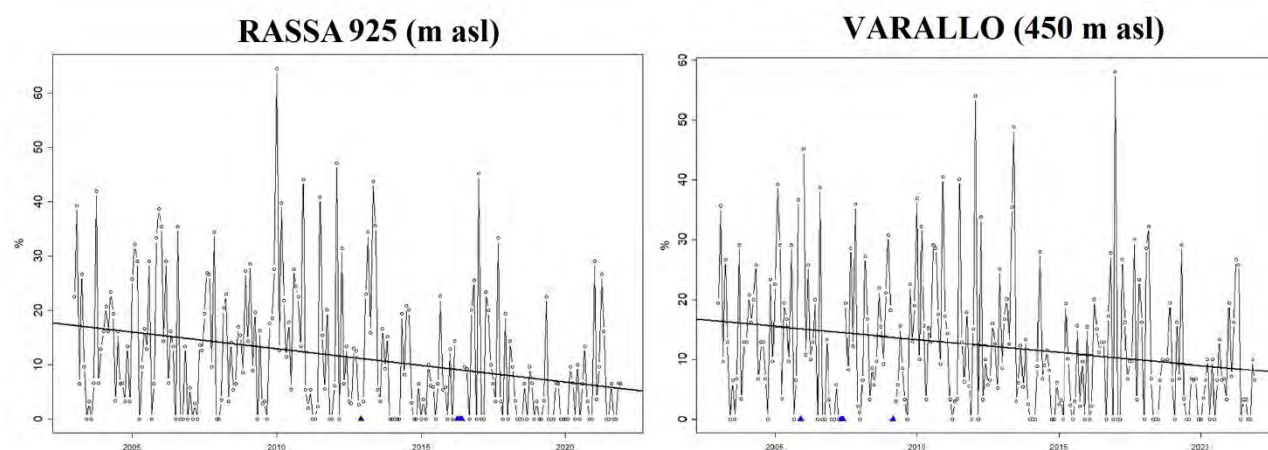
**figure 1:** Map of Italy, and location of the weather stations in Valsesia (North-western Italy)

**Table 2.** Climate extreme indices selected by the Expert Team on Climate Change Detection and Indices (ETCCDI)

Indices	Definition	Units
<b>Tx90p</b>	Percentage of days when TX > 90 <sup>th</sup> percentile	(%)
<b>Tn10p</b>	Percentage of days when TN < 10 <sup>th</sup> percentile	(%)
<b>Tx90.HWN</b>	Heatwave number as define by the 90 <sup>th</sup> percentile of Tx	Events
<b>Tx90.HWD</b>	Heatwave duration as define by the 90 <sup>th</sup> percentile of Tx	Days
<b>Tx90.HWF</b>	Heatwave frequency as define by the 90 <sup>th</sup> percentile of Tx	Days
<b>Tn90.HWN</b>	Heatwave number as define by the 90 <sup>th</sup> percentile of Tn	Events
<b>Tn90.HWD</b>	Heatwave duration as define by the 90 <sup>th</sup> percentile of Tn	Days
<b>Tn90.HWF</b>	Heatwave frequency as define by the 90 <sup>th</sup> percentile of Tn	Days

## 2 Results

We estimated the trends of climate indices for maximum and minimum temperature on Valsesia in the last 19 years. The analysis highlights a significant warming tendency in most of the locations for minimum temperature (Table 3). In fact the Tn10p index shows decreasing trends for all the stations. Only in Capanna Margherita (4554 m asl) a non-significant decreasing tendency has been estimated. Rassa (925 m asl) and Varallo (490 m asl) stations recorded the highest trends, respectively -0.054 and -0.036 % of days (Figure 2).

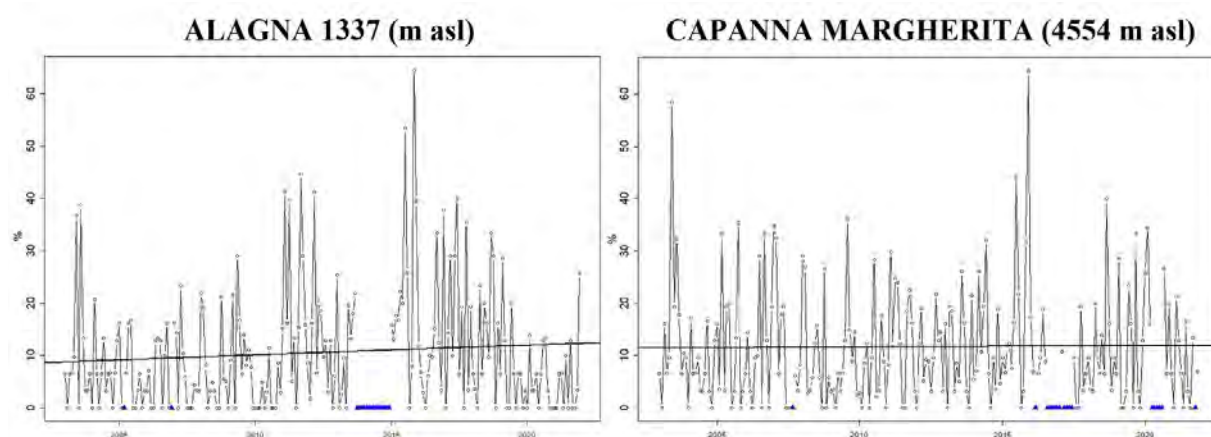


**figure 2.** Left panel percentage of days when TN < 10th percentile calculated in Rassa from 2003 to 2021; Right panel percentage of days when TN < 10th percentile calculated in Varallo from 2003 to 2021. The blue triangles represent the gaps in the series.

**Table 3.** Annual estimated trends, from 2003 to 2021, for climate indices Tx90p, Tn10p. In bold the statistical significant trends.

Station	Altitude (m asl)	Tx90p (%)	Tn10p (%)
Varallo	490	0.019	<b>-0.036</b>
Rassa	925	0.005	<b>-0.054</b>
Alagna	1,347	0.019	<b>-0.029</b>
Capanna Margherita	4,554	0.003	-0.020

The increase of maximum temperature is also highlighted by the climate index Tx90p. For all stations the trends increased but are not statistically significant (Table 3). The maximum slope (0.019 % of days) is calculated in Varallo (490 m asl) and Alagna (1337 m asl, Figure 3 left). In Rassa (925 m asl) and Capanna Margherita (4554 m asl) the slope is near to zero (Figure 3 right). Also, in all stations the maximum values of Tx90p were observed in 2015 with an average of 60% of days classified as hot. Marchina et al. (2017) figured out that 2015 was the warmest year since 1880 in northern Italy. This has brought severe drought events since Autumn 2015 influencing the water balance of the affected areas.



**figure 3.** Left percentage of days when TX > 90th percentile calculated in Alagna from 2003 to 2021; Right percentage of days when TX > 90th percentile calculated in Capanna Margherita from 2003 to 2021. The blue triangles represent the gaps in the series.

The heat wave indices show positive and non-statistically significant trends, highlighting an increase of heat waves in number, in duration and in frequency in the entire study area. Moreover, a negative and close to zero trend is calculated in Capanna Margherita (4554 m asl) for the Tx90HWD trend (Table 4). The higher values of heat waves are calculated for Tx90HWF and Tn90HWF followed by Tx90HWD and Tn90HWD. For



Tx90HWN and Tn90HWN the values of the slopes are near to zero, highlighting an absence of trends. This behaviour of HW indices shows that in this area the duration of heat waves increased.

**Table 4.** The trends of heat wave indices. The trends are not statistically significant. In bold the maximum value of the slope.

Station	Tx90.HWN	Tx90.HWD	Tx90.HWF	Tn90.HWN	Tn90.HWD	Tn90.HWF
Varallo	<b>0.07</b>	<b>0.18</b>	<b>0.43</b>	0.04	<b>0.14</b>	<b>0.31</b>
Rassa	0.04	0.15	0.3	0.02	0.12	0.19
Alagna	0.04	0.04	0.17	0.04	0.12	0.22
Capanna Margherita	<b>0.07</b>	-0.02	0.29	<b>0.05</b>	0.03	0.26

The investigation of the extreme heat waves shows that for the greatest number of stations the maximum number, frequency and duration of HWs were recorded in 2015. It turns out that for maximum temperature (Tx90), in 2015, the maximum duration was recorded in the two stations located at low elevations (Rassa and Varallo) with 12 and 15 consecutive days. While at high altitudes the duration is 8 days. For the frequency the highest values were detected for Varallo and Alagna with 21 and 29 days respectively. In terms of the number of heat waves the study figured out that Alagna only detected the highest annual number with 6 events (Table 5). While for the other stations 2016 and 2019 are the years with the greatest number of HWs.

It is also important to note that in 2015, for minimum temperature (Tn90), only the stations located at high elevations (Alagna and Capanna Margherita) recorded the maximum durations (8 days), frequencies (25 and 17 days respectively) and number (6 and 4 events respectively) of heat waves (Table 5).

**Table 5.** Analysis of the extreme heat waves for the investigated period. In the table the maximum duration, frequency and number of heat waves and the recorded years were reported. In bold the most recurring year.

	HWD-Tn90		HWD-Tx90		HWF-Tn90		HWF-Tx90		HWN-Tn90		HWN-Tx90	
	Years	Days	Years	Days	Years	Days	Years	Days	Years	Numbers	Years	Numbers
Alagna	<b>2015, 2016</b>	8	<b>2015</b>	8	<b>2015</b>	25	<b>2015</b>	20	<b>2015</b>	6	<b>2015, 2016</b>	6
Capanna Margherita	2005	9	<b>2015</b>	8	<b>2015</b>	17	<b>2015, 2019</b>	17	<b>2015</b>	4	2019	5
Rassa	2014,2020	9	<b>2015</b>	15	2006	27	<b>2015</b>	17	2006	7	2006,2011,2016,2018	3
Varallo	2014, 2018	11	<b>2015</b>	12	2014	16	<b>2015</b>	21	2013, 2020	4	2016,2018	5

## Conclusion

This paper presents a detailed analysis of the climatic variations occurred in Valsesia, in the north-west of Piedmont, Italy. The time period from 2003 to 2021 has been analysed, considering in the analysis only standard temperature indices, (Tx90p and Tn90p) and then analysing the heat waves, evaluating their duration, frequency and number for both maximum and minimum temperature.

The study figured out a clear climatic change in the study area, and this is marked for the minimum temperature. In particular for the percentage of days with minimum temperature below the 10th percentile, significant and negative trends were observed for the stations of Alagna, Rassa and Varallo. This has demonstrated the hypothesis of a more rapid warming of minimum temperature in Piedmont (Acquaotta et al. 2015).

Moreover, the analysis of heat waves shows that, as observed by Marchina et al. 2017 for the Po Valley, 2015 was an extremely hot year even in a mountainous area as Valsesia. According to the previous results, the maximum values for duration, frequency and number of heat waves was observed for minimum temperature.

**Acknowledgement:** The research was carried out within the RigeneRosa, awareness of climate change and enhancement of high mountain environments, project.

## Bibliography

- Acquaotta, F., Fratianni, S. and Garzena, D., 2015: *Temperature changes in the North-Western Italian Alps from 1961 to 2010. Theoretical and Applied Climatology*, **122**(3-4), 619-634.
- Alexander, L. and Herold, N., 2016: *ClimPACT2 indices and software (R software package). World Climate Data and Monitoring Programme User Manual*, 46p.
- Diaz, H.F. and Bradley, R.S., 1997: *Temperature variations during the last century at high elevation sites. Climatic Change*, **36**:253–279.
- Fortin, G., Acquaotta F. and Fratianni, S., 2016: *The evolution of temperature extremes in the Gaspé Peninsula, Quebec, Canada (1974–2013). Theoretical and Applied Climatology*, 1–10.
- Fratianni, S., Cassardo, C. and Cremonini, R., 2009: *Climatic characterization of foehn episodes in Piedmont, Italy. Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, **32**:15–22.
- Fratianni, S., Terzago, S., Acquaotta, F., Faletto, M., Garzena, D., Prola, M. C. and Barbero, S., 2014: *How snow and its physical properties change in a changing climate alpine context? In: Lollino G, Manconi A, Clague J, Shan W, Chiarle M Engineering geology for society and territory*, 1:57–60
- Hill Clarvis M., Fatichi S., Allan A., Fuhrer, F., Stoffel, M., Romerio, F., Gaudard, L., Burlando, P., Beniston M., Xoplaki, E. and Toreti A., 2013: *Governing and managing water resources under changing hydro-climatic contexts: the case of the upper Rhone basin. Environmental Science and Pollution Research*, **43**:56–67.
- Hyndman, R.J., and Y. Fan, 1996: *Sample quantiles in statistical packages. The American Statistician*, 50, 361-367
- Knoche, HR., 2011: *Ripercussioni dei cambiamenti climatici nella dorsale alpina settentrionale. Min. sloveno dell'Ambiente e della Pianificazione del Territorio, Segretariato permanente della Convenzione delle Alpi, ARGE ALP. Segnali Alpini*, **6**:9–14.
- Mann, H.B., 1945: *Nonparametric tests against trend, Econometrica*, **13**: 245–259.
- Marchina, C., Natali, C., Fazzini, M., Fusetti, M., Tassinari, R. and Bianchini, G., 2017: *Extremely dry and warm conditions in northern Italy during the year 2015: effects on the Po River water. Rendiconti Lincei*, 28(2), 281–290.
- Ronchi, C. and Loglisci, N., 2008: *Il clima tra passato, presente e futuro. AINEVA*, **63**:11–19
- Sen, P. K. 1968: *Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. J Am Stat Assoc* **63**(324):1379–1389
- Serquet, G., Marty, C. and Rebetz, M., 2013: *Monthly trends and the corresponding altitudinal shift in the snowfall/precipitation day ration. Theoretical Applied Climatology*, **114**:437–444.
- Toreti, A and Desiato, F., 2008: *Changes in temperature extremes over Italy in the last 44 years. International Journal of Climatology*, **28**:733–745.
- Willibald, F., Kotlarski, S., Ebner, P. P., Bavay, M., Marty, C., Trentini, F. V., Ludwig, R. and Grêt-Regamey, A., 2021: *Vulnerability of ski tourism towards internal climate variability and climate change in the Swiss Alps. Science of the Total Environment*, **784**:147054.
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G.C., Jones, P., Klein Tank, K., Peterson T. C., Trewin, B. and Zwiers, F.W., 2011: *Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, **2**(6): 851-870.
- Zhang, X., Vincent, L. A., Hogg, W. D., Niitsoo, A., 2000: *Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century. Atmosphere-Ocean* **38**:395–429

## CIRCULATION ATMOSPHÉRIQUE ET TEMPS NEIGEUX DANS LES ALPES DU SUD

Guillaume GUERIN <sup>1</sup>, Nicolas MARTIN <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Nice Sophia-Antipolis, France - UMR 7300 ESPACE

Email : [guillaume.guerin@etu.univ-cotedazur.fr](mailto:guillaume.guerin@etu.univ-cotedazur.fr)

<sup>2</sup> Université de Nice Sophia-Antipolis, France - UMR 7300 ESPACE

Email : [Nicolas.MARTIN@univ-cotedazur.fr](mailto:Nicolas.MARTIN@univ-cotedazur.fr)

**Résumé** : L'étude a pour objectif de révéler la fréquence passée (1972-2019) des précipitations solides pour le poste d'Isola 2000, situé dans les Alpes du Sud à 1912 m d'altitude. Les résultats montrent une hausse de leur occurrence lors des 25 dernières années. Le second d'objectif est de caractériser les mécanismes de formation des chutes de neige, de les cartographier puis de les expliquer, à partir du croisement entre les données d'observations du poste et les réanalyses ERA-INTERIM. Au total, six variables atmosphériques corrélées aux chutes de neige ont été identifiées, ainsi que deux types de circulation atmosphérique : les circulations d'ouest cyclonique, produisant les temps à neige faible et moyen (chutes < 21 cm) ; les circulations de sud (flux de sud-ouest) avec une dépression axée sur l'Islande et un talweg dépressionnaire sur l'Europe occidentale, qui entraînent les temps à fortes chutes de neige (chutes > 21 cm).

**Mots-Clés** : Circulation atmosphérique, chute de neige, réanalyses, cartographie.

### Introduction

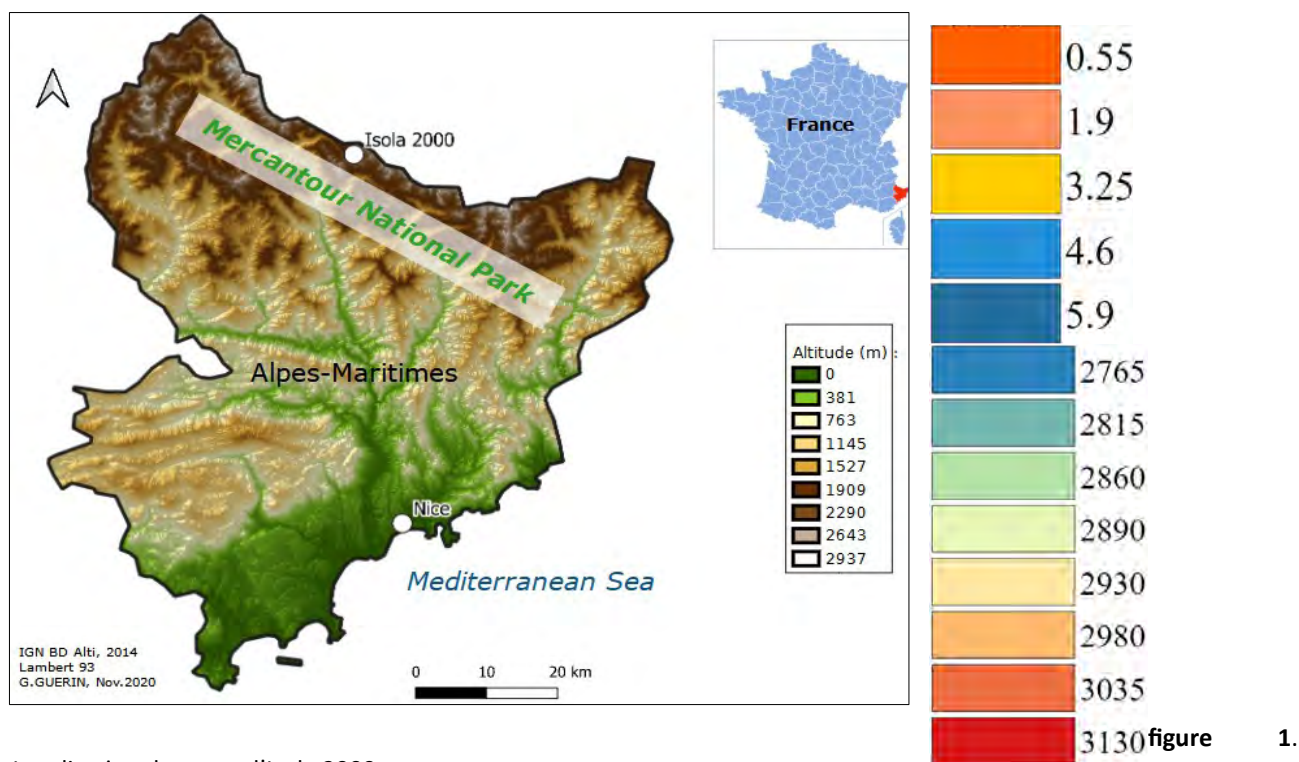
Les Alpes du Sud, à l'instar de l'ensemble de la planète, connaissent une hausse de la température de l'air depuis l'époque pré-industrielle (GREC-SUD, 2018 ; volet 1 du 6<sup>e</sup> rapport du GIEC, 2021). Les projections climatiques pour le milieu et la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, indiquent une poursuite du réchauffement à l'œuvre pour les scénarios à faibles émissions de GES et une accentuation du réchauffement pour les scénarios à fortes émissions de GES, avec un impact certain sur la cryosphère. Or, l'enneigement des massifs joue un rôle important pour les écosystèmes et les communautés installées en montagne, que ce soit pour la disponibilité de la ressource en eau, ou bien encore à travers le tourisme hivernal et la pratique des sports d'hiver (Barbier, 1982 ; François et al., 2016 ; Joye, 2019). Également, si le manteau neigeux diminue à l'avenir, l'albédo terrestre devrait augmenter, avec comme conséquence une amplification du forçage initial dans une boucle de rétroaction positive inquiétante pour le climat futur (Picard et al., 2015).

L'étude s'intéresse aux précipitations solides et se base sur le fait qu'un évènement météorologique de méso et micro-échelle de ce type est le résultat d'un ensemble de processus se produisant parfois à des milliers de kilomètres et sur une surface géographique bien plus vaste (Planchon et al., 2015). En ce sens, la circulation atmosphérique d'échelle synoptique, en redistribuant au niveau planétaire le surplus énergétique provenant de l'intensification de l'effet de serre (plus spécifiquement de l'infrarouge émis vers l'espace) est décrite comme le moteur du temps, qu'il a fait et qu'il fera sur nos territoires (Pédelaborde, 1956 ; Peña et Schulte, 2019). Les chutes de neige, sont alors la résultante de l'action d'un type de circulation, qui agit sur la météo locale en synergie avec le substratum, la topographie, etc. (Planchon et al., 2015). En identifiant, le(s) type(s) de circulation propre au type de temps étudié pour le passé, il peut alors être possible de connaître son évolution future. Ce point est d'autant plus intéressant, puisqu'il est admis que les modèles régionaux comportent des biais sur la représentation de certaines variables sensibles du temps, comme les précipitations, et sont donc incapables de donner une projection précise à fine échelle (Barrier et al., 2014). Ils sont en revanche relativement robustes sur les variables typiques de la circulation (pression de surface, altitude du géopotential 500 hPa etc.) (Boé et Terray, 2008).

Les travaux s'appuient sur la plus longue série nivologique quotidienne d'observations du département des Alpes-Maritimes. Le premier objectif est l'analyse de l'occurrence des précipitations solides depuis 1972, afin de voir comment elles ont évolué à Isola 2000. Le second objectif est d'identifier puis d'expliquer les principaux mécanismes de formation de la neige pour la zone d'intérêt, en s'intéressant aux paramètres climatiques corrélés aux précipitations solides. Ces derniers seront cartographiés et permettront de mieux comprendre les mécanismes de circulations atmosphériques propres à plusieurs types de temps à neige.

Cette étape finale se fera par le croisement entre les données d'observations et les réanalyses ERA-INTERIM de l'ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts).

## 1. Données et méthode



Localisation du poste d'Isola 2000.

### 1.1. Zone d'étude et données

Les données d'observations des chutes de neige quotidiennes proviennent du poste Météo-France d'Isola 2000 (44.1892N ; 7.1496E), situé dans les Alpes du Sud, aux portes du Parc national du Mercantour, dans le département français des Alpes-Maritimes (cf. Figure 1). Le site dispose d'un contexte topographique particulier. En effet, il se trouve à une distance géodésique de 40 km de la mer Méditerranée. L'influence de ce réservoir d'eau tiède tout au long de l'année (la température de l'eau descend rarement sous les 12 °C même en hiver) sur les terres bordières, constitue un fait d'évidence, avec comme conséquence les précipitations record enregistrées dans la région, lors des épisodes méditerranéens (Trzpit, 1980 ; Kyselý et al., 2012 ; Piras, 2016, Chochon et al., 2021 ; Carrega et al., 2021).

L'étude est rendue possible par le croisement entre les observations du poste Météo-France et les réanalyses ERA-INTERIM de l'ECMWF, utilisées ici pour caractériser les paramètres atmosphériques intervenant dans les chutes de neige (non mesurés par le poste météorologique) et qui permettent par la suite d'identifier, puis de cartographier les types de circulation propres aux précipitations solides, à l'échelle de l'espace euro-atlantique. Les réanalyses ERA-INTERIM sont situées à l'interface entre l'observation et la modélisation (Nogueira, 2020). Elles sont exploitables à partir de 1979 et disposent d'une résolution de 79 km. Ainsi, pour une partie des traitements à venir, la maille d'extraction des paramètres atmosphériques est celle située au-dessus du poste météorologique d'Isola 2000. Bien qu'étant assez fidèle au contexte topographique et climatique du lieu, le pixel d'extraction représente l'état moyen de l'atmosphère pour une superficie de 6241 km<sup>2</sup>, ce qui ne reflète pas entièrement les paramètres du site d'étude. Il est néanmoins l'indicateur le plus proche spatialement, et il produit une série complète de données quotidiennes, pour un large choix de variables atmosphériques, à différents niveaux d'altitude.

## 1.2. Méthodes

Les classes de chutes de neige sont réalisées à partir des observations du poste de mesure, en classant les jours selon la hauteur précipitée et en les discrétisant en fonction des ruptures de pente naturelles observables dans la distribution statistique. Ces ruptures composent alors les seuils des classes des types de temps à neige. La cartographie permettant la compréhension du mécanisme de formation des précipitations solides et l'identification des circulations propices aux chutes, est basée sur le processus suivant. Tout d'abord il s'agit de tester les variables atmosphériques ERA-INTERIM possiblement corrélées aux chutes de neige : Pression atmosphérique de surface ; Altitude du géopotential 500, 700, 850 hPa ; Ascendance verticale 700 et 850 hPa ; Température 700 et 850 hPa ; Composante U et V 700 et 850 hPa ; Humidité spécifique 700 et 850 hPa, soit au total 7 variables, avec 14 combinaisons de variable possibles en fonction du niveau de pression. S'ensuit la récupération des 28 combinaisons de variables sur le site de l'ECMWF. Les données en sortie sont des grilles au format NETCDF, centrées sur l'espace euro-atlantique. Ensuite, il s'agit d'extraire les valeurs quotidiennes des 28 combinaisons de variable pour le point de grille le plus proche spatialement d'Isola 2000, puis d'effectuer une analyse de corrélation entre les 28 combinaisons et les chutes de neige quotidiennes. Les variables avec les meilleurs coefficients de corrélation sont par la suite cartographiées selon la moyenne de toutes les situations quotidiennes constituant les 4 classes de types de temps à neige. Les circulations obtenues à la fin du processus sont alors dites « discriminantes », puisqu'elles sont identifiées en fonction de la variable d'intérêt.

## 2. Résultats

### 2.1. Occurrence des chutes de neige quotidiennes

Le nombre total de jours avec précipitations solides relevées par le poste d'Isola 2000, de janvier à mars, entre 1972 et 2019, s'élève à 1006. La discrétisation en 4 classes de hauteur par l'observation des ruptures de pente naturelles de la distribution statistique, permet d'obtenir quatre types de temps neigeux : de 1 à 5 cm (temps à faible chute de neige) ; de 6 à 20 cm (temps à moyenne chute de neige) ; de 21 à 40 cm (temps à forte chute de neige) et de 41 à 93 cm (temps à très forte chute de neige). La figure 3 illustre la moyenne mobile sur 5 ans du nombre de chutes journalières par classe et par an, pour la même plage d'étude. La courbe des chutes journalières totales (courbe noire) est marquée par une franche diminution jusqu'au début des années 90, passant de 25 chutes par an en 1972 à moins de 20 en 1993. Elle se stabilise autour de 20 chutes par an jusqu'en 2006, puis connaît un accroissement important, la faisant passer au-delà de 35 chutes entre 2006 et 2018. Ainsi, la tendance sur les 25 dernières années est à une augmentation de la fréquence d'apparition des précipitations neigeuses toutes classes confondues à Isola 2000.

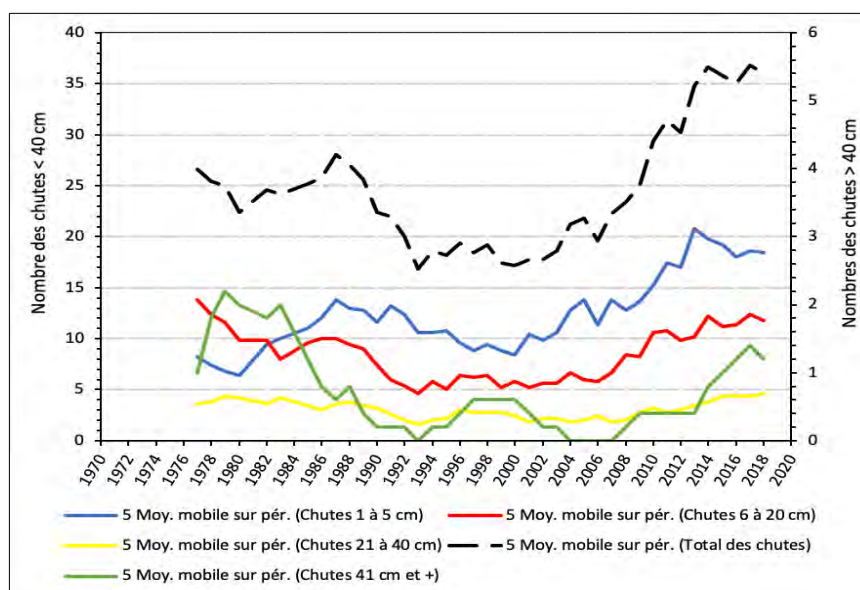


figure 2. Évolution du nombre de chutes de neige quotidiennes par classe et par an à Isola 2000 entre 1972 et 2019,

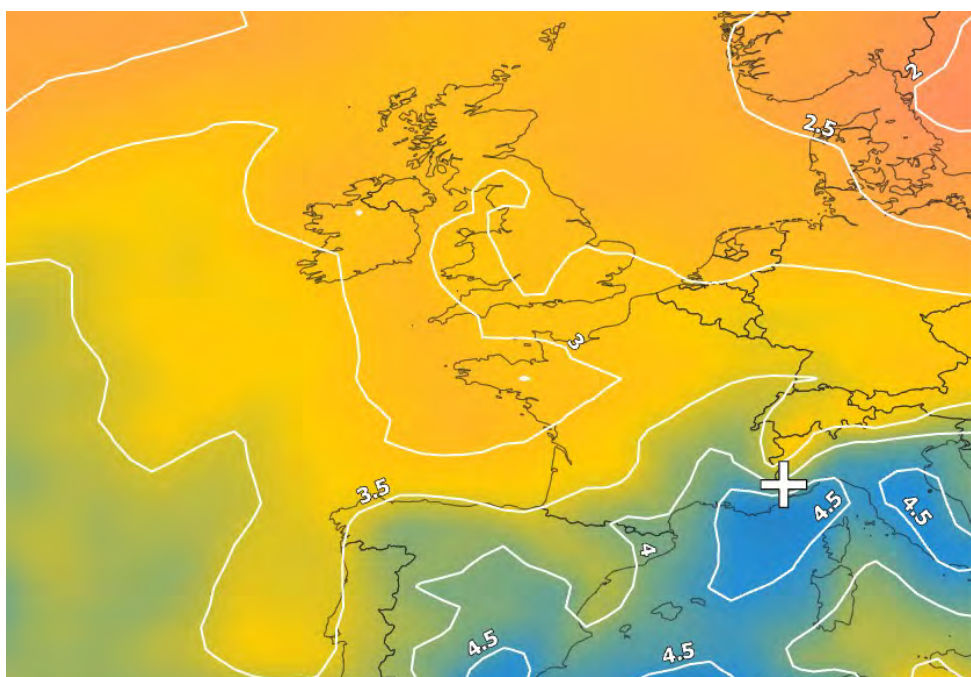


pour les mois de janvier à mars. Pour les chutes supérieures à 40 cm les chiffres se lisent sur l'axe des ordonnées à droite alors que pour les 3 autres classes l'axe de référence est à gauche (Source : METEO-FRANCE).

## 2.2. Cartographie de la circulation atmosphérique en fonction des types de temps à neige

Le croisement entre les chutes quotidiennes d'Isola 2000 et les 28 combinaisons des réanalyses ERA-INTERIM, met en évidence six covariations dont les coefficients ( $r$ ) sont intéressants : la vitesse verticale de la masse d'air à 700 hPa ( $r = -0.35$ ) ; l'humidité spécifique à 850 hPa ( $r = 0.28$ ) ; la température à 850 hPa ( $r = -0.23$ ) ; l'altitude du géopotential 700 hPa ( $r = -0.31$ ) ; la composante V à 700 hPa ( $r = 0.28$ ), la pression de surface ( $r = -0.25$ ). Ces 6 paramètres, tirés des grilles NETCDF des réanalyses ERA-INTERIM, ont été moyennés en fonction des quatre types de temps à neige, pour obtenir des cartes à l'échelle de l'espace euro-atlantique et mettre en exergue les circulations propices à ce type d'événement.

Tout d'abord, les chutes de neige ont besoin pour se produire de matière première assimilée à de la vapeur d'eau (Martin et Carrega, 2011), et d'une température basse dans les moyennes et basses couches de l'atmosphère pour former les flocons (Verfaillie et al., 2018 ; Tang, 2020). Ainsi, pour les temps à faible et moyenne chute de neige, il est constaté une Europe sèche autour de 0,5 à 2 g/kg d'air humide au maximum. Pour les temps à forte et très forte chute de neige (cf. Figure 4), l'humidité dépasse assez largement les 3 g/kg d'air humide. De même, un noyau d'humidité se concentre sur la région PACA et le golfe de Gênes, avec des valeurs supérieures à 4,5 g/kg d'air humide autour d'Isola 2000, qui expliqueraient donc l'importance des cumuls sur 24 H pour les plus fortes classes. De plus, les températures moyennes à 850 hPa, signalent l'apparition d'une poche d'air froide ( $0\text{ °C}/-2\text{ °C}$ ) centrée sur Isola 2000 pour les classes de neige les plus élevées. Cette configuration est importante puisqu'elle permet la formation des flocons de neige. De même, cette poche est entourée d'air plus chaud, ce qui renforce le mécanisme de convection de la masse d'air en provenance de la mer Méditerranée par une confrontation air froid/air chaud synonyme d'instabilité thermique.

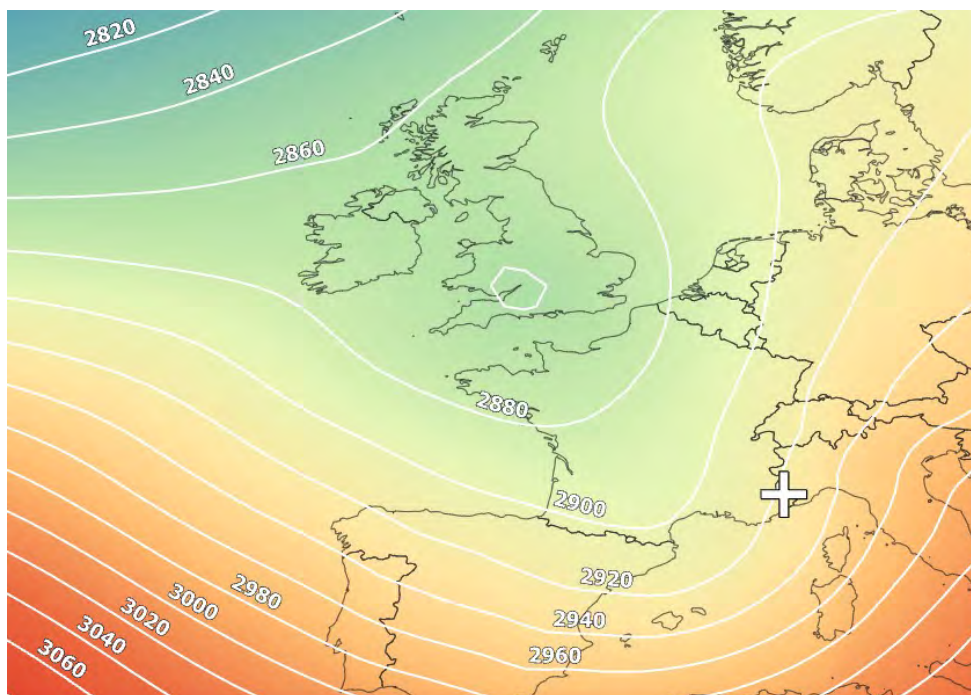


**figure 4.** Humidité spécifique à 850 hPa (en g/kg) lors des chutes supérieures à 40 cm. La croix blanche situe le poste de mesure d'Isola 2000 (ERA-INTERIM, 2019 ; G. GUERIN, 2020).

La pression atmosphérique de surface, le géopotential à 700 hPa (cf. Figure 5), la vitesse verticale et la direction du flux sont les quatre variables susceptibles d'exprimer le déplacement et l'ascendance des masses d'air, donc en d'autres termes la circulation atmosphérique lors des épisodes neigeux. Ainsi, la pression en surface dessine un champ avec un vaste secteur dépressionnaire situé sur l'Atlantique nord, au NW des côtes britanniques. Un talweg axé NW-SE de la Bretagne à la mer Méditerranée se détache et se renforce en passant des classes les plus faibles vers les plus fortes. Ce talweg est encadré par des hautes



pressions localisées au niveau des Açores et sur la mer Noire. Pour les temps à forte et très forte chute de neige, une goutte froide centrée sur les côtes languedociennes se forme, permettant (grâce à l'enroulement cyclonique des masses d'air) à un flux de secteur Sud de se mettre en place, alimentant d'autant plus la région en vapeur d'eau provenant de la mer Méditerranée. De même, l'orientation du flux force mécaniquement les masses d'air chargées en vapeur d'eau à s'élever au-dessus des Alpes. La vitesse du flux s'accélère également en Méditerranée en passant d'une classe à l'autre, jouant certainement un rôle dans le renouvellement constant d'air humide au-dessus de la station pendant les événements les plus importants. De plus, le creusement du géopotential à 700 hPa, indique que les centres d'action décrits précédemment sont d'ordre dynamique, ce qui conduit à un phénomène d'ascendance profonde au sein de la troposphère. Cela se constate avec la représentation de la vitesse verticale à 850 hPa (en Pa/s), qui montre un net renforcement des ascendances négatives ( $-0.4$  Pa/s) pour les temps à forte et très forte neige.



**figure 5.** Altitude du géopotential 700 hPa (en mètres) lors des chutes supérieures à 40 cm. La croix blanche situe le poste de mesure d'Isola 2000 (ERA-INTERIM, 2019 ; G. GUERIN, 2020).

Ainsi, il est possible d'identifier deux types de circulation à l'œuvre : une circulation d'ouest de type cyclonique, par temps à faible et moyenne chute de neige (chutes  $< 21$  cm) ; une circulation de sud avec une dépression axée sur l'Islande et un talweg sur l'Europe occidentale, par temps à forte et très forte chute de neige (chutes  $> 21$  cm).

## Conclusion

En définitive, il est mis en exergue des covariations entre les temps à neige à Isola 2000 et les six variables atmosphériques suivantes : la vitesse verticale ; l'humidité spécifique ; la pression atmosphérique de surface ; la température ; l'altitude du géopotential 700 hPa ; la composante V du flux. Un renforcement de ses paramètres dans le sens de la relation conduit à une intensification des précipitations neigeuses. Ces variables, qui entraînent localement de la neige, sont guidées par la circulation atmosphérique générale. Ainsi, la présence d'une dépression sur l'Islande, encadrée par deux anticyclones (un situé sur les Açores et l'autre sur la mer Noire) forme un talweg dépressionnaire de la Bretagne au Sud-Est de la France. Pour les plus importantes chutes de neige, une goutte froide se détache au niveau des côtes languedociennes, permettant par un jeu d'enroulement cyclonique, de diriger les masses d'air de la mer, où elles s'enrichissent en vapeur d'eau, vers les Alpes du Sud. Le forçage orographique entraîne ensuite l'ascendance de la masse d'air humide, son refroidissement, sa condensation puis des précipitations solides abondantes. Au total, deux types de circulation atmosphérique produisent des chutes de neige : les circulations d'ouest cyclonique pour les temps à neige faible et moyen ; les circulations de sud (flux de sud-ouest) avec une

dépresseion axée sur l'Islande et un talweg sur l'Europe occidentale pour les temps à forte et très forte neige.

En parallèle, suite à une diminution au début des années 90, puis une stabilisation jusqu'au milieu des années 2000, la fréquence d'apparition des chutes de neige est repartie à la hausse depuis le milieu des années 2000. L'atmosphère est-elle davantage chargée en vapeur d'eau favorisant la production des chutes de neige ? Les circulations favorables voient-elles leur fréquence augmenter ? Ce dernier point mériterait d'être approfondi, avec en guise de perspective une possible classification des types de circulations atmosphériques propres aux chutes, puis un calcul précis de leur fréquence pour le passé, mais également pour le futur, avec l'appui des sorties de modèles climatiques les plus récentes (CMIP6).

## Bibliographie

- Barbier B., 1982 : L'impact des activités humaines (sports d'hiver) sur le milieu montagnard (Control of the mountain ecosystem by winter-sports). Bulletin de l'Association de Géographes Français 485-486 pp. 121-124.
- Barrier N., Tréguier A-N., Cassou C., Deshayes J., 2014 : Influence des régimes de temps atmosphériques sur la circulation océanique de l'Atlantique Nord. La Météorologie, Météo et Climat, 2014, **8** (87), pp.38-44.
- Boé J., Terray L., 2008 : Régimes de temps et désagrégation d'échelle. La Houille Blanche, N°2 (Avril 2008), pp. 45-51.
- Carrega P., Michelot N., 2021 : Une catastrophe hors norme d'origine météorologique le 2 octobre 2020 dans les montagnes des Alpes-Maritimes », *Physio-Géo*, Volume **16** | -1, 1-70.
- Chochon R., Martin N., Lebourg T., 2021 : Analysis of extreme precipitation during the Mediterranean event associated with the Alex storm in the Alpes-Maritimes : atmospheric mechanisms and resulting rainfall. SimHydro 2021 – Models for the complex and global water issues-Practices and expectations. 16-18 June 2021, Sophia-Antipolis France.
- Francois H., Morin S., Spandre P., Lafaysse M., Lejeune Y., George-Marcelpoil E., 2016 : Croisement de simulations numériques des conditions d'enneigement avec une base de données socio-économiques spatialisée des stations de sports d'hiver : description de l'approche, application aux alpes françaises et introduction de la prise en compte des pratiques de gestion (damage et neige de culture). La Houille Blanche, n° **4**, 2016, p. 66-84.
- GIEC, 2014 : Changements climatiques 2014 : Rapport de synthèse. Contribution des Groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Sous la direction de l'équipe de rédaction principale, R.K. Pachauri et L.A. Meyer]. GIEC, Genève, Suisse, 161 p.
- Groupe Régional d'Experts sur le Climat en région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur (GREC-SUD), 2018 : Impacts du changement climatique et transition(s) dans les Alpes du Sud, Cahier Montagne, GeographR.
- Joye J-F., 2019 : Enneigement artificiel, évaluation environnementale des projets d'aménagements touristiques en montagne. Le point après l'annulation partielle du décret UTN. Journal Spécial des Sociétés.
- Kyselý J., Beguería S., Beranová R., Gaál L., López-Moreno J-I., 2012 : Different patterns of climate change scenarios for short-term and multi-day precipitation extremes in the Mediterranean. Global and Planetary Change, Volumes **98–99**.
- Martin N., Carrega P., 2011 : L'enneigement dans les Alpes du Sud en France : Évolution temporelle et relation avec la circulation atmosphérique. XXIVe colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Sep 2011, Rovereto, Italie.
- Marty C., Schlögl S., Bavay M., Lehning M., 2017 : How much can we save? Impact of different emission scenarios on future snow cover in the Alps. The Cryosphere, **11**, 517–529.
- Planchon O., Cantat O., Quénot H., (2015) : Types de temps et types de circulation atmosphérique : essai de mise en relation à Angers et Bordeaux (France). Actes du XXVIIIème colloque de l'AIC, Liège, 381-386.
- Nogueira M., 2020 : Inter-comparison of ERA-5, ERA-interim and GPCP rainfall over the last 40 years : Process-based analysis of systematic and random differences. Journal of Hydrology, Volume **583**.
- Peña J-C., Schulte L., 2019 : Simulated and reconstructed atmospheric variability and their relation with large Pre-industrial summer floods in the Hasli-Aare catchment since 1300 CE. Global and Planetary Change, Volume **190**.
- Pédélaborde P., 1956 : La circulation générale de l'atmosphère. L'information géographique, volume **20**, n°3.
- Picard G., Domine F., Krinner G., Arnaud L., Libois Q., Morin S., 2015 : La taille des grains de neige et son influence sur le climat Antarctique. La Météorologie, N°**91**.

Piras M., Mascaro G., Deidda R., Vivoni E., 2016 : Impacts of climate change on precipitation and discharge extremes through the use of statistical downscaling approaches in a Mediterranean basin. *Science of The Total Environment*, Volume **543**, Part B.

Tang Z., Wang X., Deng G., Wang X., Jiang Z., Sang G., 2020 : Spatiotemporal variation of snowline altitude at the end of melting season across High Mountain Asia, using MODIS snow cover product. *Advances in Space Research*, Volume **66**.

Trzpit J.Paul., 1980 : La Méditerranée, un creuset d'humidité. In: *Méditerranée, troisième série, tome 40. Recherches climatiques en régions méditerranéennes*, sous la direction de A. Douguedroit. pp. 13-28.

Verfaillie D., Lafaysse M., Déqué M., Eckert N., Lejeune Y. and Morin S., 2018 : Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps, *The Cryosphere*, **12**, 1249-1271.

## ÉVALUATION DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DE L'ADAPTATION AVEC DES OUTILS DE MODÉLISATION HYDROLOGIQUES LIBRES

**Guillaume THIREL<sup>1</sup>, David DORCHIES<sup>2</sup>, Olivier DELAIGUE<sup>1</sup>, Laura NUNEZ TORRES<sup>1</sup>, Diyae ELMALKI<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Université Paris-Saclay, INRAE, HYCAR research unit, Hydrology Research Group, Antony, France  
([guillaume.thirel@inrae.fr](mailto:guillaume.thirel@inrae.fr))

<sup>2</sup> G-EAU, Univ Montpellier, AgroParisTech, BRGM, CIRAD, IRD, INRAE, Institut Agro, Montpellier, France  
([david.dorchies@inrae.fr](mailto:david.dorchies@inrae.fr))

**Résumé :** L'impact du changement climatique (CC) sur l'hydrologie entraîne une aggravation des étiages qui exacerbe les tensions sur les usages de l'eau en France. Afin d'évaluer l'adéquation des stratégies d'adaptation, il est nécessaire de disposer d'outils permettant de les décliner au niveau local. Nous présentons les packages R airGR et airGRiwrn servant à la modélisation hydrologique et à la prise en compte des influences anthropiques. Ils permettent de modéliser les débits de manière distribuée et d'inclure les usages de l'eau, grâce à des données d'entrée limitées. Ces logiciels libres et simples d'usage peuvent être mis en œuvre par la recherche aussi bien qu'au niveau institutionnel. Via l'exemple de la Seine, nous montrons leur potentiel pour modéliser des débits influencés et l'impact du CC sur les débits naturels de cette zone anthropisée.

**Mots-Clés :** modélisation intégrée, logiciel libre, stratégie d'adaptation, galaxie airGR

### Introduction

Afin de mieux se préparer à un futur fortement modifié, les initiatives portées par le monde de la recherche et les organismes de gestion se multiplient : études d'impact du changement climatique, élaboration de plans territoriaux de gestion de l'eau (PTGE), de SAGE et de SDAGE, écriture de plans régionaux d'adaptation. Si de nombreuses études d'impact du changement climatique sont réalisées à des échelles globales ou régionales, la diversité des impacts au niveau local impose une déclinaison plus fine spatialement. En ce qui concerne l'hydrologie, cela s'est concrétisé par des études au niveau national (étude Explore 2070 sur la France, Chauveau et al., 2013 ; étude Explore 2 en cours) ou au niveau régional (études MOSARH 21 et CHIMERE 21 sur la région Grand-Est, par exemple ; Thirel et al., 2019, 2021).

Il est donc nécessaire de disposer d'outils permettant de décliner au mieux au niveau local les impacts du changement climatique, mais aussi la gestion intégrée des bassins versants et les stratégies d'adaptation des usages de l'eau (Sauquet et al., 2019). De nombreux outils existent déjà (e.g. WEAP, MIKE HYDRO Basin), cependant peu d'entre eux sont présentés sous forme de codes ouverts et sont parcimonieux dans leur approche (i.e. données d'entrée nécessaires limitées). Dans cet article, nous présentons deux outils, airGR et airGRiwrn, qui permettent de modéliser les débits de manière distribuée et d'inclure spatialement les usages de l'eau, tout en ne requérant qu'un nombre limité de données d'entrée.

Dans un premier temps, nous présentons ces outils. Puis, nous présentons le cas d'étude de la Seine, affecté par quatre lacs-réservoirs. Enfin, nous présentons un exemple d'application mettant en œuvre ces outils en modélisant les débits avec ou sans influence sur le passé, mais aussi les débits naturels futurs.

### 1. Des outils de modélisation libres et hautement configurables

L'étude de l'impact du changement climatique et de l'adaptation de la gestion de la ressource en eau requiert des outils permettant de modéliser la relation pluie-débit et les usages de manière spatialisée.

### 1.1. airGR

Le package airGR<sup>29</sup> (Coron et al., 2017, 2022) est un package libre disponible sous le langage R qui met à disposition les modèles pluie-débit de la famille GR, dont GR4J (Perrin et al., 2003), et leurs dernières évolutions. Ces modèles empiriques, fonctionnant aux pas de temps horaire, journalier, mensuel et annuel, permettent, via des données de précipitations et de température de l'air, de simuler les débits dans les rivières (Perrin et al., 2018). Le package propose aussi un modèle d'accumulation et de fonte de la neige, des fonctions pour optimiser les paramètres des modèles, évaluer leur performance et tracer des graphiques d'analyse.

