



HAL
open science

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

Antonin Soulie, Claire Granier, Hugo Denier van Der Gon, Jeoren J. P. Kuenen, Santiago Arellano, Sabine Darras, Thierno Doumbia, Bo Galle, Michael Guauss, Marc Guevara, et al.

► **To cite this version:**

Antonin Soulie, Claire Granier, Hugo Denier van Der Gon, Jeoren J. P. Kuenen, Santiago Arellano, et al.. THE COPERNICUS ATMOSPHERE MONITORING SERVICE (CAMS) EMISSIONS OF GREENHOUSE GASES AND AIR POLLUTANTS. 35ème colloque annuel de l'Association Internationale de Climatologie – AIC 2022, Météo-France, Jul 2022, Toulouse, France. hal-04235372

HAL Id: hal-04235372

<https://cnrs.hal.science/hal-04235372v1>

Submitted on 10 Oct 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

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

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

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

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

³ Ville d'Echirolles (Direction de la Ville Durable), France

⁴ IAB (Institute for Advanced Biosciences, INSERM-UGA, Grenoble), France

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

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

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

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

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

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

Introduction et contexte

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

Grenoble, puis 2020 pour Echirolles (3^{ème} ville de l'Isère par sa démographie), a été la création et l'installation d'un réseau de mesures micro-météorologiques intra-urbain. En effet, un point historique et scientifique bloquant s'expliquait par l'absence d'un réseau météorologique dense et structuré permettant d'analyser, représenter et éventuellement modéliser la cartographie thermique urbaine et par quartiers (outre celle provenant classiquement de la cartographie indirecte par télédétection, qui n'est pas une mesure totalement représentative de la température subie). CASSANDRE s'intéresse à l'étude micro- et bioclimatique d'un site urbain complexe par sa forte densité démographique et son contexte topoclimatique. Il veut apporter de nouvelles données météo-climatiques et épidémiologiques, ainsi que des outils méthodologiques adaptés, pour analyser les impacts des fortes températures estivales (celles de fond, en lien avec le réchauffement climatique actuel ou futur, ou celles périodiques, liées aux vagues de chaleurs ou épisodes caniculaires). L'étude de la sensibilité et de la vulnérabilité thermo-physiologique, imposée par les extrêmes météo-climatiques sur les habitants – surtout certaines populations vulnérables – mais aussi sur les rythmes d'activités socio-économiques (administratives, culturelles, scolaires, sportives, salariées) reste une étape essentielle pour permettre aux collectivités de développer des outils d'adaptation ciblés (Benmarhnia *et al.*, 2017 ; Benmarhnia et Beaudeau, 2018). Les données, diagnostics et outils opérationnels disponibles à ce jour sont toujours très génériques, souvent fondés sur des approches par inter-comparaisons urbaines ne tenant pas compte des conditions et réalités intra-communales, notamment pour l'exemple complexe grenoblois.

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

1. Objectifs du projet CASSANDRE

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

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

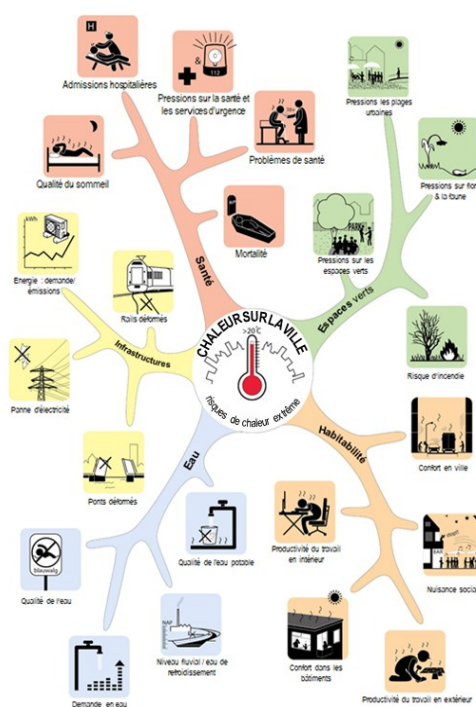


Figure 1. Carte mentale des principaux impacts des épisodes de chaleur extrême sur les environnements urbains (traduit d'après Klok et Kluck, 2018).

2. Données et méthodes

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

2.1. Un dense réseau de capteurs thermiques

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

- **6 stations météorologiques** : 2 stations Météo France (Grenoble-CEA-Radôme sur la Presqu'île et Le Versoud, à 12 km au N-E de l'agglomération), 4 stations appartenant aux villes d'Echirolles et de Grenoble (respectivement au Centre Robert Buisson et sur le toit de l'Hôtel de Ville d'Echirolles, ainsi qu'au Centre Horticole en milieu péri-urbain et sur le toit de l'Office de Tourisme de Grenoble en milieu urbain).

- **62 capteurs thermiques** (type Tinytag Talk 2) répartis dans les communes d'Echirolles et de Grenoble, représentant un réseau très dense (respectivement 4,1 et 1,6 capteurs par km²).

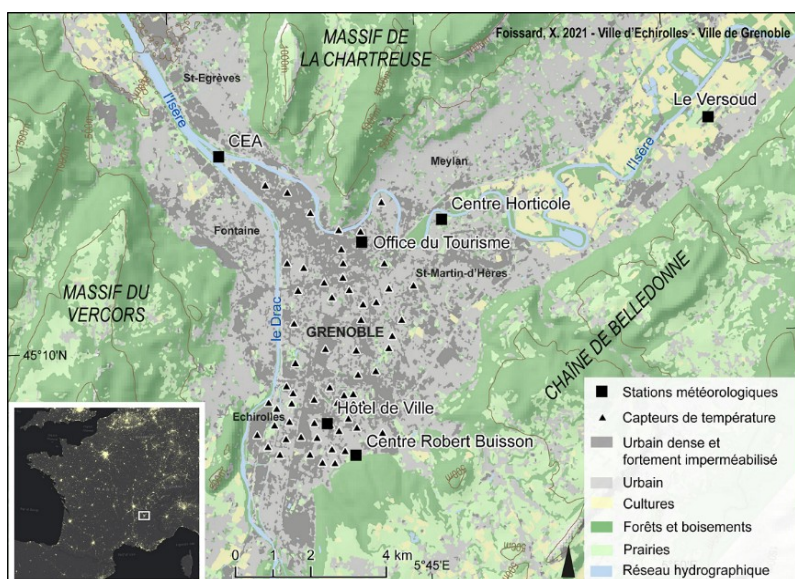


Figure 2. Réseau d'observation météo-climatique urbain (6 stations météorologiques + 62 capteurs thermiques) installé au cœur de l'agglomération grenobloise depuis 2019.

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

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

2.2. Méthodes de diagnostic des extrêmes thermiques

Une des tâches de CASSANDRE consiste à fournir aux collectivités partenaires, un diagnostic et une modélisation biostatistique des impacts des extrêmes thermiques sur la santé et ce, en climats présent et futur (horizon 2030-2050). Les expertises menées sur le climat grenoblois pour les étés 2019 et 2020 ont montré la variabilité spatio-temporelle de l'ICU à l'échelle de ces deux communes (Foissard, 2020), comme l'intensité de l'ICU et son occurrence pour ces deux étés, surtout lors de vagues de chaleur. Des cartographies préliminaires ont montré la forme spatiale de l'ICU à l'échelle des quartiers (Figure 3a). Cependant, le contexte topographique en vallée encaissée engendre une forte variabilité spatiale de l'ICU, agissant surtout sur son extension. Cette variabilité a été constatée à un pas de temps journalier à horaire. A ce jour, les modèles physiques développés pour l'ICU demeurent moins performants pour les villes avec un contexte topographique complexe (montagnes) comme le souligne l'étude menée par l'équipe de recherche autrichienne par l'évaluation du modèle MUKLIMO_3 (Hollósi *et al.*, 2021). Ces observations préliminaires soulignent le besoin de définir l'ICU selon deux aspects : temporel (fréquence et intensité) et spatial (structure et extension). Comprendre cette variabilité est nécessaire pour l'analyse conjointe d'autres thématiques, telle que la santé. Aussi, grâce au réseau de mesures très dense développé localement, deux approches sont utilisées pour détecter les extrêmes de chaleur urbains et en améliorer la quantification et la morphologie :

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

participer à l'effort d'amélioration et de normalisation sur le plan national de cette méthodologie et des outils associés.