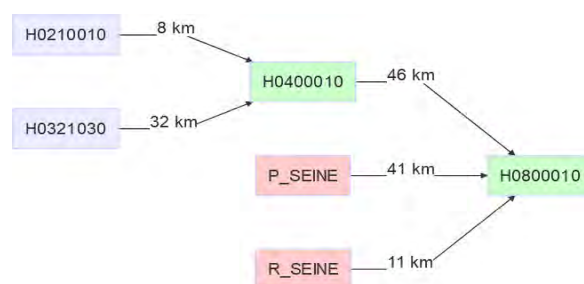
### 1.2. La semi-distribution

Historiquement, les modèles GR sont globaux (c'est-à-dire qu'ils considèrent comme homogènes à l'échelle du bassin versant les processus et les données d'entrée). Cependant, les impacts du changement climatique et les stratégies d'adaptation se déclinant au niveau local, airGR propose des versions semi-distribuées des modèles GR. Dans ces versions, les données d'entrée, les modèles GR et les paramétrisations sont appliqués sur des bassins versants emboîtés, et les débits simulés amont sont routés en aval grâce à une fonction de propagation (Lobligeois, 2014). airGR inclut aussi les derniers travaux permettant une meilleure spatialisation des paramètres des modèles GR (de Lavenne et al., 2019).

### 1.3. airGRiwrn

Le package airGRiwrn<sup>30</sup> est un package R qui « encapsule » airGR, c'est-à-dire qu'il utilise directement ses fonctionnalités et ses modèles GR, mais systématise leur utilisation de manière semi-distribuée grâce à un ensemble de nouvelles fonctions permettant de mettre en place un réseau de modèles (Dorchies et al., 2022). Par ailleurs, airGRiwrn permet d'inclure des usages de l'eau dans ce réseau, soit en injectant directement des prises ou des restitutions d'eau mesurées, soit en autorisant le couplage à des modèles d'usage (figure 1). Cependant, les usages étant soumis à des règles de gestion ou à des restrictions, il est possible d'utiliser des « contrôleurs », fonctions implémentant des logiques de décision, et qui déterminent, par exemple, quand les usages voient leur demande satisfaite ou non.

Ce package permet donc, par exemple, de simuler les débits de bassins versants intégrant des réservoirs écrêteurs de crues ou de soutien d'étiage, des canaux effectuant des transferts inter-bassins, toutes sortes de prélèvements et de rejets et leur régulation.



**figure 1.** Exemple d'un graphique GRiwrn représentant le voisinage du lac-réservoir Seine. En bleu, une modélisation hydrologique GR amont ; en vert, les modélisations hydrologiques GR sur des bassins versants intermédiaires ; en rouge, des injections d'influences humaines ou des modèles de gestion.

29 Voir le site <https://hydrogr.github.io/airGR/> pour des exemples de mise en œuvre et la documentation

30 Voir le site <https://airgriwrn.g-eau.fr/> pour des exemples de mise en œuvre et la documentation

## 2. Le cas d'étude

### 2.1. Description du bassin versant de la Seine

Nous modélisons le bassin de la Seine en amont de Vernon (superficie environ 64 420 km<sup>2</sup>). La topographie est relativement peu marquée, l'altitude variant de 31 m à 300 m, excepté dans le Morvan (max 901 m). Le régime hydrologique est pluvial océanique, caractérisé par des débits plus élevés sur la période de novembre à juin et, à l'inverse, des débits plus faibles sur la période de juillet à octobre. L'influence de la neige est assez faible sur le bassin, mais non négligeable lors de forts épisodes neigeux par exemple dans la région du Morvan. Le bassin de la Seine est soumis à différentes influences anthropiques. En effet, ce bassin présente de forts besoins en eau, car il compte environ 18 millions d'habitants. Parmi les influences anthropiques, nous nous limiterons aux quatre lacs-réservoirs situés en amont du bassin et totalisant un volume de 807,5 Mm<sup>3</sup>. Construits entre 1949 et 1990, ces retenues ont le double objectif d'écarter les crues et de soutenir les étiages.

### 2.2. Données observées

Nous utiliserons trois bases de données :

- les données climatiques issues de la base de données SAFRAN de Météo-France (Vidal et al., 2010) : la précipitation et la température de l'air, disponibles au pas de temps journalier sur une grille de 8 x 8 km ;
- les données hydrologiques de débits mesurés au pas de temps journalier, issus de la Banque HYDRO (Leleu et al., 2014), complétées par des stations gérées par l'EPTB Seine Grands Lacs ;
- les données de débits de prise et de restitution de chaque lac au pas de temps journalier, fournies par l'EPTB Seine Grands Lacs.

### 2.3. Données de projections climatiques

Les projections climatiques utilisées font partie du jeu de données climatiques DRIAS 2020 corrigées avec la méthode ADAMONT (Verfaillie et al. 2017, Soubeyroux et al., 2020). Il s'agit de la liste restreinte de cinq projections identifiées par Météo-France (communication interne). Les données, au pas de temps journalier, sont disponibles sur une grille de 8 x 8 km. Nous nous intéressons au RCP 8.5 et considérons la période de référence 1976-2005 et la période future 2071-2100.

### 2.4. Structuration du modèle

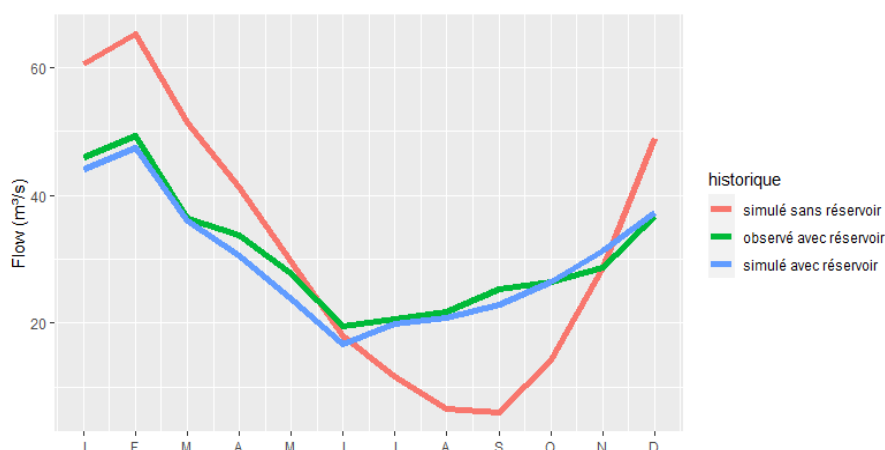
Le modèle semi-distribué découpe le bassin versant selon 143 stations de jaugeage choisies en fonction de la disponibilité des données de débit et leur localisation (Nunes-Torres, 2021). Ce maillage fin du territoire a pour intérêt une meilleure représentation des hétérogénéités hydroclimatiques du bassin, mais offre aussi la possibilité d'inclure de manière fine et localisée des influences anthropiques. Les quatre lacs-réservoirs sont intégrés via neuf points d'injections représentant leurs différents ouvrages de prise et de restitution.

## 3. Résultats

### 3.1. Modélisation de la Seine sur le passé : débits naturels et anthropisés

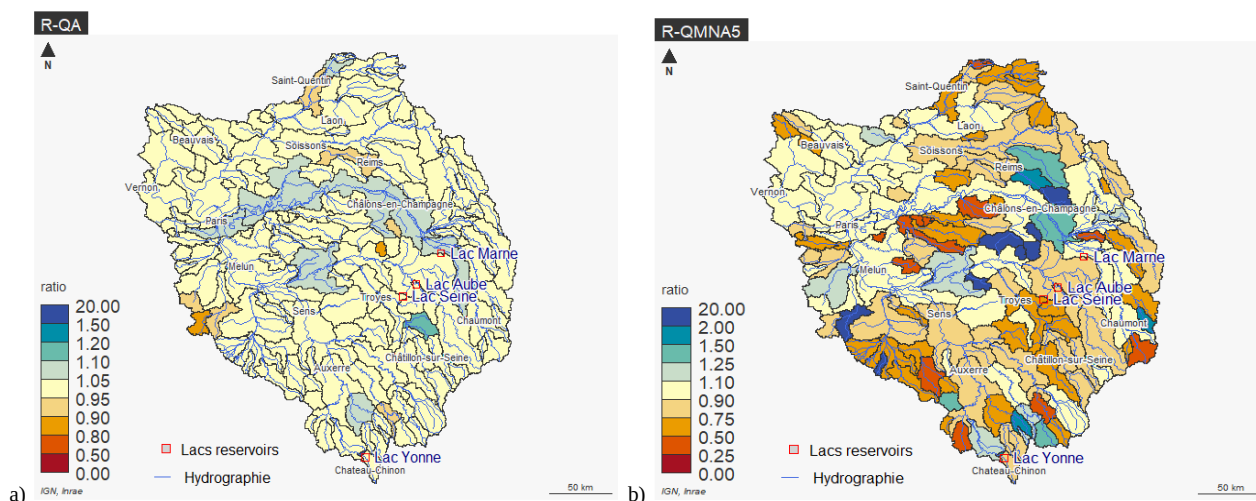
Comme décrit plus haut, airGRiwrM permet d'inclure des séries temporelles d'influences anthropiques connues. Sur la figure 2, nous montrons quel est l'impact d'une telle prise en compte pour la station de la Seine à Troyes qui se situe en aval du lac Seine. A l'aide d'un modèle hydrologique et d'une connaissance des chroniques de débits prélevés et restitués en aval du lac Seine, nous pouvons représenter fidèlement le régime hydrologique influencé sur cette station. En enlevant le lac Seine du modèle, nous pouvons par ailleurs simuler le débit « naturel », c'est-à-dire celui qui aurait dû être si la retenue en amont n'avait pas existé. On observe que le débit naturel serait plus haut l'hiver et plus bas l'été, montrant l'apport du lac Seine pour écarter les crues et soutenir les étiages.





**figure 2.** Régime hydrologique sur la période 1959-2019 de la Seine à Troyes (H0800010) observé (vert) et simulé avec le modèle GR4J et CemaNeige, avec (bleu) et sans prise en compte du réservoir Seine (rouge).

Le modèle GR4J + CemaNeige a été appliqué, via airGRiwrn, sur plus de 100 bassins versants emboîtés sur le bassin de la Seine, comme on peut le voir sur la figure 3. Dans cette configuration, les séries temporelles observées de prises et de vidanges des grands lacs de Seine sont injectées dans le modèle. La Figure 3a montre le biais commis sur le débit annuel (R-QA). On observe que le modèle ne présente qu'un biais très faible (en deçà de 5% du débit annuel) sur la plupart des sous-bassins. Une légère surestimation est notable en aval du lac situé sur la Marne et sur quelques autres bassins, et quelques sous-estimations sont notées au sud-ouest du bassin de la Seine. Concernant le biais sur le QMNA5<sup>31</sup> (R-QMNA5, Figure 3b), on observe une tendance à la sous-estimation en amont du bassin de la Seine, et quelques bassins avec une surestimation. Cependant, dans l'ensemble les erreurs commises par le modèle restent tout à fait acceptables sur ces indicateurs qui caractérisent des événements extrêmes, et donc par définition difficiles à simuler.



**figure 3.** Bassin de la Seine discrétisé en sous-bassins versants modélisés avec airGRiwrn. A gauche, le biais sur le débit annuel, à droite le biais sur le QMNA5. Les valeurs de biais sont parfaites si elles valent 1, il y a surestimation au-dessus de 1 et sous-estimation en dessous de 1.

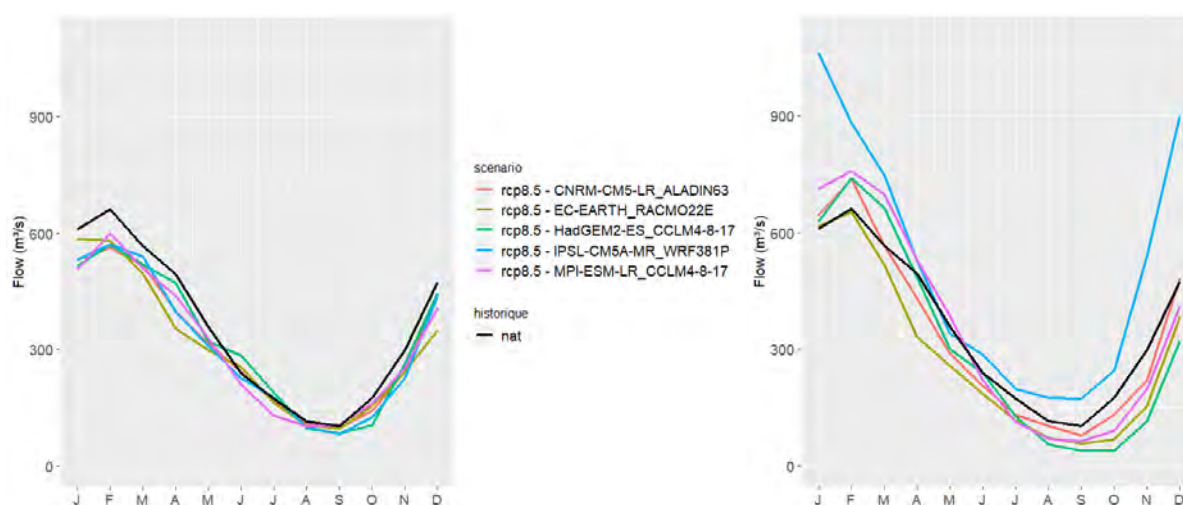
### 3.2. Impact du changement climatique sur l'hydrologie naturelle

Dans cette section, nous analysons l'impact du changement climatique sur l'hydrologie naturelle, c'est-à-dire sans prise en compte de la gestion passée, présente ou future des grands lacs de Seine. Nous considérons dans un premier temps les débits de la Seine à Paris et l'ensemble de l'emprise de son bassin pour le climat, ainsi que le RCP 8.5. Les projections climatiques montrent un comportement saisonnier globalement cohérent avec la réanalyse SAFRAN sur la période de référence (1976-2005), avec néanmoins

<sup>31</sup> Le QMNA5 est le débit mensuel minimal sur l'année avec une période de retour de cinq ans.

une forte variabilité des précipitations selon les modèles utilisés (non montré). Pour la période 2071-2100, l'évolution des précipitations est contrastée : une augmentation est observée durant l'hiver et une légère diminution durant l'été. Deux modèles climatiques divergent, avec une forte augmentation pour le modèle IPSL toute l'année sauf au printemps, et une baisse forte pour le modèle HadGEM pour l'été. L'évolution des températures se situe entre +4 °C l'hiver et +3 à +8 °C l'été.

Concernant les débits projetés pour la Seine à Paris (Figure 4), ceux-ci sont légèrement sous-estimés tout au long de l'année avec les cinq modèles sur la période de référence. Pour la période future 2071-2100, le modèle IPSL sort clairement du lot, avec une augmentation importante tout au long de l'année sauf au printemps, avec un pic à plus de 1000 m<sup>3</sup>/s en moyenne mensuelle en janvier. Cette augmentation est en lien direct avec l'évolution des précipitations décrite ci-dessus. Les autres projections de débits montrent une évolution bien différente : une augmentation de l'ensemble des projections l'hiver, une diminution de l'ensemble des projections l'été et l'automne, et une évolution neutre au printemps. Même si nous n'avons dans ce travail pas mis en œuvre de modèle de gestion future des grands lacs de Seine, il va sans dire que cette évolution tend à indiquer une tension croissante sur les objectifs d'écrêtement des crues et de soutien des étiages de ces réservoirs.



**figure 4.** Régime hydrologique mensuel de la Seine à Paris sans prise en compte des grands lacs. A gauche sur la période historique, à droite sur la période 2071-2100 pour le RCP 8.5. En noir, le débit naturel simulé avec SAFRAN.

Analysons désormais les évolutions de débits sur l'ensemble de la zone d'étude entre la période de référence et la période 2071-2100 (Figure 5). Les débits moyens montrent une évolution spatialement contrastée, avec une tendance à l'augmentation sur une large partie du territoire, et une tendance à la baisse à l'ouest de la zone. L'évolution du QMNA5, indicateur d'étiage, montre une diminution claire de ce débit caractéristique sur l'ensemble de la zone, évolution expliquée à la fois par une baisse des précipitations estivales et par une augmentation de la température, provoquant une augmentation de l'évapotranspiration.

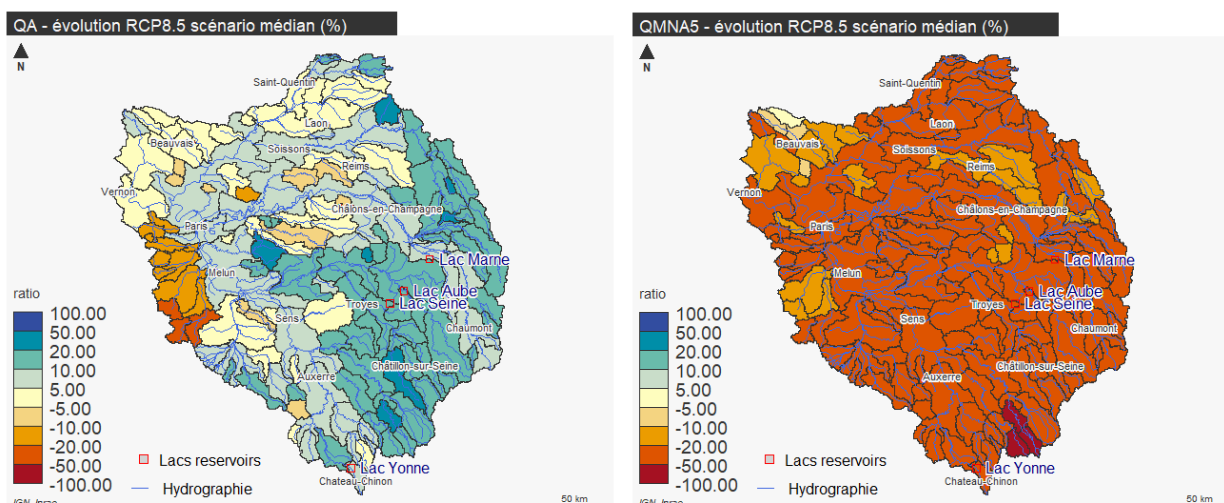


figure 5. Evolution en pourcentage du débit moyen annuel (à gauche) et du QMNA5 (à droite) entre la période historique et 2071-2100 pour le RCP 8.5. La médiane de l'ensemble des projections est tracée.

## Conclusion

Les derniers développements d'airGR et le nouveau package R airGRiwr simplifient la mise en œuvre de la modélisation de bassins versants anthropisés. Ces outils ont été utilisés pour mettre en place un modèle pluie-débit de la Seine distribué sur 143 stations de jaugeage et intégrant les interconnexions avec lacs-réservoirs régulant les crues et les étiages. La suppression de l'influence des réservoirs a permis d'évaluer l'impact du changement climatique à la fin du 21<sup>e</sup> siècle sur l'hydrologie naturelle du bassin laissant présager une évolution défavorable en termes d'intensité des étiages ainsi que des crues. Certaines projections utilisées pour cette étude font actuellement l'objet de réflexion au sein du projet Explore2 traitant de la modélisation de l'impact du changement climatique sur les débits naturels des bassins versants français. Les perspectives d'utilisation de cette chaîne de modélisation sont nombreuses : intégrations des prélèvements et transferts sur le bassin (canaux de navigation, irrigation, eau potable, industrie...) pour améliorer la naturalisation des débits, mais surtout l'intégration de règles de gestion des lacs-réservoirs et de scénarios d'usages pour l'étude des adaptations possibles du bassin au changement climatique.

**Remerciement** : Les auteurs remercient le programme du PIREN-Seine d'avoir financé le stage de fin d'études de Laura Nunez Torres. Les auteurs tiennent aussi à remercier la Commission européenne et l'Agence nationale de la recherche (ANR) pour le financement dans le cadre du consortium international collaboratif IN-WOP financé dans le cadre de l'appel conjoint 2018 du Cofund ERA-NET WaterWorks2017. Cet ERA-NET fait partie intégrante des activités développées par le JPI Water.

## Bibliographie

- Chauveau M. et al., 2013 : Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? , *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, **4**, p. 5. doi:10.1051/lhb/2013027.
- Coron L. et al., 2017 : The Suite of Lumped GR Hydrological Models in an R package. *Environmental Modelling and Software*, **94**, 166-171, doi: 10.1016/j.envsoft.2017.05.002.
- Coron L. et al., 2022 : airGR: Suite of GR Hydrological Models for Precipitation-Runoff Modelling. R package version 1.7.0, doi: 10.15454/EX11NA, URL: <https://CRAN.R-project.org/package=airGR>.
- de Lavenne A. et al., 2019 : A regularization approach to improve the sequential calibration of a semi-distributed hydrological model. *Water Resources Research*, **55** (11): 8821-8839. <https://doi.org/10.1029/2018WR024266>.
- Dorchies D. et al., 2022. airGRiwr: Modeling of Integrated Water Resources Management based on airGR. R Package version 0.6.1. <https://doi.org/10.15454/3CVD11>.
- Leleu I. et al., 2014 : La refonte du système d'information national pour la gestion et la mise à disposition des données hydrométriques. *La Houille Blanche*, **1**, 25-32. doi: 10.1051/lhb/2014004.

- Lobligeois F., 2014 : *Mieux connaître la distribution spatiale des pluies améliore-t-il la modélisation des crues ?* Diagnostic sur 181 bassins versants français. Thèse de Doctorat, Irstea (Antony), AgroParisTech (Paris), 312 pp.
- Nunez Torres L., 2021 : Simulation d'un bassin versant anthropisé à l'aide d'un modèle hydrologique semi-distribué : Le bassin de la Seine et ses réservoirs. Rapport de stage-Polytech Sorbonne. 1/9/2021. <https://hal.inrae.fr/hal-03359617>.
- Perrin C. et al., 2018 : Empirical approach to hydrological modelling: a historical perspective in the case of the GR models, *Geophysical Research Abstracts*, **20**, EGU2018-15734, EGU General Assembly 2018.
- Perrin C. et al., 2003 : Improvement of a Parsimonious Model for Streamflow Simulation, *Journal of Hydrology* **279** (1-4): 275–89. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00225-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00225-7).
- Sauquet E. et al., 2019 : Vers l'élaboration de nouvelles projections hydro-climatiques pour les stratégies d'adaptation au niveau des bassins versants français. [Rapport de recherche] Inrae; Irstea. (hal-02930768)
- Soubeyroux J.-M. et al., 2020 : LES NOUVELLES PROJECTIONS CLIMATIQUES DE RÉFÉRENCE DRIAS 2020 POUR LA MÉTROPOLE, Météo-France, rapport de 98 pages.
- Thirel G. et al., 2019 : Future streamflows for the French tributaries of the River Rhine (Mosel, Sarre and Ill), *Houille Blanche*, **5-6**, pp. 140-149.
- Thirel G. et al., 2021 : Projet CHIMERE 21. CHlers – Meuse : Evolution du RégimE hydrologique au 21e siècle. Rapport final. Agence de l'Eau Rhin-Meuse. 152 pp. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03206168>.
- Verfaillie D. et al., 2017: The Method ADAMONT V1.0 for Statistical Adjustment of Climate Projections Applicable to Energy Balance Land Surface Models. *Geosci Model Dev*, **10** (11) 4257–83. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>
- Vidal J.-P. et al., 2010 : A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, **30**(11), 1627–1644. doi: 10.1002/joc.2003.

## EXPLORING THE FUTURE IMPACTS OF CLIMATE CHANGE ON THE WATER RESOURCES OF FRANCE

**Miquel TOMAS-BURGUERA<sup>1</sup>, Patrick LE MOIGNE<sup>2</sup>, Aaron BOONE<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Centre National de Recherches Météorologiques, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, 31057 Toulouse, France  
[miquel.tomas@meteo.fr](mailto:miquel.tomas@meteo.fr)

<sup>2</sup> Centre National de Recherches Météorologiques, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, 31057 Toulouse, France  
[patrick.lemoigne@meteo.fr](mailto:patrick.lemoigne@meteo.fr)

<sup>3</sup> Centre National de Recherches Météorologiques, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, 31057 Toulouse, France  
[aaron.boone@meteo.fr](mailto:aaron.boone@meteo.fr)

**Abstract:** A new version of the Safran-Isba-Modcou (SIM2) hydrometeorological system is used to study the climate change impact on the water resources of France, as well as the impact on the vegetation, which is possible thanks to the use of the prognostic vegetation biomass option (ISBA-A-gs). Using 6 different Regional Climate Models (RCM) and three different emission scenarios (RCP26, RCP45 and RCP85), the first preliminary results for streamflow show a spatial contrast, with an increase in the north and a decrease in the south, especially for the RCP85. For the rest of emission scenarios, the results are more uncertain. For the Leaf Area Index (LAI), an increase in the mean climatological values are projected for the three emission scenarios, especially during the peak season.

**Keywords:** Water Resources; Climate change; Streamflow; Leaf Area Index

### Introduction

According to the latest Assessment Reports (AR5, AR6) of the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) (IPCC 2013, 2021), an increase in the probability of heatwaves and droughts is expected in the future. Both phenomena can have several impacts on water availability for society, agriculture and/or vegetation.

Previous studies focusing on the impact of climate change on the water resources over France concur in projecting a decrease in precipitation, especially in southern France, also showing a decrease in soil moisture and runoff, but a high uncertainty remains (Boe et al. 2009, Soubeyroux et al. 2011, Chauveau et al. 2013, Dayon et al. 2018).

Our aim is to contribute to study this uncertainty by using a new version of the Safran-Isba-Modcou (SIM) hydrometeorological system. The use of the new version of SIM (SIM2) is a clear improvement over previous studies, as it uses more realistic physics, and surface parameters description providing a better assessment of the different systems of the water cycle. In addition, we also use the prognostic vegetation biomass option in the simulations (ISBA-A-gs). This means that the evolution of the vegetation conditions throughout the year is linked to the specific meteorological and soil conditions of that year, not to an imposed climatology. This is a relevant novelty regarding the previous studies over France, and a part from its relevance in the hydrological cycle it gives us the opportunity to analyze the impact of climate change on the vegetation activity and the water balance components. The ability of ISBA-A-gs to simulate vegetation activity, focusing on Leaf Area Index (LAI) was previously tested at global scale (Gibelin et al. 2006) and at Euro-Mediterranean region (Szczypta et al., 2014). A previous study focusing on the impact of climate change on vegetation cycle over France also exist (Laanaia et al., 2016), but using CMIP3 emission scenarios.

This is a work in progress project that started in the frame of a Make Our Planet Great Again (MOPGA) postdoctoral grant.

## 1. Data and methods

6 different regional climate models (RCMs) (Table 1) from Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (CORDEX) (Giorgi et al 2009) and three different emission scenarios (Representative Concentration Pathway (RCP) 2.6, 4.5 and 8.5) were used as climate forcing data. The models were bias-corrected using the ADAMONT method applied to the RCM data (Verfaillie et al 2017) within the Explore2 project, and hourly climate data were obtained. CO<sub>2</sub> concentration values were obtained in parts per million (ppm) for the different emission scenarios and converted to kg/m<sup>3</sup> to be used in the simulations.

The simulations cover the period 1971-2100, being 1971-2005 period forced by historical RCM, with a 10-year spin-off at the beginning of this period. The 2005-2100 is forced by climate projections. For the historical period 6 different simulations are obtained and for the projected period 18 different simulations are obtained (6 RCMs x 3 RCPs).

A new version of Safran-Isba-Modcou (SIM2) was used, activating the prognostic vegetation biomass option in the simulations (ISBA-A-gs). ISBA-A-gs was used for active vegetation, meaning that vegetation phenology adapts to simulated atmospheric and soil conditions. Using values of Leaf Area Index we plan to calculate the impact of climate change on the onset, senescence and the period of activity of the vegetation

We obtained daily data from simulations, but for most of the variables we converted the data into monthly and sub monthly values. The sub monthly periods are defined as a quasi 10-daily periods, splitting each month in 3 different periods (1-10, 11-20, 21-end). Therefore, the last period of each month can have a variable number of days (8 to 11). While this can be a problem for comparison between different sub-monthly periods, this facilitates the interannual comparison of the data. Nevertheless, first preliminary analysis are shown in a yearly or monthly basis.

For this first preliminary analysis, the 1981-2000 period from the historical simulations is used as a reference to calculate the difference with three different periods in the future: 2040-2060, 2060-2080 and 2080-2100.

**Table 1.** Regional Climate Models used in the simulations.

<i>Acronym</i>	<i>GCM</i>	<i>GCM Institution</i>	<i>RCM</i>	<i>RCM Institution</i>
CNRM-ALAD	CNRM-CM5	CNRM	ALADIN63	CNRM
CNRM-RACM	CNRM-CM5	CNRM	RACMO22E	KNMI
EC-RACM	EC-EARTH	ICHEC	RACMO22E	KNMI
EC-RCA4	EC-EARTH	ICHEC	RCA4	SMHI
MPI-CCLM	MPI-ESM	MPI	CCLM4-8-17	CLMcom
MPI-REMO	MPI-ESM	MPI	REMO2009	CSC

## 2. Results

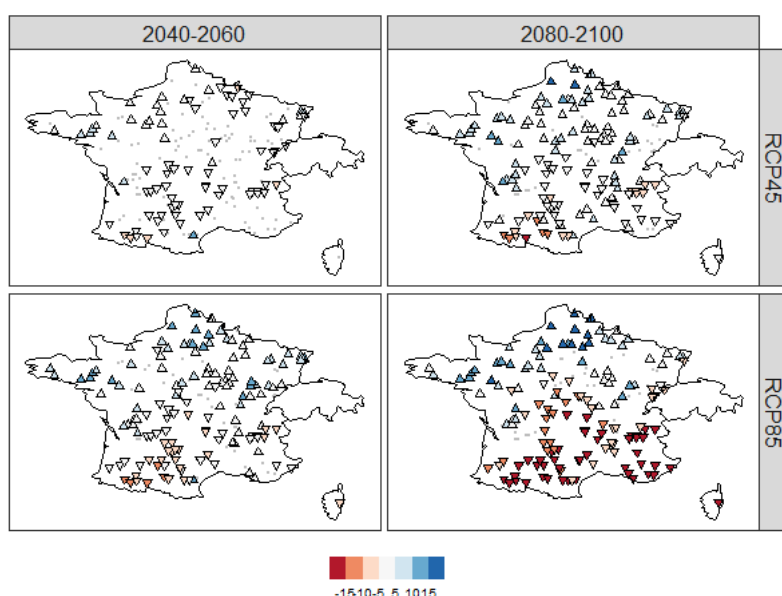
### 2.1. Streamflow

For two different periods (2040-2060 and 2080-2100) and two different emission scenarios (RCP45 and RCP85), Figure 1 represents the ensemble mean of the projected changes in the mean annual streamflow compared to the 1980-2000 period for a selection of 200 gauging stations. RCP85 is the scenario showing more relevant changes, with a contrasting north-south pattern. While an increase in the streamflow is expected in the north, a decrease is expected in the south.



RCP85 scenario detects this pattern in the two different time periods, but the RCP45 only detects this pattern at the end of the century (2080-2100). The magnitude of the projected change is also greater for the RCP85 scenario at the end of the century, showing percentage changes in the range of 10-15%, or even higher.

On the other hand, RCP45 scenario for the 2040-2060 show a high uncertainty in a large number of gauging stations, as it is reflected by the large number of small gray dots that appear in Figure 1. These dots represent those gauging stations in which three of the six simulations show a different sign in the difference than the ensemble mean.

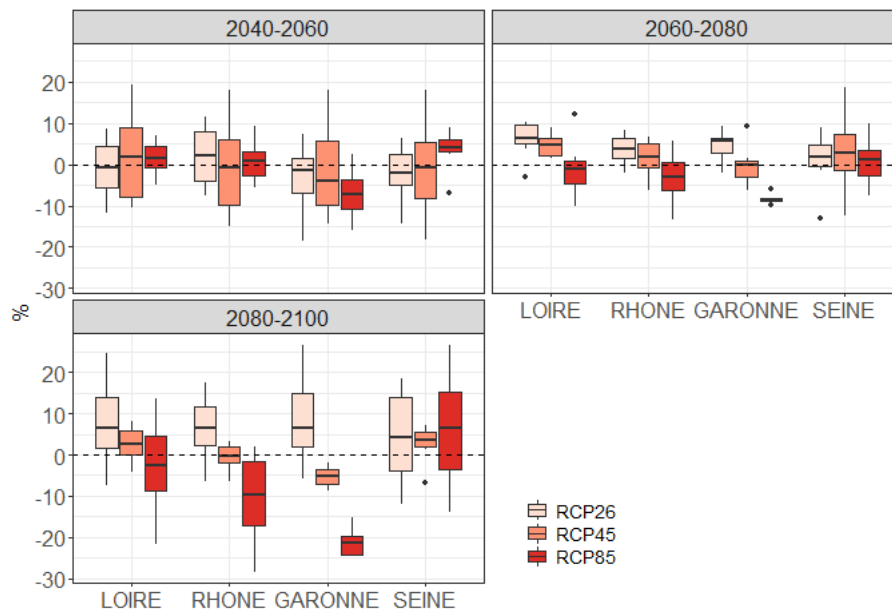


**figure 1-** Percentage of changes of annual streamflow at 200 gauge stations in France for two different emission scenarios (RCP45 and RCP85) and two different time periods (2040-2060 and 2080-2100), compared to historical simulation for the 1980-2000 period. Grey dots represent gauging stations with high uncertainty.

Figure 2 represents the change (in percentage) at 4 specific locations of the Loire, Rhone, Seine and Garonne rivers, for the three emission scenarios and three time periods.

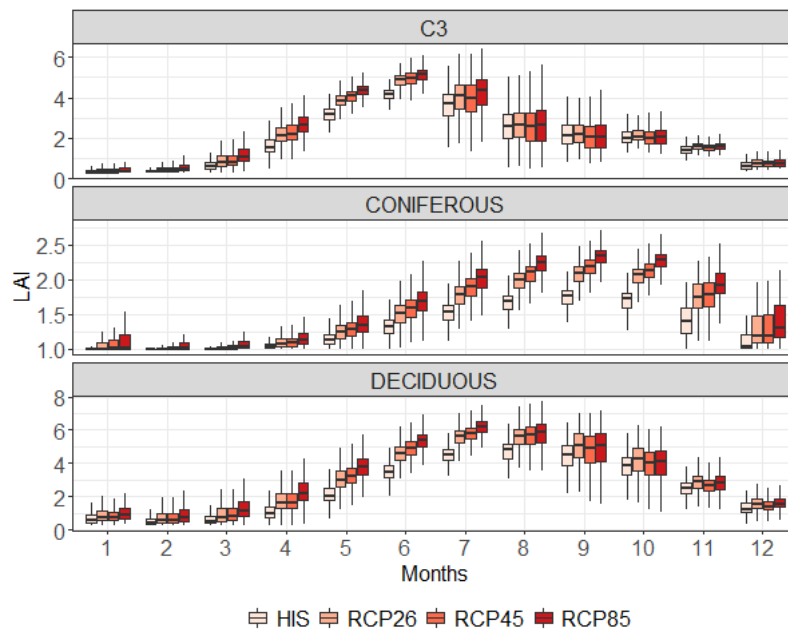
Again, the largest changes are projected under the RCP85 scenario at the end of the century (2080-2100). While a high decrease is obtained in the Rhone and Garonne, an increase is projected in the Seine, which confirms the north-south contrast above mentioned. Interestingly, the RCP26 scenario show an increase in the streamflow at these 4 different locations.

The contrasting differences between different emission scenarios confirms the high uncertainty related with the future emissions. RCMs are also a relevant source of uncertainty, as it can also be seen in Figure 2. In some cases, for example the Rhone streamflow for the 2040-2060 period, the Whisker plots for the three emission scenarios show that half of the models project a slight increase in the streamflow and half of the models project a slight decrease. Further analysis are required to better understand the specific role of the different sources of uncertainty.



**figure 2-** Whisker plots representing percentual changes in mean anual streamflow at four rivers of France : Loire, Rhone, Garonne and Seine.

## 2.2. Leaf Area Index (LAI)



**figure 3.** Whisker plot representing the Leaf Area Index (LAI) evolution values for different emission scenarios for the 2040-2060 period at the different grid points over France.

Figure 3 represents a comparison of the monthly evolution of LAI values for three different patches (C3 crops, coniferous and deciduous) between the 2040-2060 and the 1980-2000 historical simulations.

For the three emission scenarios, the projected values of LAI for the future show the same seasonality as the historical values, with some differences between the different patches. In the three cases, a general increase is projected during the vegetation activity period. For C3 crops and deciduous, this increase is mainly expected in spring and summer while for the coniferous this increase is projected from spring to autumn.

The increase in the mean values during spring could imply an earlier onset of the vegetation, but further analysis are required to confirm this point.

## Conclusion

In the first preliminary results of the project, we can detect an impact of climate over the water resources of France but also on the vegetation activity (thanks to the use of ISBA-A-gs). Projected changes in the streamflow are very dependent on the emission scenarios and are more evident for the end of the century.

On the other hand, even low level emission scenario (RCP26) seem to have an effect on vegetation activity, showing higher values of LAI. Further analysis are required to better understand the origin of this changes, which could be related with the fertilization of CO<sub>2</sub> or changes in climate/soil variables.

**Acknowledgement:** The authors want to thank the people involved in EXPLORE2 project for providing us the unbiased climate forcings. We also want to thank Simon Munier for his help with MODCOU simulations. The work of Miquel Tomas-Burguera was funded by the Make Our Planet Great postdoctoral program.

## Bibliography

Boé, J., Terray, L., Martin, E., and Habets, F., 2009, Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century, *Water Resour. Res.*, **45**, W08426, doi:10.1029/2008WR007437.

Chauveau, M., Chazot, S., Perrin, C., Bourgin, P.-Y., Sauquet, E., Vidal, J.-P., Rouchy, N., Martin, E., David, J., Norotte, T., Maugis, P., and de Lacaze, X., 2013: What will be the impacts of climate change on surface hydrology in France by 2070?, *La Houille Blanche*, **4**, 5–15

Dayon, G., Boé, J., Martin, E., and Gailhard, J., 2018: Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties, *Comptes Rendus Geoscience*, **350**, 141–153

Gibelin, A.-L., J.-C. Calvet, J.-L. Roujean, L. Jarlan, and S. O. Los , 2006 : Ability of the land surface model ISBA-A-gs to simulate leaf area index at the global scale: Comparison with satellites products, *J. Geophys. Res.*, **111**, D18102, doi:10.1029/2005JD006691.

Giorgi, F., Jones, C., Ghassem, R., 2009. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. *World Meteorol. Organizat. Bull.* **58** (3), 175-183.

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324

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 [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Laanaia, N., Carrer, D., Calvet, J.-C., Pagé, C. 2016. How will climate change affect the vegetation cycle over France? A generic modeling approach. *Climate Risk Management*, **13**, 31-42. doi.10.1016/j.crm.2016.06.001.

Szczypta, C., Calvet, J.-C., Maignan, F., Dorigo, W., Baret, F., and Ciais, P. 2014: Suitability of modelled and remotely sensed essential climate variables for monitoring Euro-Mediterranean droughts, *Geosci. Model Dev.*, **7**, 931–946, <https://doi.org/10.5194/gmd-7-931-2014>

Soubeyroux, J.-M., Vidal, J.-P., Naja, C J., Kitova, N., Blanchard, M., Dandin, P., Martin, E., Page, C., Habets, F., 2011 — Projet ClimSec – impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol (ClimSec project – impact of climate change on drought and soil moisture in France, in French). Rapport final, Météo-France, CNRM/GAME, Cemagref, CERFACS and UMR Sisyphe.

Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., and Lafaysse, M., 2017: The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, *Geosci. Model Dev.*, 10, 4257–4283, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>, 2017.

## ESTIMATION DES RÉSERVES EN EAU SOUTERRAINE RÉGULATRICES DANS LE HAUT BASSIN DE L'OUUM ER RBIA (MAROC)

Tarik EL ORFI <sup>1</sup>, Mohamed EL GHAHCI <sup>2</sup>, Sébastien LEBAUT <sup>3</sup> et Emmanuel GILLE <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire "DPRP", FLSH 23000 Béni Mellal - Maroc et Unité de Recherche "LOTERR", Université de Lorraine 57006 Metz - France, elorfitarik@gmail.com

<sup>2</sup> Laboratoire "DPRP", FLSH 23000 Béni Mellal - Maroc, elghachi\_mohamed@yahoo.fr

<sup>3</sup> Unité de Recherche "LOTERR", Université de Lorraine 57006 Metz - France, sebastien.lebaut@univ-lorraine.fr

<sup>4</sup> Unité de Recherche "LOTERR", Université de Lorraine 57006 Metz - France, emmanuel.gille@univ-lorraine.fr

**Résumé :** Les débits à pas de temps journaliers (Qmj) utilisés ont été enregistrés de 1975/76 à 2018/19 sur le bassin amont de l'Oum Er Rbia (1016 km<sup>2</sup>) et un affluent, le Srou (1421 km<sup>2</sup>). La méthode employée consiste à extraire des phases hydrologiques non directement influencés par les pluies, répondant au critère du tarissement, pour lesquelles le débit correspond à la vidange des aquifères peu profonds. De ces nombreuses phases de tarissement plusieurs méthodes sont utilisées pour définir des courbes maîtresses de tarissement desquelles sont déduits des coefficients de tarissement. A partir d'un débit initial Q<sub>0</sub> de chacune des phases, ces coefficients permettent de calculer le volume de nappe restitué au cours d'eau.

**Mots-Clés :** Oum Er Rbia (Maroc), ressource en eau, sécheresse, volume de nappe.

**Abstract:** ESTIMATION OF REGULATED GROUNDWATER RESERVES IN THE UPPER OUM ER RBIA BASIN (MOROCCO): The daily time step flows (Qmd) used were recorded from 1975/76 to 2018/19 on the upstream basin of the Oum Er Rbia (1016 km<sup>2</sup>) and an affluent, the Srou (1421 km<sup>2</sup>). The method used is to extract hydrological phases not directly influenced by rainfall, meeting the criteria of drying up, for which the flow corresponds to the emptying of shallow aquifers. From these numerous drying phases, several methods are used to define master drying curves from which drying coefficients are deduced. From an initial flow Q<sub>0</sub> of each phase, these coefficients allow the calculation of the volume of groundwater returned to the river.

**Keywords:** Oum Er Rbia (Morocco), water resource, drought, groundwater volume.

### Introduction

L'agriculture Marocaine est le premier contributeur du PIB devant le tourisme et l'industrie. Toutefois, la production agricole dépend beaucoup de la disponibilité en l'eau. Les grands périmètres irrigués consomment près de 4,2 milliards de m<sup>3</sup> d'eau par an, réparties pour 2,5 milliards m<sup>3</sup> d'eaux de surface et 1,7 milliards m<sup>3</sup> d'eaux souterraines (Moghli & Benjelloun Touimi, 2000). Dernièrement, les années sèches ont obligé les agriculteurs à se tourner davantage vers l'exploitation des eaux souterraines afin de combler le déficit en eau de surface. Cependant, dans le souci de ne pas "dépenser plus que le revenu" a conduit les chercheurs à comptabiliser la disponibilité en eau (Margat, 1969), et la notion de ressource en eau souterraine est née de la prise de conscience que des limites s'imposent aux possibilités d'exploitation globales d'une nappe (Margat, 1969 ; Lebaut et al., 2021).

À l'interface entre eaux de surface et eaux souterraines, se trouve une zone de mélange "zone hyporhéique" qui constitue une seconde rivière dont l'existence et la fonction sont largement méconnues (Binet, 2018). Cette zone de contact nappe/rivière correspond à la réserve régulatrice. Cette réserve représente la part variable de la réserve d'un aquifère libre, c'est la quantité maximale d'eau gravitaire contenue dans la zone de fluctuation (Castany & Margat, 1977). En effet, en période de déficit pluviométrique, la réserve régulatrice alimente l'écoulement en période de tarissement. De ce fait, la courbe de tarissement renferme des informations précieuses sur les caractéristiques des aquifères et le

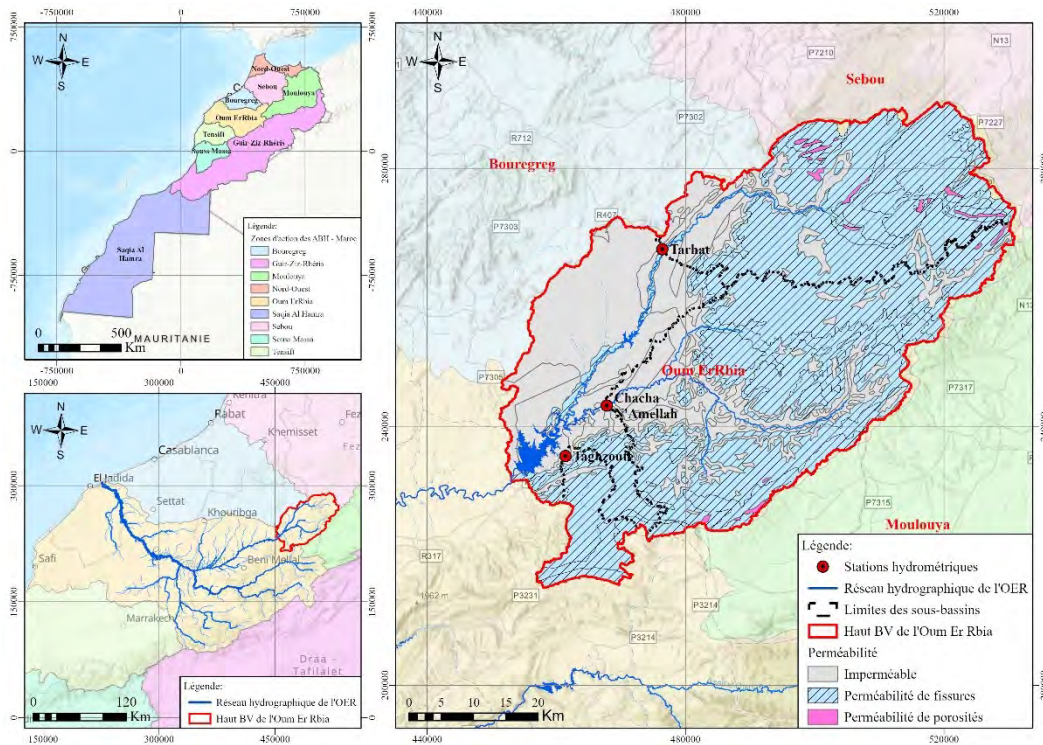
stockage (Tallaksen, 1995), elle représente le volume d'eau de la vidange des nappes en régime non-influencé au cours du temps.

Depuis Maillet (1905), une méthode pour quantifier la réserve régulatrice consiste à calculer le coefficient de tarissement d'un aquifère. Tout l'enjeu de cette quantification à partir des hydrogrammes journaliers réside dans la bonne formulation du tarissement et dans la séparation de celui-ci en débit de ruissellement et débit de base (Lebaut et al., 2021). Dans ce papier nous proposons une estimation des réserves en eau souterraine régulatrices dans le bassin amont de l'Oum Er Rbia, deuxième plus important bassin versant de point de vue des ressources en eau de surface mobilisables dont bénéficient plusieurs périmètres agricoles irrigués.

## 1. Données et Méthodes

### 1.1. Zone d'étude

Le haut bassin versant de l'Oum Er Rbia fait partie du plateau central et du Moyen Atlas au Maroc. Il est délimité par le bassin de la Moulouya à l'est, le bassin du Sebou au nord, et le bassin du Bourgreg à l'ouest (Fig.1). Le zone d'étude est représentatif du Moyen Atlas, dont l'altitude moyenne est de 1350 m, avec des sommets atteignant 2400m. Par son altitude, sa situation géographique et son exposition aux influences océaniques, le contexte climatique est de type méditerranéen, caractérisé par des hivers humides et des étés secs (Martin, 1981).



**figure 1.** Situation géographique et perméabilité dans le haut bassin versant de l'Oum Er Rbia

Du point de vue géologique, la chaîne moyen-atlasique est une chaîne intracontinentale typique développée en bordure de la chaîne alpine du Rif (Michard et al., 2011). Dans le bassin considéré, le Paléozoïque, généralement de nature schisteuse, affleure au pied du Moyen Atlas sur toute la bordure sud-est du Plateau Central. Au-dessus, se trouvent les marnes et des argiles gypsifères du Permo-Trias puis des formations carbonatées, calcaire et dolomie pour le Jurassique inférieur (Lias), et calcaire et marnes du Crétacé jusqu'au Paléocène. Le Quaternaire est marqué par des basaltes et des alluvions (Serbout, 2001). Le degré de perméabilité de ces terrains (Tab. 1) conditionne la pluie seuil à partir de laquelle il y a dépassement de l'infiltrabilité (Sallak, 2019) et détermine en conséquence la part du ruissellement de surface et celui de l'écoulement souterrain.