2/ L'approche par la prise en compte des **types de temps** complète l'analyse du degré d'instabilité spatio-temporelle de l'ICU à l'échelle des deux communes. Les phénomènes de brises de vallées peuvent ainsi être observés à partir des nouvelles stations météorologiques urbaines implantées. Une analyse à l'échelle d'une saison jusqu'à une nuit spécifique contribuera à définir les différentes structures. La connaissance acquise par l'étude des types de temps et des brises constitue un préalable pour la définition de stratégies d'intervention pour les collectivités. La préconisation apportée est de prendre en considération l'orientation des bâtiments pour limiter les obstacles à ces brises. La présence d'un "ICU mobile" pose la question de la relation entre l'occupation du sol et l'impact immédiat sur la température à l'échelle locale. Ce phénomène souligne la nécessité d'évaluer les échelles climatiques concernées et les brises associées.

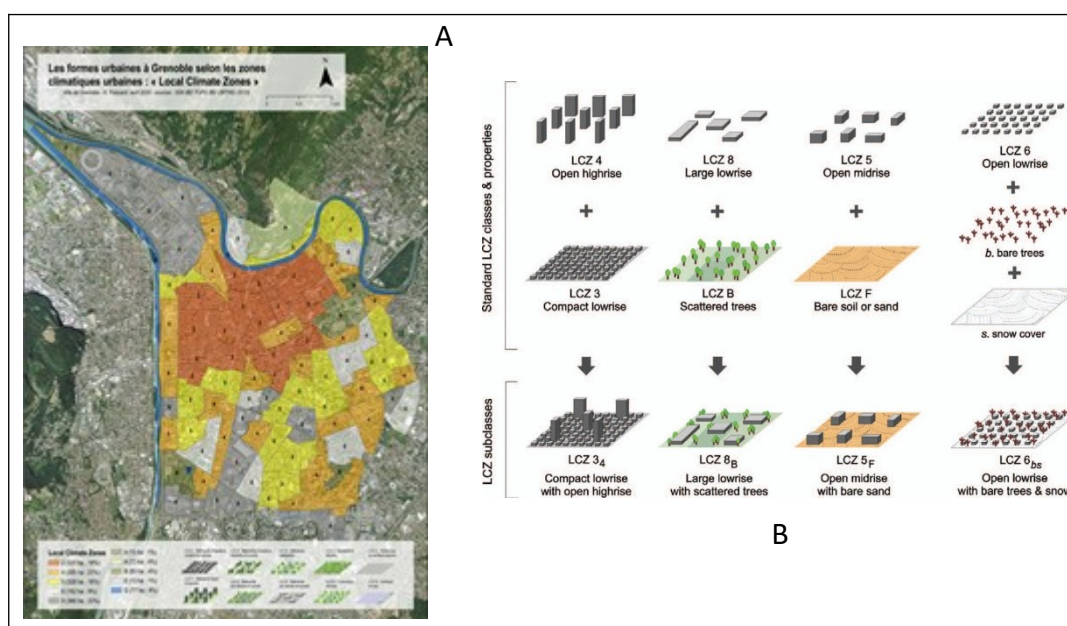


Figure 3. L'approche par Local Climate Zones (LCZ). A gauche : Cartographie des formes urbaines selon les LCZ réalisée dans le cadre de l'étude préliminaire de l'ICU à Grenoble (Foissard, 2020). A droite : Sous-classes LCZ pour représenter les combinaisons de types de "bâti" et de "couverture terrestre"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