**Tableau 1.** Synthèse lithologie/perméabilité dans le haut bassin versant de l'Oum Er Rbia.

Roches dominantes	Perméabilité	Surface (km <sup>2</sup> )	%
Schistes ou grés, Argiles rouges, Schistes Limons, dépôts encrustés, Terrasses limoneuses, ...	Imperméable	1219	36
Calcaires blancs ou beiges, Travertins, Calcaires, Basaltes doléritiques, Basaltes, Granites, Calcaires lacustres, Marno-Calcaires, Calcaires (phosphatés) ...	Perméabilité de fissures	2139	63
Alluvions, Eboulis, Conglomérats ...	Perméabilité de porosités	25	1

### 1.2. Données

L'estimation des réserves en eau souterraine régulatrices, repose sur les phases hydrologiques non directement influencées par les pluies, répondant au critère du tarissement, pour lesquelles le débit correspond à la vidange des aquifères peu profonds. L'application de méthodes de l'hydrologie analytique, sur les hydrogrammes journaliers (1975-2019) aux trois stations hydrométriques représentatives à l'amont du bassin nous a permis de calculer les volumes "dynamique" de la nappe.

Les données de débits journaliers fournies par l'ABHOER ont été utilisées pour atteindre les objectifs de notre étude (Tab.2).

**Tableau 2.** Caractéristiques des stations de mesures.

Station	Cours d'eau	Date de mise en service	Données disponibles	Surface du bassin (Km <sup>2</sup> )	Altitude à l'exutoire (m)	X	Y
Taghzoute	Ouaoumana	1970-71	P et Q	172	628	461400	235500
Chacha n'Amellah	Srou	1974-75	P et Q	1423	685	467800	243300
Tarhat	Oum Er Rbia	1969-70	P et Q	1011	1036	476400	267500

### 1.3. Méthode

La réserve régulatrice correspond au volume d'eau gravitaire contenu dans la zone de fluctuation de la surface piézométrique d'un aquifère à nappe libre (Castany, 1982). Ce volume peut être apprécié en s'appuyant sur les phases de tarissement des cours d'eau. Étant donné qu'en période d'étiage, les débits des cours d'eau sont uniquement assurés par la vidange des réserves aquifères, cet apport peut être analysé à partir du tarissement (Gischer et al., 2012).

Pour calculer la réserve régulatrice, le choix s'est porté sur la formule suivante :  $V = Q_0/\alpha$

avec  $Q_0$ , le débit au début du tarissement et  $\alpha$  le coefficient de tarissement.

Nous proposons d'estimer les volumes d'eau souterraine constituant la réserve régulatrice des aquifères du haut bassin versant de l'Oum Er Rbia sur la base du débit modal pour  $Q_0$  et le calcul d'un coefficient de tarissement. Du point de vue opérationnel, un outil de prévision automatisé "sous forme de feuilles de calcul" (Lang & Gille, 2006) a été utilisé pour extraire ces informations. Cet outil est basé sur un algorithme posant les conditions relatives à la définition du tarissement, il se compose de deux étapes (Fig.2) :

L'estimation des réserves en eau souterraine régulatrices, repose sur les phases hydrologiques non directement influencées par les pluies, répondant au critère du tarissement, pour lesquelles le débit correspond à la vidange des aquifères peu profonds. L'application de méthodes de l'hydrologie analytique, sur les hydrogrammes journaliers (1975-2019) aux trois stations hydrométriques représentatives à l'amont du bassin nous a permis de calculer les volumes "dynamique" de la nappe.

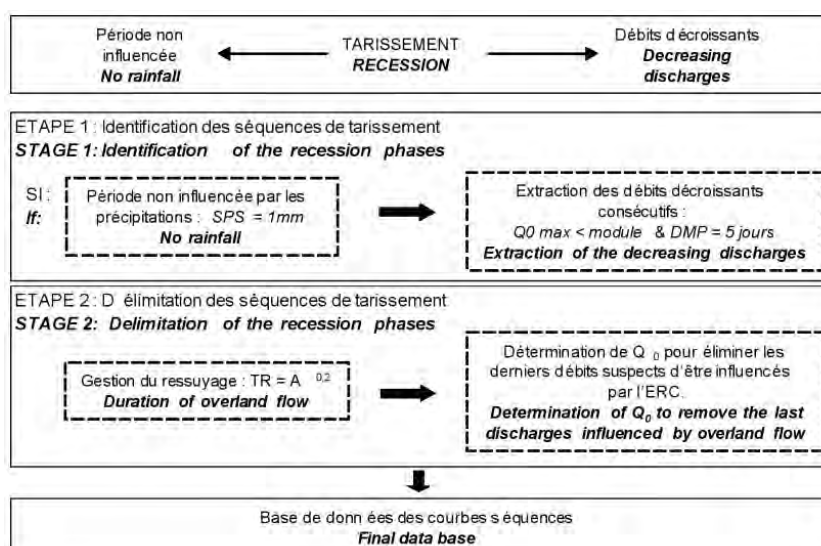


figure 2. Algorithme d'Extraction des Courbes Séquences (ALECS) (Lang & Gille, 2006).

La procédure automatique d'extraction des phases de tarissement garantit une homogénéité de la sélection des épisodes retenus.

## 2. Résultats

### 2.1. Coefficients de tarissement " $\alpha$ " et débit de départ " $Q_0$ "

Sur la période considérée, 105, 179 et 291 phases de tarissements supérieures à 5 jours ont été individualisées pour les stations de Tarhat, Taghzoute et Chacha n'Amellah. La durée moyenne varie, respectivement, entre 7,6 j, 7 j et 9,5 j. La démarche fondée sur la méthode des corrélations renvoie des coefficients  $\alpha$  maître pour un rapport de 5j proposé par (Lebaut, 2000) varie entre 0,025 et 0,056 (Tab. 3), ce qui est en accord avec des formations aquifères à "perméabilité de fissures".

Tableau 3. Analyse statistique des coefficients  $\alpha$ .

Station	$\alpha$ maître	R2	$\alpha$ moy	$\alpha$ min	$\alpha$ max	ET	CV
Taghzoute	0,056	0,99	0,08	0,01	0,33	0,05	59%
Chacha n'Amellah	0,032	0,99	0,04	0,003	0,21	0,03	66%
Tarhat	0,025	0,99	0,03	0,002	0,19	0,02	74%

La détermination automatisée de débit de départ  $Q_0$  est basée sur la pente de l'épisode de tarissement, est calculée à partir des trois derniers débits de la phase, puis extrapolée vers les jours antérieurs (Lang & Gille, 2006). La moyenne des débits  $Q_0$  sur la période d'étude est égale à 0,59 m<sup>3</sup>/s, 4,17 m<sup>3</sup>/s et 11,42 m<sup>3</sup>/s pour Taghzoute, Chacha n'Amellah et Tarhat (Tab. 4).

Tableau 4. Analyse statistique des coefficients  $\alpha$ .

Station	$Q_0$ moy	$Q_0$ min	$Q_0$ max	ET	CV
Taghzoute	0,59	0,10	0,96	0,28	48%
Chacha n'Amellah	4,17	0,55	7,42	1,91	46%
Tarhat	11,42	5,9	15,7	2,8	25%

## 2.2. Les réserves en eau souterraine

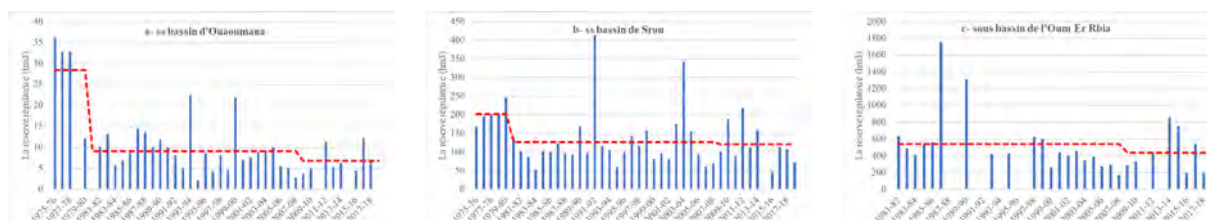
Les volumes annuels moyen de la réserve régulatrice sont de 10,6 hm<sup>3</sup> pour le sous bassin de Ouaoumana (st de Taghzoute), 133,8 hm<sup>3</sup> pour le sous bassin de Srou (st de Chacha n'Amellah) et de 508 hm<sup>3</sup> pour le sous bassin de l'Oum Er Rbia (st de Tarhat) (Tab. 5).

**Tableau 5.** Synthèse sur la ressource en eau dans le haut bassin d'Oum Er Rbia (hm<sup>3</sup>).

Station	Q <sub>0</sub> moy	Q <sub>0</sub> min	Q <sub>0</sub> max	ET	CV
Taghzoute	0,59	0,10	0,96	0,28	48%
Chacha n'Amellah	4,17	0,55	7,42	1,91	46%
Tarhat	11,42	5,9	15,7	2,8	25%

Les volumes annuels moyens varient spatialement d'une station à l'autre, et temporellement d'une année à l'autre et d'un mois à l'autre (Fig. 3 et 4). La méthode du CUSUM illustre clairement les tendances sèches et humides pour les données des précipitations des stations, elle met en évidence 3 périodes homogènes : 1975/1979, 1980/2007 et 2008/2019 (El Orfi et al., 2020). Pendant la période sèche 1980-2007, on constate une diminution remarquable de la réserve régulatrice. Pour le sous bassin de Ouaoumana, durant cette période, la réserve n'était que de 9,1 hm<sup>3</sup>, soit trois fois inférieures à celle de la période humide entre 1975 et 1979 (28,5 hm<sup>3</sup>). Au final, on constate une diminution des ressources en eau souterraines d'environ un tiers depuis 50 ans dans le bassin de l'Oum Er Rbia.

La nature karstique des aquifères atlasique, impliquant des transferts d'eau entre les bassins voisins. Le bassin versant contigu de l'oued Guigou où 884 km<sup>2</sup> de karst sont drainés vers les sources de l'Oum Er Rbia. Ces nombreuses sources à forts débits alimentent en permanence le sous bassin de l'Oum Er Rbia. Ce qui explique la différence la variabilité mensuelle de la ressource régulatrice de l'Oum Er Rbia par rapport aux autres sous bassins.



**figure 3.** La ressource régulatrice annuelle moyenne.



**figure 4.** La ressource régulatrice mensuelle moyenne.

## Conclusion

La démarche méthodologique adoptée sur le haut bassin de l'Oum Er Rbia permet de quantifier les réserves en eau souterraine d'une fraction du Moyen-Atlas. Les volumes annuels moyen de la réserve régulatrice sont de 10,6 hm<sup>3</sup> pour le sous bassin de Ouaoumana (st de Taghzoute), 133,8 hm<sup>3</sup> pour le sous bassin de Srou (st de Chacha n'Amellah) et de 508 hm<sup>3</sup> pour le sous bassin de l'Oum Er Rbia (st de Tarhat). Cependant les réserves régulatrices dans le bassin de Srou sont moins inertielles que celles du sous bassin de l'Oum Er Rbia dont il est admis qu'il bénéficie d'un transfert d'eau souterraine provenant du bassin du Sebou situé plus au nord. L'extrême variabilité des volumes montre un accord avec la nature calcaire des aquifères moyenne atlasique marocain. Ceci démontre que les nappes du « château d'eau du Maroc » sont

très peu inertielles pouvant entraîner conjoncturellement de très faibles volumes d'eau disponibles en surface pour l'irrigation des parcelles agricoles via le système d'eau gravitaire traditionnel. A cet égard, les années marquées par une sécheresse pluviométrique sévère, ont vu cette ressource chuter considérablement par rapport à la période humide et ont été marquées par de profond changement hydro-agricole. Notons qu'on est en train d'appliquer d'autres méthodes de séparation des épisodes de tarissement, et de détermination des débits modaux pour les comparées avec la méthode automatisée.

**Remerciement** : Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'Appel à Projet Recherche au profit des CEDocs, entre le laboratoire « DPRP » Maroc et l'unité de recherche « LOTERR » France.

## Bibliographie

- Binet S., 2018 : *Réserve régulatrice des aquifères et perturbations anthropiques : Implications en termes de transferts d'eau, de carbone et de contaminants vers les rivières*. Université d'Orléans.
- Castany G., 1982 : *Principes et méthodes de l'hydrogéologie*. Dunod.
- Castany G. et Margat, J., 1977 : *Dictionnaire Français d'hydrogéologie* (Editions du BRGM).
- El Orfi T., El Ghachi M. et Lebaut S., 2020 : Variabilité des précipitations dans le bassin versant de l'oued Oum ErRbia en amont du barrage Ahmed El Hansali. In : *Renforcement de la résilience des hydrosystèmes face aux changements globaux : « de la mesure hydrologique aux modèles de gestion »*, 47-52.
- Gischer L., Hallot É., Houbrechts G., Campenhout J. V. et Petit F., 2012 : Analyse des débits en période de tarissement : Essai d'une typologie régionale appliquée à des rivières du bassin de la Meuse (Belgique). *BSGLg*, **59**, 59-80.
- Lang C. et Gille E., 2006 : Une méthode d'analyse du tarissement des cours d'eau pour la prévision des débits d'étiage. *Noroi*, **201**, 31-43. <https://doi.org/10.4000/noroi.1743>
- Lebaut S., 2000 : *L'apport de l'analyse et de la modélisation Hydrologiques de bassins versants dans la Connaissance du fonctionnement d'un aquifère : Les grès d'Ardenne-Luxembourg*. Thèse de doctorat, Université de Metz.
- Lebaut S., Qadem A., Akdim B., Gille E. et Laouane M., 2021 : Estimation des réserves en eau souterraine régulatrices dans la partie moyen-atlasique du fleuve Sebou (Maroc). *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, **384**, 169-173. <https://doi.org/10.5194/piahs-384-169-2021>
- Margat J., 1969 : *Ressources en eau souterraine et bilan des nappes* (p. 73). BRGM.
- Michard A., Ouarhache D. et El-Arabi H., 2011 : Nouveaux guides géologiques et miniers du Maroc. *Éditions du service géologique du Maroc*, Vol. 4.
- Moghli E. et Benjelloun Touimi M., 2000 : Valorisation de l'eau d'irrigation dans les grands périmètres irrigués au Maroc cas des productions végétale : Situation actuelle et éléments de stratégie. *Transfert de Technologie en Agriculture*, **66**, 1-4.
- Sallak B., 2019 : *Les risques hydrologiques d'inondations et la problématique d'aménagement des territoires de piémont : Cas du dir de Taghzirt à Zaouit Echiekh, Province de Béni Mellal, Maroc*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- Serbout R., 2001 : *Le bassin versant de l'oued Oum er Rébia en amont de Déchra el Oued (moyen-Atlas) : Contribution à l'étude des phénomènes hydro-climatiques*. Thèse de doctorat, Université de Nice.
- Tallaksen L. M., 1995 : A review of baseflow recession analysis. *Journal of Hydrology*, **165** (1-4), 349-370. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)02540-R](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)02540-R)

## IMPROVING THE ACCURACY OF HYDROLOGICAL MODELING USING SNOW WATER EQUIVALENT (SWE) DURING SPRING FLOODING IN THE MOROCCAN HIGH ATLAS

Myriam BENKIRANE<sup>1,3</sup>, Nour-Eddine LAFTOUHI<sup>1</sup>, Simon GASCOIN<sup>2</sup>, Laura Sourp<sup>2</sup>,  
Said KHABBA<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>GeoSciences Laboratory, Geology Department, Faculty of Sciences Semlalia, Cadi Ayyad University (UCAM), Marrakech, Morocco [myriam14.benkirane@gmail.com](mailto:myriam14.benkirane@gmail.com), [laftouhi@gmail.com](mailto:laftouhi@gmail.com)

<sup>2</sup>CESBIO, Université de Toulouse, CNES/CNRS/IRD/INRA/UPS, 31400 Toulouse, France [simon.gascoin@cesbio.cnes.fr](mailto:simon.gascoin@cesbio.cnes.fr), [laura.sourp@cesbio.cnes.fr](mailto:laura.sourp@cesbio.cnes.fr)

<sup>3</sup>LMFE, Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, 40000 Marrakech, Maroc [khabba@uca.ac.ma](mailto:khabba@uca.ac.ma)

<sup>4</sup>Center for Remote Sensing Applications (CRSA), Mohammed VI Polytechnic University (UM6P), 43150 Benguerir, Morocco [khabba@uca.ac.ma](mailto:khabba@uca.ac.ma)

**Abstract :** The present study aims to evaluate the performance of a hydrological model to simulate the runoff process during spring floods in order to identify the impact and the contribution of snowmelt based on snow water equivalent (SWE) in the Moroccan High Atlas watersheds. For this purpose, a seasonal analysis was performed to select the flood events that reproduce this phenomenon over the period from 2011 to 2018. To this end, the calibration has been done by forcing the model with snow water equivalent (SWE) data. Based on the Nash-Sutcliffe efficiency coefficients (NSE), and Relative Root Mean Square Error (RMSE), the results indicate that the model provide an overall acceptable representation of the snow cover dynamics.

**Keywords:** Snow water equivalent, Hydrological modeling, Runoff, Micromet ERA5.

### AMÉLIORER LA PRÉCISION DE LA MODÉLISATION HYDROLOGIQUE À L'AIDE DE L'ÉQUIVALENT EAU DE NEIGE (SWE) LORS DES INONDATIONS PRINTANIÈRES DANS LE HAUT ATLAS MAROCAIN

**Résumé :** La performance d'un modèle hydrologique pour simuler le ruissellement est évaluée afin d'identifier l'impact et la contribution de la fonte des neiges dans les bassins versants du Haut Atlas marocain lors des crues printanières. Une analyse saisonnière a été réalisée pour sélectionner les événements de crue reproduisant ce phénomène entre 2011 et 2018. La calibration a été faite en forçant le modèle avec des données d'équivalent en eau de la neige (SWE). Basés sur les coefficients d'efficacité de Nash-Sutcliffe (NSE) et l'erreur quadratique moyenne relative (RMSE), les résultats indiquent que le modèle fournit une bonne représentation de la dynamique de la couverture neigeuse.

**Mots-Clés :** Équivalent en eau de la neige, modélisation hydrologique, ruissellement, Micromet ERA5.

### Introduction

Water is the most precious natural resource in the Mediterranean regions, suffering from a pronounced water shortage (Yucel et al., 2015), and this is even truer in the semi-arid regions of the Moroccan High Atlas watersheds, such as the Zat basin. Mountain snowfall in this basin serves as a natural reservoir to store precipitation during cold season and transform it into runoff that feeds rivers in spring and summer. Therefore, understanding the synchronization processes of snowmelt and river runoff is essential for water resource management. Snowmelt is an important resource for many aspects of hydrology, including water supply, and flood management. Due to its contribution to the hydrological cycle, it is important to simulate and forecast snowmelt runoff using hydrological models. The model (HEC-HMS) was chosen for this purpose. The applied methodology consists in simulating flows using daily meteorological data estimated by the MicroMet ERA5, to produce daily runoff, then comparing the simulated runoff to the daily observed discharge data measured at the Taferiat station located downstream of the Zat basin during the 2011-2018 period. Two methods were used to simulate snowmelt in this basin, namely energy balance methods resulting in good results and temperature index methods resulting in non-significant results. Indeed, the energy balance method calculates the amount of snowmelt based on the remaining energy differences in an energy balance at the snow-air interface, while the temperature index method uses the air temperature

as the only index of energy exchange at the snow surface (Anderson, 2006). These studies highlighted the importance of snowmelt to the hydrological regime of the Zat River, which is characterized by mountainous and rugged topography, spatially and temporally sparse, inconsistent, frequently with poor quality measured data (Maidment et al., 2015). Moreover, the snow regime in the Zat catchment is largely undocumented, although this catchment has a greater importance in terms of water resources than its neighboring Ghdad watershed. However, a distributed energy-balance model “Snow Model” was used to simulate the snowpack evolution. A key asset of Snow Model is MicroMet (meteorological data interpolation), which spatially interpolates the meteorological forcing data over the study area.

The objectives of this study are (1) to analyze the spatio-temporal variability of the snow water equivalent in the Zat watershed. (2) To evaluate the performance of HEC-HMS hydrological model to simulate the runoff process during spring floods using snow component. (3) To quantify and evaluate the importance of snowmelt contribution in the hydrological regime.

## 1 STUDY AREA

Zat watershed is a sub-basin of the Tensift catchment, it is also an Atlas tributary located on the left bank of Tensift River situated in the Moroccan High Atlas Mountains (Mount Toubkal, the highest mountain in North Africa). It is drained by the Zat River, which measures 89 km, the slopes are often very steep with an average of 19%, and it covers a total area of about 520 km<sup>2</sup> (Figure 1). The topography of the catchment area varies from 3777 m to 756 m at Taferiat station (Benkirane et al., 2020). This basin experiences a Mediterranean climate. Therefore, the catchment is sparsely vegetated, except for the valleys' bottoms. The study region is subject to frequent flash floods due to the topographical effect which it favors the quick runoff of snow melt and rainfall. The Zat River regime at Taferiat station is slightly dominated by the snowmelt contribution with a maximum discharge in April (Baba et al., 2021).

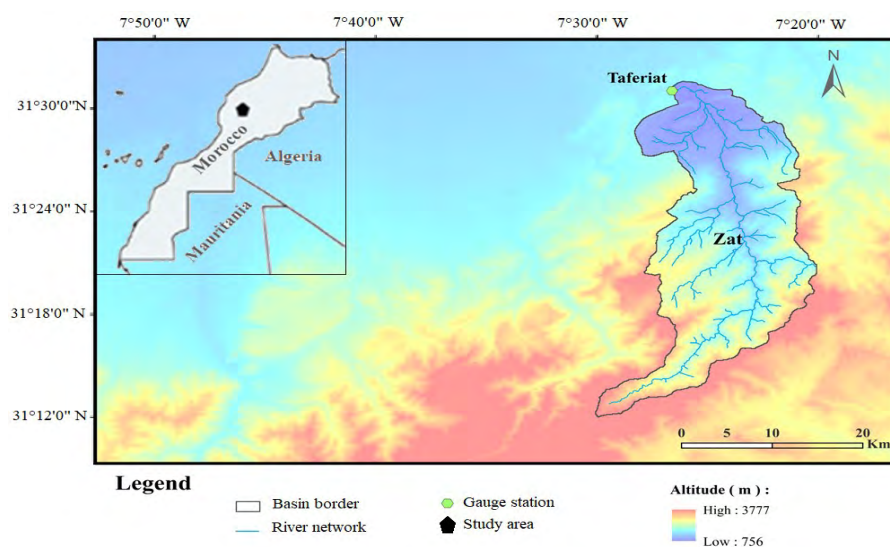


figure 1. The geographical location of the Zat basin.

## 2 DATA, HYDROLOGICAL MODEL AND METHODOLOGY

### 2.1 Data

The terrain pre-processing starts with the reconditioning of Digital Elevation Model (DEM). DEM tiles of resolution is approximately 30 m. It was downloaded from the United States Geological Survey (USGS). This DEM was clipped along the border of the basin using the polygon shapefile of the county downloaded from ESRI (Figure 1).

10-min river discharge data have been used from Taferiat River gauge (756 m, Figure 1) from the Tensift basin agency from 2011 to 2018. A python algorithm has been developed to convert the 10 min time step data into daily data. Noticing that flood events used in this study were selected during the melt season from January to June.



The SnowModel, is a spatially distributed, that accounts for meteorological forcing, topography, and vegetation cover. SnowModel combines six sub-models: MicroMet (Liston and Elder, 2006a, 2006b) is a spatially distributed meteorological forcing condition from AWS observations. EnBal is a distributed energy balance model which simulates energy and water fluxes from the MicroMet outputs (Liston 1995); SnowPack simulates snow depth, snow density, and snow water equivalent (Liston and Mernild, 2012).

## 2.2 HEC-HMS Model

The Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modelling System (HEC-HMS) model was developed by the US Army Corps of Engineers. This model was designed to simulate hydrologic processes in watershed systems to handle the water balance equation for event-based or continuous hydrologic modeling (Joshi et al., 2019). The HEC-HMS model is divided into four major input components: such as the watershed model, the weather model, the data manager, and the control manager (Bhuiyan et al., 2017). It is widely used for simulating precipitation and runoff for a wide range of geographical areas by considering important parameters such as various losses, base flow, direct runoff, river routing and reservoir components (USACE-US, 2017). The HEC-HMS model is a conceptual hydrological model potentially able to perform spatio-temporal simulations of rainfall-flow relationships across a watershed (Gebre, 2015). Overall, HEC-HMS has been successfully applied in watershed modeling of several river basins. In Morocco, there are several studies on HEC-HMS application for example (Werren et al., 2016; Brirhet and Benaabidate, 2016; Benkirane et al., 2020). The method used in this paper includes SCS-CN (Soil Conservation Service) Curve Number, Clark Unit Hydrograph, and Baseflow Recession, which are necessary to determine the hydrologic loss rate, runoff transformation, and base flow rates. The calibration process was performed using the observed flow data at the outlet of the basin. There are a total of 16 parameters in the selected methods of the basin and the meteorological component in HEC-HMS.

## 3 Methodology

Firstly, the meteorological, hydrological, and geological data were previously analyzed (Benkirane et al., 2020). In addition; the DEM of the basin was pre-processed (a. DEM reconditioning b. Fill sinks c. Flow direction d. Flow Accumulation e. Stream definition f. Stream segmentation g. Watershed grid delineation h. Watershed Polygon Processing i. Drainage Line Treatment and j. Adjoint Watershed Processing. The study area is converted into a shapefile, in order to be implemented in the HEC-HMS model). The basin and stream properties were defined using HEC-GeoHMS to generate HMS model files. This was imported into the HEC-HMS software, where all parameters for the basin, meteorology, and control specification components were entered and calibrated from the database over 2011 to 2018. Many parameters were individually and manually adjusted (max-min) and the model was run with the reasonable ranges specified for the most sensitive parameters. Finally, the model was evaluated using statistical indices such as NSE, and RMSE.

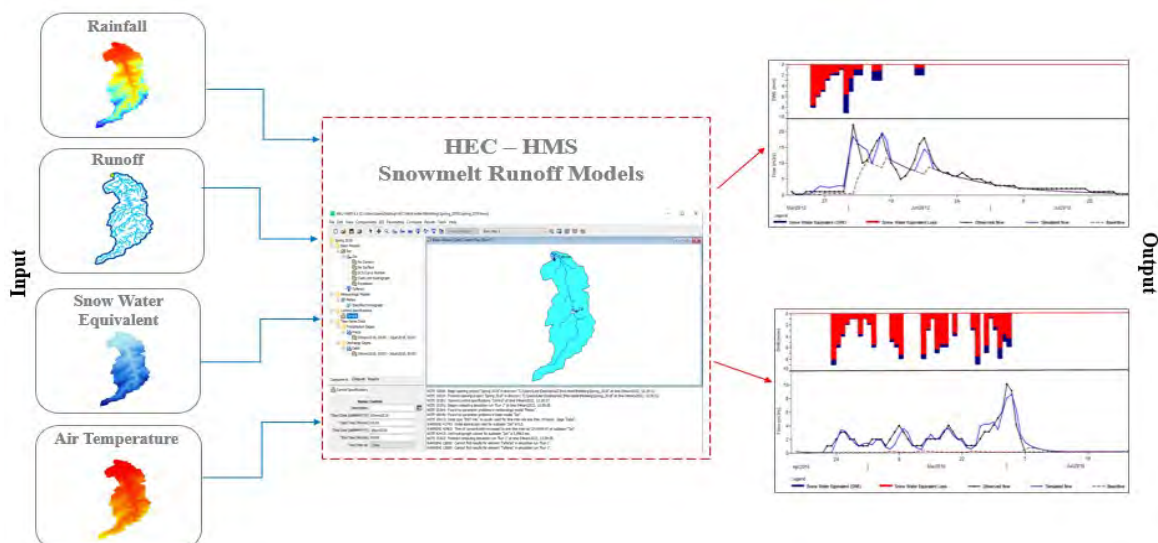


figure 2. Schematic representation of the calibration process of HEC-HMS based hydrologic models.

A manual calibration of the parameters was performed in this study due to the unpredictable behavior of the basin and the lack of data at the Taferiat measuring station. The manual calibration starts with an appropriate estimation of the initial parameters to run the model on a daily scale over a period from 2011 to 2018. The calibration was conducted using the gauging station recordings to simulate the flow on HEC-HMS. After running the simulation, the simulated results were compared to the observed data.

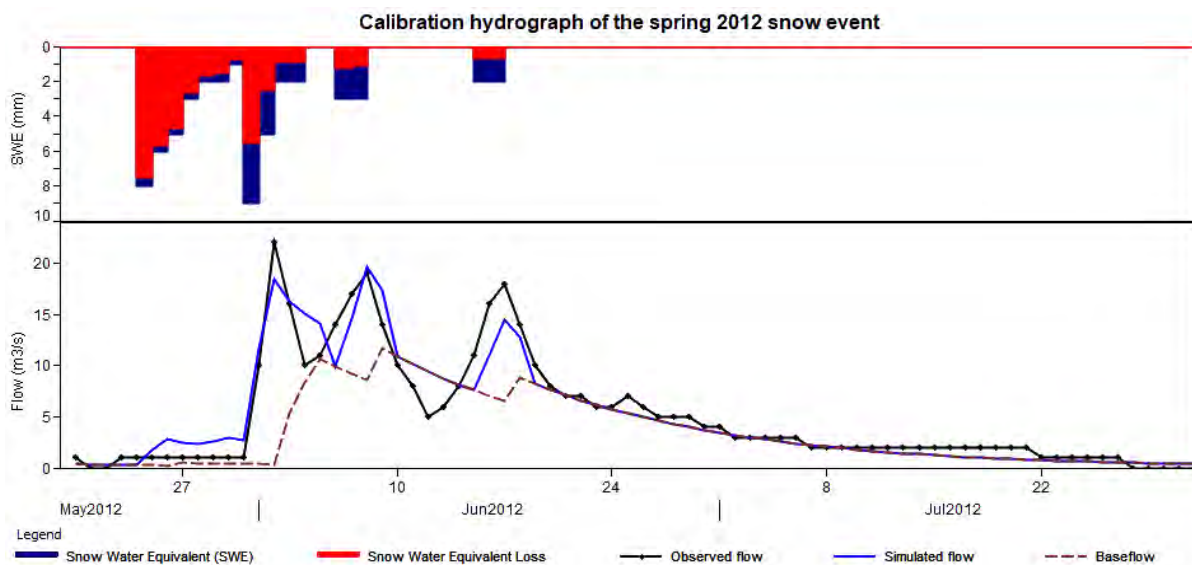
#### 4 Results

The Zat watershed is a dynamic snow basin due to its topography and elevation. To model the process of snowmelt transformation into runoff. SWE simulations were performed; in general, the model reasonably simulated the snowmelt runoff in the Zat basin (Figure 3 and 4) between 2011 and 2016. Consequently, the model failed to correctly simulate the snowmelt runoff from 2017 to 2018 due to the occurrence of precipitation events, which led to an overestimation of the streamflow during the spring season of 2018. However, based on the comparison of the simulated flow curve to the observed flow curve, the model was able to produce a reasonable simulation of snowmelt runoff in the watershed. Thus, the obtained NSEs were greater than 0.85 for the majority of snow events; indeed, two representative events were selected for this paper.

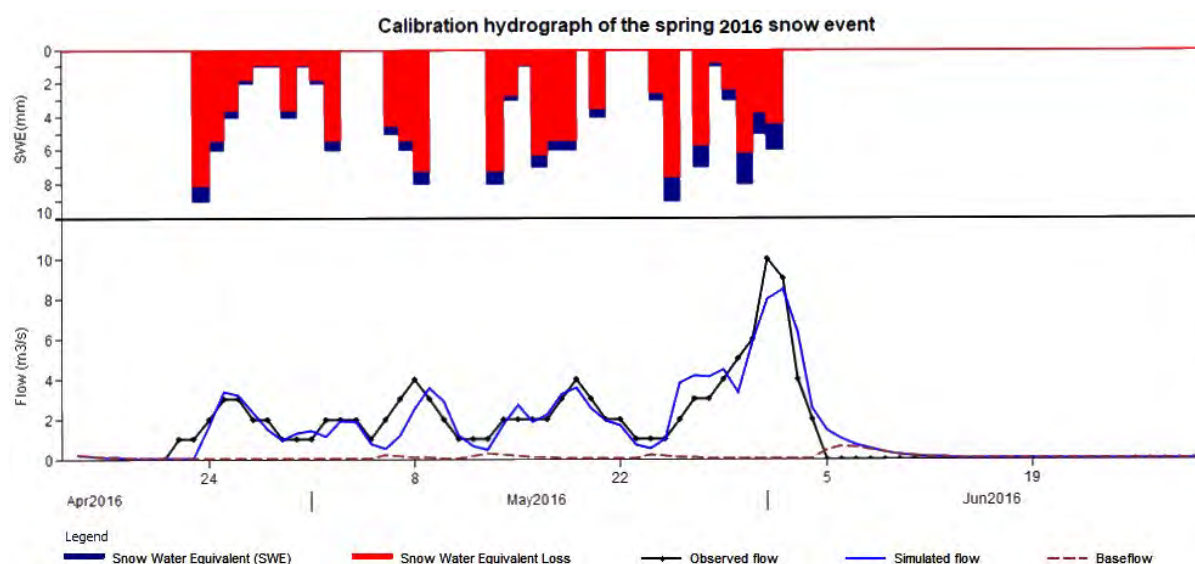
A visual assessment of Figures 3 & 4 shows that the simulated flow curves are well reproduced compared to the observed flow curves for both events. The modeled results were used to test the performance of the model to simulate snowmelt runoff. Therefore, a comparison was made for the model performance using two performance criteria (Table 1). The adopted methodology provided better modeled results compared to alternative approaches we previously used.

Figures 3 and 4 demonstrate an underestimation of the flow during some peak flows due to the permeability of the soil at the medium elevation (1800m). On the other hand, the rise and recession curves were well reproduced for both events, and the volumes were respected. The NSE coefficient attained 90% and an RMSE value of 0.3 during 2012 event while an NSE of 86.5% and an RMSE of 0.4 were obtained for 2016 event.

Noticing that the Curve Number, percent impervious surface, snowmelt temperature, and the runoff coefficient were the most sensitive parameters in the snowmelt methods applied for this watershed.



**figure 3.** Calibration result of the spring 2012 snowmelt event illustrating the SWE simulated flow and the observed flow at the Taferiat station.



**figure 4.** Calibration result of the spring 2016 snowmelt event illustrating the SWE simulated flow and the observed flow at the Taferiat station.

**Table 1.** Calibration results of spring events

Events	Observed volume	Simulated volume	RMSE	NSE
<b>Spring 2012</b>	61.39	59.99	0.3	<b>90%</b>
<b>Spring 2016</b>	18.94	18.9	0.4	<b>86.50%</b>

Indeed, by examining the performance results (table 1), it can be seen that the obtained NSE and RMSE provides good performance considering different aspects of the hydrographs (i.e., raise curve, recession curve, volumes and peak flows).

## CONCLUSION

The main objective of this study is to evaluate the ability of the HEC-HMS model to simulate daily flows in mountainous watershed where data are scarce. This study preprocessed the basin characterization with the GIS-based program HEC-GeoHMS, and created basin and meteorological models. The resulting outputs were used as inputs for the hydrological simulation. The HEC-HMS conceptual model was successfully calibrated for the Zat basin on a daily time scale between 2011 and 2018. The sensitivity analysis of the model reveals that Curve Number, Percentage of Impervious Surface, Snowmelt Temperature, and Runoff Coefficient are the most sensitive parameters of the model. The Nash-Sutcliffe efficiency criterion value were between 90% for the 2012 event and 86.50% for the 2016 event, which demonstrates a good model adjustment with a slight underestimation. However, it is evident that the model underestimated the flow during calibration. This is attributed to three main criteria, namely climatic factors, geological factors and topographical factors. This led to an underestimation of flow in the spring. These modeled results have a great impact on predicting runoff from snow-melt watersheds, which may have significant implications for flood forecasting. Based on the overall evaluation, it can be concluded that the used methodology can be applied to model the runoff flow rate due to snowmelt.

## REFERENCES

- Anderson, E.A., 2006: Snow Accumulation and Ablation Model – SNOW-17. Natl. Ocean. Atmospheric Adm. Natl. Weather Serv. Silver Springs MD.
- Baba, M.W.; Gascoin, S.; Hanich, L.; Marchane, A.; Boudhar, A.; Chehbouni, A. 2021: Assessment of MERRA-2 and ERA5 to Model the Snow Water Equivalent in the High Atlas (1981–2019). *Water*, **13**, 890.
- Benkirane, M., Laftouhi, N.-E., El Mansouri, B., Salik, I., Snineh, M., El Ghazali, F. E., Safia, K., Zamrane, Z., 2020: An approach for flood assessment by numerical modeling of extreme hydrological events in the Zat watershed (High Atlas, Morocco). *Urban Water Journal*. **17**, 381-389.

- Bhuiyan, H.A.K.M., McNairn, H., Powers, J., Merzouki, A., 2017: Application of HEC-HMS in a Cold Region Watershed and Use of RADARSAT-2 Soil Moisture in Initializing the Model. *Hydrology*, **4**, 1- 9.
- Brirhet, H., Benaabidate, L., 2016: Comparison of Two Hydrological Models (Lumped and Distributed) Aver a Pilot Area of the Issen Watershed in the Souss Basin, Morocco. *European Scientific Journal*, **12**, 347-358.
- Gebre, S.L., 2015: Application of the HEC-HMS Model for Runoff Simulation of Upper Blue Nile River Basin. *Hydrology Current Research*, **6**, 1-8
- Liston G.E., 1995: Local advection of momentum, heat, and moisture during the melt of patchy snow covers. *J. Appl.Meteorol.* **34**: 1705–1715.
- Liston, G.E., K. Elder., 2006a: A distributed snow-evolution modeling system (SnowModel). *J. Hydromet.*, 7(6), 1259–1276.
- Liston, G.E., K. Elder., 2006b: A meteorological distribution system for high-resolution terrestrial modeling (MicroMet). *J. Hydromet.*, **7(2)**, 217–234.
- Maidment, R.I., Allan, R.P., Black, E., 2015: Recent observed and simulated changes in precipitation over Africa. *Geophysical Research Letters*, **42**, 8155-8164.
- US Army Corps of Engineers, 2017: Hydrologic Modeling System; Application Guide. US Army Corps of Engineers, Washington DC, 158.
- Werren, G., Reynard, E., Lane, S.N. and Balin, D., 2016: Flood Hazard Assessment and Mapping in Semi-Arid Piedmont Areas: A Case Study in Beni Mellal, Morocco. *Natural Hazards*, **81**, 481-511.
- Yucel, I., Guventurk, A., Sen, O.L., 2015. Climate change impacts on snowmelt runoff for mountainous transboundary basins in eastern Turkey. *Int. J. Climatol.* **35** (2), 215–228.
- Joshi, N., Bista, A., Pokhrel, I., Kalra, A., Ahmad, S., 2019: Rainfall-Runoff Simulation in Cache River Basin, Illinois, Using HEC-HMS. *World Environmental and Water Resources Congress 2019: Watershed Management, Irrigation and Drainage, and Water Resources Planning and Management*, 348-360.

## ASSIMILATION OF THERMAL AND MICROWAVE DATA TO IMPROVE FAO-56 METHOD FOR EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATES IN SEMI-ARID REGIONS

Abdelhakim AMAZIRH<sup>1</sup>, Salah ER-RAKI<sup>1,2</sup>, Olivier MERLIN<sup>3</sup>, Abdelghani CHEHBOUNI<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Mohammed VI Polytechnic University (UM6P), Center for Remote Sensing Applications (CRSA) to add the city, Morocco ([abdelhakim.amazirh@um6p.ma](mailto:abdelhakim.amazirh@um6p.ma))

<sup>2</sup>ProcEDE, Département de Physique Appliquée, Faculté des Sciences et Techniques, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Morocco ([s.erraki@uca.ma](mailto:s.erraki@uca.ma))

<sup>3</sup>Centre d'Études Spatiales de la Biosphère (CESBIO), Université de Toulouse, CNES, CNRS, IRD, UPS, Toulouse, France ([olivier.merlin@cesbio.cnes.fr](mailto:olivier.merlin@cesbio.cnes.fr) ; [ghani.chehbouni@ird.fr](mailto:ghani.chehbouni@ird.fr))

**Abstract:** FAO-56 is one of the widely used formulations to estimate the actual crop evapotranspiration ( $ET_a$ ) due to its operational nature and since it represents a reasonable compromise between simplicity and accuracy. In this vein, the objective of this paper was to examine the possibility of improving  $ET_a$  estimates through remote sensing data assimilation. For this purpose, SMAP-based surface soil moisture (SM) was assimilated into the soil evaporation ( $E_s$ ) component through the soil evaporation coefficient, and Landsat land surface temperature (LST) was assimilated into the actual crop transpiration ( $T_a$ ) component through the crop stress coefficient. By using SMAP-based SM and Landsat-LST, results also improved in comparison with standard FAO and reached a RMSE of 0.73 mm/day against eddy-covariance  $ET_a$  measurements.

**Keywords:** evapotranspiration; data assimilation; soil moisture; land surface temperature

### Introduction

Evapotranspiration (ET) is an essential component of the water and energy exchanges between surface and the atmosphere. Since ET is a crucial flux of the water cycle and helps understanding the hydrological processes, its estimation accurately is a must. ET has an important role for water resource management, drought monitoring and climate simulation (Tasumi, 2019). Arid and semi-arid regions suffer from many problems related to water resources and water use, where optimizing the use of irrigation water could help to deal with these issues. To do so, a quantification of crop water requirements which is equivalent to precise ET estimates is needed (Allen et al., 2011).

Several instruments have been used to measure ET at local scale, such as eddy correlation system (Allen et al., 2011), weighing lysimeter (Daamen et al., 1993), sap flow (Rafi et al., 2019) and Scintillometer that can provide ET at 10 km transect (Ezzahar and Chehbouni, 2009). Remote sensing data has the privilege to assess the ET indirectly at a global scale by using related remotely sensed indicators. Among these indicators, Leaf Area Index (LAI), Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Land Surface Temperature (LST) (Li et al., 2009) and soil moisture (Elfarkh et al., 2021).

FAO dual crop coefficient (FAO-2Kc) is one of widely used model to assess ET (Allen et al., 1998). FAO model is extensively used for modeling water consumption and growth of plants, due to its operability and simplicity as well as requires few input variables (Alberto et al., 2014). Many researchers have used FAO-56 to retrieve ET over contrasted area and different crop types, including, wheat (e.g., Amazirh et al., 2021; Olivera-Guerra et al., 2018; Rafi et al., 2019), olive (e.g., Er-Raki et al., 2010; Rallo et al., 2014), grapes and vineyards (Ferreira et al., 2012), as well as citrus (Rallo et al., 2017).

The FAO-2Kc approach is based on partitioning the ET into soil evaporation and plant transpiration by separating the crop coefficients ( $K_c$ ) into a basal crop  $K_{cb}$  and a soil evaporation  $K_e$  coefficients. The ET under well-watered conditions ( $ET_a$ ) is obtained by multiplying both coefficients by reference evapotranspiration ( $ET_0$ ), then the real ET is obtained by readjusting  $ET_a$  through integrating the crop stress coefficient when more factors limit moisture transport to the atmosphere. Several studies agreed about the fact that ET was under/overestimated by FAO double coefficient over bare and quasi bare soil conditions especially at the beginning or/and at the end of the crop growth season (e.g., Amazirh et al., 2021; Olivera-Guerra et al., 2018). This is because FAO-56 uses the water balance model at the surface to estimate soil



evaporation where, its component such as irrigation is not available all time which could lead to uncertainties. To overcome this issue soil moisture data has been successfully used to estimate the ET under bare soil conditions (Amazirh et al., 2018; Baghdadi and Zribi, 2006). Transpiration also could lead to uncertainties in FAO-ET modeling, where FAO used water balance in root zone, where the difficulty in modeling root zone soil moisture from meteorological data alone could provide some uncertainties on transpiration estimates. Several researchers attempt to improve the ET estimates using remotely sensed data, including Land surface temperature (LST) and soil moisture (Amazirh et al., 2021). Other research used data assimilation techniques to estimate ET where in Er-Raki et al. (2008) the assimilation of the LST into the single crop FAO-56 model provides better results than the standard FAO-56.

In this regard, data assimilation technic was used to improve the FAO-2Kc ET, SM and LST data are jointly assimilated, to improve soil evaporation using SM and to correct the wheat crop transpiration by using LST. Sequential assimilation scheme was applied in order to update the  $E$  and  $T_r$  estimates. The LST derived from Landsat 7/8 and disaggregated SMOS-SM were used at field scale. The assimilation approach was applied over a wheat field named F16 (2015-2016) near to Marrakech city in center Morocco.

## 1. Material and method

### 1.1. Data and study sites

The study was investigated over a 4 hectares wheat field that have been monitored during the 2015-2016 wheat agricultural season named 'F16'. This field is in the eastern part of the Tensift basin, Central Morocco, 40 km east of the Marrakech city (Figure 1). The climate is of semi-arid continental type, with low and irregular rainfall (~250 mm/year), temperatures rather low in winter (4.9 °C as average of the minima) and very high in summer (37.7 °C as average of the maxima) (Er-Raki 2007), and a very high evaporative demand (~1600 mm/year). This region has been the subject of several research studies since 2002 addressing various problems regarding the use of water, understanding the integrated hydrological functioning of the Tensift semi-arid basin, as well as improving our knowledge of fundamental hydrological processes (Amazirh et al., 2017). Flood gravitation irrigation system was adopted for watering this field, where the irrigation volume was measured by the installed flowmeters. The irrigation frequency was 1 to 3 weeks, where the field was irrigated 8 times with a volume of 64 mm each during the wheat agricultural season. The field is known for high clay contents (47%) and 18% of sand fraction. The sowing date was the 13th December 2015 (Amazirh et al., 2017).

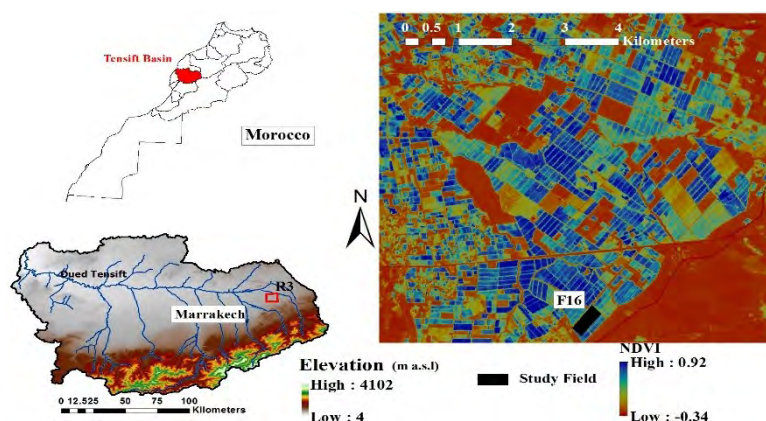


figure 1. Study area.

An eddy covariance station (EC) was installed in the field, to monitor energy fluxes, including, vertical sensible heat ( $H_{obs}$ ) and latent heat ( $LE_{obs}$ ) fluxes which is equivalent to  $ET_{obs}$ . Other instruments were also installed on the EC tower to provide additional measurements such as the surface net radiation (net radiometer CNR4) and the three components of wind speed (3D sonic anemometer). Soil heat flux ( $G$ ) was also measured at 5 cm depth by using two heat flux plates (HPF01). In order to assess the reliability of the energy fluxes, a comparison of the surface available energy ( $R_n - G$ ) to the sum of turbulent fluxes ( $H_{obs} +$



LEobs) called the energy balance closure is needed. The energy budget closure was achieved in Amazirh et al. (2017) for the same site with a strong coefficient of determination ( $R^2=0.91$ ).

Remotely sensed data were also used to provide soil moisture and Land surface temperature. LST data were provided by the Landsat-7 (L7) and Landsat-8 (L8) while soil moisture data were acquired from disaggregated SMAP data (Ojha et al., 2019) (Table 1).

**Table 1.** Technical characteristics of satellite products.

Sensors /Mission	Acquisition Time	Bands	Spatial resolution (m)	Temporal resolution (Day)
Soil Moisture Active Passive (SMAP)	06:00 AM/PM	Brightness temperature	36 km	2-3
Landsat 7 and Landsat 8 (L7/L8)	~11:30 AM	- VNIR <sup>+</sup> (L7: B3 & B4; L8: B4 & B5) - TIR (B6 for L7 and B10 et B11 for L8)	60 m and 100 for TIR 15 m for VNIR	8

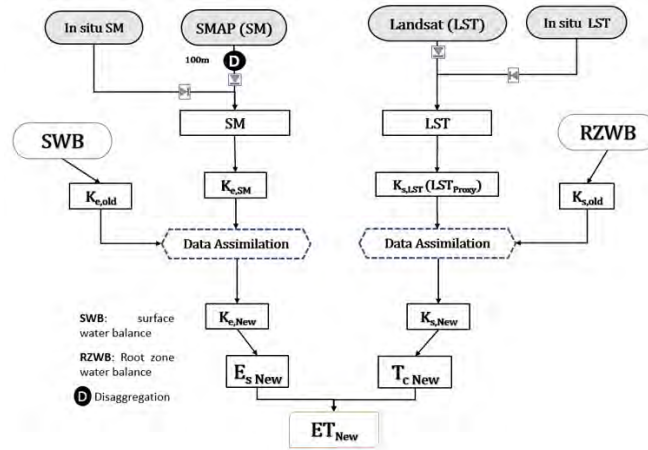
Thermal infrared (TIR) data were converted to LST data after applying atmospheric correction and correction of surface emissivity. The followed steps are described in Tardy et al. (2016) and the same processing chain was used and validated by in situ LST measurements in Amazirh et al. (2018, 2019). The 36 km SMAP soil moisture was disaggregated to 100 m resolution by Ojha et al. (2019) using DISPATCH (DISaggregation based on Physical and Theoretical scale Change) method. The followed disaggregation steps were described in Ojha et al. (2019). The disaggregated SMAP-SM products were evaluated over 22 irrigated fields in the same used area where the *in situ* SM measurements have been collected and calibrated as in Amazirh et al. (2018) during the same 2015–2016 season.

## 1.2. Methodology

Evapotranspiration was estimated using the dual crop coefficient FAO-56 that allows for partitioning ET into bare soil evaporation and wheat crop transpiration beyond standard conditions using two coefficients: the soil water evaporation coefficient ( $K_e$ ) to describe evaporation from the soil surface and the basal crop coefficient ( $K_{cb}$ ) to describe plant transpiration with an adjustment to obtain the real crop evapotranspiration  $ET_a$ , by introducing the water stress coefficient  $K_s$ , according to Equation (1):

$$\frac{ET_a}{ET_0} = (K_{cb} K_s + K_e) \quad (1)$$

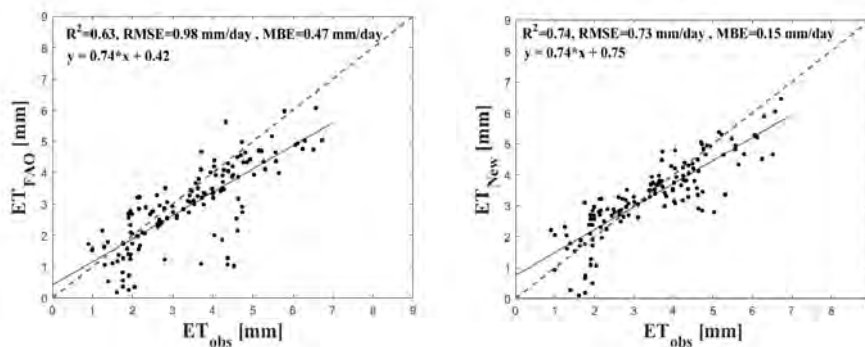
with  $ET_0$  being the ET rate over a well-watered crop land covered by a short green, grass-like crop (reference ET), depending only on atmospheric conditions;  $K_{cb}$  and  $K_e$  being the basal crop coefficient and the bare soil coefficient, respectively. Soil evaporative coefficient ( $K_e$ ) is calculated as a function of the amount of water in the soil, soil properties and the exposed and wetted soil fraction to solar radiation where most evaporation occurs ( $f_{ew}$ ).  $tK_s$  is the water stress calculated based on a daily computation of the water balance for the root-zone layer  $Z_r$  (m). All equations were described in Allen et al. (1998). As stated before, the assimilation approach seeks to improve the evaporation component by assimilating SM in  $K_e$  ( $K_{e,New}$ ) and transpiration component by assimilating LST into  $K_s$  ( $K_{s,New}$ ). Sequential Kalman filter was used for this issue as proposed by Schuurmans et al. (2003) and used by Er-Raki et al. (2008). This method has been chosen due to its simplicity and to keep FAO-2Kc method operational. SM was assimilated directly into the  $K_e$ , while a normalized LST ( $LST_{proxy}$ ) was assimilated into  $K_s$  ( $K_{s,LST}$ ). The LST was normalized by its maximal and minimal values as in Idso et al. (1981). Figure 2 illustrates the flowchart of retrieved approaches.



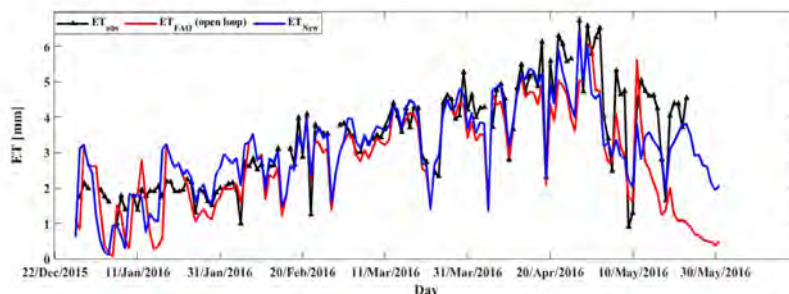
**figure 2.** Schematic diagram of the assimilation approach.  $E_s$  New,  $T_c$  New,  $K_e$ ,New ,  $K_s$ ,New are the updated evaporation, transpiration, evaporation and stress coefficient after assimilation, respectively.  $K_e$ ,old and  $K_s$ ,old are  $K_e$  and  $K_s$  before assimilation, respectively.

**2. Results and discussions**

To evaluate the spatial extensibility of the assimilation scheme, the daily  $ET_a$  over the selected F16 field during 2015–2016 was simulated at a spatial resolution of 100 m. SM data was derived from SMAP data product, which were disaggregated to 100 m (Ojha et al., 2019), and LST data were derived from Landsat-7 and Landsat-8 data. Figures 3 and 4 present the scatter and time series plots of the obtained results using the assimilation technique, respectively.



**figure 3.** Scatter plot comparison between FAO-56 and observed  $ET_a$  ( $ET_{Obs}$ ) without assimilation ( $ET_{FAO}$ ), and with assimilation ( $ET_{New}$ ).



**figure 4.** Daily temporal comparison between FAO-56 after and before assimilation and observed ET ( $ET_{Obs}$ ).

From the obtained results in Figures 3 & 4, the assimilation of LST and SM conjointly tend to improve the  $ET_a$  estimates. Figures 3 compare the results of the assimilation procedure with the one from the open-loop  $ET_{FAO}$  (no assimilation). For the other case, when coupled assimilation of  $SM_{DISPATCH}$  and LST through using the normalized LST proxy, the RMSE is equal to 0.73 mm/day with a bias that doesn't exceed 0.15

mm/day. Without assimilation (ET<sub>FAO</sub>), FAO-2K<sub>c</sub> severely underestimates ET<sub>a</sub> during the senescence period, where the assimilation experiment has improved the accuracy in ET<sub>a</sub> estimates. This is seen especially at the beginning and the end of the wheat growing season (Figure 4), where the SM improves the soil E<sub>s</sub> when soil is under bare soil conditions. The assimilation of SM allows the updating of the surface depletion (D<sub>e</sub>), thus controlling the water budget at the surface then updating the K<sub>e</sub> coefficient of evaporation. By integrating the LST information, this allows the updating of the root zone depletion D<sub>r</sub>, which controls the temporal course of the root zone water budget, which leads to correcting the K<sub>s</sub> values. The idea of assimilating LST into the stress coefficient is to improve the transpiration component. The selected site was well irrigated, and the stress appears just in some periods during the investigated study. The real impact of LST on the water balance at the root zone could be seen clearly in the case of a field that undergoes several stress periods when irrigation is deliberately cut. In this study, just on some dates that the field is undergoing stress period and by assimilating LST into FAO model we succeeded to capture the stress periods.

## Conclusion

This work aims to improve the actual crop evapotranspiration (ET<sub>a</sub>) estimates using data assimilation technique. The idea was to improve the accuracy of the FAO-56 ET components through assimilating remote sensing data. Surface soil moisture (SM) data is assimilated in order to update soil evaporation and land surface temperature (LST) is assimilated to update the crop wheat transpiration. SMAP disaggregated SM and Landsat derived LST were used at field scale. The investigated technique was tested over F16 field located in central Morocco, during the 2015-2016 wheat growing season. The modelled ET<sub>a</sub> tracks successfully the ET<sub>a</sub> observation, by coupling SM and LST assimilation. However, some uncertainties were observed, and this could be due to the sensing depth of SM data. The assimilation technique has demonstrated the potential of inferring valuable information from remotely sensed land surface data (SM and LST) for evaluating distributed water balance models, given that forcing data (including irrigation) are accurately known.

The proposed study showed its capability to retrieve ET<sub>a</sub> at field scale. Furthermore, a spatialization of ET<sub>a</sub> over a large scale (basin, region, national scales) is needed. This could be done by using LST and SM products at high resolution (Amazirh et al., 2019; Ojha et al., 2019). Recently, Amazirh et al. (2021) proposed a new evaporation formulation by including the soil texture information into the reduction coefficient (K<sub>r</sub>). The proposed formulation demonstrates its better performance than the classical FAO. Combining the assimilation of SM into E<sub>s</sub> formulation developed in Amazirh et al. (2021) could provide more accurate results by improving the E<sub>s</sub> component.

## Bibliography

- Alberto, M.C.R., Quilty, J.R., Buresh, R.J., Wassmann, R., Haidar, S., Correa, T.Q., Sandro, J.M., 2014: Actual evapotranspiration and dual crop coefficients for dry-seeded rice and hybrid maize grown with overhead sprinkler irrigation. *Agric. Water Manage.* **136**, 1–12. doi:10.1016/j.agwat.2014.01.005
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998: Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage, Paper No. 56, FAO. Rome, Italy.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Howell, T.A., Jensen, M.E., 2011: Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agric. Water Manage.* **98**, 899–920. doi:10.1016/j.agwat.2010.12.015
- Amazirh, A., Er-Raki, S., Chehbouni, A., Rivalland, V., Diarra, A., Khabba, S., Ezzahar, J., Merlin, O., 2017: Modified Penman–Monteith equation for monitoring evapotranspiration of wheat crop: Relationship between the surface resistance and remotely sensed stress index. *Biosyst. Eng.* **164**, 68–84. doi:10.1016/j.biosystemseng.2017.09.015
- Amazirh, A., Merlin, O., Er-Raki, S., Gao, Q., Rivalland, V., Malbeteau, Y., Khabba, S., Escorihuela, M.J., 2018: Retrieving surface soil moisture at high spatio-temporal resolution from a synergy between Sentinel-1 radar and Landsat thermal data: A study case over bare soil. *Remote Sens. Environ.* **211**, 321–337. doi:10.1016/j.rse.2018.04.013
- Amazirh, A., Merlin, O., Er-Raki, S., 2019: Including Sentinel-1 radar data to improve the disaggregation of MODIS land surface temperature data. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* **150**, 11–26. doi:10.1016/j.isprs.2019.02.004

- Amazirh, A., Merlin, O., Er-Raki, S., Bouras, E., Chehbouni, A., 2021: Implementing a new texture-based soil evaporation reduction coefficient in the FAO dual crop coefficient method. *Agric. Water Manage.* **250**, 106827. doi:10.1016/j.agwat.2021.106827.
- Baghdadi, N., Zribi, M., 2006: Evaluation of radar backscatter models IEM, OH and Dubois using experimental observations. *Int. J. Remote Sens.* **27**, 3831–3852. doi:10.1080/01431160600658123
- Daamen, C., Simmonds, L., Wallace, J., Laryea, K., Sivakumar, M., 1993: Use of microlysimeters to measure evaporation from sandy soils. *Agric. For. Meteorol.* **65**, 159–173. doi:10.1016/0168-1923(93)90002-Y
- Elfarkh, J., Er-Raki, S., Ezzahar, J., Chehbouni, A., Aithssaine, B., Amazirh, A., Khabba, S., Jarlan, L., 2021: Integrating thermal stress indexes within Shuttleworth–Wallace model for evapotranspiration mapping over a complex surface. *Irrig. Sci.* **39**, 45–61. doi:10.1007/s00271-020-00701-3
- Er-Raki S., 2007 : Estimation des besoins en eau des cultures dans la région de Tensift AL Haouz : Modélisation, expérimentation et télédétection. Thèse de doctorat en Mécanique des Fluides et Énergétique – Télédétection, Faculté des Sciences Marrakech, 112 p.
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Hoedjes, J., Ezzahar, J., Duchemin, B., Jacob, F., 2008: Improvement of FAO-56 method for olive orchards through sequential assimilation of thermal infrared-based estimates of ET. *Agric. Water Manage.* **95**, 309–321. doi:10.1016/j.agwat.2007.10.013
- Er-Raki, S., Chehbouni, A., Boulet, G., Williams, D.G., 2010: Using the dual approach of FAO-56 for partitioning ET into soil and plant components for olive orchards in a semi-arid region. *Agric. Water Manage.* **97**, 1769–1778. doi:10.1016/J.AGWAT.2010.06.009
- Ezzahar, J., Chehbouni, A., 2009: The use of scintillometry for validating aggregation schemes over heterogeneous grids. *Agric. For. Meteorol.* **149**, 2098–2109. doi:10.1016/J.AGRFORMET.2009.09.004
- Ferreira, M.I., Silvestre, J., Conceição, N., Malheiro, A.C., 2012: Crop and stress coefficients in rainfed and deficit irrigation vineyards using sap flow techniques. *Irrig. Sci.* **30**, 433–447. doi:10.1007/s00271-012-0352-2
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J., Hatfield, J.L., 1981: Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* doi:10.1016/0002-1571(81)90032-7
- Li, Z.-L., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C., Tang, B., Yan, G., Zhang, X., Li, Z.-L., Tang, R., Wan, Z., Bi, Y., Zhou, C., Tang, B., Yan, G., Zhang, X., 2009: A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data. *Sensors* **9**, 3801–3853. doi:10.3390/s90503801
- Ojha, N., Merlin, O., Molero, B., Suere, C., Olivera-Guerra, L., Ait Hssaine, B., Amazirh, A., Al Bitar, A., Escorihuela, M., Er-Raki, S., 2019 : Stepwise Disaggregation of SMAP Soil Moisture at 100 m Resolution Using Landsat-7/8 Data and a Varying Intermediate Resolution. *Remote Sens.* **11**, 1863. doi:10.3390/rs11161863
- Olivera-Guerra, L., Merlin, O., Er-Raki, S., Khabba, S., Escorihuela, M.J., 2018: Estimating the water budget components of irrigated crops: Combining the FAO-56 dual crop coefficient with surface temperature and vegetation index data. *Agric. Water Manage.* **208**, 120–131. doi:10.1016/j.agwat.2018.06.014
- Rafi, Z., Merlin, O., Le Dantec, V., Khabba, S., Mordelet, P., Er-Raki, S., Amazirh, A., Olivera-Guerra, L., Ait Hssaine, B., Simonneaux, V., Ezzahar, J., Ferrer, F., 2019 : Partitioning evapotranspiration of a drip-irrigated wheat crop: Inter-comparing eddy covariance-, sap flow-, lysimeter- and FAO-based methods. *Agric. For. Meteorol.* **265**, 310–326. doi:10.1016/j.agrformet.2018.11.031
- Rallo, G., Baiamonte, G., Manzano Juárez, J., Provenzano, G., 2014: Improvement of FAO-56 model to estimate transpiration fluxes of drought tolerant crops under soil water deficit: Application for olive groves. *J. Irrig. Drain. Eng.* **140**. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000693
- Rallo, G., González-Altozano, P., Manzano-Juárez, J., Provenzano, G., 2017: Using field measurements and FAO-56 model to assess the eco-physiological response of citrus orchards under regulated deficit irrigation. *Agric. Water Manage.* **180**, 136–147. doi:10.1016/J.AGWAT.2016.11.011
- Schuermans, J.M., Troch, P.A., Veldhuizen, A.A., Bastiaanssen, W.G.M., Bierkens, M.F.P., 2003: Assimilation of remotely sensed latent heat flux in a distributed hydrological model. *Adv. Water Resour.* **26**, 151–159. doi:10.1016/S0309-1708(02)00089-1
- Tardy, B., Rivalland, V., Huc, M., Hagolle, O., Marcq, S., Boulet, G., 2016: A Software Tool for Atmospheric Correction and Surface Temperature Estimation of Landsat Infrared Thermal Data. *Remote Sens.* **8**, 696. doi:10.3390/rs8090696

Tasumi, M., 2019: Estimating evapotranspiration using METRIC model and Landsat data for better understandings of regional hydrology in the western Urmia Lake Basin. *Agric. Water Manage.* 226, 105805. doi:10.1016/j.agwat.2019.105805

## CLIMSNOW, UN SERVICE CLIMATIQUE POUR ANTICIPER L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES CONDITIONS D'ENNEIGEMENT DES STATIONS DE SPORT D'HIVER

H. FRANÇOIS<sup>1</sup>, S. MORIN<sup>2</sup>, C. CARMAGNOLA<sup>2,3</sup>, R. SAMACOÏTS<sup>4</sup>, N. ANIORT<sup>4</sup>, L. GUILY<sup>3</sup>, J. SIMON<sup>3</sup>, J.M. SOUBEYROUX<sup>4</sup>, A. DROUIN<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Université Grenoble-Alpes, INRAE Lyon-Grenoble Auvergne-Rhône-Alpes - LESSEM, 2 rue de la Papeterie - BP76, 38402 Saint-Martin-d'Hères CEDEX, hugues.francois@inrae.fr

<sup>2</sup> Université de Toulouse, Université Grenoble Alpes, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Etudes de la Neige (Toulouse, Grenoble)

<sup>3</sup> Dianeige, Grenoble

<sup>4</sup> Météo France, Toulouse

**Résumé :** La démarche de recherche scientifique à l'origine de ClimSnow avait pour objectif de combler une lacune de connaissance au sujet de l'impact du changement climatique sur les conditions d'exploitation des domaines skiables. Auparavant, les études abordaient la question de l'enneigement sous l'angle de l'enneigement naturel là où les gestionnaires avaient développé des méthodes de gestion de la neige avancées et adaptées à leur pratique professionnelle. Cette approche constituait un frein majeur pour que les acteurs de la filière s'approprient les enjeux du changement climatique. Lever ce verrou impliquait une démarche interdisciplinaire croisant connaissance des stations de sports d'hiver, portée par l'INRAE, et de l'étude de l'enneigement en montagne, amenée par le CNRM (Météo-France - CNRS) qui a débouché, outre les avancées de connaissances scientifiques, sur le service ClimSnow, produit de diagnostic des impacts du changement climatique dont les exploitants sont aujourd'hui demandeurs, renversant ainsi la perspective initiale.

**Mots-Clés :** changement climatique, impacts, domaine skiable, enneigement.

### Introduction

Si la matérialité du changement climatique est dorénavant acceptée par la majorité de la population, l'ampleur des questions qu'il soulève et les incertitudes associées à ses impacts sont autant de freins pour que les acteurs concernés prennent explicitement ce facteur en compte dans la définition de leurs stratégies à court et moyen termes, dans une perspective de long terme. Les stations de sports d'hiver n'échappent pas à cette situation et ce d'autant moins qu'elles composent avec une ressource, la neige, particulièrement variable d'une année sur l'autre et dont dépend directement l'ouverture de leur domaine skiable. Les hivers peu enneigés de la fin de la décennie 1980, début de la décennie 1990 ont particulièrement alerté les décideurs publics quant aux fragilités d'un secteur qui depuis les années 1960 avait été le fer de lance de l'aménagement du territoire montagnard et de développement économique et social des zones de montagne. Cette séquence a non seulement rappelé l'effet des conditions d'enneigement sur l'exploitation des stations de sports d'hiver mais surtout leur fragilité face à la succession des « hivers sans neige » comme le veut la dénomination héritée de cette période.

Cette situation est d'autant plus problématique que le deuxième pilier du tourisme de ski, outre la neige, sont les remontées mécaniques, reposant elles-mêmes sur des capitaux lourds. Si cette intensité capitaliste répond bien aux concepts de massification de la production et de la consommation de la période fordiste dans laquelle les stations émergent, elles héritent également des limites du modèle en termes de flexibilité productive. La réponse aux difficultés d'exploitation s'est alors traduit par une poursuite de la logique capitaliste en investissant dans les technologies de production de neige qui ont dès lors suivi une double trajectoire d'amélioration des performances d'une part et de diffusion de l'autre (Spandre et al., 2015), ces deux dynamiques se renforçant mutuellement. En outre, le développement de la production de neige s'est accompagné d'un ensemble d'outils contribuant à la gestion de l'enneigement depuis le profilage des pistes jusqu'au monitoring du manteau neigeux (Berard-Chenu, 2021). L'ensemble



de ces processus a permis d'améliorer les capacités d'exploitation en même temps que les conditions naturelles se dégradent sous l'effet du changement climatique masquant ainsi en partie ses premiers impacts sensibles sur la réduction de l'enneigement (Berard-Chenu et al., 2022), sans garantie que ces technologies soient en mesure de jouer un rôle équivalent à l'avenir (Hock et al., 2019).

Tout l'enjeu est alors de disposer d'éléments permettant d'évaluer la contribution future des pratiques de gestion de la neige au regard de l'évolution des conditions climatiques, afin de mesurer le risque climatique qui pèse sur les stations individuelles, sur leurs territoires support d'une part comme sur la filière du tourisme hivernal et de montagne d'autre part. Il s'agit d'un enjeu central pour l'avenir des stations de sports d'hiver et la définition de stratégies d'adaptation au changement climatique. La fiabilisation de l'enneigement permet de conforter les moyens existants, tirés de l'exploitation des domaines skiables, mais limite les possibilités d'explorer des voies de développement différentes. Pour apporter un éclairage précis à ce sujet, une chaîne de modélisation complexe permettant d'intégrer le damage et la production de neige à l'évaluation de la fiabilité de l'enneigement passé et futur des domaines skiables a été développée. Cette communication apporte dans un premier temps des précisions sur les outils mobilisés et, dans un second temps, la démarche de transfert opérationnel de ce dispositif scientifique qui a permis de formaliser le service climatique ClimSnow en s'appuyant sur le savoir-faire du bureau d'études Dianeige, spécialisé dans l'aménagement et de la gestion des domaines skiables.

## 1. Les fondements scientifiques de la modélisation et la quantification de l'enneigement des domaines skiables

La quantification de la fiabilité de l'enneigement des domaines skiables prenant en compte les pratiques de gestion de la neige en station de sports d'hiver est issue des travaux de recherche communs entre le Centre d'Etudes de la Neige (CNRM, Météo-France - CNRS) et l'INRAE depuis 2012. Les premiers croisements de ces méthodes et outils ont ainsi permis d'établir les bases méthodologiques de l'approche en croisant des résultats de la modélisation spatiale des domaines skiables et des simulations de manteau neigeux en intégrant uniquement les processus gouvernant l'évolution du manteau neigeux naturel (François et al., 2014). Il s'agit donc d'une méthode fournissant des résultats agrégés à l'échelle de chaque domaine skiable au sein desquels l'évaluation de l'enneigement est réalisée en appliquant la simulation de manteau neigeux correspondant aux caractéristiques de localisation, d'altitude, de pente et d'orientation de chaque pixel qui le compose.

Sur cette base, plusieurs initiatives de recherche successives et complémentaires ont permis d'affiner et de développer la modélisation de l'enneigement des domaines skiables :

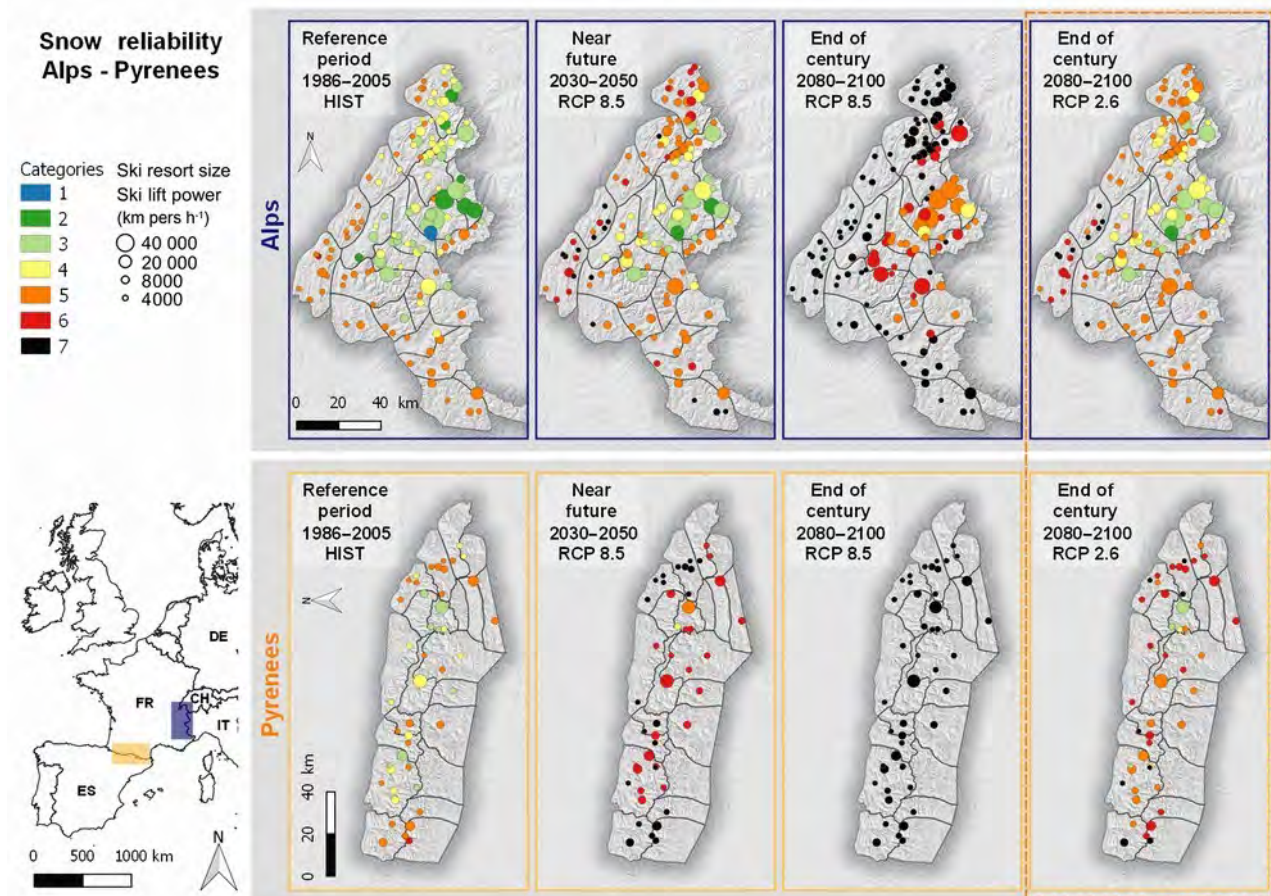
La thèse de P. Spandre a permis de développer **Crocus Resort** (Spandre et al., 2016), version enrichie du modèle de manteau neigeux à base physique Crocus développé au CNRM, en implémentant les effets du damage et de la production de neige.

Dans le cadre de ce travail de thèse, la représentation spatiale des enveloppes gravitaires de domaine skiable développée par l'INRAE dans la **BD Stations** a également pu être affinée, notamment au regard de la représentation spatiale des zones couvertes par les installations de production de neige.

Le programme GICC **ADAMONT** a permis de développer un jeu de données de projections climatiques compatibles avec la chaîne de modélisation SAFRAN-Crocus en utilisant des méthodes de descente d'échelle / débiaisage des simulations régionales EUROCORDEX (Verfaillie et al., 2017).

Deux formes d'analyse ont ainsi permis de proposer une meilleure compréhension des impacts du changement climatique sur l'enneigement naturel et géré. L'étude des altitudes limites de fiabilité de l'enneigement (snow reliability line) et de leur évolution en fonction des massifs et du contexte climatique à venir (Spandre et al., 2019b). Cette approche consiste à comparer différentes altitudes du domaine skiable (pied des pistes, altitude moyenne) avec celle au dessus de laquelle une quantité suffisante de neige est disponible pendant suffisamment longtemps (règle dite « des 100 jours », Abegg et al., 2006). L'ajout de différentes modalités de gestion de neige (naturelle, damée, en fonction de différents taux de couverture du domaine skiable), l'utilisation de différentes altitudes caractéristiques ainsi que l'utilisation d'une

approche probabiliste pour tenir compte de la variabilité de l'enneigement et les incertitudes de la modélisation permettent d'enrichir la lecture de cette information relativement limitée car réduisant la complexité des domaines skiables à une limite altitudinale. Une typologie des conditions d'exploitation en 7 catégories, des plus favorables aux plus défavorables, a ainsi pu être établie et appliquée aux massifs des Alpes et des Pyrénées (figure 1).



**figure 1.** Limite d'altitude de fiabilité de l'enneigement dans les Alpes et les Pyrénées à différentes périodes et en fonction des scénarios d'émission de gaz à effet de serre. Les catégories 1, 2 et 3 illustrent les stations de ski où les conditions d'enneigement naturel sont fiables. Les catégories 4 et 5 illustrent les stations de ski où les conditions d'enneigement sont fiables grâce à la fabrication de neige de culture. Les catégories 6 et 7 illustrent les stations de ski où la fabrication de neige n'est plus efficace pour réduire l'effet du manque de neige naturelle aux plus basses altitudes de la station (Spandre et al., 2019b).

La définition d'un indice de fiabilité de l'enneigement caractéristique d'une saison touristique hivernale (Spandre et al., 2019a) permet quant à elle d'intégrer explicitement toute la complexité des domaines skiables pour proposer une vision à la fois plus complète et plus compacte des impacts du changement climatique en synthétisant de nombreuses informations. Ce type d'analyse a notamment conduit à proposer une analyse de risque climatique, en complément de l'analyse de l'évolution de l'indice de fiabilité au fil du temps, fondée sur la reproduction des conditions d'exploitation les plus défavorables. Pour cela, une donnée d'enneigement "critique" de référence est calculée, correspondant au vingtième centile sur la période de référence passée 1986-2015 (saisons 1986-1987 à 2015-2016), permettant de caractériser l'enneigement typique d'une année faiblement enneigée. Ceci permet ensuite d'étudier la fréquence des saisons à venir où la valeur de l'indice de fiabilité est inférieure ou égale à cette valeur caractéristique des conditions d'exploitation difficile. Cette approche a ainsi été mobilisée pour analyser la situation dans les Pyrénées (François et al., 2021) et dans les Alpes (Figure 2, Arlot et al., 2022).

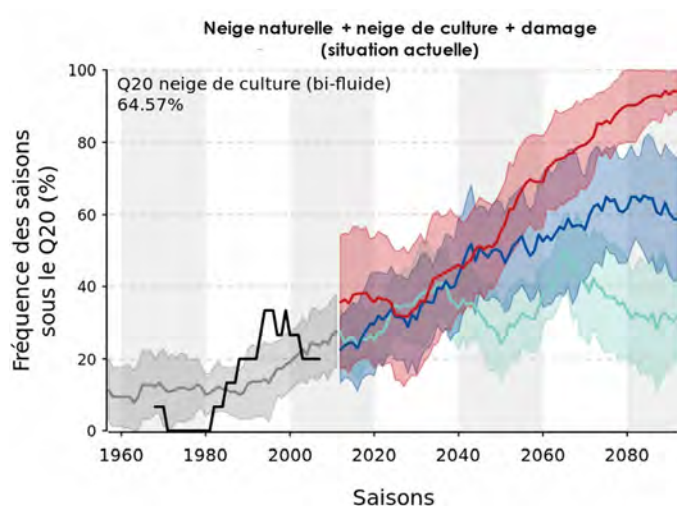




## 2. ClimSnow, transfert opérationnel des méthodes et résultats de la recherche vers un outil de diagnostic personnalisé

Afin de répondre à des questionnements d'acteurs locaux sur les questions de stratégies de développement des stations de sports d'hiver dans la perspective du changement climatique en tenant compte des spécificités de chaque domaine skiable, des informations complémentaires doivent être intégrées, ce qui s'inscrit dans le cadre d'un service dédié, que constitue ClimSnow. Développé sous forme prototype en réponse à une commande du Conseil Départemental de l'Isère / Isère Attractivité en 2017-2018 (Gerbaux et al., 2020), ce service valorise et enrichit les outils scientifiques, et s'inscrit dans le cadre d'un partenariat entre Météo-France et Dianeige, en lien avec INRAE. Le croisement de l'expertise et des compétences de chacun des partenaires a ainsi abouti au développement d'une chaîne opérationnelle qui vient compléter les travaux scientifiques en apportant une forme de médiation essentielle à l'appropriation des résultats complexes issus de ClimSnow. L'intermédiation par Dianeige débute en amont de la réalisation de la production de l'étude ClimSnow par l'expression du besoin qui préside à la collecte des données géographiques correspondantes. La définition amont des enjeux permet de guider la rédaction d'un rapport circonstancié et l'appropriation des résultats par les commanditaires pour contribuer aux délibérations visant à définir les orientations stratégiques pour l'évolution des aménagements de leur domaine skiable.

Les résultats issus de ClimSnow se présentent comme un jeu d'indicateurs restitués sous formes de graphiques, cartes et tableaux, assortis de leur description et de préconisations. Outre l'évolution de l'enneigement naturel et géré, ClimSnow permet de quantifier le besoin en eau associé à la production de

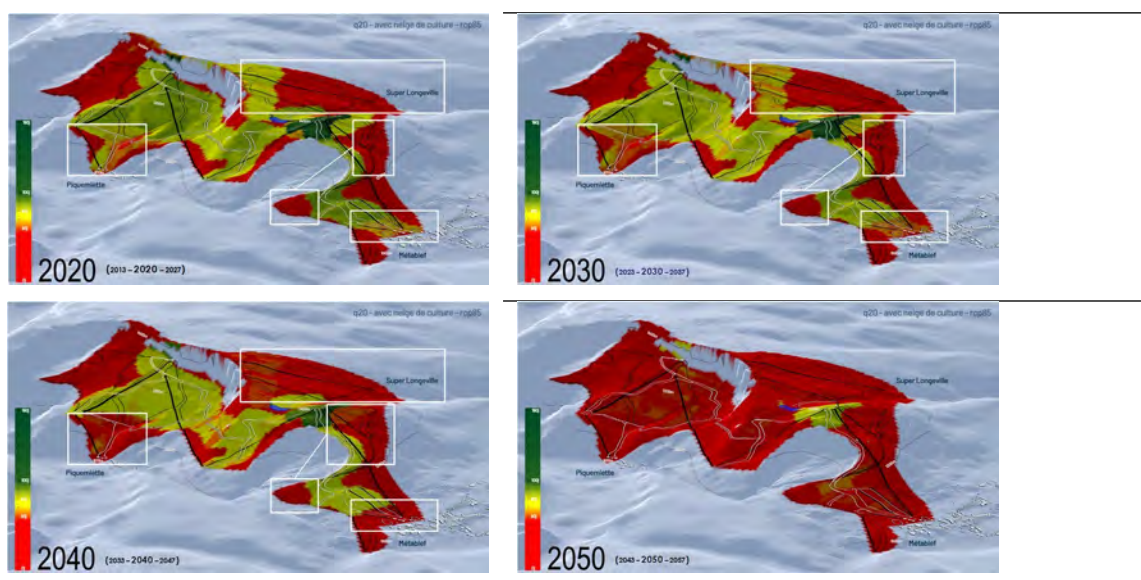


neige, qui peut être combiné à d'autres sources d'information au sujet de l'évolution de cette ressource pour nourrir les démarches de planification territoriale.

L'évolution temporelle en fonction des scénarios d'émission de gaz à effet de serre permet de faire un lien direct avec les représentations utilisées par le GIEC concernant l'évolution des températures. Ici, nous représentons le taux de retour du Q20 historique. Ce type de figure (voir Figure 3) montre ainsi toute l'importance de la trajectoire climatique suivie, notamment à partir du milieu de siècle où la divergence entre les scénarios est plus marquée.

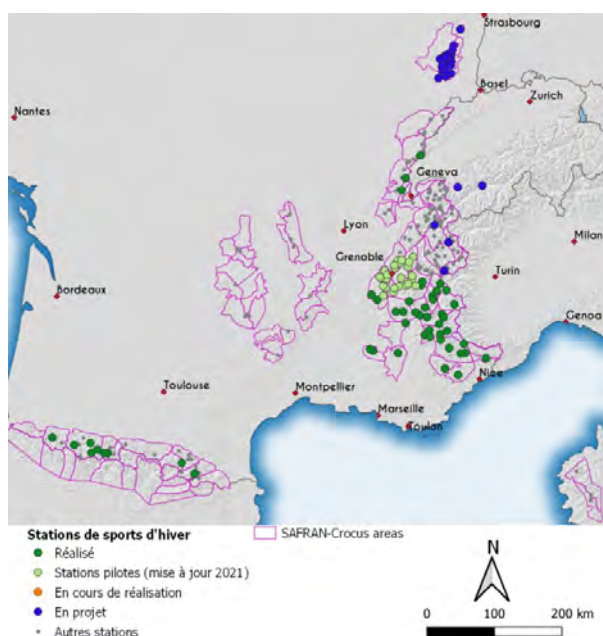
**figure 3.** Evolution du taux de retour du Q20 représentatif des hivers où les conditions d'exploitation sont les plus défavorables en fonction du temps et des scénarios d'émissions de GES (RCP 2.6, RCP 4.5 et RCP 8.5)

Le partenariat avec un bureau d'études spécialisé dans le domaine et rôlé à la relation avec les exploitants permet également d'adopter les formes de représentations vers des visualisations parfois moins rigoureuses du point de vue académique mais qui font plus directement sens pour le destinataire des études telles que l'illustrent les cartes de la figure 4. En outre, il existe un enjeu direct de crédibilisation plus ou moins forte des résultats avec la demande des acteurs de terrains de mixer les résultats issus de la chaîne de traitement afin de limiter la représentation des sorties prenant en compte la production de neige au stricte périmètre des pistes couvertes là où nos simulations sont évaluées sur la base d'approches plus globales, cohérentes avec l'approche par enveloppes gravitaires de domaines skiables.



**figure 4.** Evolution du nombre de jours « skiables » au sein du domaine skiable en fonction de 4 périodes lors des saisons où les conditions d'exploitation sont les plus difficiles (Q20 projeté) dans le cas du scénario RCP 8.5 en tenant compte de la production de neige au regard de la couverture du domaine existante. Ces figures montrent un effet de seuil entre 2040 et 2050 où la production de neige ne permet plus de répondre au besoin.

La demande d'analyses individuelles peut également être portée par des collectivités moins directement impliquées dans la gestion des domaines skiables (en France les remontées mécaniques sont un service public sous la responsabilité des communes ou de groupements de communes) telle que les Régions, les Département ou des Établissements Publics de Coopération Intercommunale (EPCI) au sein desquels figurent plusieurs domaines skiables. Si l'expérience nous a montré que dans cette configuration l'enjeu d'appropriation reste variable pour les gestionnaires directs de la neige en station elle a permis de développer des formes de représentation répondant au besoin de ciblage des politiques publiques telle que ce fut le cas pour la Région Sud-PACA en 2021 et 2022 avec la production d'une carte synthétique de l'ensemble des situations individuelles.



Aujourd'hui, compte tenu des commandes institutionnelles et des commandes individuelles, plus de 100 diagnostics ClimSnow ont pu être réalisés (cf. Figure 5) et cet outil fait désormais autorité auprès des décideurs publics. D'un côté, la démarche scientifique contribue aux travaux de la communauté dans ce domaine et plus largement à l'étude des impacts du changement climatique ce qui permet d'abonder les réflexions au sujet des stratégies d'adaptation. De l'autre, elle a permis d'explicitement mettre l'évolution du climat à l'agenda des gestionnaires de domaines skiables et est directement recommandée par le Plan Avenir Montagne et le rapport parlementaire sur le tourisme de montagne et les enjeux du changement climatique (Battistel et Gayte, 2022).

**figure 5.** Carte des stations pour lesquelles une évaluation de la fiabilité de l'enneigement fondée sur ClimSnow est réalisé ou

sera prochainement réalisé.

## Conclusion

Le service ClimSnow constitue une traduction opérationnelle d'un effort de recherche de long terme, ayant abouti à la co-construction d'une information climatique pertinente pour tenir compte de l'évolution

du risque climatique au cours du 21ème siècle sur les conditions d'exploitation des stations de sport d'hiver afin de nourrir les réflexions et démarches d'adaptation et de transition. Issu d'un partenariat entre organismes de recherche, associant des acteurs des filières concernées, et concrétisé sous l'égide d'un bureau d'étude spécialisé, ClimSnow constitue aujourd'hui un des exemples les plus aboutis de service climatique au niveau national (ONERC, 2022). Cette contribution fournit les éléments de contexte qui ont présidé à son développement et sa concrétisation opérationnelle. Le service ClimSnow opérationnel a vocation à évoluer à l'avenir afin de continuer d'apporter des éléments tangibles aux débats au sujet de la transition des territoires de montagne.

Par exemple, un des axes de développement concerne l'articulation des résultats de ClimSnow avec les enjeux de l'évolution des ressources en eau et du partage de ses usages. Ceci requiert de poursuivre un effort de recherche et de transfert, afin de demeurer à l'état de l'art dans le domaine de la modélisation climatique (prochaines générations de modèles de climat à résolution spatiale croissante, augmentation de la robustesse des simulations et de la caractérisation des incertitudes), de la simulation de la neige sur piste tenant compte des évolutions technologiques et de représentations plus fines des pratiques de gestion de la neige, d'analyses multi-agents des conséquences de l'évolution de l'enneigement sur la demande touristique au delà de la stricte analyse de l'offre permis par ClimSnow actuellement. Les perspectives sont nombreuses et s'intègrent dans le cadre du développement des services climatiques, à l'interface des disciplines des bases physiques du climat, de l'étude des impacts, de l'adaptation et de la vulnérabilité, dans un cadre transdisciplinaire en relation avec les filières et les territoires, toute en prêtant attention au modèle économique de ce nouveau secteur destinée à produire et fournir une information climatique pertinente.

## Références

- Battistel, M.N. et L. Gayte, Rapport d'information sur le tourisme de montagne et les enjeux du changement climatique. Assemblée Nationale, Commission des Affaires Economiques, [https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cion-eco/l15b5127\\_rapport-information](https://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/cion-eco/l15b5127_rapport-information), 2022.
- Berard-Chenu, L., François, H., George, E., and Morin, S. : Past changes in natural and managed snow reliability of French Alps ski resorts from 1961 to 2019, *The Cryosphere*, 16, 863–881, <https://doi.org/10.5194/tc-16-863-2022>, 2022.
- Arlot M.P., S.Morin, L. Tschanz, E. George, H. François, E. Jeanjean, Mise en prospective d'une approche intégrée et participative d'adaptation d'un territoire de montagne au changement climatique, in *La prospective au service de l'adaptation au changement climatique*, Rapport au Premier ministre et au Parlement de l'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique (<https://www.ecologie.gouv.fr/parution-du-rapport-annuel-observatoire-national-sur-effets-du-rechauffement-climatique-onerc-0>), pp 196-211, 2022.
- François, H., S. Morin, M. Lafaysse and E. George-Marcelpoil, Crossing numerical simulations of snow conditions with a spatially-resolved socio-economic database of ski resorts : a proof of concept in the French Alps, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 108, 98–112, doi : [10.1016/j.coldregions.2014.08.005](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2014.08.005), 2014.
- François, H., Samacoïts, R., Carmagnola C., Soubeyroux J.M., Morin S., Perspectives d'enneigement dans les stations pyrénéennes de sports d'hiver, in *Cahier Régional Occitanie sur les Changements Climatiques - Édition 2021, Chapitre 9 - Tourisme*, pp 201 - 205, [https://reco-occitanie.org/crocc\\_2021/](https://reco-occitanie.org/crocc_2021/), 2021.
- Gerbaux, M., P.Spandre, Hugues François, E. George et S. Morin, Fiabilité de l'enneigement et disponibilité des ressources en eau pour la production de neige dans les domaines skiables du Département de l'Isère (France), en conditions climatiques actuelles et futures, *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, 108-1, <https://dx.doi.org/10.4000/rga.6724>, 2020.
- Hock, R., G. Rasul, C. Adler, B. Cáceres, S. Gruber, Y. Hirabayashi, M. Jackson, A. Kääh, S. Kang, S. Kutuzov, Al. Milner, U. Molau, S. Morin, B. Orlove, and H. Steltzer, 2019: High Mountain Areas. In: *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 131-202. <https://doi.org/10.1017/9781009157964.004>, 2019.
- ONERC, La prospective au service de l'adaptation au changement climatique, Rapport au Premier ministre et au Parlement de l'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique



(<https://www.ecologie.gouv.fr/parution-du-rapport-annuel-observatoire-national-sur-effets-du-rechauffement-climatique-onerc-0>), 2022.

Spandre, P., H. François, D. Verfaillie, M. Lafaysse, M. Déqué, N. Eckert, E. George and S. Morin, Climate controls on snow reliability in French Alps ski resorts, *Sci. Rep.*, 9, 8043, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44068-8>, 2019a.

Spandre, P., François, H., Verfaillie, D., Pons, M., Vernay, M., Lafaysse, M., George, E., and Morin, S. : Winter tourism under climate change in the Pyrenees and the French Alps : relevance of snowmaking as a technical adaptation, *The Cryosphere*, 13, 1325-1347, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1325-2019>, 2019b.

Spandre, P., S. Morin, M. Lafaysse, Y. Lejeune, H. François and E. George-Marcelpoil, Integration of snow management processes into a detailed snowpack model, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 125, 48-64, doi: [10.1016/j.coldregions.2016.01.002](https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.01.002), 2016.

Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., and Lafaysse, M. : The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, *Geosci. Model Dev.*, 10, 4257-4283, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>, 2017.

## PROJECTIONS CLIMATIQUES ET CONDITIONS D'ENNEIGEMENT DANS LES MASSIFS MONTAGNEUX FRANÇAIS

Raphaëlle SAMACOÏTS <sup>(1,3)</sup>, Samuel MORIN <sup>(2)</sup>, Jean-Michel SOUBEYROUX <sup>(1)</sup>, Matthieu LAFAYSSE <sup>(2)</sup>, Carlo CARMAGNOLA <sup>(2,4)</sup>, Hugues FRANÇOIS <sup>(3)</sup>

<sup>1</sup> : Météo-France, Direction de la Climatologie et des Services Climatiques, Toulouse, France

raphaëlle.samacoits@meteo.fr, jean-michel.soubeyroux@meteo.fr

<sup>2</sup> : Univ. Grenoble Alpes, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, CNRM, Centre d'Etudes de la Neige, Grenoble, France - samuel.morin@meteo.fr, matthieu.lafaysse@meteo.fr

<sup>3</sup> : Université Grenoble Alpes, INRAE LESSEM – hugues.francois@inrae.fr

<sup>4</sup> : Dianeige, Grenoble, France – carlo.carmagnola@meteo.fr

**Résumé** : Les territoires de montagne sont particulièrement vulnérables au changement climatique, dont les conséquences affectent en profondeur les écosystèmes et sociétés humaines. Le jeu de données Adamont, panel d'indicateurs atmosphériques et nivologiques, découle des scénarios climatiques Euro-CORDEX corrigés et adaptés sur les massifs montagneux français en utilisant la méthode Adamont. Ce jeu de données offre une perspective détaillée du changement climatique en montagne et alimente plusieurs projets et études traitant des problématiques d'agro-pastoralisme et fiabilité de l'enneigement pour les stations de ski.

**Mots-Clés** : changement climatique, régions de montagne, enneigement, tourisme hivernal

**Abstract** : Mountain regions are particularly sensitive to climate change, its consequences profoundly affecting ecosystems and human societies. The Adamont dataset, which is a panel of atmospheric and snow cover indices, derives from Euro-CORDEX simulations, adjusted to the French mountains using the Adamont statistical adjustment method. This dataset offers a detailed perspective of climate change in the mountains and feeds several projects and studies dealing with issues of agro-pastoralism and reliability of snow cover for ski resorts.

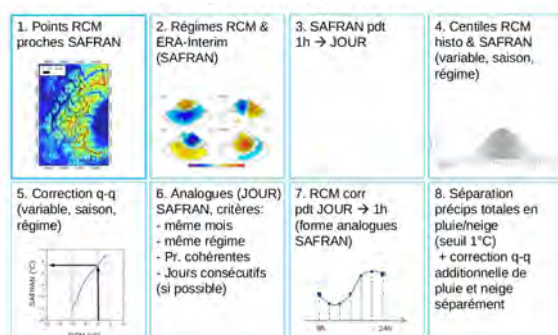
**Keywords** : climate change, mountain regions, snow cover, winter tourism

### Introduction

L'enneigement saisonnier actuel et futur constitue un sujet d'intérêt dans les régions montagneuses françaises, où le tourisme des sports d'hiver et l'hydroélectricité sont des contributeurs importants au revenu régional. Les questions de changements de débits fluviaux associés, leurs conséquences sur la gestion de la ressource en eau, la vulnérabilité future des écosystèmes alpins ainsi que l'occurrence d'aléas tels que les glissements de terrain, éboulements rocheux ou avalanches, sont également un sujet de préoccupation. Cet article a pour objet de présenter les données d'entrée et la méthodologie adoptée pour la production du jeu de données Adamont, panel d'indicateurs atmosphériques et nivologiques couvrant l'ensemble des massifs montagneux français. Des exemples d'analyse et possibilité d'exploitation de ce jeu de données sont ensuite développés.