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

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

Le projet CASSANDRE correspond à une demande explicite provenant des orientations stratégiques nationales, pour étudier le climat et la santé. De plus, le dernier rapport annuel du Haut Conseil pour le Climat (HCC, 2021) note qu'il est indispensable de se doter d'outils robustes et fiables pour identifier et

mesurer les impacts du changement climatique et permettre le développement de services climatiques coordonnés. Cela doit passer par l'acquisition, l'application et l'opérationnalisation des données et connaissances en matière de climat. Le rapport note que la plateforme européenne Climate-ADAPT (<https://climate-adapt.eea.europa.eu/>) doit être renforcée et élargie avec, en particulier, la création d'un observatoire de la santé, et pour des échelles spatiales plus fines.

L'étude des extrêmes thermiques futurs et de la vulnérabilité socio-spatiale qu'ils imposeront aux échelles urbaines est alors un attendu majeur des collectivités, dans le cadre particulièrement d'un urbanisme tactique et programmatique, et donc un objectif important de CASSANDRE. Par exemple, en menant une première analyse fréquentielle générale à partir des températures quotidiennes moyennes mesurées à la station de Grenoble-CEA-Radôme (Figure 4) en juillet et août 2020 (été caniculaire ; Rome *et al.*, 2020) et 2021 (été considéré « normal »), on observe déjà des seuils thermiques moyens atteints très élevés.

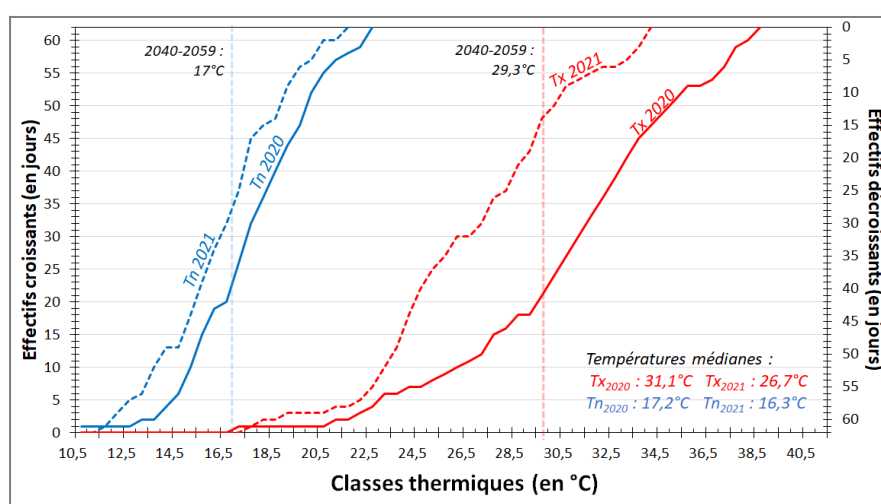


Figure 4. Nombre de jours cumulés croissants (ordonnée de gauche) ou décroissants (ordonnée de droite) selon des classes de températures de 0,5°C (abscisse) calculés à partir des températures minimales (Tn) et maximales (Tx) de la station Grenoble-CEA-Radôme en juillet-août (N = 62) des années 2020 et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

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

Conclusion

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

Remerciement : Ce travail est réalisé dans le cadre du projet CASSANDRE (CANicules, SANTé et Densité de REseaux météorologiques sur le territoire grenoblois) financé par l'APR PACT²e (Planifier et Aménager, face au Changement climatique, la Transition des Territoires) de l'ADEME.