### 1. Méthodologie et données d'entrée

Les scénarios climatiques CORDEX ne peuvent être directement utilisés pour des études locales ces scénarios présentant des biais systématiques par rapport aux observations. La méthode de correction statistique de biais ADAMONT (Verfaillie D. et al 2017) permet de corriger les scénarios climatiques, sur la base d'une réanalyse de référence S2M version 2019 (Vernay M. et al. 2019) et donc d'adapter ces simulations à des données locales.



**figure 1** : Étape de traitement de la méthode Adamont

Les différentes étapes de cette correction sont décrites ci-dessous :

une sélection des points des modèles climatiques les plus proches des centroïdes des massifs définis dans la réanalyse de référence S2M est effectuée (1),

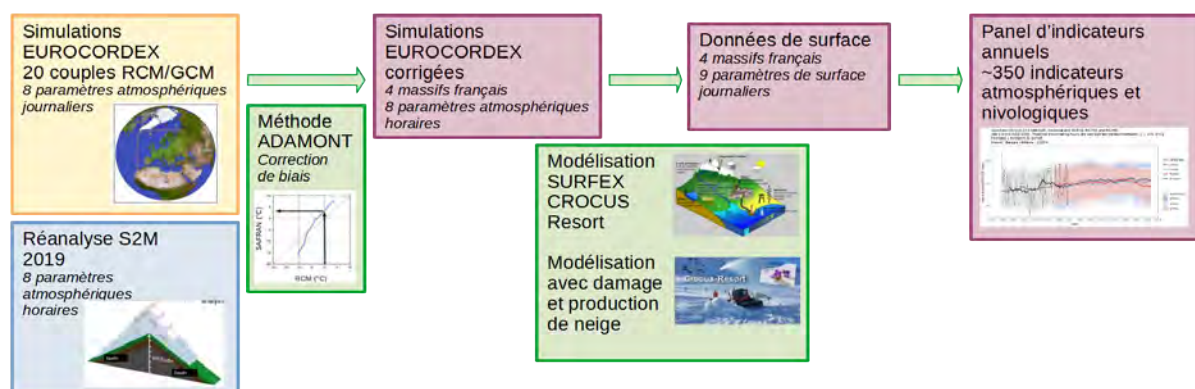
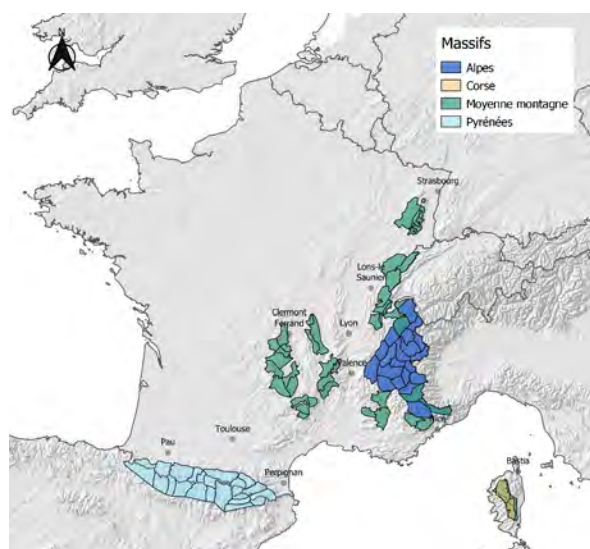
.4 régimes de temps, basés sur une analyse du géopotential à 500hPa sont calculés, ceci pour chaque GCM et pour la réanalyse S2M, en utilisant dans ce cas la réanalyse européenne ERA-Interim. (2),

.la correction quantile-quantile univariée, différenciée par saison et régime de temps, s'applique sur des données journalières pour l'ensemble des variables atmosphériques (température, humidité, précipitations, vent, rayonnement) (4,5),

.les données journalières issues de l'étape (5) sont désagrégées au pas de temps horaire, en utilisant les données de la réanalyse S2M horaires et suivant une recherche de journée analogue (6,7). Différents critères sont appliqués afin de respecter au mieux le cycle journalier de la variable considérée,

.un raffinement de la correction est appliqué aux quantités de précipitation liquide et solide (pluie et neige) (8)

Ainsi, la méthode a l'avantage de produire des jeux de données climatiques à un pas de temps horaire, permettant la réutilisation directe de ces scénarios dans des chaînes de modélisation de surface. Nous avons utilisé la chaîne de modélisation de surface nivo-météorologique SURFEX Crocus Resort (Spandre P. et al. 2016), qui intègre le damage et la production de neige de culture (Hanzer, F. et al. 2020). Quatre configurations ont été implémentées : neige naturelle, avec damage seul, avec damage et productions de neige de culture par lances ou ventilateurs (figure 2).

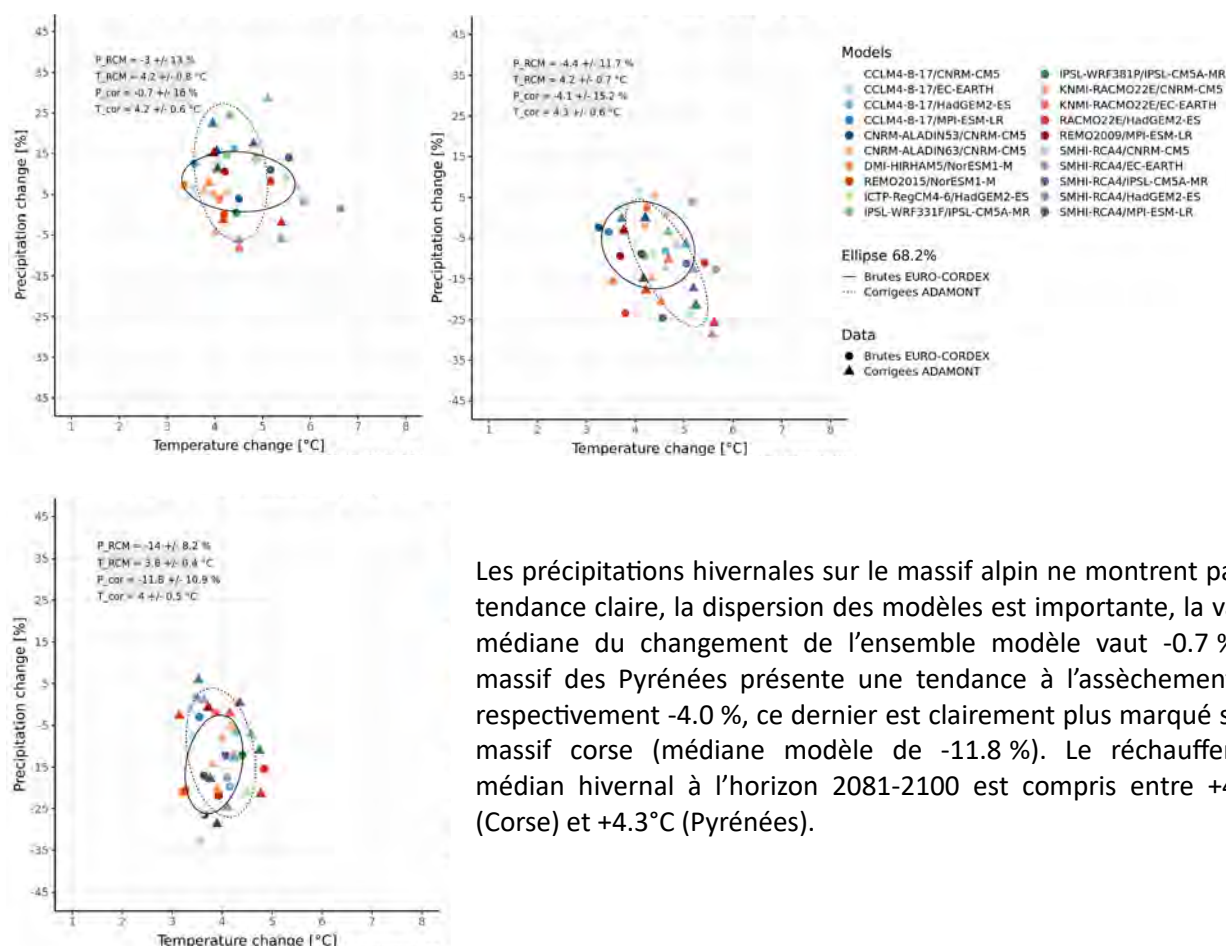
**figure 2** : Schéma de production des données Adamont

Les données produites couvrent 4 ensembles montagneux français : Alpes (263 points), Pyrénées (232 points), Corse (18 points) et massifs de moyenne montagne (Vosges, Jura, Massif central, Alpes du Sud, Corse, 242 points), voir figure 3. Ces ensembles montagneux sont divisés massifs ou zones dites "symposium" (pour la moyenne montagne), climatologiquement homogènes, par tranche d'altitude de 300 m. Les données ont également été déclinées plus finement, en fonction des orientations et degré de pente, pour chaque altitude. Vingt simulations Euro-CORDEX, dont les 12 simulations sélectionnées dans le jeu DRIAS 2020 sur la France

métropolitaine, déclinées en 3 scénarios de gaz à effet de serre RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5, ont été traitées dans le cadre de cette étude.

**figure 3** : Carte des massifs traités

Les graphiques suivants (figure 4) présentent l'évolution de la température (°C) et des précipitations totales (%) à l'horizon 2081-2100 pour le scénario RCP8.5 et la saison hivernale, par rapport à la période de référence 1976-2005. Les données de chaque couple, brut et corrigé par la méthode Adamont, ont été agrégées à l'échelle des massifs des Alpes, Pyrénées et Corse.



**figure 4** : Evolution relative des précipitations totales (%) en fonction de l'évolution des températures (°C) – horizon fin de siècle 2081-2100 pour le RCP8.5 – saison hiver. Alpes (haut-gauche), Pyrénées (haut-centre), Corse (bas-gauche)

**Tableau 1** : Evolution des précipitation et température hivernales à l'horizon 2081-2100 pour le RCP8.5

		Evolution médiane par rapport à la période historique 1976-2005	
	Ensemble modèle	Précipitations totales (%)	Température (°C)
Alpes	brut	-3.0	+4.2
	corrigé	-0.7	+4.2
Pyrénées	brut	-4.4	+4.2
	corrigé	-4.1	+4.3
Corse	brut	-14.0	+3.8
	corrigé	-11.8	+4.0

## 2. Indicateurs atmosphériques et nivologiques

Un panel d'indicateurs atmosphériques et nivologiques annuels a été produit à partir des données corrigées de forçage et des sorties du modèle Crocus. Ces indicateurs, calculés pour chaque modèle de

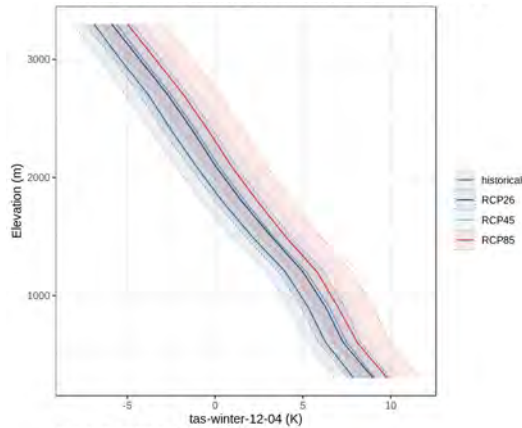
climat, couvrant la période 1950 – 2100, permettent la représentation du climat et des conditions d'enneigement moyens ; d'autres indicateurs ont été développés pour servir à des applications plus spécifiques, pour l'hydrologie ou le tourisme hivernal (tableau 2).

**Tableau 2** : Description des indicateurs atmosphériques et nivologiques

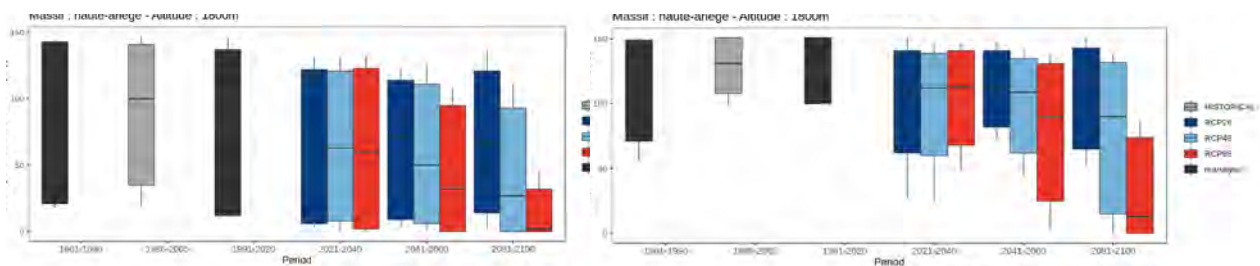
Type	Exemple d'indicateur
Température (°C)	Température moyenne saisonnière, annuelle, mensuelle
Précipitation (kg/m <sup>2</sup> )	Précipitations totales hivernales, annuelles
Hauteur de neige (m)	Hauteur de neige moyenne hivernale, annuelle
Nombre de jours dépassant un certain seuil de hauteur de neige ou d'équivalent en eau du manteau neigeux (jour)	Nombre de jours dont la hauteur de neige au sol est supérieure à 30 cm de neige, dont l'équivalent en eau du manteau neigeux est supérieur à 100 kg/m <sup>2</sup>
Équivalent maximum en eau du manteau neigeux (kg/m <sup>2</sup> )	Équivalent en eau du manteau neigeux au 1 <sup>er</sup> avril
Date de début et de fin de saison (jour julien)	Dates de début et de fin d'un couvert de neige continu et le plus long, de 5 cm
Nombre d'heures vérifiant une plage de température humide pour la production de neige (heure)	Nombre d'heures dont la température humide calculée entre le 01/11 et le 31/12 est inférieure à -2°C
Quantité de neige de culture produite (kg/m <sup>2</sup> )	Quantité de neige totale produite par ventilateurs sur une année hydrologique

Des visualisations graphiques ensemblistes, prenant en compte la dispersion de l'ensemble des modèles étudiés (évolution temporelle, profil altitudinal, boxplot, carte) ont été générées pour chaque indicateur. Sont présentés ci-après quelques exemples d'analyse pour le massif de la Haute-Ariège (figures 5 et 6).

Le réchauffement à moyen terme 2041-2060 est globalement constant selon l'altitude, la médiane de l'ensemble des modèles montre un réchauffement moyen de +1.0°C pour le RCP2.6, +1.2°C pour le RCP4.5, +1.9°C selon RCP8.5 et par rapport à la période historique 1986-2005. La dispersion et la variabilité interannuelles des 20 modèles étudiés sont quantifiées par l'écart entre les percentiles P10 et 90.



**figure 5** : Profil altitudinal de la température hivernale décembre - avril. Percentile 10, médiane, percentile 90 de l'ensemble des modèles sur la période 2041-2060, selon les RCPs pour 2041-2060



**figure 6** : Nombre de jours annuel dont la hauteur de neige est supérieure à 30 cm, en neige naturelle (noté NN, gauche), avec damage et production de neige avec lances (noté LANCE, droit) – massif de la Haute-Ariège – altitude 1800 m.

La figure 6 présente l'évolution selon les RCPs et horizons temporels du nombre de jours annuels dont la hauteur de neige est supérieure à 30 cm, ceci pour 2 configurations de neige Crocus Resort, en neige naturelle et production de neige et effet du damage. En neige naturelle et pour le scénario RCP4.5, l'indicateur décroît graduellement au fil des horizons, passant de 100 jours (médiane) sur la période historique à 63 jours à l'horizon proche et 27 jours en fin de siècle. La gestion de la neige en configuration LANCE sécurise l'enneigement et réduit la variabilité interannuelle importante, intrinsèque à la configuration NN. Elle permet en moyenne 1 mois d'enneigement supplémentaire sur la période historique 1986-2005 (131 jours). L'indice d'enneigement décroît, de 112 jours sur l'horizon proche à 90 jours pour la période 2081-2100.

**Tableau 3** : Percentile 10, 90, médiane de l'indicateur « Nombre de jours annuel dont la hauteur de neige est supérieure à 30 cm » pour les configurations de neige NN et LANCE, scénario RCP4.5

RCP4.5 nombre de jour annuel	P10		P50		P90	
	NN	LANCE	NN	LANCE	NN	LANCE
1986-2005	35	108	100	131	141	151
2021-2040	8	60	63	112	121	139
2041-2060	1	62	50	109	111	135
2081-2100	0	15	27	90	93	132

### 3. Conclusion et perspectives

Le jeu de données Adamont complète les projections climatiques déjà disponibles sur la France métropolitaine via le portail de données climatiques DRIAS. Les données produites sont actuellement utilisées dans le cadre de ClimSnow <sup>(1)</sup> (François et al., AIC 2022). Ce service climatique, développé par l'INRAE, Météo-France (CNRM) et le bureau d'études Dianeige, permet d'évaluer la fiabilité de l'enneigement à l'échelle d'un domaine skiable. Outil d'aide à la décision et déjà mis en œuvre pour une centaine de stations françaises, ClimSnow délivre une information précise et locale, et permet d'accompagner les gestionnaires de stations de ski et acteurs du tourisme pour l'aménagement du territoire. Ces données ont également alimenté le dispositif Alpages Sentinelles <sup>(2)</sup> et le projet européen Alpine Drought Observatory <sup>(3)</sup>, tous deux en partenariat avec l'INRAE, et qui visent à mieux comprendre et anticiper les conséquences du changement climatique et des phénomènes de sécheresse en alpage. Ces projets ont permis la production d'indicateurs agro-climatiques (bilan hydrique, ETP, qualification de périodes de sécheresse) sur le massif alpin. Ce jeu de données sera élargi et enrichi aux autres massifs français et mis à disposition sur un portail de données agro-climatique.

### Bibliographie

Hanzer, F., Carmagnola, C., Ebner, P., Koch, F., Monti, F., Bavay, M., Bernhardt, M., Lafaysse, M., Lehning, M., Strasser, U., François, H., and Morin, S.: Simulation of snow management in Alpine ski resorts using three different snow models, *Cold Regions Science and Technology*, 172, doi:doi.org/10.1016/j.coldregions.2020.102995, 2020.

Jean-Michel Soubeyroux, Sébastien Bernus, Lola Corre, Agathe Drouin, Brigitte Dubuisson, Pierre Etchevers, Viviane Gouget, Patrick Josse, Maryvonne Kerdoncuff, Raphaëlle Samacoits et Flore Tocquer. 2020 - LES NOUVELLES PROJECTIONS CLIMATIQUES DE RÉFÉRENCE DRIAS 2020 POUR LA MÉTROPOLE - <http://www.drias-climat.fr/document/rapport-DRIAS-2020-red3-2.pdf>

Spandre, P., S. Morin, M. Lafaysse, Y. Lejeune, H. François and E. George-Marcelpoil, Integration of snow management processes into a detailed snowpack model, *Cold Reg. Sci. Technol.*, 125, 48-64, doi:10.1016/j.coldregions.2016.01.002, 2016.



Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., and Lafaysse, M.: The method ADAMONT v1.0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models, *Geosci. Model Dev.*, 10, 4257-4283, <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4257-2017>, 2017.

Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., Lejeune, Y., and Morin, S.: Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps, *The Cryosphere*, 12, 1249-1271, <https://doi.org/10.5194/tc-12-1249-2018>, 2018.

Vernay, M., Lafaysse, M., Hagenmuller, P., Nheili, R., Verfaillie, D., & Morin, S.: The S2M meteorological and snow cover reanalysis in the French mountainous areas (1958 - present) [Data set]. AERIS. <https://doi.org/10.25326/37>, 2019.

(1) <https://www.climsnow.com/>

(2) <https://www.alpages-sentinelles.fr/>

(3) <https://www.alpine-space.org/projects/ado/en/home>

## DROUGHT CHARACTERISTICS OVER TWO LARGE BASINS IN MOROCCO (TENSIFT AND SEBOU)

**Kaoutar OUKADDOUR<sup>1</sup>, Younes FAKIR<sup>1,2</sup>, Michel LE PAGE<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>*GEOSCIENCES Laboratory, Department of Geology, Faculty of Sciences Semlalia, Cadi Ayyad University, Marrakech, Morocco. kaoutaroukaddour@gmail.com, fakir@uca.ac.ma.*

<sup>2</sup>*CRSA, Mohammed VI Polytechnic University UM6P, Ben Guerir, Morocco.*

<sup>3</sup>*CESBIO, University of Toulouse, IRD/CNRS/UPS/CNES, Toulouse, France. michel.le\_page@ird.fr.*

**Abstract:** Standardized precipitation index (SPI) is a key parameter for drought monitoring. Using SPI the present work provides a retrospective spatio-temporal analysis of the droughts occurring in Morocco over the last 39 years (1981-2020). The used data were driven from the satellite Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data (CHIRPS) products from which the drought index SPI was calculated. SPI allowed the characterization of drought over two large basins, namely Tensift and Sebou. The areas under drought conditions in both Tensift and Sebou basins were compared to derive regional differences at a time scale of 12 months. This analysis is vital for water resources management that is a challenging mission.

**Keywords:** Drought; SPI; CHIRPS; Morocco.

### INTRODUCTION

Drought is one of the important recognized natural hazards that occur causing extended water scarcity. It can lead to a decrease in river flow regimes and groundwater reserves, with severe water shortages for drinking water and agriculture (Tramblay et al., 2020). The scientific community often classifies drought into three major types according to its nature : (1) Meteorological drought, which refers to a deficit in rainfall ; (2) Agricultural drought, which is defined as a deficit in soil moisture and (3) Hydrological drought, which affects water resources. Agricultural and hydrological droughts generally are subsequent to meteorological drought which makes the meteorological drought subject to several studies.

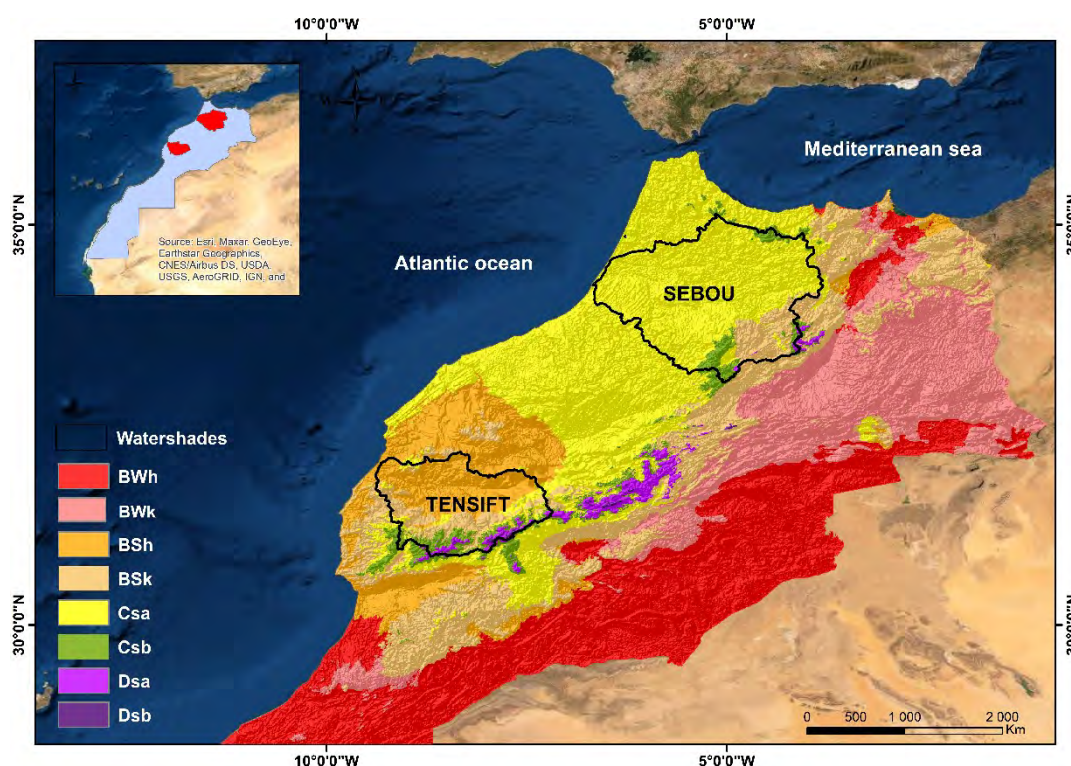
Many indices have been developed for drought assessment and monitoring. Precipitation is the primary variable often used in the calculation of indices, such as the Standardized Precipitation Index (SPI) (Mckee et al., 1993). SPI is widely used to monitor drought and manage climate-related risks. It is computed generally using long-term series of data, covering at least 30 years of rainfall data, with spatially well distributed gauges. The lack of sufficient measurement networks in most developing countries is one of the reasons for the existing uncertainties related to droughts analyses and prediction. Monitoring droughts through remote sensing data is particularly useful in this case, with a large amount of information on several hydrological variables. Indeed, for the regional assessment of drought using SPI, it is of particular interest to use satellite-based precipitation products. Multiple sensors provide information on rainfall such as Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), Precipitation Estimation From Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks (PERSIANN), and Climate Prediction Center morphing technique (CMORPH). Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations (CHIRPS) is a gridded precipitation data showing a high concordance with ground measurements in Morocco (Bijaber et al., 2018). The product has also been evaluated in several parts of the world (Bai et al., 2018; Bouaziz et al., 2021; Neeti et al., 2021).

The study of aspects of drought in an African country like Morocco, where water resources are limited and where the agricultural sector contributes most to the economy, is necessary for scientific and resources management purposes. The present study aimed to analyze the temporal and spatial patterns of drought over two major basins in Morocco, namely Tensift and Sebou, located in two different climatic conditions. Through the use of SPI calculated from long-term precipitation data

from CHIRPS products, the drought resilience in the basins was analyzed and very dry and severe events were identified based on two drought severity thresholds.

## 1. STUDY AREA

The study was conducted in two large hydrological basins in Morocco. The Tensift basin is located in the center of Morocco with an area of 24 000 Km<sup>2</sup> (Figure 1). The region is known for its morphological diversity, hence a great spatial variability of precipitation. Rain and snowfall supply the semi-arid plain of Haouz and contribute to the recharging of groundwater (Bouimouass et al., 2020; Boukhari et al., 2015). The Sebou basin is one of the major basins in Northern Morocco covering nearly 40 000 km<sup>2</sup>. From a hydrological perspective, the Sebou basin contributes to 30 % of the national potential of surface water resources and 20 % of groundwater resources (Chadli et al., 2016). The Köppen-Geiger climate classification map is used to identify the climatic zones of the study areas (Beck et al., 2018). The climatic context of the basins is different with a dominant semi-arid climate (BSk) for the Tensift basin and a Mediterranean climate (Csa) with oceanic influence for the Sebou basin.



**figure 1.** The study area with the Köppen-Geiger climate classification map.

## 2. METHODOLOGY

### 2.1. Data

Monthly precipitation data from CHIRPS were used in this study. CHIRPS represents satellite estimates corrected by the integration of precipitation data from in situ weather stations. The open data set was provided by the Climate Hazards Center (CHC) Group at the University of Santa Barbara, California, in partnership with the U.S. Geological Survey Earth Resources Observation and Science Center (<https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps>). The used data are from 1981 to 2020, with a spatial resolution of  $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ .

## 2.2. Method

Temporal and spatial analysis of drought was performed using the standardized precipitation index (SPI). The SPI is known as a key indicator of meteorological drought and has shown high performance compared to other drought monitoring indices (Sobral et al., 2019). The SPI is calculated over 1981-2020 to assess past drought events using CHIRPS precipitation data at 5 km resolution and at different time scales: 1, 3, 6, and 12 months. The use of multiple time scales allows verifying the impacts of drought on different water components. Indeed, meteorological and soil moisture conditions respond to precipitation anomalies on relatively short timescales, while streamflow, reservoirs, groundwater respond to precipitation anomalies on longer time scales (Livada & Assimakopoulos, 2007).

The SPI was defined by fitting a Gamma probability distribution function to the precipitation long-term dataset. According to Mckee et al., 1993, a drought event occurs when the SPI reaches a value of -1 or less and its severity is defined as the minimum value reached by the SPI. Mckee et al., 1993 also proposed a classification of drought intensity from which the most severe events, their frequency, and duration can be defined. The next step consisted in comparing drought events over the two hydrological basins. The most severe and dry events were identified using two thresholds corresponding to 20 % and 5 % respectively of the probability of occurrence of drought in the standard normal distribution. This method allows identifying two categories of drought severity according to Lloyd-Hughes & Saunders, 2002 classification (Table 1). The final part of the study was the temporal evolution of the areas under drought conditions. It was obtained by the SPI values below the thresholds explained above on a 12-months scale. The drought area was compared on the Sebou and Tensift basins.

**Table 1.** Drought classification based on the SPI index and corresponding event probability (Lloyd-Hughes & Saunders, 2002).

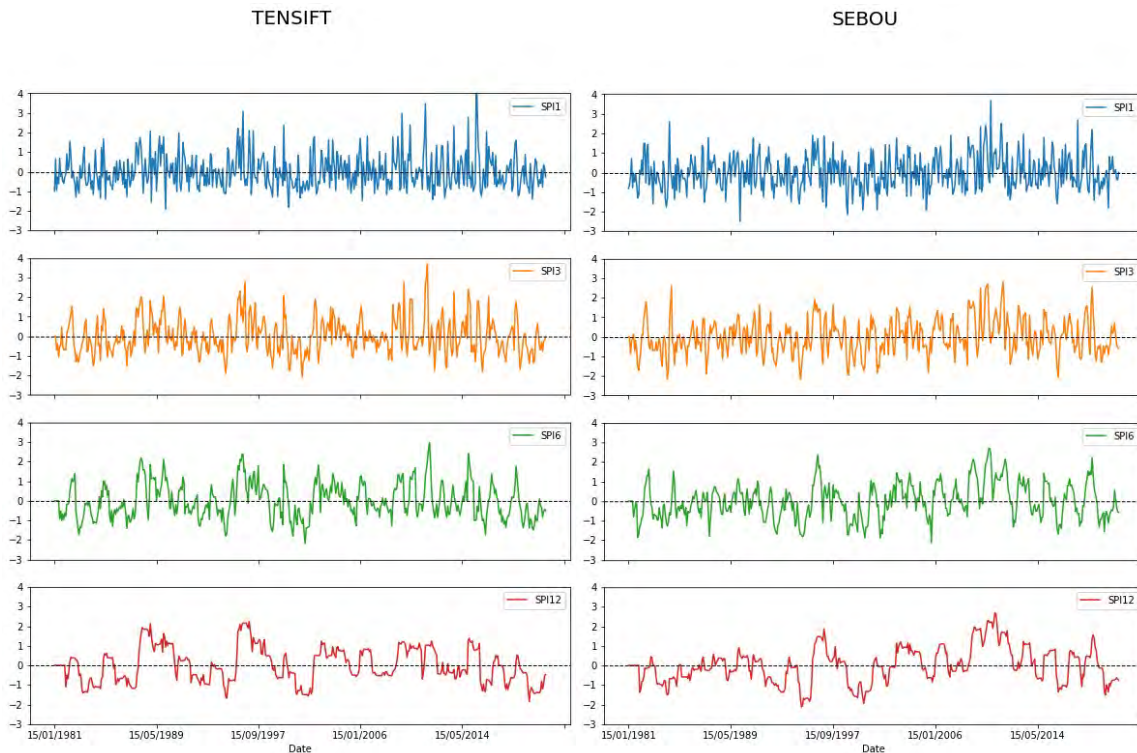
Index value	Drought categories	Probability (%)
2.00 or more	Extremely wet	2.3
1.99 to 1.5	Severely wet	4.4
1.49 to 1	Moderately wet	9.2
0.99 to 0	Mildly wet	34.1
0 to -0.99	Mild drought	34.1
-1 to -1.49	Moderate drought	9.2
-1.5 to -1.99	Severe drought	4.4
-2 or less	Extreme drought	2.3

## 3. RESULTS

The results were obtained from calculating the SPI based on monthly CHIRPS rainfall data. SPI was computed over the two basins of Tensift and Sebou, over the period 1981-2020. Figure 2 shows the SPI time series at different time scales (1, 3, 6, and 12 months), where SPI values below 0 represent dry periods, and wet periods are represented by the positive SPI values. These fluctuations determine the drought parameters i.e. the duration, frequency, severity as well as the onset and cessation of each drought episode. The frequency and duration have a negative relationship with the time scale, consequently, the identification of drought periods is highly dependent on the time scale considered.

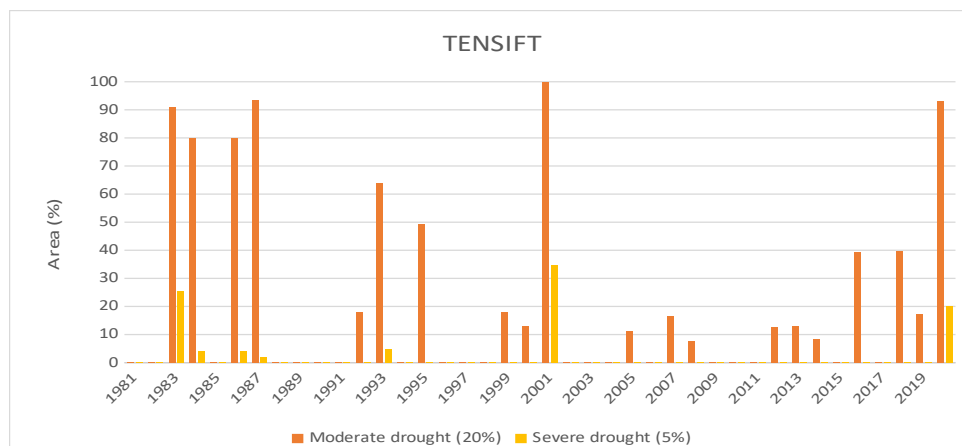
Both the basins have experienced several periods of drought. In the Tensift basin, the 6-month SPI (SPI6) and the 3-month SPI (SPI3) have reached values of -2.18 and -2.1 respectively in 2001, making this year the driest in terms of severity during the study period. For the Sebou basin in the north of Morocco, the SPI time series showed that 1995 was the driest year when SPI3 and SPI12 have reached an intensity of -2.19 and -2.12 respectively.

It should be noted that both basins have experienced wet periods. Thus, wetness episodes can be deduced from the SPI time series. The extremely wet year for the Tensift basin was 1996 with values of SPI12 greater than 2. On the other hand, the Sebou basin had reached a maximum of wetness in 2010.

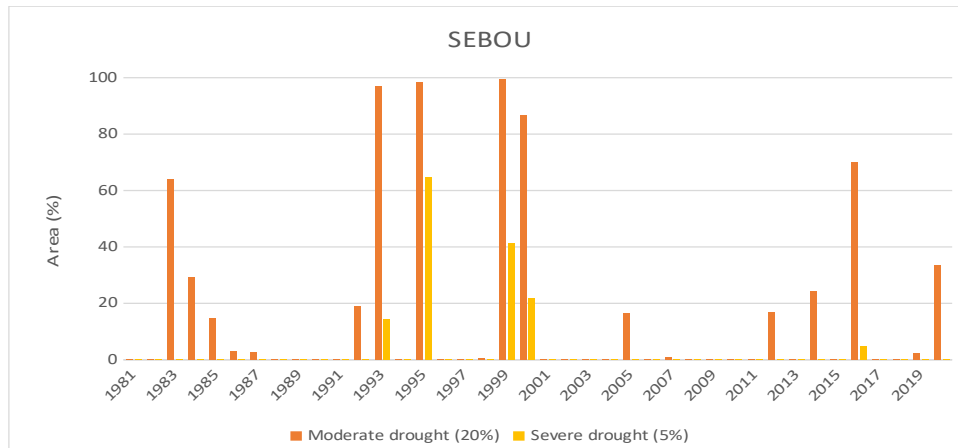


**figure 2.** Time series of SPI at different time scales during the 1981-2020 period for the Tensift and Sebou basins.

The spatial extent represents an essential parameter for the regional assessment of drought. The temporal evolution of the area affected by drought on the Tensift and Sebou basins is shown in Figure 3. Two thresholds of 20% and 5% were used respectively to synthesize the areas of moderate and severe droughts. In the Tensift basin, the drought of 2001 affected the whole basin for a threshold of 20 % and only 35 % of the basin at the 5 % threshold. In the Sebou basin, the drought of 1995 affected 98 % and 65 % using the 2 thresholds.







**figure 3.** Temporal evolution of the fraction of area under drought conditions during the study period from 1981 to 2020.

According to the summary results presented in Table 2, the Tensift basin has experienced multiple severe drought events, with seven drought periods: 1983, 1984, 1986, 1987, 1993, 2001, and 2020. However, the Sebou basin has recorded fewer severe drought events (1993-1999-2000-2016). One extreme drought was observed in the Sebou basin in 1995. Other drought episodes have been recorded in the basins but with less intensity. The Tensift basin had more episodes of drought than the Sebou basin. These differences can be explained by the difference in climate in the basins, and the spatial variability of rainfall in Morocco. In addition to the area covered by each basin and its morphological characteristics that can affect the spatial distribution of rainfall in the basin.

**Table 2.** Summary of dry years by category of drought.

Drought categories	Basins	
	<i>Tensift</i>	<i>Sebou</i>
<b>Extreme</b>		1995
<b>Severe</b>	1983-1984-1986-1987-1993-2001-2020	1993-1999-2000-2016
<b>Moderate</b>	1995-2000-2016-2018	1983-1984-1992-2019-2020
<b>Mild</b>	1992-1999-2005-2007-2008-2012-2013-2014	1985-1986-1987

### CONCLUSION

In the present work, a long-term series (1981-2020) of CHIRPS satellite data was used to compute the standardized precipitation index (SPI) at different time scales, in Morocco. The SPI was an efficient tool for characterizing drought over two large basins, Tensift, and Sebou. The Tensift basin was the most affected by severe and moderate drought with long dry spells during the period 1981-2020. The most severe events were observed at different years over the basins which approve the different regional patterns of drought in two climate contexts. The Tensift basin is more vulnerable to drought, as it has experienced more drought events, in addition to the percentage of areas affected by drought was high compared to the Sebou basin. The results of this study open perspectives to assess drought occurrence over the whole country, and to adapt the existing water and agriculture strategies to the characteristics and drought vulnerability of each basin.

### BIBLIOGRAPHY

Bai L., Shi C., Li L., Yang Y. & Wu J., 2018 : Accuracy of CHIRPS satellite-rainfall products over mainland China. *Remote Sensing*, **10**(3).

Beck H. E., Zimmermann N. E., McVicar T. R., Vergopolan N., Berg A., & Wood E. F., 2018 : Present and future köppen-geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, **5**, 1–12.



- Bijaber N., El Hadani D., Saidi M., Svoboda M. D., Wardlow B. D., Hain C. R., Poulsen C. C., Yessaf M., & Rochdi A., 2018 : Developing a remotely sensed drought monitoring indicator for Morocco. *Geosciences (Switzerland)*, **8**(2), 55.
- Bouaziz M., Medhioub E., & Csaplovisc E., 2021 : A machine learning model for drought tracking and forecasting using remote precipitation data and a standardized precipitation index from arid regions. *Journal of Arid Environments*, 189(March).
- Bouimouass H., Fakir Y., Tweed S., & Leblanc M., 2020 : Groundwater recharge sources in semiarid irrigated mountain fronts. *Hydrological Processes*, **34**(7), 1598–1615.
- Boukhari K., Fakir Y., Stigter T. Y., Hajhouji Y., & Boulet G., 2015 : Origin of recharge and salinity and their role on management issues of a large alluvial aquifer system in the semi-arid Haouz plain, Morocco. *Environmental Earth Sciences*, **73**(10), 6195–6212.
- Chadli K., Kirat M., Laadoua A., & El Harchaoui N., 2016 : Runoff modeling of Sebou watershed (Morocco) using SCS curve number method and geographic information system. *Modeling Earth Systems and Environment*, **2**(3), 1–8.
- Livada I., & Assimakopoulos V. D., 2007 : Spatial and temporal analysis of drought in Greece using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Theoretical and Applied Climatology*, **89**(3–4), 143–153.
- Lloyd-Hughes B., & Saunders M. A., 2002 : A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, **22**(13), 1571–1592.
- Mckee B. T., Doesken N. J., & Kleist J., 1993 : The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eighth Conference on Applied Climatology*, **4**(8), 179–184.
- Neeti N., Arun Murali C. M., Chowdary V. M., Rao N. H., & Kesarwani M., 2021 : Integrated meteorological drought monitoring framework using multi-sensor and multi-temporal earth observation datasets and machine learning algorithms: A case study of central India. *Journal of Hydrology*, 601, 126638.
- Sobral B. S., Oliveira-Júnior J. F. de., de Gois G., Pereira-Júnior E. R., Terassi P. M. de B., Muniz-Júnior J. G. R., Lyra G. B., & Zeri M., 2019 : Drought characterization for the state of Rio de Janeiro based on the annual SPI index : trends, statistical tests and its relation with ENSO. *Atmospheric Research*, 220(July 2018), 141–154.
- Tramblay Y., Koutroulis A., Samaniego L., Vicente-Serrano S. M., Volaire F., Boone A., Le Page M., Llasat M. C., Albergel C., Burak S., Cailleret M., Kalin K. C., Davi H., Dupuy J. L., Greve P., Grillakis M., Hanich L., Jarlan L., Martin-StPaul N., ... Polcher J., 2020 : Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios. *Earth-Science Reviews*, 210(September), 103348.

## LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA RESSOURCE EN EAU EN BRETAGNE : LES RÉSULTATS DU PROGRAMME DEMOCLIM AIC 2022

Louis AMIOT<sup>1</sup>, Vincent DUBREUIL<sup>2</sup>, Josette LAUNAY<sup>3</sup>, Florence MASSA<sup>4</sup>, Enora KEROMNES<sup>5</sup>, Elodie BARDON<sup>6</sup>, Franck BARAER<sup>7</sup>

<sup>1</sup> LETG-Rennes, UMR 6554 CNRS - Université Rennes-2, Place Recteur H. Le Moal, 35043 Rennes Cedex – France. [louis.amiot@univ-rennes2.fr](mailto:louis.amiot@univ-rennes2.fr)

<sup>2</sup> LETG-Rennes, UMR 6554 CNRS - Université Rennes-2, Place Recteur H. Le Moal, 35043 Rennes Cedex – France. [vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr](mailto:vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr)

<sup>3</sup> CRESEB, 283 avenue du Général Patton, CS 21101 35711 Rennes Cedex 7. [josette.launay@agrocampus-ouest.fr](mailto:josette.launay@agrocampus-ouest.fr)

<sup>4</sup> Région Bretagne, 283 avenue du Général Patton, CS 21101 35711 Rennes Cedex 7. [florence.massa@bretagne.bzh](mailto:florence.massa@bretagne.bzh)

<sup>5</sup> Région Bretagne, 283 avenue du Général Patton, CS 21101 35711 Rennes Cedex 7. [ENORA.KEROMNES@bretagne.bzh](mailto:ENORA.KEROMNES@bretagne.bzh)

<sup>6</sup> Région Bretagne, 283 avenue du Général Patton, CS 21101 35711 Rennes Cedex 7. [ELODIE.BARDON@bretagne.bzh](mailto:ELODIE.BARDON@bretagne.bzh)

<sup>7</sup> Météo-France, 27 r Jules Vallès, 35136 Saint Jacques de la Lande, [franck.baraer@meteo.fr](mailto:franck.baraer@meteo.fr)

[https://www.pagesjaunes.fr/carte?code\\_etablissement=08933772&code\\_localite=03528100&code\\_rubrique=](https://www.pagesjaunes.fr/carte?code_etablissement=08933772&code_localite=03528100&code_rubrique=)

**Résumé :** Le climat change, c'est le constat qui est fait depuis déjà plusieurs décennies par les scientifiques du monde entier. Les tendances d'évolutions des températures sont bien connues avec +1,1°C en France depuis 1900. Cependant les tendances en termes d'évolution des précipitations ne sont pas aussi faciles à déterminer. Une grande incertitude plane sur l'évolution future de la ressource en eau. En Bretagne, région réputée bien arrosée, le manque d'eau peut exister et inquiète les gestionnaires notamment en vue de la gestion future de cette ressource notamment en période d'été.

Cette étude vise à élaborer une méthode d'analyse des effets du changement climatique sur la ressource en eau en région Bretagne. Différents indicateurs sont présentés pour suivre l'évolution des cumuls pluviométriques ou du risque de sécheresse. Il y a deux phases de travail : d'abord un regard sur les données passées et les tendances observées, puis une approche du climat futur avec des modélisations issues du portail Drias.

**Mots-Clés :** Pluie, sécheresse, gestion de l'eau

### Introduction

L'eau est le grand enjeu du XXI<sup>ème</sup> siècle dans le monde, la tension sur la ressource en eau ne cesse de s'accroître. En effet, la consommation en eau dans le monde a été multipliée par 5 en 50 ans et va continuer d'augmenter au regard de l'évolution démographique (Mutin, 2000). En parallèle, le risque de sécheresse augmente au niveau mondial (GIEC, 2021), national (Soubeyroux et al., 2011) et régional (Dubreuil 1993, Dubreuil 1997, Merot et al. 2013, Lamy 2013). La caractérisation de l'évolution climatique à échelle fine est donc indispensable pour les gestionnaires de l'eau afin d'anticiper les évolutions des besoins en eaux pour adapter la gestion actuelle afin de garantir à tous les secteurs un accès suffisant à la ressource.

## Données et méthodes

### .Les objectifs de l'étude

L'objectif du programme DEMOCLIM est d'élaborer une méthode d'analyse des effets du changement climatique sur la ressource en eau à l'échelle des bassins versants bretons. Cela a été développée dans un guide méthodologique à destination des gestionnaires de l'eau notamment (Amiot et al., 2021). Il s'agit de réaliser un Diagnostic Climatique Territorial (DCT) afin de mieux caractériser la disponibilité future de la ressource en eau sur ces territoires. Ces résultats aideront les acteurs locaux à construire la définition locale d'un partage durable de la ressource en eau pour contribuer à anticiper les effets du changement climatique par une gestion équilibrée et économe de la ressource en eau. Cette méthodologie s'appuie sur les résultats d'une recherche exploratoire menée en amont dont l'objectif était de mener une étude climatologique d'exploration d'indicateurs climatiques. L'étude a été menée à l'échelle de la région Bretagne en collaboration avec le Centre de Ressources et d'Expertise Scientifique sur l'Eau en Bretagne (CRESEB), Météo-France et la région Bretagne. Elle s'intègre dans une volonté régionale d'étudier les impacts des changements climatiques sur la ressource en eau en Bretagne à des horizons allant de 25 à 100ans.

Le paramètre principal est la ressource en eau, considérée ici comme les arrivées d'eau sur un territoire, c'est-à-dire les précipitations. Par cohérence avec le souhait de la région de s'adresser aux gestionnaires de l'eau, il a été décidé de travailler à l'échelle des bassins versants. C'est en effet à cette échelle hydrographique que s'effectue la gestion de l'eau. De plus, des situations climatiques similaires peuvent se retrouver dans plusieurs bassins versants, l'étude se limite donc à 4 bassins versants dont les critères de choix ont été : une taille intermédiaire et similaire autour de 1 000 à 2 000 km<sup>2</sup> pour permettre une comparaison efficace entre eux ; représenter la diversité climatique (gradient ouest-est, marqué par un écart de cumuls de précipitations important), géographique (littoral-intérieur) et hydrogéologique bretonne. Cette sélection s'est effectuée sur la base des données climatiques observées disponibles, mais aussi sur les résultats de différentes études qui montrent cette différence spatiale (Merot et al, 2012 ; Belleguic et al, 2012 ; Mounier 1965 ; ...). Les bassins versants sélectionnés sont ceux de l'Odet, du Blavet, de la Rance et de la Seiche (Figure 1).

### .Base de données

Les séries de données climatiques ont été fournies par Météo-France, le paramètre climatique le plus important est la pluviométrie. Différents critères de sélection des stations ont été considérés ici : le choix de ces sources de données a donc été motivé par la longueur de la série, la continuité des données et l'homogénéité statistique. Il est essentiel d'avoir des séries de données homogènes et sans données manquantes pour considérer la série comme étant fiable (Bigot, 2002). L'homogénéité statistique d'une série se traduit par une absence de rupture dans la série de données. Une série hétérogène marquée par de nombreuses ruptures peut présenter des biais de près de 2°C dans l'analyse des températures et plus de 10% pour les cumuls de pluie (Moisselin et al., 2002). La longueur de la série est essentielle pour identifier des tendances d'évolution dans le temps. De plus il faut des séries de données d'au moins trente ans (OMM, 2017), la longueur de série recherchée était ici de soixante ans pour pouvoir comparer deux périodes et voir les évolutions moyennes. Des critères géographiques comme la proximité de la station avec un bassin versant, la situation amont/ aval ont aussi été pris en compte pour permettre d'identifier la situation climatique propre à un bassin versant.

La figure 1 dévoile les 14 stations sélectionnées sur 4 bassins versants, avec 3 ou 4 stations par bassin versant retenu. Le tableau 1 montre la disponibilité des différents paramètres climatiques. Les données de précipitations sont recherchées en priorité et 4 stations synoptiques ont d'autres éléments climatiques comme la température.

Bassin versant	Station (d'Ouest en Est)	Paramètre climatique disponible			
		P	T	ETP	INST
ODET	Quimper				
	Coray				
	Guisriff				
BLAVET	Lorient				
	Plouay				
	Rostrenen				
	Mur				
RANCE	Merdrignac				
	Bléruais				
	Saint-Pern				
	Dinard-Pleurtuit				
SEICHE	Rennes-St Jacques				
	Rennes Gallet				
	Erbrée				

P Précipitation (en mm)  
 T Températures (en °C)  
 ETP EvapoTranpiration Potentielle (en mm)  
 INST Insolation (en Joule/cm<sup>2</sup>)



figure 1 : Répartition des séries de données

## Méthode

À partir des données climatiques, plus d'une vingtaine d'indicateurs ont été testés pour étudier la ressource en eau d'un point de vue climatique. Les indicateurs sélectionnés peuvent se diviser en deux catégories : des indicateurs pour décrire le climat moyen actuel et des indicateurs pour évaluer les risques de sécheresses et inondations. Ces indicateurs ont été déclinés à différentes échelles temporelles, il a été démontré que l'année hydrologique (octobre (n-1) – septembre (n)), les saisons hydrologiques qui correspondent à la saison de recharge des cours d'eau (octobre (n-1) – mars (n) ) et la saison d'étiage (avril (n) – septembre (n) ) sont les échelles temporelles les plus pertinentes pour travailler sur la ressource en eau (Amiot 2020). Les indicateurs ont donc été calculés et analysés sur l'ensemble des stations sur la période passée historique (1951-2019) et le futur modélisé à l'aide des données du portail Drias (2031-2100). Pour la modélisation climatique, les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 ont été sélectionnés pour avoir deux futurs contrastés probables qui donnent une gamme de futurs possibles. Toujours dans l'idée d'avoir un ensemble de futurs possibles, deux modèles contrastés ont été sélectionnés : il s'agit du modèle CNRM-ALADIN plutôt chaud et assez sec avec le modèle IPSL-WRF plus humide et frais (DRIAS 2014,2020). Les données modélisées ont été corrigées de leurs biais moyens par rapport aux données observées sur la période 1976-2005 avant d'être analysées.

## État de la ressource en eau

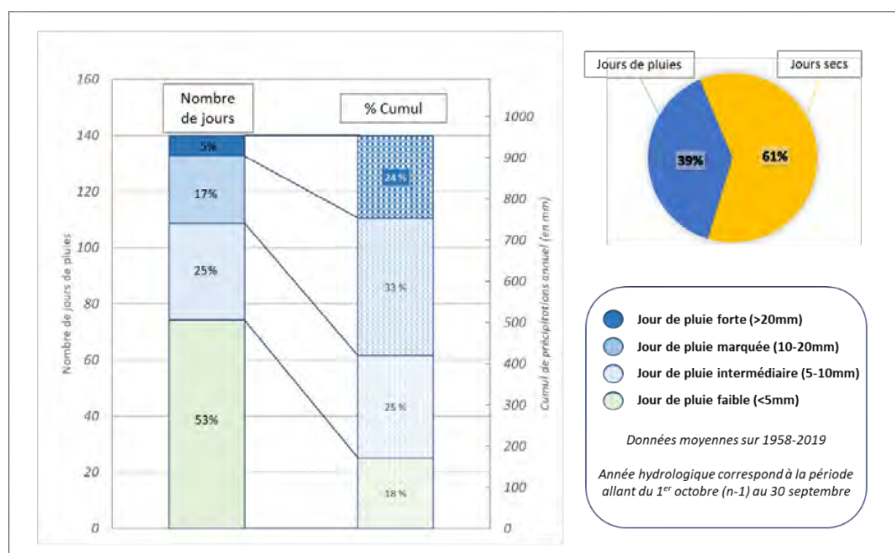
## Une variabilité de la ressource pluviométrique

La pluviométrie est un paramètre très variable spatialement et temporellement. Cette grande variabilité s'observe en Bretagne avec des cumuls qui vont du simple au double sur la région, de environ 600 mm sur le bassin rennais à plus de 1 200 mm sur le Massif armoricain en moyenne sur une année hydrologique (Belleguic *et al.*, 2012). Au sein même d'un bassin versant, la différence pluviométrique n'est pas négligeable avec parfois près de 500 mm d'écart qui intervient d'autant plus lorsque le relief est plus marqué. La variabilité s'exprime aussi temporellement au sein d'une année où deux tiers du cumul intervient sur la saison de recharge des cours d'eau. L'écart entre les saisons de recharge et d'étiage est de l'ordre de 100 à 400mm sur une année, il est accentué sur l'Ouest de la Bretagne. La variabilité pluviométrique s'exprime aussi d'une année à l'autre, par exemple à Mur-de-Bretagne, le cumul sur une année hydrologique peut varier de 100 à 200mm d'une année à l'autre.

### L'importance des fortes pluies dans les variabilités spatiales et temporelles

La décomposition des pluies selon leur apport quotidien permet de séparer les cumuls selon le type de pluie. Cette méthode de décomposition en apports d'intensité donnée a été décrite par Mounier et Péguy en 1968 afin de montrer l'importance des précipitations intenses (Mounier et Péguy, 1968). Une étude régionale a aussi été menée en utilisant cette méthode pour l'étude des précipitations intenses en Bretagne (Dubreuil *et al.*, 1996).

Le nombre de jours de pluie selon l'intensité (figure 2) est mis en parallèle avec le cumul moyen de pluie à Mur-de-Bretagne. Sur une année hydrologique, il y a environ 7 jours de fortes pluies qui représentent 25 % du cumul annuel et 74 jours de pluie faible qui représentent 18 % du cumul. Plus de la moitié du cumul est apporté par une trentaine de jours de pluie de plus de 10 mm. L'autre partie (autour de 40 % du cumul) est apportée par près de 110 jours de pluie. Donc, le cumul de précipitation dépend fortement de quelques jours de fortes pluies. La ressource en eau disponible dépend fortement de ces quelques jours de fortes pluies c'est pourquoi il est nécessaire d'identifier les périodes où interviennent ces fortes pluies et leurs évolutions. Ces observations se retrouvent sur les autres stations, l'apport des fortes pluies est d'autant plus important que le cumul est important. Par exemple à Coray (station la plus arrosée), 35% du cumul annuel est apporté par 15 jours de fortes pluies ou  $P > 20\text{mm}$ .



**figure 2 :** Nombre de jours de pluie et fréquence de cumul moyen sur une année hydrologique à Mur-de-Bretagne (1958-2019)

Les fortes pluies sont donc essentielles pour l'apport pluviométrique total. Autrement dit, le cumul total dépend de quelques jours de fortes pluies. Elles forgent ainsi le régime pluviométrique des différentes stations bretonnes et contribuent ainsi à accentuer la variabilité spatiale et temporelle de la pluviométrie.

## Variabilité pluviométrique historique et future

### Une tendance à la hausse du cumul porté par une intensification des pluies :

Le cumul annuel tend à augmenter sur l'ensemble des stations bretonnes cette hausse est située autour de + 10% et est plus forte sur le littoral sud-breton. La figure 3 précise la situation à Mur-de-Bretagne qui est la plus longue série de la base de données. La tendance à la hausse  $y$  est significative avec +1,97mm / an d'après le test  $t$  mais cette tendance est marquée par une grande variabilité interannuelle. Des pics de cumul annuel à plus de 1 200 mm sont de plus en plus fréquents depuis 1990. Cette évolution semble assez liée avec celle du cumul des fortes pluies. Ce cumul est situé en moyenne autour de 200 mm, mais varie de 50 à 450 mm. Depuis les années 90, des pics de cumul annuel de forte pluie  $\geq 350$  mm s'observent davantage. Parallèlement, le cumul des pluies faibles tend aussi à augmenter mais présente une variabilité interannuelle moins importante. La hausse du cumul est annuelle est donc portée principalement par ces pics de cumul de fortes pluies.

À échelle mensuelle, l'évolution est plus variable spatialement. La hausse du cumul intervient plus en fin d'automne/ début d'hiver et juillet-août tandis qu'une baisse des cumuls est observée sur l'ensemble des stations en mars et mai.

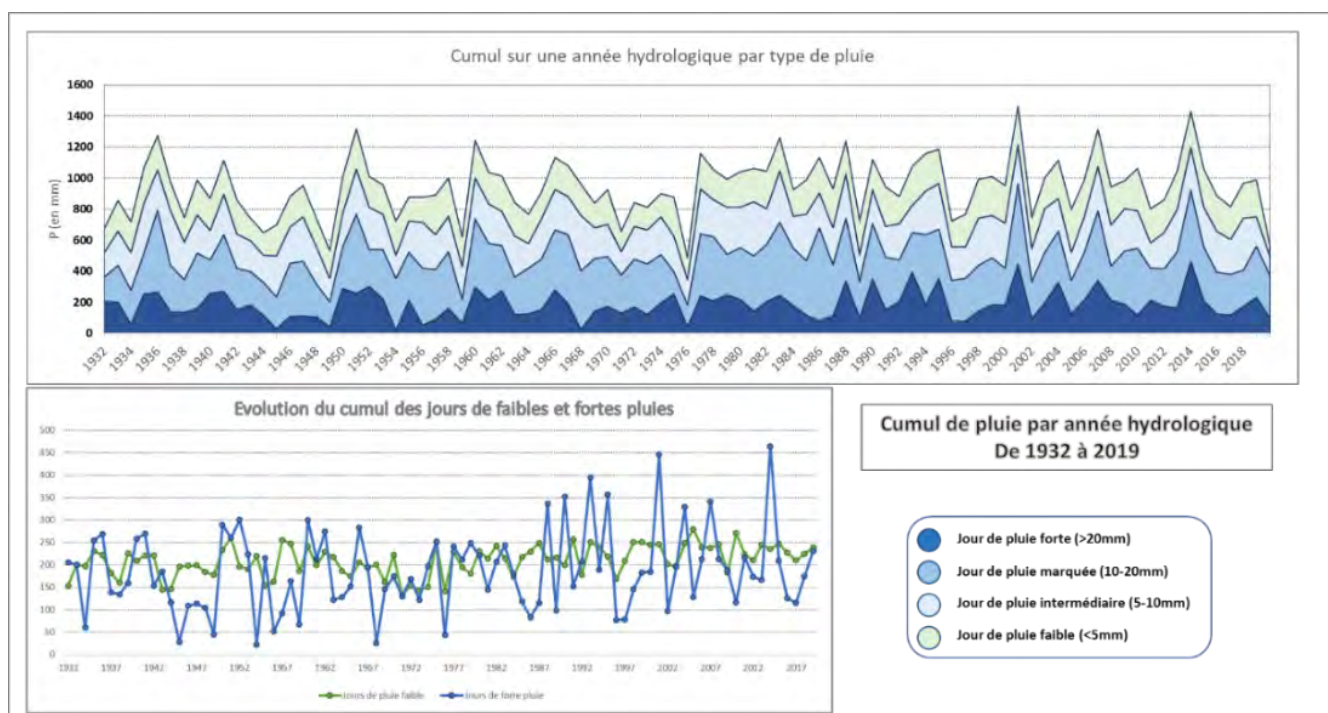


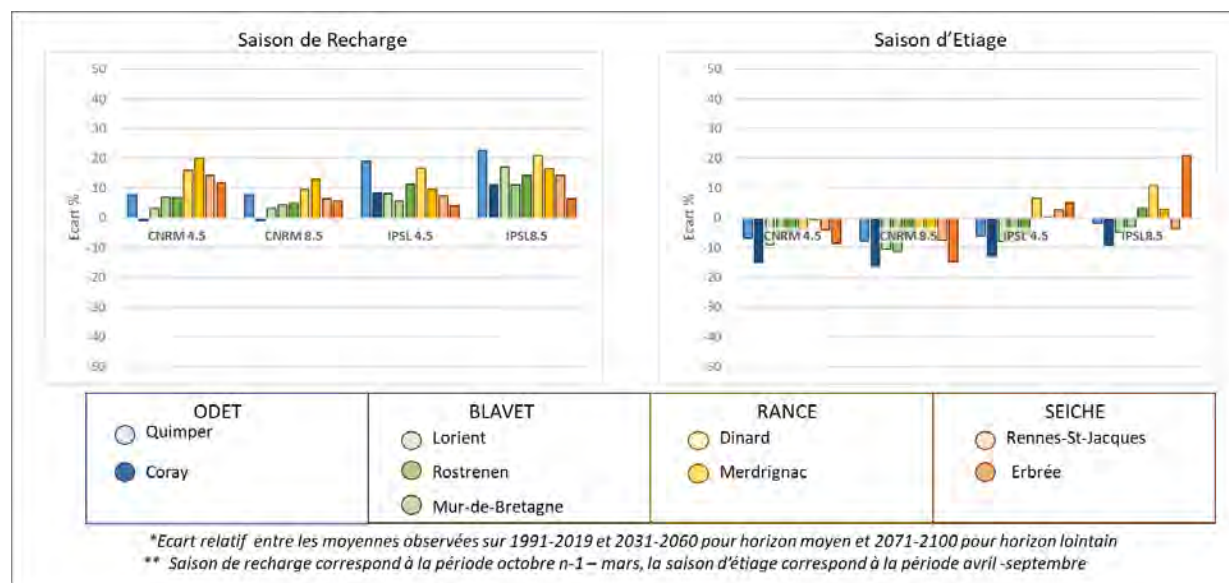
figure 3 : Évolution du cumul par année hydrologique à Mur-de-Bretagne de 1932 à 2019

### De nombreuses incertitudes sur l'évolution future de la pluviométrie

L'évolution de la pluviométrie est difficile à cerner puisque celle-ci dépend de quelques jours de fortes pluies à l'année. De plus, l'étude des biais des modèles CNRM et IPSL a montré une grande différence entre les modèles, mais aussi selon le lieu et la période de l'année considérés. À échelle annuelle, les écarts sont de moins de 10% ; cependant des écarts mensuels de plus de 20 mm sont parfois observés pour les deux modèles. C'est notamment le cas de novembre dont le cumul est fortement surestimé pour le modèle IPSL et août fortement sous-estimé par le modèle du CNRM. Donc malgré une correction des données par le biais moyen observé, une incertitude subsiste sur l'analyse de ces données corrigées du fait de la grande diversité des écarts selon le lieu, le modèle et la période de l'année.



## Une convergence de tendances saisonnières



C'est un des résultats majeurs de cette étude, indépendamment du modèle et du scénario, le cumul tend à augmenter en saison de recharge (octobre (n-1) – mars (n) ) et diminuer ou stagner en saison d'étiage (avril (n) - septembre (n) ). À l'horizon moyen, cette hausse est située autour de + 10% du cumul saisonnier avec quelques différences dans l'intensité et la distribution spatiale de cette hausse selon le modèle. C'est-à-dire l'apport d'un mois de pluie de décembre supplémentaire sur la seule saison de recharge. La convergence est nette vers une hausse de cumul selon les deux modèles et deux scénarios plus importante entre les modèles (figure 4). Pour la saison d'étiage, tendance est à la baisse de cumul, autour de 8% au moins sur l'Ouest de la Bretagne. Cela induit une amplification de l'écart saisonnier

### Conclusion

Le programme DEMOCLIM a permis de définir une méthode d'analyse des effets du changement climatique sur la ressource en eau à l'échelle de bassins versants. L'étude exploratoire a montré l'importance des fortes pluies dans l'apport du cumul total, ces jours de fortes pluies sont rares mais essentiels dans l'apport du cumul total. Quelques jours de fortes pluies en moins suffisent à réduire le cumul annuel parfois de plusieurs centaines de millimètres. C'est aussi ces quelques jours de fortes pluies qui expliquent la différence entre l'est et l'ouest de la Bretagne.

L'évolution future de la pluviométrie est pleine d'incertitude. Ce premier travail exploratoire rend compte de toute la difficulté de mener une étude climatique. Il a été complété par un guide méthodologique à destination des gestionnaires de l'eau. Ce guide communique toutes les étapes de la mise en place de ce diagnostic climatique : la sélection des stations, la sélection des indicateurs, l'analyse de la série historique puis l'évolution du climat futur. L'objectif est de donner les clés aux gestionnaires pour mener des études climatiques cohérentes et conscientes des biais et incertitudes du climat futur.

**Remerciement** : Merci à la région Bretagne d'avoir financé le programme et merci à météo France pour sa participation notamment pour avoir fourni les données. Sans ces deux éléments essentiels, l'étude n'aurait pas pu avoir lieu.

### Bibliographie

Amiot L., 2020, *Impacts des changements climatiques sur la ressource en eau en Bretagne : Approche exploratoire à partir des données historiques et des données du portail Drias*, Mémoire de Master Géographie, Aménagement Environnement, Développement Parcours Environnement, Territoires, Université Rennes 2.

- Amiot L., Dubreuil V., Launay J., Bardon E., Massa F., Keromnes E., 2021, *DIAGNOSTIC CLIMATIQUE TERRITORIAL FOCUS « RESSOURCE EN EAU » Guide méthodologique*, CRESEB et région Bretagne.
- Belleguic K., Conseil C., Eveno T., Lorge S., Baraer F., 2012, *Le Changement climatique en Bretagne*, Météo-France
- DRIAS, 2014, *Simulations climatiques - CNRM2014 - ARPEGE / ALADIN52*
- DRIAS, 2014, *Simulations climatiques - IPSL2014 - IPSL -CM5A / WRF*
- Dubreuil V., 1994, *La sécheresse dans la France de l'ouest : étude au moyen des bilans hydriques et des données NOAA-AVHRR*, Thèse de Doctorat de Géographie
- Dubreuil V., Lamy C., Planchon O., 2018, *Les sécheresses à Rennes : passé, présent et futur, Les risques naturels dans le contexte de changement climatique*, 2018, Cluj, Roumanie, 15-21
- Jouzel J., Ouzeau G., Déqué M., Jouini M., Planton S., Vautard S., 2014, *Le climat de la France au XXIe siècle Volume 4 scénarios régionalisés : édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer*, Direction générale de l'Energie et du Climat
- Lamy C., 2013, *Impact du changement climatique sur la fréquence et l'intensité des sécheresses en Bretagne*, Thèse de doctorat de Géographie, Université Rennes 2
- Merot P., Dubreuil V., Delahaye D., Desnos P., 2012, *Changement climatique dans l'Ouest : évaluation, impacts, perceptions*, Presses universitaires de Rennes, 458 pages
- Mounier J., Peguy P., 1968, Une méthode de recherche climatique : l'analyse fréquentielle des précipitations tombées en 24 heures, *Annales de géographie*, **424**, 711-720
- Mutin G., 2000, De l'eau pour tous ?, *Documentation photographique*, 18 pages
- OMM. (2017). Directives de l'OMM pour le calcul des normales climatiques, OMM-N° 1203
- Soubeyroux J-M., Vidal J-P., Najac J., Kitova N., Blanchard M., Dandin P., Martin E., Pagé C., Habets F., 2011, *Projet Climsec, Impact du changement climatique en France sur la sécheresse et l'eau du sol*, Rapport final du projet, Météo-France

## IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'ÉCOULEMENT DES RIVIÈRES EN ROUMANIE

Liliana ZAHARIA<sup>1</sup>, Gabriela IOANA-TOROIMAC<sup>1</sup>, Gabriela Adina MOROSANU<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de Bucarest, Faculté de Géographie, 1 Boulevard N. Bălcescu, 010041, Bucarest, Roumanie, zaharialili@hotmail.com ; gabriela.toroimac@geo.unibuc.ro

<sup>2</sup> Institut de Géographie de l'Académie Roumaine, 12 Str. Dimitrie Racoviță, 023993, Bucarest, Roumanie, gabriela.adina.m@gmail.com

**Résumé :** Ce travail présente une synthèse des résultats scientifiques les plus récents portant sur les changements observés dans la variabilité hydro-climatique en Roumanie, les dernières 5-6 décennies. Dans le contexte des changements climatiques (présentés brièvement dans la première partie du travail), des tendances générales à la baisse des débits moyens annuels ont été observées, surtout au sud du pays. Des modifications plus ou moins significatives ont été notées dans le régime annuel d'écoulement : des tendances à la hausse des débits en hiver (dus au réchauffement hivernal significatif et à l'augmentation des précipitations liquides au détriment de celles solides) et en automne (sur le fond des précipitations plus riches), ainsi que des tendances à la baisse en été (induites par le réchauffement et l'augmentation de l'évaporation).

**Mots-Clés :** changement climatique, débits, rivières, Roumanie

### Introduction

Les dernières décennies, des variations et changements significatifs des paramètres climatiques ont été signalés à différentes échelles spatiales, qui ont perturbé les systèmes humains et naturels (IPCC, 2022). Les modifications des températures de l'air, de l'évapotranspiration et des précipitations liquides et solides impactent le comportement hydrologique des rivières et les ressources en eau, avec des conséquences négatives sociétales et environnementales. Dans ce contexte, ce travail présente un aperçu des résultats scientifiques les plus récents et pertinents portant sur les changements dans la variabilité des principaux paramètres climatiques contrôlant l'écoulement des rivières en Roumanie, ainsi que sur les modifications détectées dans la variation des débits des rivières. Le travail repose principalement sur la recherche bibliographique et la synthèse des informations portant sur des changements identifiés dans les séries de données hydro-climatiques observées les dernières décennies aux stations du réseau national de mesures météorologiques et hydrométriques.

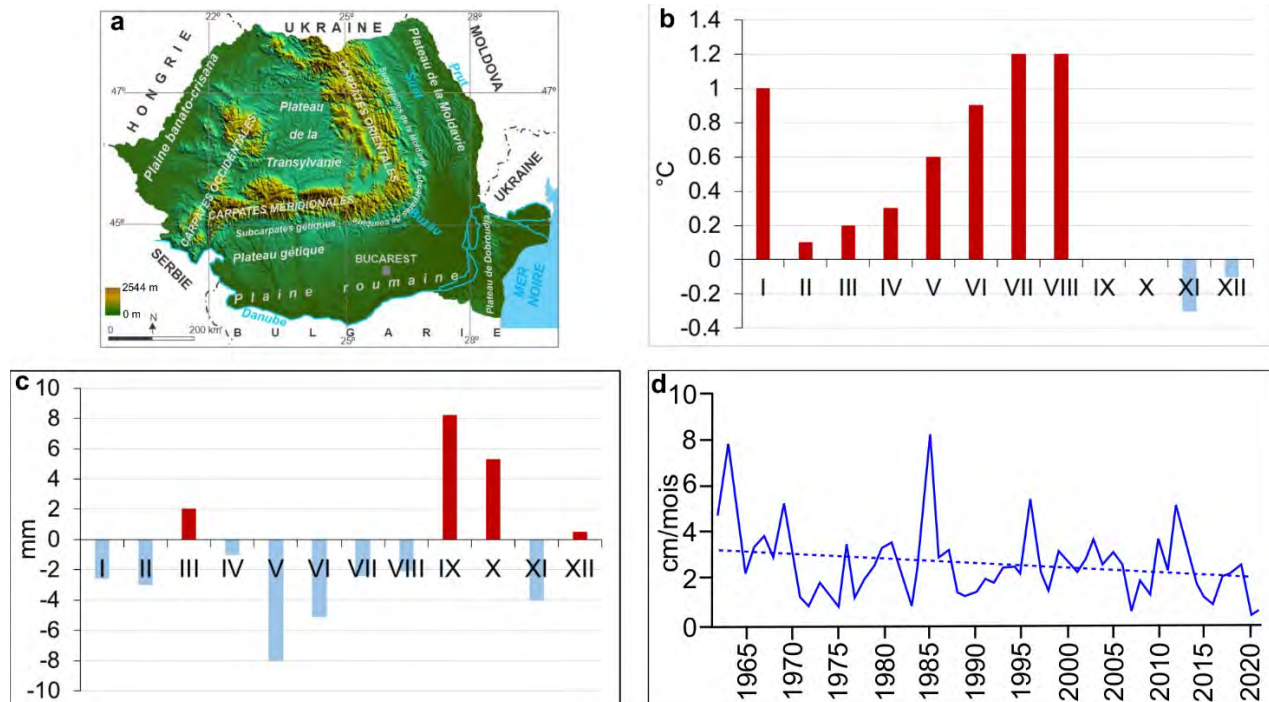
### 1. Aperçu des tendances des principaux paramètres climatiques contrôlant l'écoulement des rivières en Roumanie

Située dans la partie centrale de l'Europe, le territoire de la Roumanie (avec une superficie d'environ 240000 km<sup>2</sup>) s'articule autour de l'Arc des Carpates, en s'étalant entre 0 m et 2544 m d'altitude. Le relief englobe dans une proportion à peu près égale des montagnes, collines et plateaux et des plaines (à l'extérieur des Carpates). Le Danube draine le sud et sud-est du pays sur une longueur de 1075 km (plus d'un tiers de sa longueur totale) avant de se jeter, à travers un delta, dans la Mer Noire qui borde le pays au sud-est (Fig. 1a).

Due à sa position géographique, la Roumanie a un climat tempéré de transition entre celui océanique et continental, avec des différences spatiales induites par l'orographie et les influences régionales (liées aux centres bariques majeurs de pression atmosphérique). La température moyenne multiannuelle en Roumanie varie en latitude (de 8°C au nord à 11°C au sud) et en altitude (de 11-12°C dans les plaines, à moins de 0°C aux sommets des Carpates). Les précipitations moyennes multiannuelles augmentent de moins de 400 mm/an (dans le sud-est du pays) à plus de 1200 mm/an dans les hautes Carpates. Les précipitations les plus riches tombent en été (notamment en juin et juillet) et au printemps, alors que les plus faibles quantités de pluie tombent en hiver (dans les régions montagneuses) et en automne (aux basses altitudes) (ANM, 2008).

Les dernières décennies, en Roumanie, comme dans le monde entier, il y a eu des événements et des tendances dans la variabilité des paramètres climatiques qui ont été attribués au changement climatique. Ces tendances ont été signalées par de nombreuses publications dédiées à l'étude de la variabilité climatique en Roumanie, sur la base des données mesurées aux stations météorologiques. Dans la suite nous allons présenter synthétiquement les résultats les plus récents à l'échelle du pays, afin de fournir un aperçu sur les changements observés des paramètres climatiques majeurs contrôlant l'écoulement des rivières en Roumanie, à savoir la température de l'air, les précipitations atmosphériques et l'enneigement.

**La température de l'air.** Ce paramètre climatique influence indirectement l'écoulement des rivières, par son rôle dans l'évaporation/l'évapotranspiration et le phénomène de gel qui affecte le sol et les cours d'eau. Sur l'ensemble du pays, entre 1901 – 2020, la température moyenne annuelle de l'air a augmenté de plus de 1°C (Bojariu et al., 2021). Un réchauffement plus fort a été signalé dans le sud et l'est du pays, alors que dans les Carpates, la variation thermique a été plus faible (ANM, 2014). L'analyse des données observées à plus de 100 stations météorologiques de la Roumanie entre 1961 – 2020 a montré des tendances au réchauffement statistiquement significatives pour toutes les stations analysées, en hiver et en été (avec des taux de 0,1-0,6 °C/décennie) et pour la plupart des stations, au printemps (avec 0,1-0,5 °C/décennie). En automne les tendances de réchauffement sont plus faibles (entre 0,001 et 0,3 °C/décennie) et pour environ un tiers des stations elles ne sont pas statistiquement significatives (Bojariu et al., 2021). Durant l'année, sur le territoire de la Roumanie (en considérant 150 stations météo), les plus fortes augmentations de la température moyenne mensuelle de l'air au cours de la période 1981-2013 par rapport à la période 1961-1990, ont été observées en janvier-février (1°C) et en juillet-août (1,2°C) (Mateescu, 2014 ; Fig. 1b).



**figure 1.** a) La carte physique de la Roumanie; b - c) Différences observées dans les températures moyennes mensuelles de l'air (b) et les cumuls mensuels des précipitations (c) dans la période 1981 – 2013 par rapport à la période 1961 – 1990, en considérant 160 stations météo de Roumanie (source des données: Mateescu, 2014) ; d) Variation de l'épaisseur moyen de la couche de neige (cm/mois, en octobre-avril 1961 – 2021) et la tendance linéaire associée, en considérant 88 stations météo de Roumanie situées aux altitudes inférieures à 800 m (source: Bojariu et al., 2021).

**Précipitations.** La pluviométrie est le principal facteur naturel responsable de la variabilité de l'écoulement des rivières. Contrairement à la température de l'air, la variation à long terme (1901 – 2013) des cumuls annuels des précipitations sur l'ensemble de la Roumanie est relativement stable (Mateescu, 2014). A l'échelle saisonnière, entre 1961 et 2013, des tendances significatives à la hausse ont été identifiées pour plusieurs stations en automne (en particulier dans le centre et l'ouest du pays), tandis que pour les autres saisons, les précipitations n'ont pas connu de tendances significatives, à l'exception de quelques stations isolées qui ont enregistré des tendances négatives (Dumitrescu et al., 2014 ; Bojariu et al., 2015). Dans le régime annuel des précipitations sur l'ensemble de la Roumanie (en considérant 160 stations météo), une baisse des précipitations mensuelles a été notée entre 1981-2013, par rapport à la période 1961-1990, en particulier au printemps et en été (de 5 à 8 mm/mois en mai et juin) et une augmentation dans la première partie de l'automne (de 8 mm en septembre et de 5 mm en octobre) (Mateescu, 2014 ; Fig. 1c).

Des tendances à la hausse ont été identifiées pour les précipitations maximales journalières, notamment en été et en automne (Dumitrescu et al., 2014 ; Bojariu et al., 2015), alors que le nombre moyen de jours avec des précipitations supérieures à 20 mm entre 1991-2020 a été plus élevé par rapport à la période 1961-1990 pour la plupart des stations de la Roumanie (Bojariu et al., 2021).

**L'enneigement.** Avec les précipitations liquides, la neige joue un rôle majeur dans l'alimentation des rivières et, par conséquent, dans la variabilité de leurs débits. Les paramètres relatifs à l'enneigement ont connu des changements importants en Roumanie les derniers 5-6 décennies. L'analyse des séries de données enregistrées à 104 stations météo dans la période 1961–2010 a montré des tendances à la baisse statistiquement significative du nombre de jours avec couche neige à 40 % des stations analysées et de son épaisseur moyenne à 20 % des stations. Le changement le plus fort concerne le nombre de jours de chutes de neige, qui tend à diminuer sur 82 % des stations. Les plus touchées par les modifications des paramètres liés à l'enneigement sont les régions intra-carpates, de l'ouest et nord-est du pays (Bîrsan et Dumitrescu, 2014). La variation de l'épaisseur moyenne de la couche de neige sur l'ensemble de la Roumanie (en considérant environ 100 stations météo) entre 1991 et 2021 (durant la période octobre-avril) a connu des différences spatiales entre les stations des régions montagneuses (situées à plus de 800 m d'altitude) et celles des régions plus basses. Ainsi, une tendance générale à la baisse a été identifiée pour l'ensemble des stations (88) situées à des altitudes inférieures à 800 m (Fig. 1d). La tendance négative a été statistiquement significative dans la période décembre-mars (0,5 cm/décennie), alors qu'en octobre-novembre il y a eu un faible accroissement (mais non significatif). Pour les stations situées aux altitudes plus élevées (13), la tendance a été d'accroissement pour tous les mois analysés (sauf février, avec une situation quasi-stationnaire), mais statistiquement significative en octobre et novembre uniquement (Bojariu et al., 2021).

## 2. Changements observés dans l'écoulement des rivières

Les rivières (sans compter le Danube) sont la principale ressource en eau utilisable pour les besoins socio-économiques en Roumanie. Le Danube, bien qu'il détienne le plus grand volume d'eau douce de la Roumanie, est moins utilisé comme source d'eau, à cause de sa position périphérique par rapport au territoire national.

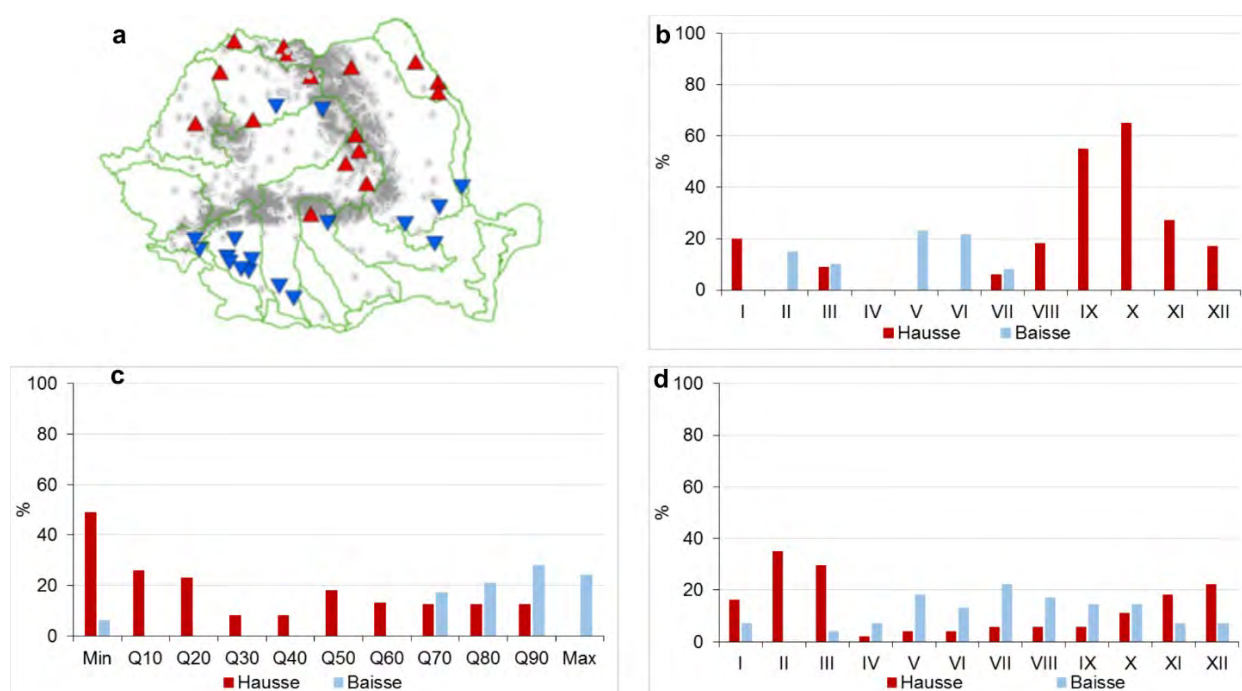
La densité moyenne des rivières intérieures sur l'ensemble du pays est de 0.5 km/km<sup>2</sup>, avec des valeurs plus élevées (0,6 – 1,0 km/km<sup>2</sup>) dans les régions montagneuses et moins faibles (0,2 – 0,3 km/km<sup>2</sup>) dans les régions de plaine (encore plus réduites dans le sud-est du pays) (Pătru et al., 2006). Le volume moyen annuel d'eau détenu par les rivières intérieures est estimé à 39920 \*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (pour la période 1950 – 2019). Par rapport à cela, entre 2015 – 2019, le volume moyenne annuel a diminué à 36605 \*10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (environ 8%) (MEEF et ANPE, 2021). Cette diminution pourrait être une conséquence du changement climatique.

La réponse hydrologique des rivières à ce changement a été le sujet de recherche de plusieurs publications scientifiques en Roumanie qui ont investigué les tendances dans la variabilité de l'écoulement



des rivières à de différentes échelles spatiales. Dans cette étude nous avons synthétisé les résultats les plus récentes, à l'échelle du pays et régionale, portant sur les tendances identifiées dans les séries des débits des rivières intérieures de la Roumanie mesurés aux stations du réseau hydrométrique national. Le Danube n'a pas été considéré dans ce travail, car la variabilité de son écoulement est dépendante du climat à une échelle spatiale beaucoup plus large. Une étude plus compréhensive, englobant des changements dans la variabilité de débits aussi observés que projetés dans le futur par des simulations, a été menée par Zaharia et al. (2020).

Le travail de Bîrsan (2017) portant sur la variabilité spatio-temporelle des débits moyens mensuels reconstitués de 156 stations hydrométriques de la Roumanie, dans la période 1956 – 2005, a montré des différences spatiales dans les tendances des débits moyens annuels. Ainsi, aux stations situées dans la moitié nord du pays, notamment dans la région montagneuse (carpatique), les débits ont connu des tendances à la hausse, alors que dans la moitié sud, avec des altitudes plus basses (collines, plateaux et plaine), les tendances des débits moyens annuelles ont été à la baisse (Fig. 2a). Ces différences pourraient



être liées au fait que la partie sud de la Roumanie est la plus touchée par le réchauffement, comme on l'a montré dans la section 1. Durant l'année, des tendances à la hausse des débits moyens mensuels ont été notées entre août et janvier, avec les fréquences les plus élevées en septembre – novembre (jusqu'à 50 – 60% du nombre total des stations, en septembre et octobre). En février, mai et juin, les débits moyens ont connu des tendances à la baisse (pour plus de 20% des stations en mai et juin), alors qu'en mars et juillet, il y a eu aussi des tendances positives, que négatives (avec des fréquences inférieures à 10% des stations analysées) (Bîrsan, 2017 ; Fig. 2b).

**figure 2.** a) Tendances dans les séries des débits moyens annuels (reconstitués) des rivières entre 1956 et 2005 (triangle rouge – tendance à la hausse ; triangle bleu – tendance à la baisse ; cercle – station sans tendance statistiquement significative) ; b-d) Fréquences relatives des stations avec tendances statistiquement significatives des : b) débits moyens mensuels (reconstitués) entre 1956 – 2005 (156 stations; les valeurs inférieures à 5% sont omises) ; c) quantiles des débits annuels (Q10...Q90) et des valeurs minimales et maximales (1961–2009 ; 25 stations) ; d) débits minimums mensuels (1980 – 2013 ; 54 stations). Sources : a) Bîrsan (2017) ; b) adapté selon Bîrsan et al. (2017) ; c) adapté selon Bîrsan (2014) ; d) adapté selon Tănase et Zaharia (2018).

Des changements relativement similaires ont été identifiés dans la variabilité des débits moyens pour une période plus longue (1935 – 2010), en considérant 46 stations hydrométriques de la Roumanie, à savoir : des tendances (généralement statistiquement significatives) à la hausse en hiver, au printemps, en automne et à l'échelle annuelle dans la partie nord-ouest du pays et des tendances significatives à la baisse au printemps dans la partie méridionale du pays (Mic et al., 2016).



L'analyse des séries des débits moyens mensuelles des 51 stations hydrométriques (avec un régime d'écoulement quasi-naturel), pour la période 1976-2005, a montré des changements notables dans la saisonnalité de l'écoulement : plus de la moitié des stations ont eu des tendances négatives du débit à la fin du printemps et au début de l'été (Bîrsan et al., 2012). Les changements les plus importants ont été notés en juin, où plus de 60 % des stations ont eu des tendances à la baisse. D'avril à juillet, les tendances ont été exclusivement négatives, tandis qu'en automne, les débits ont augmenté. En février et mars, les tendances sont mixtes, avec un faible pourcentage (moins de 20% des stations), alors qu'aucun changement n'a été identifié en août et décembre. Quant aux débits moyens annuels, des tendances à la baisse ont été statistiquement significatives durant la période 1976 – 2005 uniquement (Bîrsan et al., 2012). Entre 1961 et 2009, l'étude menée par Bîrsan et al. (2014), basée sur les débits moyens mensuels mesurés à 25 stations hydrométriques avec le régime d'écoulement non-perturbé anthropiquement, a montré des tendances générales à la hausse statistiquement significative pour les débits annuels faibles et moyens (correspondant au débit minimal et aux quantiles  $Q_{10}$  -  $Q_{60}$ ) et des tendances à la baisse pour les débits élevés (correspondant aux quantiles  $Q_{70}$  -  $Q_{90}$  et au débit maximal) (Fig. 2c). La même étude a montré des changements saisonniers dans le régime d'écoulement, à savoir : des tendances dominantes (statistiquement significatives) à la hausse de débits en hiver et en automne et à la baisse en été. Au printemps, dans le nord-ouest du pays, les tendances ont été positives, alors que dans les Carpates et au sud du pays, les débits ont connu une tendance à la baisse. Pour une période plus courte (1975 – 2009), mais en considérant 44 stations hydrométriques, les tendances négatives en été ont eu une extension spatiale plus large, alors que les tendances positives en automne ont été moins répandues (pour plus de détails à voir Bîrsan et al., 2014).

Entre 1980 et 2013, les valeurs annuelles les plus basses des débits moyens quotidiens et mensuels enregistrés à 54 stations hydrométriques de la Roumanie (avec un régime d'écoulement quasi-naturel) ont connu des tendances généralement positives aux stations situées notamment dans la région montagneuse, tandis que dans les régions plus basses les tendances ont été négatives (Tănase et Zaharia, 2018). Les débits minimums mensuels (en considérant les débits moyens journaliers les plus petits de chaque mois entre 1980 et 2013) ont eu des tendances à la hausse durant la période froide (novembre - mars) pour la plupart des stations analysées, alors que dans la période chaude (avril – octobre) les tendances ont été généralement négatives (Tănase et Zaharia, 2018 ; Fig. 2d).

A l'échelle régionale, les tendances identifiées dans la variation de l'écoulement des rivières sont hétérogènes, due à l'influence des changements climatiques locaux (en l'absence des pressions anthropiques majeures). Ainsi, dans la partie est de la Roumanie (la province historique de Moldavie), les débits moyens annuels et saisonniers des rivières ont augmenté à la plupart des 17 stations analysées (pour les périodes 1950 – 2006 et 1960 – 2015). Le taux le plus élevé des tendances positives statistiquement significative a été enregistré en automne. Dans la partie sud de la Moldavie, des tendances négatives ont été également signalées, notamment en hiver et printemps (Croitoru et Minea, 2015 ; Minea, 2020). Dans la partie nord, les tendances des débits moyens annuels et saisonniers sont essentiellement positives (entre 1950 et 2017), mais, généralement statistiquement non-significatives (sauf deux stations parmi sept) (Minea et al. 2020). Dans le cas de la rivière Prut (qui forme la frontière orientale de la Roumanie avec la République de la Moldavie), l'analyse comparative des débits moyens annuels et saisonniers entre les périodes 1961 – 1990 et 1991 – 2017 a mis en évidence l'augmentation des débits en hiver et automne (jusqu'à 15%) durant la dernière période par rapport à la première et la diminution au printemps et en été. A l'échelle annuelle, une très faible diminution du débit a été trouvée (d'environ 2%) après 1991 (Corobov et al., 2021).

Dans le sud-ouest de la Roumanie (la région d'Olténie), entre 1961 et 2009, la diminution de l'écoulement moyen des rivières a été remarquée, comme résultat de l'augmentation du déficit climatique en eau. Des tendances négatives statistiquement significatives du débit ont été identifiées, en particulier au printemps (Prăvălie et al., 2016).

## Conclusions

En raison de la forte dépendance de la variabilité hydrologique du climat, le changement climatique impacte d'une manière significative l'écoulement des rivières, affectant la ressource en eau pour les besoins

des sociétés, ainsi que les écosystèmes aquatiques. En Roumanie, les changements climatiques les plus importants détectés dans les dernières 5-6 décennies, avec des impacts hydrologiques significatifs sont : le réchauffement général à l'échelle annuelle et saisonnière (hors l'automne) ; l'augmentation des précipitations en automne et du nombre moyen annuel de jours avec précipitations supérieures à 20 mm ; des tendances à la baisse des indices liés à l'enneigement (surtout à des altitudes inférieures à 800 m). Dans ce contexte, à l'échelle de la Roumanie, parmi les principaux changements identifiés dans l'écoulement des rivières sont à noter: des tendances générales à la baisse des débits moyens annuels, notamment au sud du pays, alors que dans la partie nord, les tendances sont surtout à la hausse ; des modifications dans la variabilité mensuelle et saisonnière des débits, à savoir des tendances à la hausse en hiver (liées à l'augmentation de la température de l'air et au passage des précipitations solide en forme liquide) et en automne (sur le fond de l'augmentation des précipitations) et des tendance à la baisse en été (induites par le réchauffement et comme suite, l'augmentation de l'évaporation).

Identifier les changements climatiques et leurs impacts hydrologiques présente un intérêt majeur à la fois scientifique et pratique, afin de mettre en place des stratégies adéquates d'adaptation à ces changements et de lutte contre leurs effets négatifs.

## Bibliographie

- ANM (Administration Nationale de Météorologie), 2008 : *Clima României*. Académie Roumaine, 365 pages.
- ANM (Administration Nationale de Météorologie), 2014 : Adaptation measures in Romanian agriculture. SEE Project-OrientGate: a structured network for integration of climate knowledge into policy and territorial planning, 99 pages. [https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/publications/climate-change-adaptation-measures-in-romanian-agriculture/wp4\\_pilot-study-2\\_report\\_web.pdf](https://climate-adapt.eea.europa.eu/metadata/publications/climate-change-adaptation-measures-in-romanian-agriculture/wp4_pilot-study-2_report_web.pdf).
- Bîrsan M.V., Zaharia L., Chendeş V. et Brănescu E., 2012 : Recent trends in streamflow in Romania (1976–2005). *Romanian Reports in Physics*, **64(1)**, 275–280.
- Bîrsan M.V., Zaharia L., Chendeş V. et Brănescu E., 2014 : Seasonal trends in Romanian streamflow. *Hydrological Processes*, **28**, 4496–4505. DOI: 10.1002/hyp.9961.
- Bîrsan M.V. et Dumitrescu A., 2014 : Snow variability in Romania in connection to large-scale atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*, **34(1)**, 134–144. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.3671>.
- Bîrsan M.V., 2017 : *Variabilitatea regimului natural al scurgerii râurilor din România*. Ars Docendi, 100 pages.
- Bojariu R., Bîrsan M.V., Cică R., Velea L., Burcea S., Dumitrescu A., Dascălu S.I., Gothard M., Dobrinescu A., Cărbunaru F. et Marin L., 2015 : *Schimbările climatice – de la bazele fizice la riscuri și adaptare*. Printech, 100 pages.
- Bojariu R., Chițu Z., Dascălu S.I., Gothard M., Velea L.F. Burcea R., Dumitrescu A., Burcea S., Apostol L., Amihaesei V., Marin L., Crăciunescu V.S., Irimescu A., Mătreacă M., Niță A. et Bîrsan M.V., 2021 : *Schimbările climatice – de la bazele fizice la riscuri și adaptare*. Édition révisée et ajoutée, Printech, 222 pages.
- Corobov R., Ene A., Trombitsky I. et Zubcov E., 2021 : The Prut River under Climate Change and Hydropower Impact. *Sustainability*, **13**, 1-17. DOI: <https://dx.doi.org/10.3390/su13010066>.
- Croitoru A.E. et Minea I., 2015 : The impact of climate changes on rivers discharge in Eastern Romania. *Theoretical and Applied Climatology*, **120**, 563–573. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1194-z>.
- Dumitrescu A., Bojariu R., Bîrsan M.V., Marin L., Manea A., 2014 : Recent climatic changes in Romania from observational data (1961-2013). *Theoretical and Applied Climatology*, **122(1–2)**, 111–119.
- IPCC, 2022: Summary for Policymakers [Pörtner H.O. et al. (eds.)]. *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, 35 pages, [https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC\\_AR6\\_WGII\\_SummaryForPolicymakers.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6wg2/pdf/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf).
- Mateescu E., 2014 : *ADER 1.1.1. Sistem de indicatori geo-referențiali la diferite scări spațiale și temporale pentru evaluarea vulnerabilității și măsurile de adaptare ale agroecosistemelor față de schimbările globale*, 45 pages. <https://www.madr.ro/attachments/article/139/ANM-ADER-111.pdf>.
- Mic R.P., Mareș C., Corbuș C., Mătreacă M., Chendeş V., Radu E., Stănescu G., Chelcea S., Teodor S., Mătreacă S., Adler M.J., Mareș I., Achim D., Preda A., Borcan M., Retegan M., Apostu A.D. et Brănescu E., 2016 : *Climate change impact on hydrology, CLIMHYDEX – Changes in climate extremes and associated impact in hydrological events in Romania. Final Report*, 86 pages.

Minea I., 2020 : The Vulnerability of Water Resources from Eastern Romania to Anthropic Impact and Climate Change. In Negm A., Romanescu G., Zeleňáková M. (eds) *Water Resources Management in Romania*. Springer Water. Springer, 229-250. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22320-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22320-5_7).

Minea I., Boicu D., Iosub M., Chelariu O.E., Solomon B., 2020 : Long-term trends in rivers flow from north-eastern part of Romania. *20th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2020*, 225-231.

Ministère de l'Environnement, des Eaux et des Forêts (MEEF) et Agence Nationale pour la Protection de l'Environnement (ANPE), 2021: Rapport annuel privind starea mediului în România, anul 2020, 691 pages, [http://www-old.anpm.ro/upload/217086\\_RSM%202020.pdf](http://www-old.anpm.ro/upload/217086_RSM%202020.pdf).

Pătru I., Zaharia L. Oprea R., 2006: Geografia fizică a României. *Climă, ape, vegetație, soluri*. Universitară, 175 pages.

Prăvălie R., Zaharia L., Bandoc G., Petrișor A., Ionuș A. et Mitof I., 2016 : Hydroclimatic dynamics in southwestern Romania drylands over the past 50 years. *Journal of Earth System Science*, **125(6)**, 1255–1271. DOI: 10.1007/s12040-016-0730-x.