Bibliographie

- Benmarhnia T., Beaudeau P., 2018. Les villes et la canicule : se préparer au futur et prévenir les effets sanitaires des îlots de chaleur urbain. *Bull. Epidemiol. Hebd.*, **16-17**, 354-57.
- Benmarhnia T., Kihal-Talantikite W., Ragettli M., Deguen S., 2017. Small-area spatiotemporal analysis of heatwave impacts on elderly mortality in Paris: A cluster analysis approach. *Science of the Total Environment*, **592**, 288-294.
- Bigot S., Bertrand M., Rome S., Duché S., 2017a. La prédisposition aux îlots de chaleur urbains (ICU) à Grenoble : cartographie par télédétection et intérêt des mesures in situ. Poster présenté à la Biennale de Grenoble - Villes en transition, 9-12 mars 2017.
- Bigot S., Duché S., Madelin M., Rome S., 2017b. Etude du climat urbain: pour une mise à disposition de nouveaux services climatiques. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, **68**, 13-36.
- Foissard X., 2020. *Etude préliminaire de l'îlot de chaleur urbain à Grenoble - Cartographie des indicateurs de formes urbaines en relation avec le climat urbain*, Ville de Grenoble, France.
- HCC, 2021. *Renforcer l'atténuation, engager l'adaptation*. Rapport annuel du Haut Conseil pour le Climat, 184 p.
- Hollósi B., Žuvela-Aloise M., Oswald S. et al., 2021. Applying urban climate model in prediction mode-evaluation of MUKLIMO_3 model performance for Austrian cities based on the summer period of 2019. *Theor. Appl. Climatol.*, **144**, 1181-1204.
- Hough I., Just A. C., Zhou B., Dorman M., Lepeule J., Kloog I., 2020. A multi-resolution air temperature model for France from MODIS and Landsat thermal data. *Environ Res.*, **183**, 109244.
- Klok E. J., Kluck J., 2018. Reasons to adapt to urban heat (in the Netherlands). *Urban Climate*, **23**, 342-351.
- Kloog I., Nordio F., Lepeule J., Padoan A., Lee M., Auffray A., Schwartz J., 2016. Modelling spatio-temporally resolved air temperature across the complex geo-climate area of France using satellite-derived land surface temperature data. *Int. J. Climatology*, **37** (1), 296-304.
- Lepeule J., 2018. Exposition de la femme enceinte à la température ambiante et issues de grossesse. *Anses, Bulletin de veille scientifique* n° **33**, Santé-Environnement-Travail, 5 p.
- Oliveira A., Lopes A., Niza S., 2020. Local Climate Zones classification method from Copernicus Land Monitoring Service datasets: an ArcGIS-based Toolbox. *MethodsX*, **7**, 101150, 10 p.
- Rome S., Bertrand M., Duché S., Bigot S., 2017a. La perception des îlots de chaleur à Grenoble : enquête sur la sensibilisation des habitants aux extrêmes thermiques. Poster présenté à la Biennale de Grenoble - Villes en transition, 9-12 mars 2017.
- Rome S., Bigot S., Foissard X., Madelin M., Duché S., Fouvet A.-C., 2020. Les deux épisodes caniculaires de l'été 2019 à Grenoble : constat et perspective pour une gestion des extrêmes thermiques futurs. *Climatologie*, **17**, 12, 16 p.
- Rome S., Bigot S., Le Roy B., Duché S., Madelin M., 2017b. Les services climatiques pour faciliter l'étude des événements extrêmes et l'adaptation à l'échelle locale : cas d'étude en Auvergne-Rhône-Alpes. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, **31**, 219-224.
- Stewart I. D., Oke T. R., 2012. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **93**, 1879-1900. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>

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

Mahamadou ZAKARI¹, Abdou KAILOU DJIBO², Souleymane KEITA³, Fabrice PAUL NGUEMA⁴

¹Département Hygiène-Sécurité-Environnement, IUT, Université de Zinder, Laboratoire Ville et Développement Territorial Durable au Sahel (VIDET-Sahel), BP : 656 Zinder, Niger. Email : mounir_zakari@yahoo.fr

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

³Département Génie Civil, Ecole Nationale d'Ingénieurs (ENI) Abderhamane Baba Touré, 410 Av. Van Vollenhoven, Bamako, Mali. Email : soulkei_ml@yahoo.fr