Tănase I. et Zaharia L., 2018 : Recent trends in the low-flow variability in Romania. *Risks and Catastrophes Journal*, **23(2)**, 27 – 35. DOI: [10.24193/RCJ2018\\_13](https://doi.org/10.24193/RCJ2018_13).

Zaharia L., Ioana-Toroimac G., Perju E.R, 2020 : Hydrological Impacts of Climate Changes in Romania. In Negm A., Romanescu G., Zeleňáková M. (eds) *Water Resources Management in Romania*. Springer Water. Springer, Cham, 309 - 351. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-22320-5\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-22320-5_10).

## ÉVOLUTION DU RÉGIME PLUVIOMÉTRIQUE SUR UN SIÈCLE DANS LA PROVINCE DE SETTAT, MAROC

Abdelali SEBBAR <sup>1</sup>, Hassan FOUGRACH <sup>2</sup>, Mohamed HSAINE<sup>2</sup>, Wadi BADRI<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Direction de la Météorologie Nationale (DMN), BP 8106-Casa Oasis; Bd Mohamed Taïb Naciri Hay Hassani, Casablanca. Maroc. [sebbar202@gmail.com](mailto:sebbar202@gmail.com)

<sup>2</sup> Laboratoire Ecologie et Environnement (LEE), Equipe Ecologie et Ecophysiologie Végétale (3EV), Faculté des Sciences Ben M'Sik- Casablanca. Université Hassan II- Casablanca. [bl.wadi@hotmail.fr](mailto:bl.wadi@hotmail.fr)

**Résumé :** Depuis les années 1970, l'Afrique du Nord a connu une hausse des températures, une baisse pluviométrique et la multiplication d'événements extrêmes. Le Maroc n'a pas échappé à ces conditions difficiles qui pèsent lourdement sur les activités économiques et agricoles, réduisent considérablement les ressources en eau mobilisables pour une population sans cesse croissante. Ainsi, nous proposons une étude sur l'évolution du régime pluviométrique dans la province de Settata située au centre ouest du Maroc. L'étude des tendances a montré une tendance à la baisse mais non significative. D'autre part, une rupture a été signalée au sein de la série aux alentours de 1979. Et en fin, nous avons identifié les périodes des sécheresses les plus persistantes et sévères, à travers l'indice pluviométrique standardisé (IPS).

**Mots-Clés :** Variabilité climatique ; Pluviométrie ; sécheresse ; Maroc.

**Abstract: Evolution of the rainfall regime over a century in the province of Settata, Morocco.**

Since the 1970s, North Africa has experienced rising temperatures, falling rainfall and an increase in extreme events. Morocco has not escaped these difficult conditions that weigh heavily on economic and agricultural activities, considerably reduce the water resources that can be mobilized for an ever-growing population. Thus, we propose a study on the evolution of the rainfall regime in the province of Settata located in the center west of Morocco. The study of the trend showed a downward trend but not significant. On the other hand, a break was reported within the series around 1979. Finally we identified the periods of the most persistent and severe droughts, through the standardized rainfall index (IPS).

**Key words:** Climate variability; Rainfall; drought; Morocco.

### Introduction

Dans les pays arides et semi-aride de l'Afrique du Nord, la variabilité climatique s'est manifestée depuis les années 1970, par une hausse des températures de l'ordre de 0,6 °C, une baisse pluviométrique et par la multiplication d'événements extrêmes. Le Maroc n'a pas échappé à ces conditions difficiles qui pèsent lourdement sur les activités économiques et agricoles, réduisent considérablement les ressources en eau mobilisables pour une population sans cesse croissante. Plusieurs études ont été effectuées pour déceler d'éventuelles fluctuations climatiques sur cette partie du globe. Ainsi, depuis les années 1950, Debrach et *al.*, et Daget ont étudié les précipitations atmosphériques au Maroc et caractérisé le bioclimat méditerranéen. D'autre part, (Amraoui L., 2011 ; Sebbar et *al.*, 2012 ; Belaassal A., 1998) ont évoqué l'évolution climatique récente en Afrique du Nord-Ouest en liaison avec la circulation atmosphérique.

Dans ce cadre, nous proposons une étude sur l'évolution du régime pluviométrique dans la province de Settata située au centre ouest du Maroc et qui dispose d'une base de données qui dépasse un siècle. Nous allons étudier les tendances par le test de Mann Kendall, déceler d'éventuelles ruptures au sein de la série par le test de Pettitt et par la segmentation d'Hubert. Et identifier les dates des sécheresses les plus persistantes, à travers l'indice pluviométrique standardisé (IPS).

### 1. Zone d'étude et base de données

#### 1.1. Zone d'étude

Située au centre-ouest du Maroc, entre les longitudes 7° 13' W et 8°31' W et les latitudes 32°57' N et 33°43' N. La superficie de la province s'étend sur environ 7220 km<sup>2</sup>, ce qui constitue 35% de

la superficie régionale. Sur une altitude qui varie de 200 à 550 m, la province (figure 1) se caractérise par un climat de type continental semi-aride. Ses étés sont chauds avec des températures maximales allant de 35° à 45°C et ses hivers sont frais de 5° à 15°C (Sebbar et *al.*, 2018). Variables d'une année à l'autre, les précipitations sont faibles. Elles sont de l'ordre de 360 mm en moyenne.

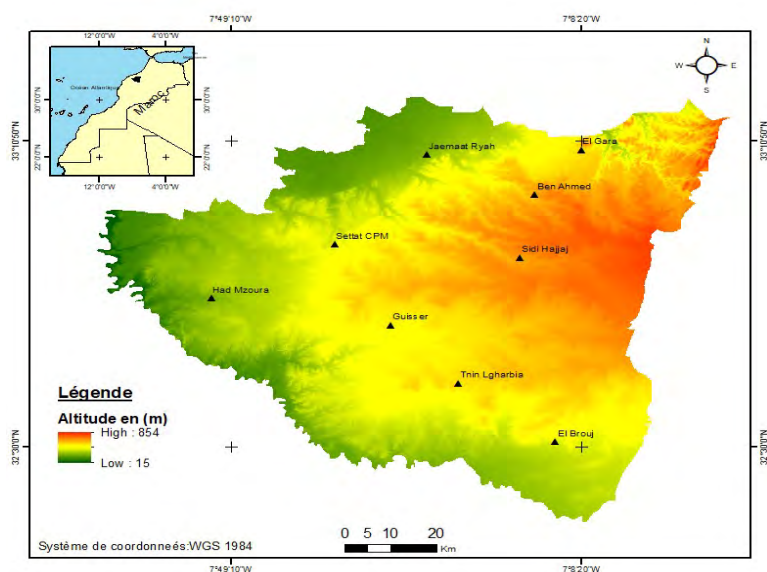


figure 1 : Localisation de la zone d'étude et ses caractéristiques

## 1.2. Base de données

La base de données mise à notre disposition provient des services d'hydrologie, des plans directeurs et du centre provincial météorologique de Settât. Elle se compose des cumuls pluviométriques mensuels et annuels sur la période qui s'échelonne de 1910 à 2020. On a utilisé les cumuls pluviométriques de l'année agricole qui débute au premier septembre de l'année K et finit le 31 août de l'année K+1. Ce choix se justifie par le fait que, dans le domaine méditerranéen, la saison pluvieuse commence au mois de septembre et s'achève au mois de mai. Pour reconstituer les données manquantes nous avons employé la méthode de Laborde et Mahous 1998 par rapport aux stations avoisinantes de Nouasser et Casablanca, l'homogénéité de la série a été vérifiée à l'aide de logiciel Anclim (Stépànek, 2005) par l'approche relative à la méthode d'Alexandersson et comme station de référence la station de Casablanca.

Tableau 1: Caractéristiques de la station étudiée

Station	Longitude	Latitude	Altitude	Période	Moyenne (mm)	Ecart-type (mm)	Coefficient de variation Cv (%)
Settât	7° 37' W	32°57' N	407.5 m	1910/2020	360	118	34

## 2. Méthodologie et résultats

D'après Kendall et Stuart (1943), l'analyse d'une série temporelle a pour but d'améliorer la compréhension des mécanismes statistiques générateurs de cette série d'observations. Ainsi, notre démarche d'analyse chronologique des pluies comprend trois étapes différentes : l'analyse de la tendance générale de l'évolution des précipitations, la détection des ruptures au sein de la série pluviométrique et la quantification de la réduction pluviométrique de part et d'autre de la date de rupture et enfin la mise en évidence ses phases pluvieuses et des phases sèches en appliquant l'IPS pour notre cas.

### 2.1. Etude des tendances pluviométriques annuelles et saisonnières

Pour étudier le régime annuel des précipitations et sa tendance sur la zone d'étude, nous avons employé en premier lieu la courbe de tendance linéaire, et en deuxième lieu nous avons utilisé le test de Mann Kendall pour déceler la significativité ou non de la tendance.

A la province de Settât, la valeur maximale est de l'ordre de 624 mm enregistrée en 1962/63 alors que la valeur minimale 117 mm est enregistrée en 1980/81. D'autre part, d'après la figure 2, il

ressort que le régime pluviométrique annuel se caractérise par une grande variabilité inter annuelle. De plus la tendance linéaire signale une baisse importante des précipitations avec une pente de l'ordre de -0.84. Le résultat du test de Mann Kendall signale que cette tendance n'est pas significative au sens statistique du terme ( $P_{\text{value}} = 0,99$ )

D'après la figure 3, les régimes pluviométriques saisonniers de la station de Settât se caractérisent par, une tendance à la baisse non significative pour l'hiver et le printemps, tandis que, l'automne présente une stabilité relative des précipitations. Ainsi, on peut lier la baisse pluviométrique annuelle à la baisse des deux saisons, d'hiver et du printemps.

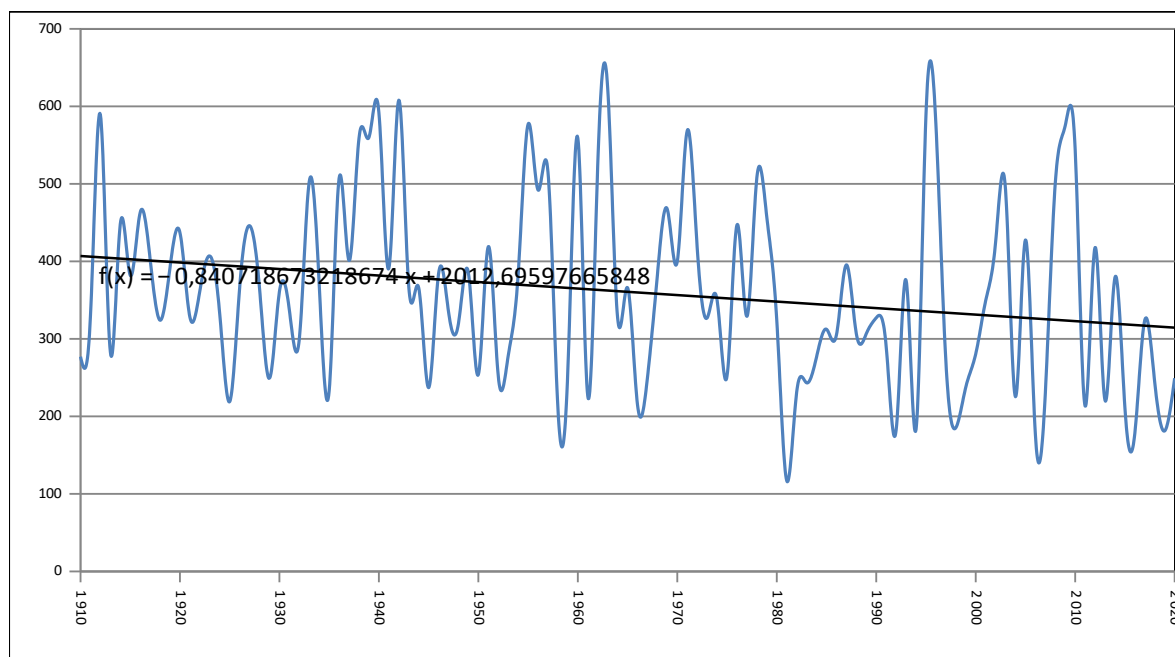


figure 2 : Évolution de la pluviométrie à la province de Settât 1910/2020

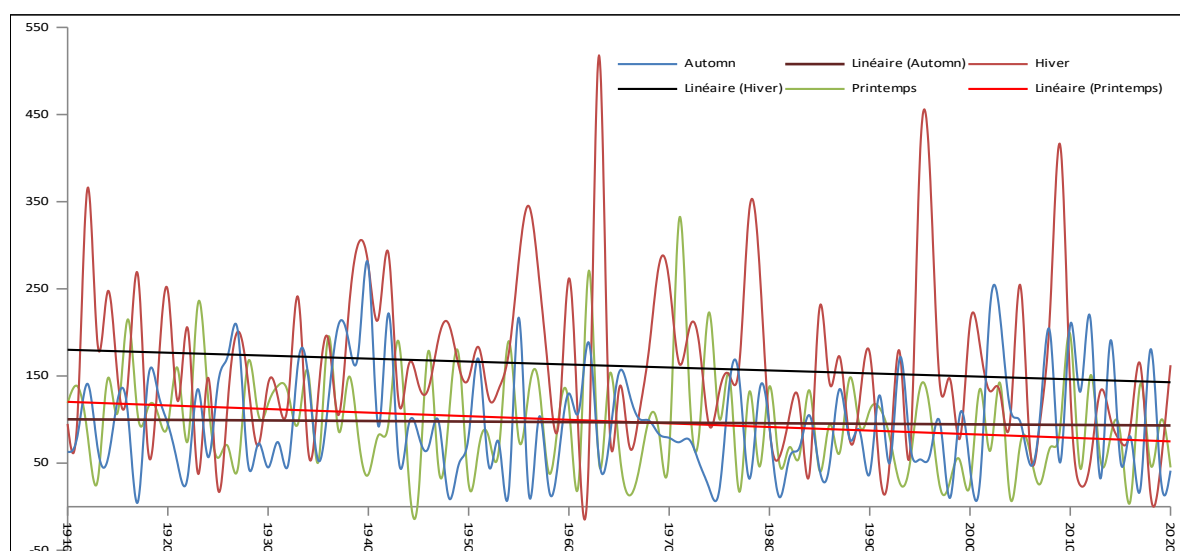


figure 3 : Évolution de la pluviométrie saisonnière à la province de Settât 1910/2020

## 2.2. Etude des ruptures et de la sécheresse

La caractérisation des fluctuations du régime pluviométrique repose sur l'analyse statistique, notamment la détermination des ruptures au sein de la série chronologique des pluies, sur des périodes, les plus longues possibles (Servat et al., 1999).



L'application de la méthode non paramétrique de Pettitt 1979, et celle bayésienne de Lee et Heghinian 1977, nous a permis d'identifier une rupture au sein de la série aux alentours de 1979 (Tableau 2). Cette rupture correspond aussi à la date du début du déficit pluviométrique au Maroc. Ce dernier s'intègre à la fluctuation du régime pluviométrique observée au cours des années 1970 et au début des années 1980 en Afrique du nord (Meddi et al., 2009 ; Hnia, 2010, Sebbar et al., 2011). D'autre part, nos résultats des tendances pluviométriques concordent avec la baisse des précipitations à partir de 1975 sur la bande composant la rive sud méditerranéenne (Meddi et al., 2009)

Par la suite nous avons calculé le taux de réduction pluviométrique annuelle par la formule suivante : Où :  $T_r$  : Taux de réduction pluviométrique.  $M_1$ : Moyenne annuelle pluviométrique avant la rupture (1979).  $M_2$ : Moyenne annuelle pluviométrique après la rupture (1979).

$$T_r = \left[ \frac{M_1 - M_2}{M_1} \right] * 100$$

**Tableau 2** : Date de rupture à la station de Settat

Station	Date de rupture Test de Pettitt	Date de rupture Test de Lee Heghinian	Taux de réduction (%)
Settat	1979	1979	19

Ces résultats vont dans le même sens que les conclusions du Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat de 2021 (GIEC, 2021) et les prévisions de Coste et al., 2021. Par ailleurs, à l'échelle de la rive sud méditerranéenne, les recherches effectuées par Meddi et al., (2009) en Algérie, et par Bouzaiane et Laforgue (1986) en Tunisie, signalent la presque la même date de rupture (1975) et montrent l'extension spatiale de la sécheresse accompagnée d'une nette réduction pluviométrique moyenne de l'ordre de 20 %. A l'échelle nationale, Singla et al., (2010) et Khomsi et al., (2011), décrivent également au Maroc une rupture climatique qui débute vers 1976 dans certaines régions, et qui s'étend largement vers 1979-1980 à la presque totalité du territoire.

### 2.3. Etude de la sécheresse

L'objectif de notre travail est de caractériser la sécheresse climatique sur le plan de la province de Settat pour la période 1910/2020 à travers le calcul de l'Indice pluviométrique standardisé (IPS) à l'échelle annuelle. Les résultats nous montrent à travers la figure 4, d'une part, l'identification d'une tendance importante à la baisse de l'IPS et d'autre part, selon les moyennes mobiles et centrées sur 7 ans, nous avons décelé des phases humides et sèches. Ainsi, une phase humide au cours des années 1930, une phase normale au cours des années 1950, 1960, 1970. A partir de l'année 1979 date de rupture, début d'une phase sèche qui perdure jusqu'à nos jours. En effet, la persistance de la sécheresse au cours des années 1980, 1990 et 2000 a réduit considérablement les ressources en eau. De plus, la tendance de la moyenne mobile signale une phase sèche vers la fin de la décennie 2010. Cette situation nécessite une bonne gestion des ressources en eau superficielles et souterraines.

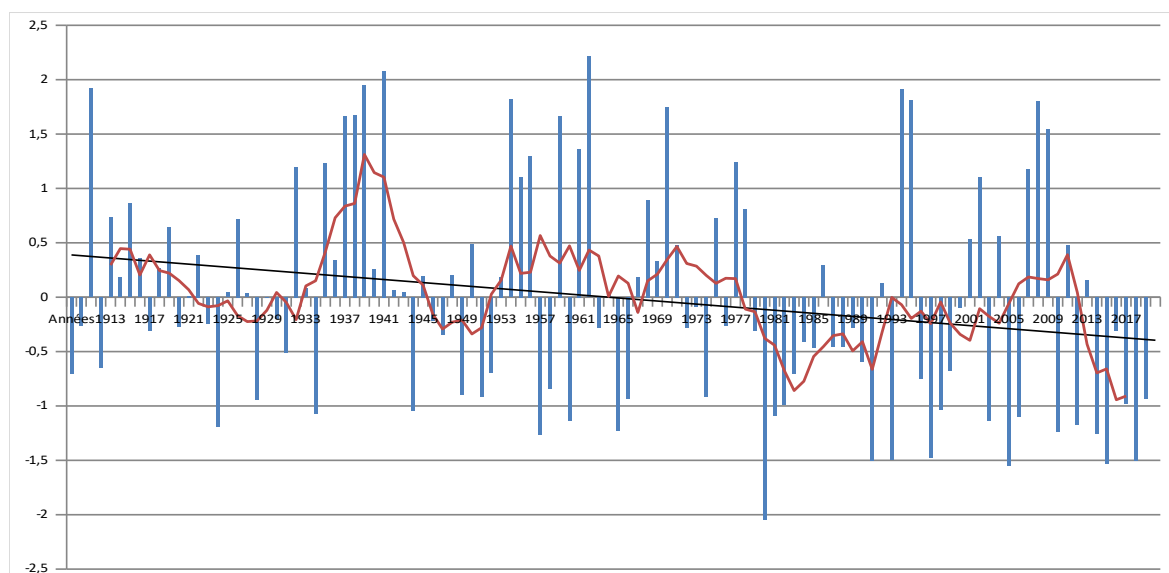


figure 4 : Évolution de l'IPS et de la moyenne mobile (7ans) 1910/2020

## Conclusion

L'analyse des résultats obtenus concordent avec les conclusions de (ELHoussaoui et al., 2007) en Algérie. Ils montrent que la province de Settat subit des fluctuations climatiques sévères. D'une part, par la variabilité et la réduction de la pluviométrie de l'ordre de 19% qui impactent les rendements céréaliers, d'autre part, par la persistance des années sèches qui pèsent lourdement sur les aspects économiques, sociaux et environnementaux. D'où la nécessité d'une stratégie nationale qui implique tous les acteurs du domaine des ressources en eau.

## Bibliographie

Aghrab A., 2003 : Etude de la sécheresse au Maroc, Le manuscrit, 109p.

Amraoui L., 2011 : Évolution climatique récente en Afrique du Nord-Ouest (Maroc, Mauritanie et leur proche océan entre 1950 et 2008, Thèse de l'Université Jean Moulin - Lyon III.

Belaassal A., 1998 : Précipitations au Maroc et circulation atmosphérique au niveau 700 hPa, Méditerranée, **88**, 19-26.

Bouzaiane, S., Lafforgue, A., CAMUS, H., & BENZARTI, Z. (1986). Monographie hydrologique des oueds Zeroud et Merguellil. Tunis (Tunisie), Paris (France): ministère de l'Agriculture– ORSTOM.

Coste JF, Coursimault A, Brissaud F, Bongrand J., & Chauvin D. 2021: Les prévisions du GIEC. Changement climatique EDP Sciences, 21-24.

Daget P., 1977 : Le bioclimat méditerranéen : Caractères généraux, modes de caractérisation, Végétation, **34**, 1-20.

Debrach J., Ousset J., Michel M., 1956 : Précipitation atmosphérique au Maroc (1925-1949) ; fréquence et intensité des précipitations, Annales du serv, De phys, Du globe et de météor, Rabat, 77-108.

ELHoussaoui A., Khaldi A. 2007 : Évolution des conditions climatiques et la sécheresse dans le bassin versant de l'oued Mékerra (Algérie). In 1st Atlas Georesources international Congress, **20**.

GIEC, 2007: Impacts adaptation and vulnerability, Summary for policymakers, Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change.

Henia L., 2008 : Atlas de l'eau en Tunisie, Publications de l'Université de Tunis1, 186 p.

Kendall SM., Stuart A., 1943: The Advanced theory of statistics, Charles Griffin Londres, **3**, 585 p.

Khoms K., Mahé G., Sinan M., & Snoussi M. 2013: Hydro-climatic variability in two Moroccan basins: Comparative analysis of temperature, rainfall and runoff regimes. Climate and Land Surface Changes in Hydrology, Proceedings of the H, **1**, 193-190.

Meddi H., Meddi M., 2009 : Variabilité des précipitations annuelles du Nord-Ouest de l'Algérie, Sécheresse, **20(1)**, 57-65.

Pettitt AN., 1979: A non-parametric approach to the change-point problem, Applied Statistics, **28(2)**, 126-135.

Sebbar A., Fougrach H., Hsain M. et Badri W., 2012 : Etude des variations climatiques de la région Centre du Maroc, Actes du colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Grenoble, 709-714.

Sebbar A., Fougrach H., Hsain M., Saloui A., Badri W., 2011 : Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935 – 2004), Sécheresse, **22**, 139-148.

Servat E., Paturel JE., Lubès 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, Rev sci eau, **12(2)**, 363-387.

Singla S., Mahe G., Dieulin C., Driouech F., Milano M., El Guelai FZ. & Ardoin-Bardin S., 2010 : Evolution des relations pluie-débit sur des bassins versants du Maroc, IAHS-AISH publication, **340**, 679-687.

## ÉTUDE DES VARIATIONS CLIMATIQUES AU SUD DU MAROC ET DES DÉBITS DE PROJET, CAS DU "BASSIN D'OUED OUM LAACHAR"

**Abdelali SEBBAR<sup>1</sup>, Youssef DARARI<sup>1</sup>, Mostafa BADILOU<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Direction de la Météorologie Nationale (DMN), BP 8106-Casa Oasis; Bd Mohamed Taïb Naciri Hay Hassani, Casablanca, Maroc. [sebbar202@gmail.com](mailto:sebbar202@gmail.com)

**Résumé :** Lors des trois dernières décennies, les inondations qui ont touché l'Afrique du Nord, ont été marquées par des intensités et des extensions très remarquées. Dans ce cadre, nous nous proposons, d'étudier la variabilité climatique de la région sud du Maroc et de prédéterminer les débits maximums dans le bassin d'oued Oum Laachar à la ville de Guelmim, qui a vécu des inondations catastrophiques en 2014. Ainsi, d'une part, nous allons identifier les différentes configurations climatiques de la zone étudiée sur la période 1980-2014 et d'autre part, une analyse quantitative et tendancielle des régimes pluviométrique et thermique, sera effectuée. Enfin, pour prédéterminer les débits de projet du bassin d'oued Oum Laachar, nous allons appliquer la méthode rationnelle.

**Mots clés :** Sud Maroc ; climat ; débit ; inondation.

**Abstract:** Study of climatic variations in southern Morocco and flow associated with the project, case of the "Oum Laachar river basin". During the last three decades, the floods that have affected North Africa have been marked by intensities and very noticeable extensions. In this context, we propose to study the climatic variability of the southern region of Morocco and to predetermine the maximum flows in the Oum Laachar river basin in the city of Guelmim, which experienced catastrophic floods in 2014. Thus, on the one hand, we will identify the different climatic configurations of the area studied over the period 1980-2014 and on the other hand, a quantitative and trend analysis of the rainfall and thermal regimes will be carried out. Finally, to predetermine the maximum flows of the Oum Laachar river basin, we will apply the rational method.

**Key words:** South Morocco; climate; discharge; flood

### Introduction

Les études portant sur la caractérisation du climat sont nécessaires pour évaluer les contraintes liées aux différents types de climats au regard des disponibilités en eau et de ses conséquences sur l'agriculture et le développement en général (Sebbar et al., 2012). Dans ce cadre, on se propose de caractériser dans la première partie de cette étude le climat de la partie méridionale du Maroc sur la période 1980-2014 à travers l'étude des paramètres précipitations et température, facteurs principaux qui influencent le climat. On étudie également la variabilité annuelle des précipitations et on essaye aussi de déceler des tendances au niveau des stations étudiées. En deuxième partie, on aborde un cas pratique avec la ville de Guelmim qui a subi les conséquences d'un événement météorologique extrême, les inondations du mois de Novembre 2014. L'étude consistera en la prédétermination des débits de projets dans le Bassin de l'Oued Oum El Achar grâce à la méthode rationnelle

### 1. Zone d'étude et base de données

#### 1.1. Zone d'étude

On s'intéresse dans cette étude à la partie sud du Maroc située, entre les parallèles 20° et 31° nord et limitée par les reliefs de l'Atlas au nord, l'océan Atlantique à l'ouest, la Mauritanie au sud et l'Algérie à l'est. Cette région se caractérise par un régime pluviométrique très variable, qui décroît

du nord au sud, (300 à 15 mm) (Sebbar et *al.*, 2011). La moyenne annuelle de la température varie entre 17 °C le long des côtes et 25 °C ailleurs. Toutefois il convient de signaler que les températures maximales quotidiennes dépassent les 40 °C. L'altitude varie environ de 0 à 4000 m (figure 1).

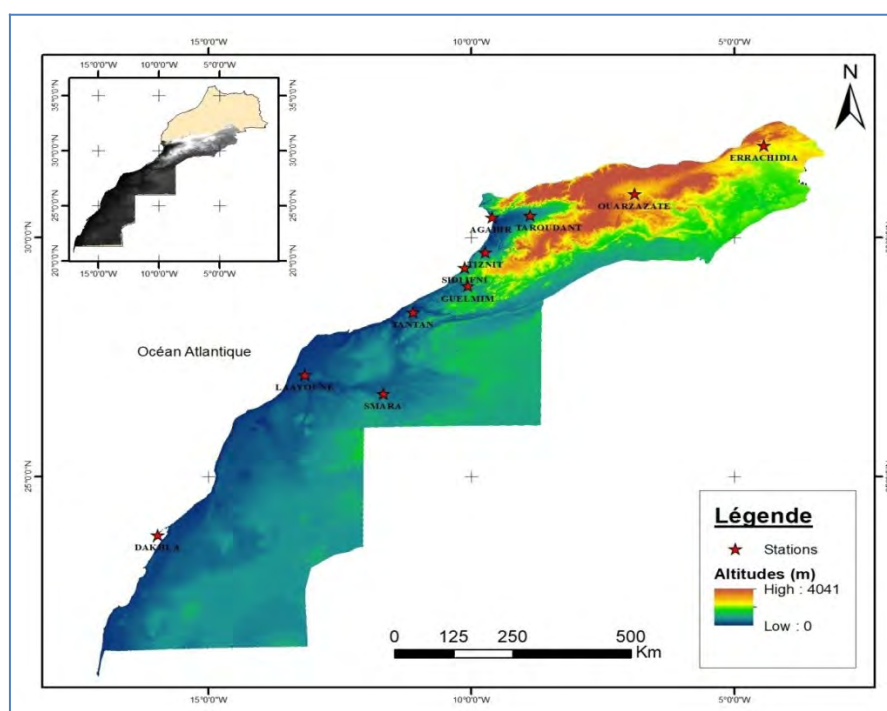


figure 1 : Localisation de la zone d'étude

## 1.2. Base de données

Les données utilisées (tableau 1) dans notre étude proviennent de la Direction de Météorologie Nationale, elles se composent des cumuls pluviométriques journaliers et des températures maximales et minimales journalières de 11 stations météorologiques représentées sur la figure 1. Le pourcentage des données manquantes varie entre 0 et 0,6 %. Elles ont été comblées par la méthode de (Laborde et Mahaous, 1998). L'homogénéité des séries a été vérifiée à l'aide de logiciel Anclim (Stépànek, 2005) par l'approche relative à la méthode d'Alexandersson.

**Tableau 1:** Caractéristiques des stations étudiées (Cv : coefficient de variation)

Station	Latitude	Longitude	Altitude	Période	Moyenne annuelle Des pluies en (mm)	Cv (%)
LAAYOUNE	27°10' N	13°13' O	63,0 m	1976 - 2014	56,0	59,9
SIDI IFNI	29°22' N	10°11' O	50,0 m	1975 - 2014	149,4	50,0
DAKHLA	23°43' N	15°56' O	12,0 m	1980 - 2014	28,6	94,2
ERRACHIDIA	31°56' N	04°24' O	1037,2 m	1973 - 2014	126,3	47,5
AGADIR	30°23' N	09°34' O	18,0 m	1960 - 2014	260,3	52,9
TAROUDANT	30°30' N	08°49' O	264,0 m	1992 - 2014	247,9	56,2
OUARZAZATE	30°56' N	06°54' O	1136,0 m	1960 - 2014	121,3	45,4
TIZNIT	29°41' N	09°44' O	260,0 m	1989 - 2014	167,9	56,0
GUELMIM	29°01' N	10°03' O	300,0 m	1992 - 2014	125,6	57,9
TANTAN	28°26' N	11°09' O	199,0 m	1975 - 2014	107,0	49,8
SMARA	26°44' N	11°41' O	110,0 m	2004 - 2014	40,9	63,7

## 2. Le zonage climatique

L'objectif d'un zonage climatique est d'obtenir un découpage d'une région en zones à l'intérieur desquelles le comportement climatique est similaire vis-à-vis des paramètres étudiés. Ainsi, nous avons employé deux méthodes : La Classification Hiérarchique Ascendante (CHA) et l'Analyse en Composantes Principales (ACP). Le tableau de données contient 10 lignes et 26 colonnes, la colonne 1 étant réservée pour le nom de la station, les 25 colonnes qui suivent correspondent aux valeurs des variables quantitatives suivantes :

Latitude, Longitude et Altitude; nombre moyen annuel de jours de pluie; cumul annuel des précipitations ; les moyennes des cumuls mensuelles des précipitations ; les moyennes des cumuls saisonniers ; les moyennes annuelles des températures maximale et minimale ; la température maximale du mois le plus chaud (M) et la température minimale du mois le plus froid (m)

Pour l'application de la CHA nous avons choisi la distance euclidienne comme type de dissimilarité, et la méthode de Ward comme critère d'agglomération. De manière objective, la meilleure classification correspond à la première coupe, elle donne trois classes puisqu'elle maximise la distance entre les classes (figure 2a). Mais la meilleure classification est celle correspondante à la deuxième coupe qui donne lieu à 4 classes. En parallèle, nous avons utilisé une ACP rotative de type VARIMAX qui permet d'obtenir une structure plus facile à analyser.

D'après le critère de Cattell, il faut retenir deux composantes principales. Le premier axe factoriel F1 exprime 46.6 % d'information, le deuxième axe F2 exprime 34.4 %, soit au total, 81 % d'information. L'examen du cercle de corrélation (figure 2b) montre que l'axe D1 peut être interprété comme étant l'axe de la période humide de l'année. En effet les saisons d'hiver, d'automne et de printemps et les mois de février, novembre, décembre, janvier, mars et avril sont fortement corrélées avec cet axe (corrélations supérieures à 0,8).

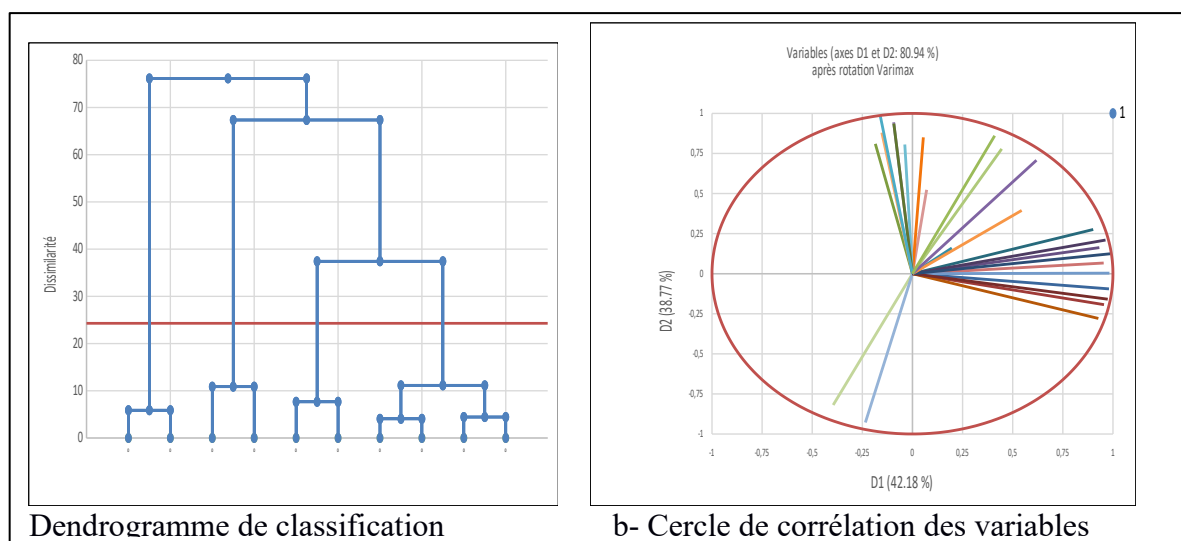


figure 2 : Résultats de CHA et ACP Varimax

Quant à l'axe D2, les variables M (température du mois le plus chaud),  $T_{\max}$  longitude, Altitude et cumuls pluviométriques de la période chaude sont fortement corrélées avec cet axe alors que les variables m (température du mois le plus froid) et  $T_{\min}$  (température maximale moyenne) sont fortement anti-corrélées avec ce même axe, donc cet axe peut être interprété comme étant l'axe représentatif de la température. Le même raisonnement peut être suivi avec l'axe D2 dans lequel les stations d'Errachidia et Ouarzazate se montrent fortement corrélées car ces stations enregistrent les records de température maximale ainsi que minimale ( $M > 38^{\circ}\text{C}$  et  $m < 2^{\circ}\text{C}$ ). Ceci est dû à



l'éloignement par rapport à la mer. L'océan Atlantique joue en effet un rôle très important dans la régulation de la température. Ce raisonnement rejoint l'interprétation déjà donnée à l'axe D2. Le tableau 2, résume les 4 classes auxquelles on a abouti à l'aide du zonage à travers l'ACP et la CHA.

**Tableau 2:** Classes retenues et étalons

Numéro de la	Stations de la classe	Région représentée par la classe
1	Taroudant et Agadir-Inzegane	Souss
2	Tan-Tan, Guelmim, Tiznit et Sidi-Ifni	Piedmont de l'Anti atlas
3	Dakhla et Laâyoune	Région côtière sud
4	Ouarzazate et Errachidia	région pré-désertique

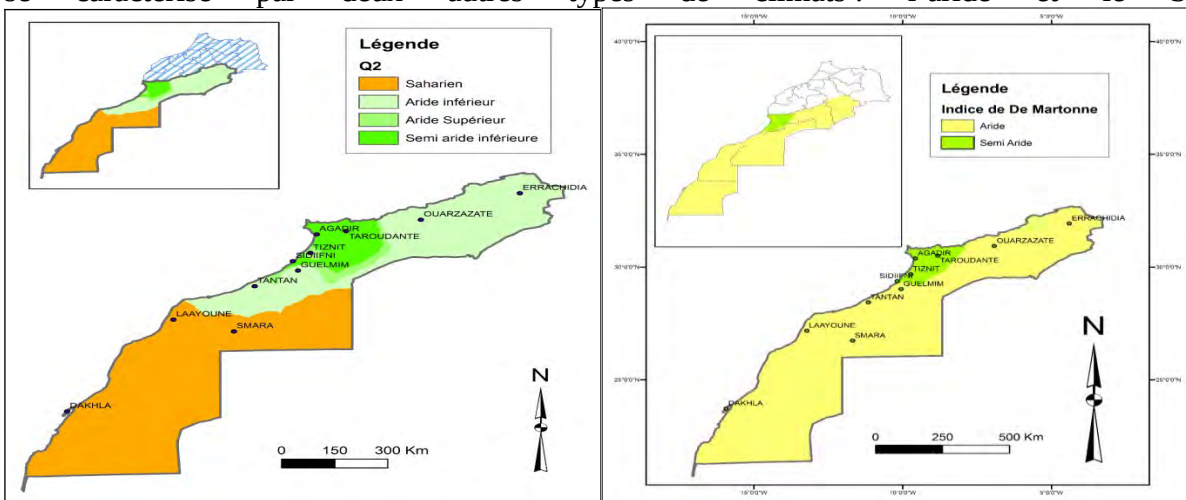
### 3. Caractérisation du climat de la zone d'étude

L'étude des types de climat caractéristique d'une région se fait sur la base du calcul des indices climatiques (ou bioclimatiques). Pour des raisons liées à nos latitudes, nous avons procédé au calcul de deux indices climatiques à savoir l'indice d'Emberger ( $Q_2$ ) et celui de De Martonne ( $I_d$ ). Le premier se base sur les pluies annuelles ( $P$ ) et les températures du mois le plus chaud ( $M$ ) et celle du

mois le plus froid ( $m$ ), avec  $Q_2 = \frac{P}{\frac{M - m}{2} * (M + m)}$  tandis que le deuxième se base sur les pluies

annuelles ( $P$ ) et la température moyenne annuelle ( $T$ ) avec  $I_d = \frac{P}{T + 10}$ .

La figure 3, nous permet d'identifier trois types de climats, qui varient du nord vers le sud ou l'est. Ainsi, la partie nord-ouest de la zone bénéficie d'un climat semi-aride, tandis que la partie sud se caractérise par deux autres types de climats : l'aride et le Saharien.



**figure 3 :** Cartes de la répartition des climats selon l'indice d'Emberger et celui de DE Martonne

### 4. Etude des tendances

Pour étudier la significativité des tendances annuelles des précipitations, des températures maximales et minimales annuelles, nous avons employé le test non paramétrique de Mann-Kendall au seuil de 95%.

Le tableau 3, regroupe les résultats obtenus. Il ressort que la majorité de ces stations signalent une tendance à la hausse des pluies annuelles et des températures  $T_{max}$  et  $T_{min}$ . Ainsi, les tendances des séries des températures maximales et minimales montrent que la plupart des stations ont connu une hausse significative sur la période 1980-2014. Toutefois, il faut signaler que la station de Dakhla fait exception en enregistrant des tendances non significatives de baisse de  $T_{max}$ . Quant aux

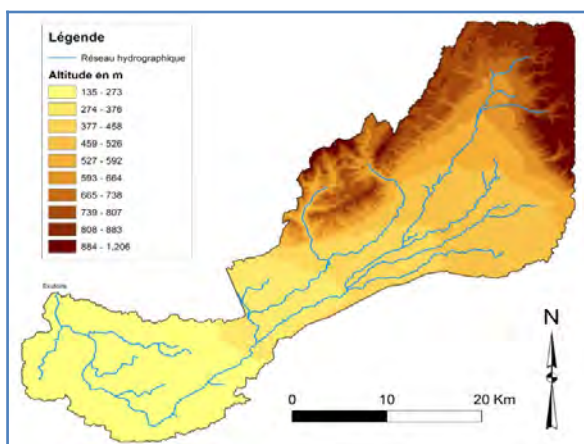
précipitations, pour la majorité des stations leurs tendances ont montré une situation de hausse des précipitations non significatives à l'exception des stations de Guelmim et Errachidia qui enregistrent, une tendance à la hausse significative. Ces résultats vont dans le même sens que ceux publiés par Nouaceur et *al.* (2012) en Mauritanie située au sud du Maroc.

**Tableau 3 : Résultats du test Mann Kendall**  
 (-) : tendance à la baisse ; (+) : tendance à la hausse N.S : Non Significative

Station	Pente pluies	P <sub>value</sub> pluies	Significativité	Pente T <sub>max</sub>	P <sub>value</sub> T <sub>max</sub>	Significativité	Pente T <sub>min</sub>	P <sub>value</sub> T <sub>min</sub>	Significativité
Agadir-Inzegane	+0,92	0,92	N.S	+0,05	0,01	significative	+0,07	0,01	significative
Dakhla	+0,27	0,27	N.S	-0,02	0,19	N.S	-0,02	0,49	N.S
Guelmim	+1,90	0,04	Significative	+ 0,05	0,07	N.S	+0,05	0,04	significative
Laâyoune	-0,50	0,30	N.S	+0,04	0,01	significative	+0,04	0,01	significative
Ouarzazate	+0,44	0,56	N.S	+0,05	0,01	significative	+0,02	0,03	significative
Errachidia	+2,10	0,08	N.S	+0,05	0,01	significative	+0,05	0,01	Significative
Sidi-Ifni	-0,10	0,95	N.S	+0,02	0,19	N.S	+0,03	0,02	Significative
Tan-Tan	+0,20	0,88	N.S	+0,04	0,01	significative	+0,01	0,39	N.S
Taroudante	+2,50	0,22	N.S	+0,05	0,05	significative	+0,04	0,02	significative
Tiznit	+2.20	0,16	N.S	+0,06	0,01	significative	+0,04	0,01	significative

### 5. Evaluation des débits de projets du bassin versant d'Oum El Achar à Guelmim

La plaine de Guelmim fait partie de l'Anti Atlas occidental. Elle se présente comme une cuvette limitée au nord par les plateaux de Lakhsass, et par les chaînons du massif d'Ifni, au sud par le Jbel Taïssa. Grace aux outils d'analyse hydrologique d'ARCGIS, on a pu délimiter le bassin de l'Oued Oum El Achar et générer le réseau hydrographique du bassin, ainsi que ces caractéristiques géomantiques (figure 4 et tableau 4).



Paramètre	Valeur
Périmètre : P	267.45 Km
Superficie : A <sub>tot</sub>	911.56 Km <sup>2</sup>
Altitude minimale : h <sub>min</sub>	135 m
Altitude maximale : h <sub>max</sub>	1206 m
Altitude médiane : h <sub>med</sub>	471.9 m
Altitude moyenne : h <sub>moy</sub>	585.6 m
Longueur du cours d'eau	88.4 Km
Longueur de tous les cours	263.7 Km
Pente moyenne du bassin versant	.%

figure 4 et tableau 4 : Caractéristiques géométriques du bassin de l'Oued Oum El Achar

#### 5.1 Prédétermination de la crue du projet

Dans un projet de barrage, la crue désigne l'élévation du niveau des eaux contre laquelle on veut se prémunir. Sa détermination est basée sur la détermination de la fréquence d'occurrence de la plus grande crue décennale, centennale voire millénaire selon l'importance du projet. Il est donc nécessaire de déterminer le débit de la crue dont on a choisi la période de retour. Pour notre cas nous avons utilisé la méthode rationnelle pour l'estimation des débits qui est une méthode hydrométéorologiques (Oesbordes, 1974 ).

$$Q_{max} = \frac{C_r \times I(t_c, T) \times S}{3.6}$$
 où :  $C_r$  est le coefficient d'écoulement moyen, qui représente le rapport entre la hauteur d'eau ruisselée à la sortie d'une surface considérée (dite "pluie nette") et la hauteur d'eau précipitée,  $t_c$  est le temps de concentration du bassin,  $I(t_c, T)$  en mm/h représente

l'intensité de la pluie moyenne maximale au cours de  $t_c$  et de période de retour  $T$ ,  $S$  est la superficie du bassin en  $\text{Km}^2$ ,  $Q_{max}$  est calculé en  $\text{m}^3/\text{s}$ . La seule inconnue est  $P(T, 24h)$  qui est la pluie maximale journalière correspondante à  $T$ , si on le détermine on peut calculer l'intensité et déduire le débit. De même pour l'ajustement de l'échantillon on a eu recours au logiciel Hyfran par la loi de Gumbell, puisque le but de ce paragraphe comme on vient de le signaler est la détermination d'une loi de probabilité qui s'adapte aux données de pluies maximales dont on dispose. Ces données sont supposées Indépendantes et Identiquement distribuées. L'axe des ordonnées représente les valeurs des observations alors que l'axe des abscisses représente les valeurs des fréquences empiriques associées aux observations.

L'application de la méthode rationnelle a généré les résultats du tableau 5. Il ressort que, la ville de Guelmim est sujette à des inondations lors des années à venir. Ainsi, une anticipation de la part des décideurs politiques est nécessaire.

**Tableau 5** : Valeurs de  $P(T, 24h)$ , des débits  $Q_{max}$

Période de retour $T$ en années	$u(T)$	$P(T, 24h)$ en mm	$Q_{max}$ en $\text{m}^3/\text{s}$
100	4.60	58.72	181.48
50	3.90	52.62	162.64
20	2.97	44.49	137.50
10	2.25	38.21	118.08
5	1.50	31.65	97.83
3	0.90	26.44	81.72
2	0.37	21.76	67.25

## Conclusion

La région sud du Maroc est caractérisée par un climat qui varie du saharien au semi-aride, une tendance à la hausse des températures significative, pas de tendance significatives des précipitations. Ces résultats concordent avec ceux du rapport du GIEC 2021 (Coste et *al.*, 2021). D'où la nécessité d'une étude plus approfondie pour adapter l'écosystème de cette zone vulnérable aux changements climatiques.

## Bibliographie

- Coste JF, Coursimault A, Brissaud F, Bongrand J., & Chauvin D. 2021 : Les prévisions du GIEC. Changement climatique EDP Sciences, 21-24.
- GIEC, 2007: Impacts adaptation and vulnerability, Summary for policymakers, Contribution of Working Group II to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on climate change.
- Kendall SM., Stuart A., 1943: The Advanced theory of statistics, Charles Griffin Londres, Volume 3, 585 p.
- Laborde J., Mouhous N., 1998 : Notice d'installation du logiciel HYDROLAB. Nice : Equipe de gestion et valorisation de l'environnement
- Nouaceur Z., Laignel B. & Dieppois B., 2012 : Évaluation des récents changements climatiques sur le littoral atlantique mauritanien. Actes du XXVe colloque de l'AIC, Grenoble, 583- 58
- Oesbordes M., 1974 : Réflexions sur les méthodes de calcul des réseaux urbains d'assainissement pluvial». Thèse de docteur-ingénieur, Université de Montpellier. 224 p
- Sebbar A., Fougrach H., Hsain M. et Badri W., 2012 : Etude des variations climatiques de la région Centre du Maroc, Actes du colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Grenoble, 709-714.
- Sebbar A., Fougrach H., Hsain M., Saloui A., Badri W., 2011 : Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935 – 2004), Sécheresse, Volume 22, 139-148.

## **SIMULATION DE DÉBITS ET D'ÉVÈNEMENTS DE CRUE À PARTIR D'INFORMATIONS ATMOSPHÉRIQUES DE GRANDE ÉCHELLE : EXEMPLE DU BASSIN VERSANT DU RHÔNE AMONT (ALPES EUROPÉENNES)**

**Caroline LEGRAND, Bruno WILHELM, Benoît HINGRAY**

*Université Grenoble Alpes, CNRS, IRD, G-INP, IGE, 38000 Grenoble, France  
caroline.legrand@univ-grenoble-alpes.fr*

**Résumé :** Dans cette étude, nous évaluons la capacité de deux chaînes de modélisation à reproduire les variations de l'activité de crue du Rhône amont (10900 km<sup>2</sup> ; Alpes Européennes) sur le dernier siècle (1902-2009). Les chaînes de modélisation sont composées de (i) la réanalyse atmosphérique ERA-20C, (ii) soit du modèle de descente d'échelle statistique SCAMP, soit du modèle de descente d'échelle dynamique MAR, et (iii) du modèle glacio-hydrologique GSM-SOCONT. Les températures et les précipitations de bassin ainsi que les variations de l'activité de crue simulées et observées sont comparées. Les meilleurs résultats sont obtenus à partir du modèle de descente d'échelle statistique SCAMP en raison de biais importants présents dans les simulations MAR. Nous envisageons de réaliser une correction de type quantile-quantile de ces biais.

**Mots-Clés :** activité de crue ; modélisation hydro-météorologique ; descente d'échelle dynamique ; descente d'échelle statistique

**Abstract:** In this study, we evaluate the capacity of two simulation chains to reproduce changes in flood activity of the upper Rhône River (10900 km<sup>2</sup>, European Alps) over the last century (1902-2009). The modeling chains are made up of (i) the atmospheric reanalysis ERA-20C, (ii) either the statistical downscaling model SCAMP, or the dynamical downscaling model MAR, and (iii) the glacio-hydrological model GSM-SOCONT. The mean areal precipitation and temperature, as well as the simulated and observed flood activity are compared. The best results are obtained from the statistical downscaling model SCAMP due to large biases in MAR simulations. We intend to proceed with a quantile-quantile bias correction.

**Keywords:** flood activity; hydro-meteorological modeling; dynamical downscaling; statistical downscaling

### **Introduction**

Les crues font partie des catastrophes naturelles les plus destructrices en termes de pertes humaines, matérielles et économiques. Ce risque pourrait s'amplifier avec le changement climatique en cours, qui modifiera probablement l'intensité et la fréquence des crues. Estimer comment l'activité de crue (périodes riches et pauvres en crue) changera dans le futur n'est cependant pas aisé. L'approche classiquement utilisée consiste à estimer les variations de l'activité de crue à partir de simulations hydrologiques forcées par des scénarios météorologiques pour différents scénarios climatiques futurs. Le développement de scénarios météorologiques pertinents est par conséquent déterminant. Comme les modèles climatiques possèdent une résolution grossière et supérieure aux échelles pour lesquelles les processus hydrologiques ont lieu, des modèles de descente d'échelle, soit dynamiques, soit statistiques, sont également utilisés.

Dans cette étude, nous avons pour but d'évaluer la capacité de deux chaînes de modélisation à reproduire les variations de l'activité de crue du Rhône amont (10900 km<sup>2</sup> ; Alpes Européenne) sur le dernier siècle (1902-2009). Les chaînes de modélisation sont composées de (i) la réanalyse atmosphérique ERA-20C (Poli et al., 2016), (ii) soit du modèle de descente d'échelle statistique SCAMP (Sequential Constructive Atmospheric Analogues for Multivariate weather Predictions; Raynaud et al., 2020), soit du modèle de descente d'échelle dynamique MAR (Modèle Atmosphérique Régional ; Ménégoz et al., 2020), et (iii) du modèle glacio-hydrologique GSM-SOCONT (Glacier and Snowmelt SOil CONTRibution model; Schaeffli et al., 2005).

## 1. Zone d'étude

La zone d'étude retenue est le bassin versant du Rhône amont (10900 km<sup>2</sup> ; Fig. 1) en raison de la constante augmentation de l'exposition des biens et des personnes aux risques hydrologiques en lien avec la croissance démographique et l'attractivité touristique. Ce bassin couvre une partie des Alpes françaises et suisses et le climat y est principalement de type continental. A basses altitudes, les précipitations moyennes annuelles s'étendent de 600 mm dans le canton du Valais, en Suisse, à 1100 mm à Chamonix en France. A l'exutoire du bassin versant, la station hydrométrique de Bognes enregistre les débits moyens journaliers. Cette station se situe à Injoux-Génissiat, en France, à 46 km à l'aval de la confluence entre le Rhône et l'Arve et à 6 km à l'aval de la confluence entre le Rhône et la Valsérine. Le régime hydrologique du Rhône à Bognes est de type nivo-glaciaire avec des débits mensuels moyens minimum et maximum ayant lieu respectivement en Décembre (environ 270 m<sup>3</sup>/s) et Juillet (environ 530 m<sup>3</sup>/s) pour un débit moyen annuel d'environ 358 m<sup>3</sup>/s.

A partir des années 1950-1960, une grande partie du Rhône a été aménagée, notamment dans le canton du Valais, en Suisse, pour la production hydro-électrique, la satisfaction des besoins en eau pour l'agriculture et la protection contre les inondations. Le régime hydrologique du Rhône amont a ainsi été modifié par la construction, à cette époque, des barrages de Mattmark, Grande-Dixence, Mauvoisin et Emosson, pour ne citer que les plus importants, qui stockent une partie des apports intervenant au printemps et en été lors de la fonte des neiges et des glaciers. Le niveau du Léman est aussi régulé depuis 1884 pour protéger les riverains contre les inondations.

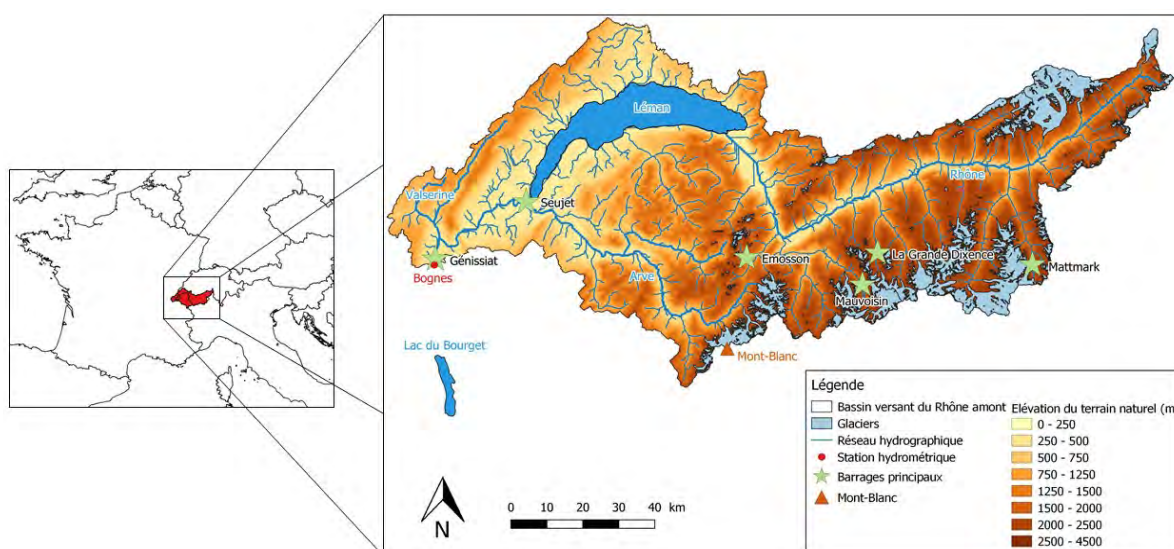


figure 1 : Zone d'étude

## 2. Stratégie de calage du modèle hydrologique

La simulation des débits est réalisée à partir du modèle glacio-hydrologique GSM-SOCONT (Glacier and Snowmelt SOil CONTriBution model; Schaefli et al., 2005), un modèle spécialement conçu pour la simulation hydrologique en zone de montagne. Il s'agit d'un modèle conceptuel à réservoirs et semi-distribué. Le bassin versant est divisé en 18 sous-bassins, chaque sous-bassin est divisé en partie glaciaire et en partie non-glaciaire et chacune de ces entités est subdivisée en bandes d'altitudes de 500 m de hauteur. Les mêmes paramètres s'appliquent à toutes les bandes d'altitudes d'un même sous-bassin. Les paramètres peuvent varier d'un sous-bassin à un autre. Le modèle hydrologique permet de simuler la fraction des précipitations qui tombe sous forme liquide et solide, la dynamique d'accumulation et de fonte du manteau neigeux, les processus d'évapotranspiration, d'infiltration des précipitations ou de la fonte, les processus de transfert des ruissellements, le stockage et le déstockage des précipitations infiltrées dans les nappes, ainsi que la propagation des débits dans le réseau hydrographique. Pour les parties englacées des bassins versants, il permet aussi de simuler les débits de fonte en provenance des glaciers. Les principaux forçages météorologiques utilisés pour une simulation sont, pour chaque unité de discrétisation de chaque bassin versant, les précipitations journalières et les températures moyennes journalières.

L'anthropisation du bassin versant à partir des années 1950-1960 rend difficile le calage des paramètres du modèle hydrologique puisque nous ne disposons, comme observations, que de données météorologiques et hydrométriques sur une période où le régime hydrologique est significativement perturbé par les grands barrages hydro-électriques. Nous proposons une modélisation du fonctionnement « naturel » du bassin versant sur le dernier siècle à partir d'un calage climatologique visant à reproduire certaines signatures hydrologiques des bassins modélisés (Hingray et al., 2010 ; Horner, 2020). Ces signatures sont le régime journalier interannuel et la distribution annuelle des débits maximum journaliers classés puisque nous nous intéressons aux événements de crue. Nous faisons ainsi l'hypothèse que le comportement hydrologique « naturel » des sous-bassins a peu changé au cours du dernier siècle.

Du fait de ses dimensions et indépendamment de sa régulation actuelle, le Léman a une influence significative sur le bilan hydrologique et sur la dynamique des débits du Rhône. Même en l'absence de régulation, le lac a pour effet de laminier les apports et les crues en provenance du bassin supérieur du Rhône. L'impact du Léman sur l'hydrologie du Rhône s'est accru avec la mise en place de sa régulation. Notamment, le règlement sur la manœuvre de l'ouvrage de régularisation du niveau du Léman à Genève du 17 Septembre 1997 fixe i) le niveau du lac à viser pour chaque jour d'une année civile donnée (ce niveau varie donc au cours de l'année), ii) la valeur minimum du débit à assurer en tout temps à l'aval (débit réservé) et iii) la valeur maximum du débit à ne pas dépasser sauf durant des périodes de hautes eaux du lac. Les débits en sortie du Léman sont également déterminés par les débits à turbiner par la centrale hydroélectrique située en sortie du Léman, ces débits étant eux-mêmes déterminés par la demande électrique régionale.

La chronologie passée de la demande électrique et, par suite, celle des débits à turbiner n'étant pas disponibles, il n'est pas possible de proposer une modélisation fine de la régulation du Léman. Seuls le fonctionnement hydrologique classique du Léman résultant de son fonctionnement « naturel » (laminage des apports associés aux phénomènes de stockage et de déstockage d'un réservoir hydraulique non régulé) et les contraintes liées au règlement cité ci-dessus ont été prises en considération pour simuler les débits en sortie du Léman. Cette modélisation n'a évidemment pas pour ambition de permettre la simulation des débits observés sur les décennies passées à l'aval du Léman. A ce titre, la comparaison des observations et des simulations à l'aval du Léman ne peut être considérée que pour information. Nous considérons cependant que la modélisation proposée pourra permettre de simuler le comportement hydrologique « naturel » du système pour des contextes climatiques différents du contexte actuel, ce qui est l'objectif à plus long terme de ce travail (simulation de l'hydrologie du bassin pour les climats du millénaire passé).

Dans ce contexte, le fonctionnement du Léman qui serait obtenu sans régulation est simplement simulé à l'aide du système classique de 3 équations nécessaires pour simuler le comportement des réservoirs non régulés : (i) l'équation de bilan, (ii) l'équation de stockage et (iii) l'équation de débit du réservoir (Hingray et al., 2009). L'équation de bilan relie les variations de stock au sein du réservoir aux apports (débits des bassins versants amont et latéraux) et aux pertes (évaporation, débit en sortie du Léman), l'équation de stockage relie le volume stocké à la hauteur d'eau dans le réservoir et l'équation de débit relie le débit de sortie à la hauteur dans le réservoir. Dans notre modélisation, le débit en sortie du Léman sans régulation est supposé proportionnel au volume stocké dans le réservoir (la constante de temps K du réservoir est le seul paramètre du modèle ; elle définit en première approximation le décalage entre les crues entrantes et les crues sortantes du Léman). Pour les simulations présentées plus loin, le modèle de comportement ci-dessus est suivi des règles de régulation définies dans le règlement mentionné précédemment.

### 3. Descente d'échelle dynamique

Nous utilisons le modèle de descente d'échelle dynamique MAR (Modèle Atmosphérique Régional ; Ménégot et al., 2020), ce modèle ayant déjà été testé et validé avec les sorties de la réanalyse ERA-20C comme conditions aux limites pour l'Europe (Wyard et al., 2017, 2018). Dans notre étude, MAR est forcé par les sorties de la réanalyse ERA-20C au pas de temps 6h, possède une résolution horizontale de 7 km, 24 niveaux pour l'atmosphère, 7 niveaux pour le sol et la couverture neigeuse est décrite par un nombre de couches variant de 1 à 20.



ERA-20C est une réanalyse atmosphérique couvrant la période 1900-2010 et ayant une résolution spatiale de 1,125° (environ 125 km). ERA-20C assimile des données de pression de surface et de vent à la surface de l'océan et est forcé par des données de température de surface de la mer, de couverture de glace de mer, de composition atmosphérique et de forçage solaire (Poli et al., 2016). La résolution grossière de ERA-20C ne permet pas une description correcte des variables atmosphériques en zone de montagne, ce qui justifie l'utilisation d'un modèle régional ayant une plus grande résolution et des paramétrisations physiques avancées.

#### 4. Descente d'échelle statistique

Indépendamment du modèle MAR, nous utilisons le modèle SCAMP (Sequential Constructive Atmospheric Analogues for Multivariate weather Predictions; Raynaud et al., 2020), un modèle de descente d'échelle statistique, afin de générer des scénarios météorologiques sur le dernier siècle à partir des sorties de la réanalyse ERA-20C. Le modèle SCAMP comprend :

(1) Un modèle analogue classique (Obled, 2002; Bontron, 2004; Mezghani and Hingray, 2009; Ben Daoud, 2010; Marty, 2012; Chardon, 2014; Raynaud, 2016) basé sur l'hypothèse que deux situations atmosphériques similaires donnent lieu à des situations météorologiques locales similaires (Lorenz, 1969). Nous reprenons les caractéristiques du calage (fenêtres d'analogie, prédicteurs, critères d'analogie) du modèle analogue optimisé par Raynaud et al. (2020) pour un bassin en Suisse, le bassin versant de l'Aar. Pour chaque jour de la période de simulation, 30 valeurs de pluie de bassin et de température moyenne de bassin observées et rééchantillonnées sont ainsi obtenues.

(2) Un module permettant de générer des pluies de bassin supérieures à celles observées afin d'améliorer la reproduction des cumuls sur 3 ou 5 jours. Pour chaque jour de la période de simulation, une loi Gamma (Chardon et al., 2018; Raynaud et al., 2020) est ajustée aux 30 valeurs de pluie de bassin issues des analogues et un nouvel échantillon de 30 valeurs de pluie de bassin est tiré aléatoirement.

(3) Un module de réarrangement temporel des dates analogues afin d'améliorer la consistance temporelle entre deux jours consécutifs et ainsi favoriser la succession de jours pluvieux. Ce module correspond à la méthode du Schaake Shuffle initialement introduit par Clark et al. (2004). 30 scénarios de dates analogues, de pluie de bassin et de température moyenne de bassin sont ainsi obtenus.

(4) Un module de désagrégation spatiale pour les précipitations (Chardon et al., 2018; Raynaud et al., 2020) permettant de passer de l'échelle du bassin versant aux stations pluviométriques tout en assurant une cohérence spatiale, la structure spatiale retenue étant celle d'un analogue.

(5) Un module de correction de température inspiré de la méthode ANATEM (ANALogues + TEMoin ; Kuentz et al., 2015) appliqué aux scénarios de température de bassin obtenus à l'issue du Schaake Shuffle. La température de la réanalyse ERA-20C corrigée par une méthode de débiaisage de type quantile-quantile est choisie comme chronique témoin.

#### 5. Critères d'évaluation des chaînes de modélisation

Afin d'évaluer la performance de chaque chaîne de modélisation, plusieurs variables hydro-météorologiques sont analysées.

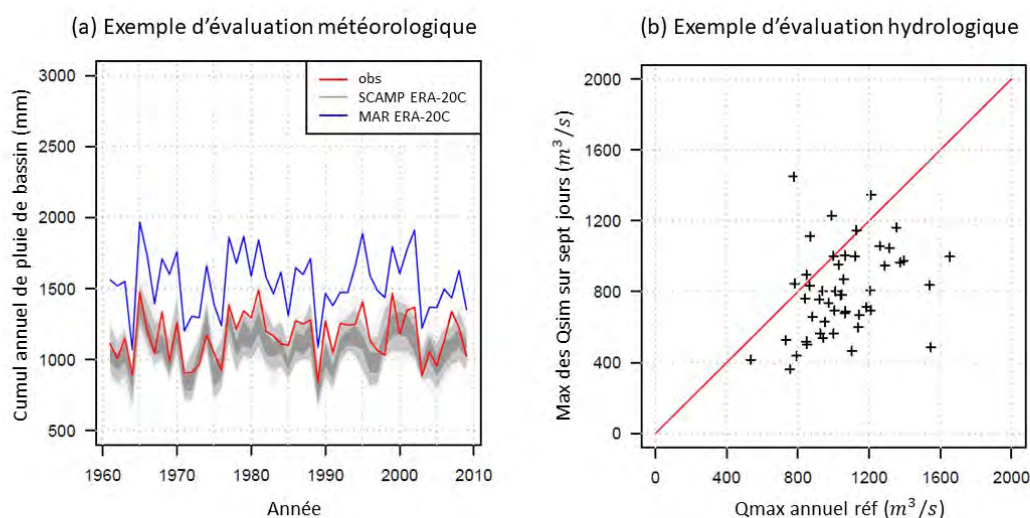
(1) Evaluation météorologique : les chroniques annuelles et les régimes mensuels interannuels des pluies et des températures moyennes de bassin simulés et observés sont comparés sur la période 1961-2009.

(2) Evaluation hydrologique : les débits simulés sont comparés (i) à des débits de référence (i.e. les débits simulés à partir de la météorologie observée) sur la période 1961-2009 puisque, pour cette période, les débits observés sont influencés par les grands barrages hydro-électriques et sont donc non utilisables pour notre évaluation, et ii) aux débits observés sur la période antérieure à 1950.

Plus précisément, l'évaluation hydrologique concerne (i) les débits maximum annuels en chronologie, i.e. si un débit maximum annuel est observé le jour J, le maximum des débits annuels simulés des jours J-3 à J+3 est sélectionné (tolérance de +/- 3 jours), et (ii) les variations de l'activité de crue, celles-ci étant obtenues à partir des chroniques de débit et de l'approche POT (Peak Over Threshold).

## 6. Premiers résultats et perspectives

Les premiers résultats montrent que la météorologie et les événements de crue sont mieux reproduits par la chaîne de modélisation comprenant le modèle de descente d'échelle statistique SCAMP. Cela est dû au fait que les simulations MAR présentent des biais importants : (i) une surestimation des pluies de bassin (Fig. 2a) et (ii) une sous-estimation des températures moyennes de bassin au printemps, conduisant à une sous-estimation des événements de crue en chronologie (Fig. 2b).



**figure 2 :** (a) Chroniques des cumuls annuels de pluie de bassin sur la période 1961-2009 observées (en rouge), simulées par MAR ERA-20C (en bleu) et simulées par SCAMP ERA-20C (en gris). Les différents niveaux de gris représentent les intervalles de confiance à 50%, 90% et 99% des 30 scénarios issus de SCAMP ERA-20C. (b) Nuage de points des débits maximum annuels de référence et simulés par MAR ERA-20C en chronologie sur la période 1961-2009.

La bonne reproduction des températures est cruciale pour notre bassin puisqu'elle affecte (i) la répartition des précipitations en pluie (si  $T > 2^{\circ}\text{C}$ ) ou en neige (si  $T < 0^{\circ}\text{C}$ ) et (ii) l'accumulation et la fonte saisonnière du manteau neigeux. Plus précisément, les fontes du glacier et du manteaux neigeux sont modélisées par des modèles de type degré-jour (si  $T > 0^{\circ}\text{C}$ ) dans le modèle hydrologique.

Les résultats obtenus sont en adéquation avec ceux trouvés dans la littérature, à savoir que les modèles de régionalisation présentent des biais importants dans les précipitations et les températures (Ayar et al., 2015; Troin et al., 2015; Tang et al., 2016). D'autres études comme celle de Boé et al. (2007) montrent également que la correction de ces biais peut considérablement améliorer la qualité des simulations hydrologiques. Nous envisageons donc de réaliser un débiaisage de type quantile-quantile des précipitations et des températures moyennes issues de MAR.

### Bibliographie

Ayar P. V., Vrac M., Bastin S., Carreau J., Déqué M., and Gallardo C., 2016: Intercomparison of statistical and dynamical downscaling models under the EURO- and MED-CORDEX initiative framework: Present climate evaluations. *Climate Dynamics*, **46**, 1301-1329.

Ben Daoud A., 2010 : *Améliorations et développements d'une méthode de prévision probabiliste des pluies par analogie : application à la prévision hydrologique sur les grands bassins pluviaux de la Saône et de la Seine*. Thèse de doctorat. Université de Grenoble.

Boé J., Terray L., Habets F., and Martin E., 2007: Statistical and dynamical downscaling of the Seine basin climate for hydro-meteorological studies. *International Journal of Climatology*, **27**, 1643-1655.

Bontron G., 2004 : *Prévision quantitative des précipitations : adaptation probabiliste par recherche d'analogues*. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble.

- Chardon J., Hingray B., Favre A.-C., Autin P., Gailhard J., Obled C., and Zin I., 2014: Spatial similarity and transferability of analog dates for precipitation downscaling over France. *Journal of Climate*, **27**, 5056-5074.
- Chardon J., Hingray B., and Favre A.-C., 2018: An adaptive two-stage analog/regression model for probabilistic prediction of small-scale precipitation in France. *Hydrology and Earth System Sciences*, **22**, 265-286.
- Clark M., Gangopadhyay S., Hay L., Rajagopalan B., and Wilby R., 2004: The Schaake shuffle: A method for reconstructing space-time variability in forecasted precipitation and temperature fields. *Journal of Hydrometeorology*, **5**, 243-262.
- Hingray B., Picouet C., Musy A., 2009 : *Hydrologie 2 Une science pour l'ingénieur*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 601 pages.
- Hingray B., Schaeffli B., Mezghani A., and Hamdi Y., 2010: Signature-based model calibration for hydrological prediction in mesoscale Alpine catchments. *Hydrological Sciences Journal*, **55(6)**, 1002-1016.
- Horner I., 2020 : *Construction et évaluation de signatures hydrologiques pour le diagnostic et l'amélioration d'un modèle hydrologique distribué*. Thèse de doctorat. Université Grenoble Alpes.
- Kuentz A., Mathevet T., Gailhard J., and Hingray B., 2015: Building long-term and high spatio-temporal resolution precipitation and air temperature reanalyses by mixing local observations and global atmospheric reanalyses: the ANATEM method. *Hydrology and Earth System Sciences*, **19**, 2717-2736.
- Lorenz E. N., 1969: Atmospheric predictability as revealed naturally occurring analogues. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **26(4)**, 636-646.
- Marty R., Zin I., Obled C., Bontron G., and Djerboua A., 2012: Toward real-time daily PQPF by an analog sorting approach: Application to flash-flood catchments. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **51**, 505-520.
- Ménégoz M., Valla E., Jourdain N. C., Blanchet J., Beaumet J., Wilhelm B., Gallée H., Fettweis X., Morin S., and Anquetin S., 2020: Contrasting seasonal changes in total and intense precipitation in the European Alps from 1903 to 2010. *Hydrology and Earth System Sciences*, **24(11)**, 5355-5377.
- Mezghani A. and Hingray B., 2009: A combined downscaling-disaggregation weather generator for stochastic generation of multisite hourly weather variables over complex terrain: development and multi-scale validation for the Upper Rhone River basin. *Journal of Hydrology*, **377(3-4)**, 245-260.
- Obled C., Bontron G., and Garçon R., 2002: Quantitative precipitation forecasts: A statistical adaptation of model outputs through an analogues sorting approach. *Atmospheric Research*, **63(3)**, 303-324.
- Poli P., Hersbach H., Dee D. P., Berrisford P., Simmons A. J., Vitart F., Laloyaux P., Tan D. G. H., Peubey C., Thépaut J.-N., Trémolet Y., Hólm E. V., Bonavita M., Isaksen I., and Fisher M., 2016: ERA-20C: An Atmospheric Reanalysis of the Twentieth Century. *Journal of Climate*, **29**, 4083-4097.
- Raynaud D., Hingray B., Zin I., Anquetin S., Debionne S., and Vautard R., 2016: Atmospheric analogs for physically consistent scenarios of surface weather in Europe and Maghreb. *International Journal of Climatology*, **37(4)**, 2160-2176.
- Raynaud D., Hingray B., Evin G., Favre A.-C., and Chardon J., 2020: Assessment of meteorological extremes using a synoptic weather generator and a downscaling model based on analogues. *Hydrology and Earth System Sciences*, **24**, 4339-4352.
- Schaeffli B., Hingray B., Niggli M., and Musy A., 2005: A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, **9**, 95-109.
- Tang J., Niu X., Wang S., Gao H., Wang X., and Wu J., 2016: Statistical downscaling and dynamical downscaling of regional climate in China: Present climate evaluations and future climate projections. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, **121(5)**, 2110-2129.
- Troin M., Caya D., Velázquez J. A., and Brissette F., 2015: Hydrological response to dynamical downscaling of climate model outputs: A case study for western and eastern snowmelt-dominated Canada catchments. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, **4**, 595-610.
- Wyard C., Scholzen C., Fettweis X., Van Campenhout J., and François L., 2017: Decrease in climatic conditions favouring floods in the south-east of Belgium over 1959-2010 using the regional climate model MAR. *International Journal of Climatology*, **37**, 2782-2796.
- Wyard C., Doutreloup S., Belleflamme A., Wild M., and Fettweis X., 2018: Global Radiative Flux and Cloudiness Variability for the Period 1959-2010 in Belgium: A Comparison between Reanalyses and the Regional Climate Model MAR. *Atmosphere*, **9**, 262.

# L'IMPACT DE LA VARIABILITÉ PLUVIOMÉTRIQUE SUR L'APPORT DES BARRAGES ET L'APPROVISIONNEMENT DES VILLES EN EAU POTABLE EN TUNISIE

Afifa BEN HAMMOUDA<sup>1</sup>, Salem SEBEI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire de recherche Gouvernance et développement territorial, Faculté des Sciences Humaines et Sociales, Université de Tunis, [sebeiafifa@yahoo.fr](mailto:sebeiafifa@yahoo.fr)

<sup>2</sup> Laboratoire d'Ecologie Forestière, Institut national de recherche en génie rural eaux et forêts (INERGREF), Tunisie, [sebei\\_salem@yahoo.fr](mailto:sebei_salem@yahoo.fr).

**Résumé :** Les ressources en eau en Tunisie, comme dans les autres pays de la rive sud de la Méditerranée, sont menacées par la sécheresse et le potentiel hydrique est modeste. L'évolution des réserves des barrages entre 2019 et 2021 met en évidence une forte réduction des apports par rapport à la capacité de stockage. Cette réduction des apports hydriques est due à l'irrégularité du régime pluviométrique. Le changement au niveau des réserves des barrages perturbe l'alimentation des villes et des périmètres irrigués en eau, surtout au cours de la saison sèche. En 2020, l'Observatoire Tunisien de l'Eau (OTE) a signalé 1345 problèmes de distribution de l'eau. D'où l'importance d'établir une gestion durable de l'eau.

**Mots-clés :** Apport des barrages, approvisionnement en eau des villes, variabilité pluviométrique, Tunisie

**Summary :** Water resources in Tunisia, as in other countries on the southern shore of the Mediterranean, are threatened by drought and the water potential is modest. The evolution of dam reserves between 2019 and 2021 highlights a sharp reduction in inflows compared to storage capacity. This reduction in water supply is due to the irregularity of the rainfall regime. The change in the level of dam reserves disrupts the supply of water to towns and irrigated areas, especially during the dry season. In 2020, the Tunisian Water Observation (OTE) reports 1345 water distribution problems. Hence the importance of establishing sustainable water management.

**Keywords :** Contribution of dams, city water supply, pluviometric variability, Tunisia

## Introduction

Les ressources en eau en Tunisie, comme dans les autres pays de la rive sud de la Méditerranée, sont menacées par la sécheresse. Le potentiel hydrique est modeste ; la part d'eau par habitant est de 480 m<sup>3</sup>/an/hab (SONEDE, 2017), cette quantité est au-dessous du seuil de pauvreté (1000 m<sup>3</sup>/an/hab). Le pays est dans une situation de stress hydrique, sous le seuil de pénurie (500 m<sup>3</sup>/an/hab) selon les normes de la Banque Mondiale (2007).

Dans cette situation hydrique critique, l'Etat a intérêt à mobiliser l'eau pour répondre aux besoins croissants de la population. Et comme les 3/4 des ressources en eau de la Tunisie sont renouvelables, et sont très tributaires du climat, les années déficitaires consécutives aggravent le problème d'approvisionnement en eaux.

En effet, l'évolution des réserves des barrages entre 2019 et 2021 met en évidence une forte réduction des apports par rapport à la capacité de stockage qui est d'environ 2,322 Mm<sup>3</sup>. Et les réserves des barrages sont de 43,9% en 2021 contre 76,1% en 2019, suite à deux années consécutives de sécheresse (2020-2021).

Cette réduction des apports hydriques est due à l'irrégularité du régime pluviométrique. Nous enregistrons des années de fortes pluies à l'origine d'inondations violentes, et des phases de sécheresses prolongées (2016 -2021).

Ces changements au niveau des réserves et du manque de pluviométrie provoquent une perturbation d'alimentation des villes et des périmètres irrigués en eau, surtout au cours de la saison sèche. Les villes sont exposées à des coupures d'eau fréquentes et chroniques, qui s'intensifient en été.

## 1 Matériels et méthodes

Dans cette étude, nous nous sommes basés sur plusieurs sources de données à savoir: le bulletin mensuel de l'Observatoire National de l'Agriculture (ONAGRI), les rapports annuels de la Société Nationale

d'Exploitation et de Distribution des Eaux (SONEDE), de la Direction Générale des Barrages et des Grands Travaux Hydrauliques (DGBGTH), de l'Institut National de la Statistique (INS) et de l'Institut National de la Météorologie (INM). L'analyse de ces données statistiques permet d'étudier l'évolution des stocks des barrages, la variabilité pluviométrique et la perturbation d'alimentation des villes en eau. En plus, le recours aux images satellitaires (Google Earth) a permis de réaliser une étude de l'évolution de la surface de quelques barrages qui alimentent les grandes villes en eau potable.

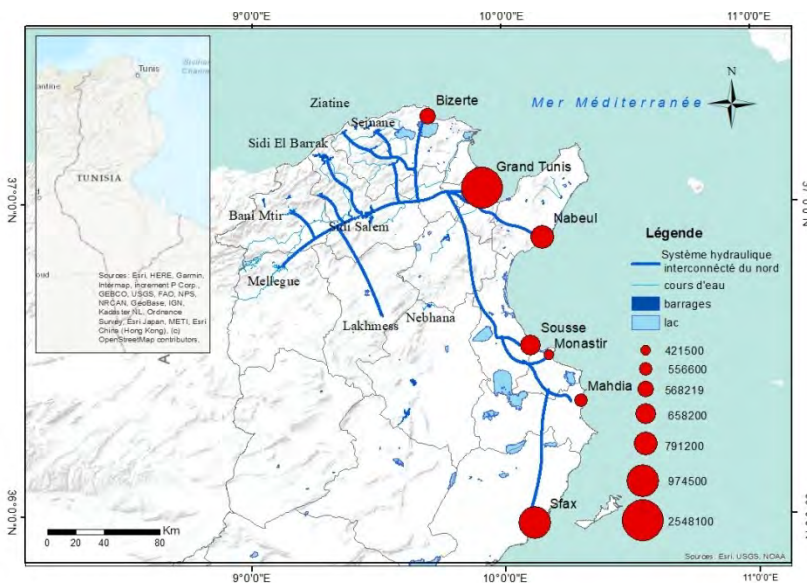
## 2 Résultats

### 2.1 Evolution des stocks d'eau des barrages

La Tunisie est l'un des pays de la Méditerranée les moins pourvus en ressources hydrauliques. Afin d'assurer la satisfaction des besoins en eau de la population et des périmètres irrigués, l'Etat a mis en place un certain nombre d'aménagements hydrauliques pour mobiliser les eaux de surface et souterraines (barrages, lacs collinaires, puits, ...). On cite comme exemple les plus grands barrages : Sidi Salem, Meleg, Joumine, Sejnene, ... (Henia et al., 2008).

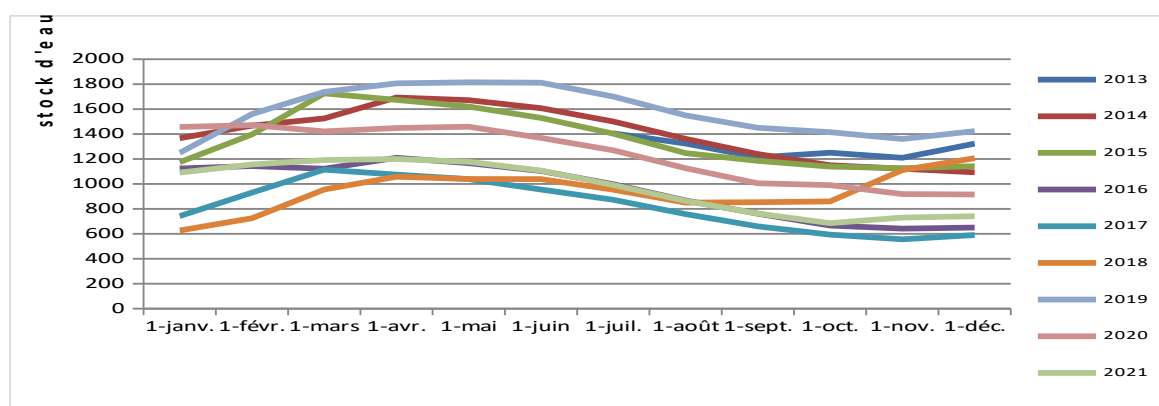
Aujourd'hui, la Tunisie compte au total 36 barrages d'une capacité de retenue de l'ordre de 2.313 milliards de m<sup>3</sup>. Ces barrages sont gérés par la Direction Générale des Barrages et des Grands Travaux Hydrauliques (DGBGTH), et la majorité de ces barrages se trouvent dans le nord du pays.

Ces barrages alimentent les agglomérations et les périmètres irrigués en eau grâce à un réseau de canaux qui acheminent l'eau du nord vers les régions côtières, où se concentrent la majorité de la population et des activités économiques (Cherif, 2003). Les barrages fournissent 57% des besoins en eau potable de la population, en plus d'autres sources, telles que les puits et les forages d'eau profonds (SONEDE, 2017) (fig. 1).



**figure 1.** Carte des aménagements hydrauliques de la Tunisie

Malgré la mobilisation de 90% des ressources en eau de surface identifiées et l'importance des aménagements hydrauliques, le stock en eau est très variable (Chahed et Hamdane, 2013). Ainsi on note une diminution des ressources qui reflète la variabilité temporelle des apports des barrages à la fois saisonnière et interannuelle. Cela menace la régularité de l'approvisionnement et de la distribution de l'eau. Au cours de la dernière décennie, nous avons observé une instabilité du stock des barrages. Ainsi, les ressources étaient en dessous de la moyenne 2014-2021 durant les années 2016, 2017, 2018, 2020 et 2021. Cette situation est critique en raison des ressources limitées et de la faible part d'eau par habitant (fig. 2).

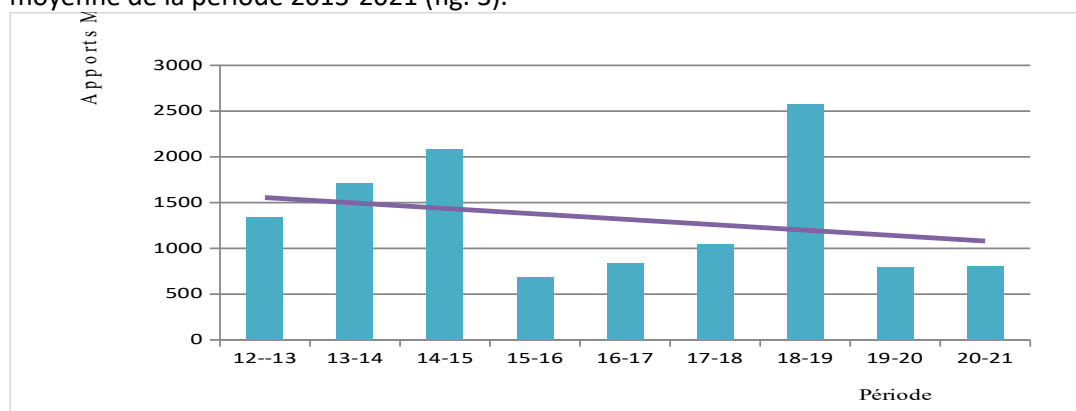


**figure 2.** Evolution des stocks d'eau des barrages par mois entre 2014 et 2021 en  $Mm^3$

Au cours des deux dernières années 2020 et 2021, les ressources en eau disponibles dans les barrages ont nettement chuté par rapport à 2019. Avec un taux de régression par mois qui s'étend entre 12 % en janvier et 51% en octobre. Et les réserves des barrages sont de 43,9% en 2021 contre 76,1% en 2019, suite à deux années consécutives de sécheresse (2020-2021).

Et surtout la chute est plus remarquable pendant la période sèche (Mai à Octobre), avec une baisse maximale des réserves totales au mois d'octobre 2021 de  $729,886 Mm^3$  par rapport à la même période en 2019, soit un taux de remplissage de l'ensemble des barrages tunisiens de 29.64% en octobre 2021 contre 62.8% en octobre 2019 (ONAGRI). Par contre en 2019, près de 14 barrages ont atteint leur capacité d'absorption maximale en raison des fortes pluies enregistrées en février.

Aussi on a enregistré une forte baisse des apports globaux en eau de 2019 à 2021, puisque ces apports sont de l'ordre de  $804,263 Mm^3$  du 1<sup>er</sup> septembre 2020 au 31 août 2021 (soit 42.59% de la moyenne de la période 2013-2021), contre  $2574,72 Mm^3$  du 1<sup>er</sup> septembre 2018 au 31 août 2019) (soit 146,11% de la moyenne de la période 2013-2021 (fig. 3).



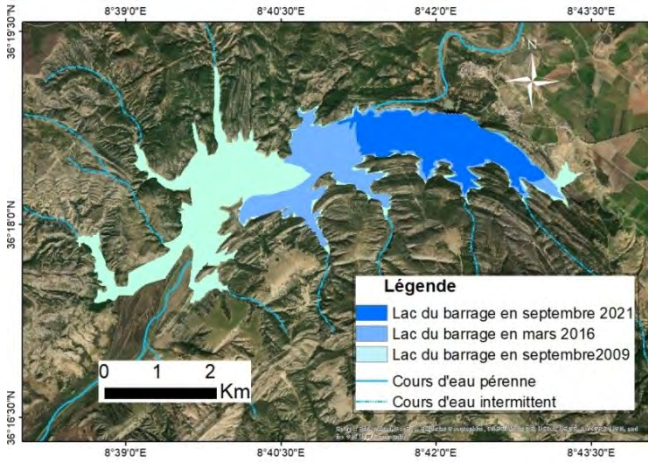
**figure 3.** Apport annuel des barrages en Tunisie

En octobre 2021, la situation des barrages dans les gouvernorats du nord et de Beja en particulier est très critique, car les apports des barrages enregistrent une baisse comprise entre 70% et 80 %, comme les barrages de Kassab et d'Al-Burag et le barrage de Sidi Salem, qui est le plus grand barrage de la Tunisie et qui contient  $99 Mm^3$  d'eau sur une capacité totale de plus de  $700 Mm^3$ .

Les apports des barrages de la région de Beja au cours des années 2020 et 2021 sont de  $1400 Mm^3$ , tandis que leurs quantités normales pour un an sont de l'ordre de  $1800 M m^3$ . Si les pluies continuent de se raréfier, alors les terres seront menacées par la sécheresse.

On peut citer à titre d'exemple quelques barrages où la régression du stock d'eau est remarquable. Pour le cas de barrage Bouhertma, la superficie du lac en 2021 s'est rétrécie de 30% par rapport à 2011 (fig. 6). Aussi pour le barrage Mellegue, en comparant la superficie entre 2009 et 2021, on remarque un rétrécissement de 72% (de 907 ha à 248 ha) (fig. 4). Le barrage de Nebhana est en risque de dessèchement avec une régression de 71% (de 616 ha à 177 ha), malgré sa valeur socio-économique. Ce barrage alimente les périmètres irrigués sur quatre gouvernorats (Kairouan, Sousse, Mounastir, Mahdia) et les zones





touristiques du Sahel en été. Mais au cours des dernières années, le DGBGTH décide sa fermeture surtout en été à cause de la forte baisse du stock d'eau (fig. 5).

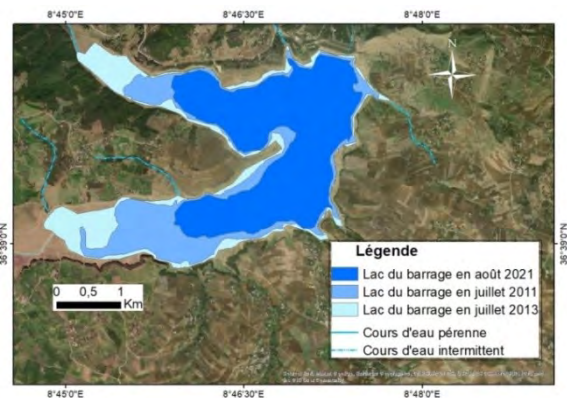


figure 4. Evolution du lac de barrage Mellegue au nord-ouest de la Tunisie

## 2.2 L'irrégularité du régime pluviométrique.

En général, la saison des pluies en Tunisie s'étend de septembre à mai, avec une grande irrégularité en quantité et en intensité. Par conséquent, le pays connaît des années de fortes pluies à l'origine d'inondations, et des sécheresses de grandes dimensions spatio-temporelles (Henia, 1993).

Le climat de la Tunisie est très variable. Au cours de la dernière décennie, les régimes pluviométriques saisonniers et mensuels sont souvent perturbés. À titre d'exemple, au cours des années 2020-2021, la pluie est inférieure à la normale en hiver et au printemps (INM).

L'année 2020 est considérée comme une année de déficit pluviométrique, car le total annuel des principales stations a été inférieur à la moyenne et s'est élevé à l'équivalent de 783 mm, soit une diminution de 4,8%, surtout pendant la saison hivernale. La baisse des précipitations concerne surtout les stations du nord où se situent la plupart des barrages. Citons les stations de Béja et de Bizerte qui ont enregistré une baisse de respectivement 29% (620 mm à 440 mm) et 26% (INM). Les fluctuations de la pluviométrie entraînent par ailleurs une perturbation des ressources en eau.

Ainsi, une année sèche comme celle de 2020 ou de 2021 provoque une diminution des réserves en eau. Sachant que les bassins versants qui alimentent les barrages font partie du territoire tunisien, sauf une petite partie appartenant à un pays voisin. On note aussi que les 3/4 des ressources en eau de la Tunisie sont renouvelables et très tributaires du climat. Les années déficitaires consécutives aggravent le problème d'approvisionnement en eaux.

Donc le déficit pluviométrique d'une année à l'autre et l'envasement des barrages sont les problèmes majeurs de la mobilisation des eaux en Tunisie. Dans le même temps, la consommation continue à augmenter, d'où l'importance d'établir une gestion durable de l'eau.

## 3 L'approvisionnement en eau

Ces changements au niveau des réserves d'eau et du manque de pluviométrie provoquent une perturbation d'alimentation des villes et des périmètres irrigués en eau, surtout au cours de la saison sèche. Les villes sont exposées à des coupures d'eau fréquentes et chroniques, qui s'intensifient en été.

L'eau potable représente un besoin vital et une base pour le développement socio-économique en Tunisie. Son transfert, son traitement et sa distribution sur tout le territoire tunisien sont réalisées à travers l'infrastructure de la SONEDE (Société Nationale d'Exploitation et de Distribution des Eaux), placée sous la tutelle du Ministère de l'Agriculture, des Ressources Hydrauliques et de la Pêche.

Le taux de branchement au réseau exprime le degré d'accès à l'eau. Le taux de desserte en 2020 est de 100 % en ville, et seulement de 53.4 % en campagne. Le volume d'eau distribué a atteint 664,5 Mm<sup>3</sup> en 2020 (contre 580,9 Mm<sup>3</sup> en 2015 et 570,7 Mm<sup>3</sup> en 2014) soit 103.7 litres/jour/hab.

L'Observatoire Tunisien de l'Eau (OTE) a signalé 1345 problèmes de distribution de l'eau en 2020 et 1630 en 2021. Les villes sont exposées à des coupures d'eau fréquentes et chroniques, qui s'intensifient en été. Même les coupures de l'eau deviennent constantes et s'étendent sur plusieurs jours consécutifs dans la capitale et dans toutes les grandes villes.

La SONEDE explique la perturbation d'alimentation par des problèmes techniques à cause du vieillissement des réseaux de distribution et d'adduction ou par le manque d'entretien. Sachant que la longueur du réseau de la SONEDE est de 56 561km, dont 40 % ont plus de 29 ans et 17 % plus de 49 ans (SONEDE, 2017). En effet les anciens ouvrages sont largement amortis, ce qui nécessite le renouvellement et l'augmentation de leur capacité.

Des entretiens menés auprès de la Direction de l'Eau du Ministère de l'Agriculture ont révélé que les fréquentes perturbations d'approvisionnement des villes et des périmètres irrigués s'expliquent aussi par la baisse des réserves. D'où la réduction de la part en eau de chaque périmètre irrigué si bien que les structures locales conseillent aux agriculteurs de réduire les surfaces cultivées pendant la période estivale. De telles situations causent la surexploitation de la nappe phréatique.

Un autre problème se pose, celui de la détérioration de la qualité d'eau due à la régression des stocks, ce qui nécessite un traitement intensif de l'eau à un coût élevé (Ministre de l'Agriculture, 2013). Et vu le faible financement des stations de traitement, l'approvisionnement en eau potable est de plus en plus discontinu.

## Conclusion

On conclut que la quantité de pluie en Tunisie a beaucoup fluctué ces dernières années. Les précipitations diminuent, en particulier dans les stations du nord où se concentrent la plupart des barrages, diminuant ainsi le stock et les apports des barrages aux niveaux mensuel et annuel.

La question de l'eau pose plusieurs problèmes en Tunisie: la fluctuation des réserves d'eau, le potentiel limité et la demande exponentielle, ainsi que la concurrence entre les secteurs. Cela menace la part d'eau par habitant de continuer à décliner, sachant qu'elle est estimée à 480 m<sup>3</sup>/hab/an, ce qui est déjà un état critique.

L'interruption fréquente de l'approvisionnement en eau des villes, surtout en été, affecte négativement le niveau économique et social. C'est pourquoi, plusieurs projets en cours ont pour but d'assurer la sécurisation des approvisionnements réguliers et durables en eau potable. D'abord, il s'agit de trouver de nouvelles ressources non conventionnelles et de poursuivre l'exécution du programme de construction des barrages qui revêt une importance stratégique. Aussi bien, instaurer des programmes qui maîtrisent les stocks des barrages et renforcent leur connectivité (SONEDE). Enfin, lancer des travaux d'entretien et de renouvellement du réseau de distribution d'eau pour réduire les fuites et les interruptions d'eau.

En plus, les solutions doivent s'intégrer dans une vision de long terme pour mieux gérer les crises suite aux extrêmes climatiques afin de garantir la régularité de l'approvisionnement en eau potable.

## Bibliographie

Banque Mondiale, 2007. *Obtenir le meilleur parti des ressources rares. Une meilleure gouvernance pour une meilleure gestion de l'eau au Moyen-Orient et en Afrique du Nord*, Rapport sur le développement, région MENA, 235 p.

Chahed J, Hamdane A., 2013. *Techniques de l'Ingénieur (Réf. W3005v1) : L'Eau en Tunisie*. Projects: National Water Security Water Management and Governance, 20 p.

Cherif A., 1994. Politique de l'eau et aménagement des campagnes, *Cahiers de la Méditerranée*, 49 pp. 83-104.

Cherif A., 2003. *Le problème de l'eau en Tunisie nord-orientale : besoins, ressources locales et transferts inter-régionaux*, in Paul Arnould, Micheline Hotyat (dir.), *Eau et environnement* ENS Éditions, 2003, p. 53-61.

Henia L., 1993. *Climat et Bilans de l'Eau en Tunisie : Essai de régionalisation climatique par les bilans hydriques*. Publications de l'Université de Tunis I, 391 p.

Henia, L., Omrane, M.-N., Hlaoui, Z., Cherif, A., 2008. *Atlas de l'eau en Tunisie*. Faculté des Sciences Humaines et Sociales de l'Université de Tunis, Tunis, 186 p.

Institut National de Météorologie (INM), 2020. *Rapport annuel*, 37 p.

République Tunisienne, Ministre de l'Agriculture, Bureau de Planification et des Equilibres Hydrauliques Tunis, 2013. *L'alimentation en eau potable et l'assainissement en Tunisie*, 15 p.

SONEDE, Direction centrale de la planification et des études générales, Direction des statistiques et de la planification Tunis, 2017. *Rapport des statistiques*, 230 p.