⁴Faculty of Agronomy and Agricultural Science, School Of Wood, Water and Natural Resources, University of Dschang, P. O. Box 786, Ebolowa, Cameroon. Email : paul.nguema@univ-dschang.org

Résumé : Au Niger, malgré une urbanisation relativement tardive par rapport aux autres pays d'Afrique, la pollution atmosphérique est un défi. Cette étude vise donc à élucider la problématique de la pollution atmosphérique à travers la détermination de profils temporels et du niveau global de la pollution de l'air ambiant des ménages de la ville de Zinder. Ainsi, certains polluants gazeux (HCOH, COVT) et particulaires (PM₁, PM_{2,5}, PM₁₀) ont fait l'objet de surveillance durant 12 mois à l'aide d'un moniteur multifonctionnel. Les résultats mettent en exergue l'importance de la pollution particulaire qui dépasse les valeurs guides de l'OMS. En outre, 1,2 jours par semaine présentent un niveau global de pollution allant de 30% à 80%, ce qui signifie une qualité de l'air ambiant de pauvre à dangereuse.

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

Abstract: In Niger, despite relatively late urbanization compared to other African countries, air pollution is a challenge. This study aims to elucidate the problem of air pollution through the determination of temporal profiles and the overall level of ambient air pollution in households in the city of Zinder. Thus, some gaseous (HCOH, TVOC) and particulate pollutants (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀) were monitored for 12 months using a multifunctional monitor. The results highlight the importance of particulate pollution, which exceeds the WHO guideline values. In addition, 1.2 days per week have an overall level of pollution ranging from 30% to 80%, which means ambient air quality from poor to dangerous.

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

Introduction

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

La pollution atmosphérique a des origines naturelles (émissions par la végétation, érosion du sol, volcans, océans, etc.) mais aussi anthropiques à travers les activités résidentielles, les activités industrielles et agricoles, le chauffage, la production énergétique, le transport, les feux de savane etc.. Les polluants issus des activités humaines forment un cocktail de gaz et d'aérosols. On y trouve les oxydes d'azote (NO_x), le dioxyde de soufre (SO₂), les composés organiques volatils (COVs), les particules de diamètre inférieur à 10 µm, celles inférieures à 2,5 µm et celles inférieures à 1 µm (respectivement appelées PM₁₀, PM_{2,5}, et PM₁), les métaux lourds, les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les pesticides et beaucoup d'autres composés à l'état de gaz ou d'aérosols (INERIS,

2017). Conséquemment, c'est un sujet polymorphe (Charvolin et al., 2015). Des études ont mis en exergue, très malheureusement les caractères toxicologiques (Quénel et al., 2003) et écotoxicologiques (Avognon-Houéto, 1997 ; Moudachirou, 2005) de la plupart de ces polluants.

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

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

1. Matériels et Méthodes

1.1. Matériels

Les mesures ont été effectuées avec le moniteur de la qualité de l'air du model IGERESS WP3960S qui est une marque appartenant à VSON TECHNOLOGY. Il a la taille d'un smartphone. Il mesure simultanément sept paramètres à savoir : les Formaldéhydes, les Composés Organiques Volatils Totaux, les PM₁, les PM_{2,5}, les PM₁₀, l'humidité relative et la température. Il renseigne également sur le niveau global de la pollution calculé à partir des différents paramètres mesurés qui va de 0% à 100%.

1.2. Méthodes

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

2. Résultats

2.1. Profils temporels de la Pollution particulaire

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

De manière générale, nous avons remarqué que les PM_{10} , $PM_{2,5}$ et PM_{10} sont fortement et positivement corrélées. Ainsi, la corrélation entre PM_{10} et PM_{10} , PM_{10} et $PM_{2,5}$, et PM_{10} et $PM_{2,5}$ est de l'ordre de 0,99.

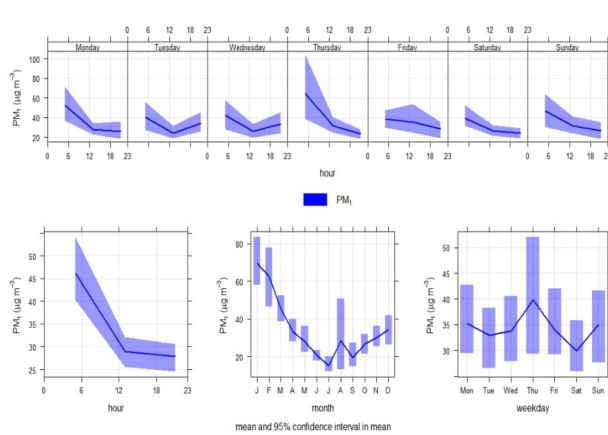


Figure 1. Profils temporels des PM_{10}

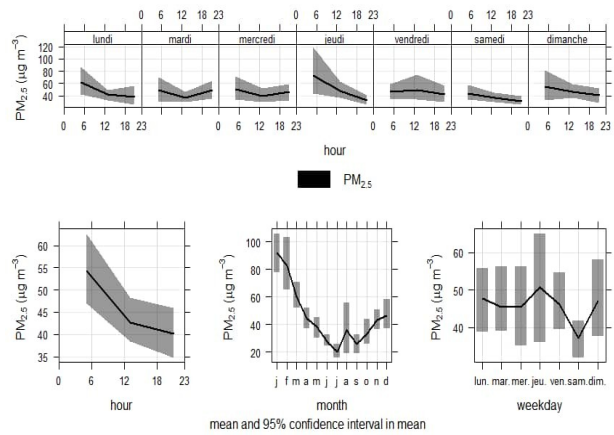


Figure 2. Profils temporels des $PM_{2,5}$

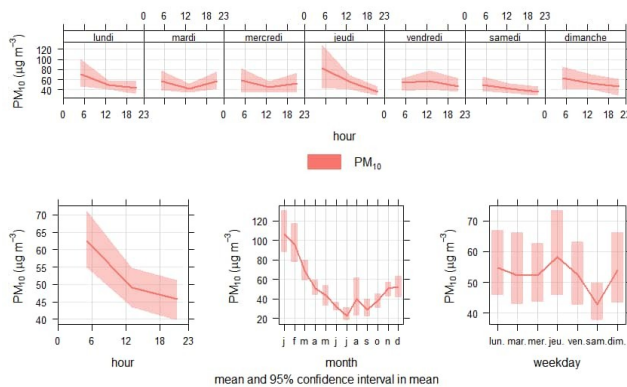


Figure 3. Profils temporels des PM_{10}

2.2. Profils temporels des composés organiques volatils et du formaldéhyde

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

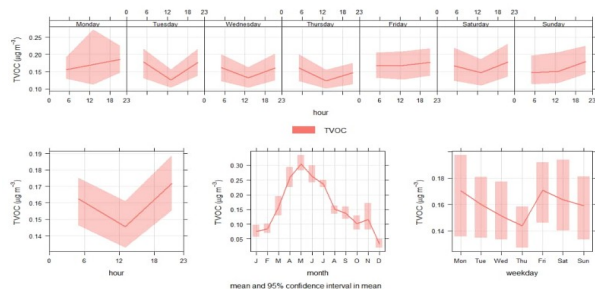


Figure 4. Profils temporels des COVT

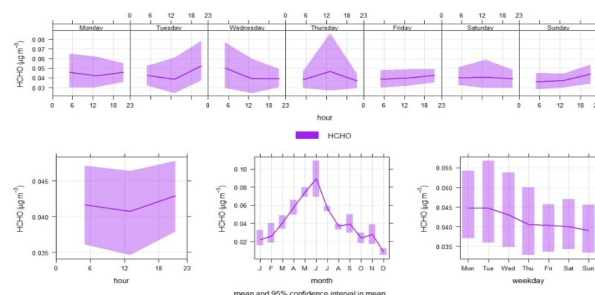


Figure 5. Profils temporels du HCOH

2.3. Conditions climatiques et pollutions particulaires et gazeuses

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

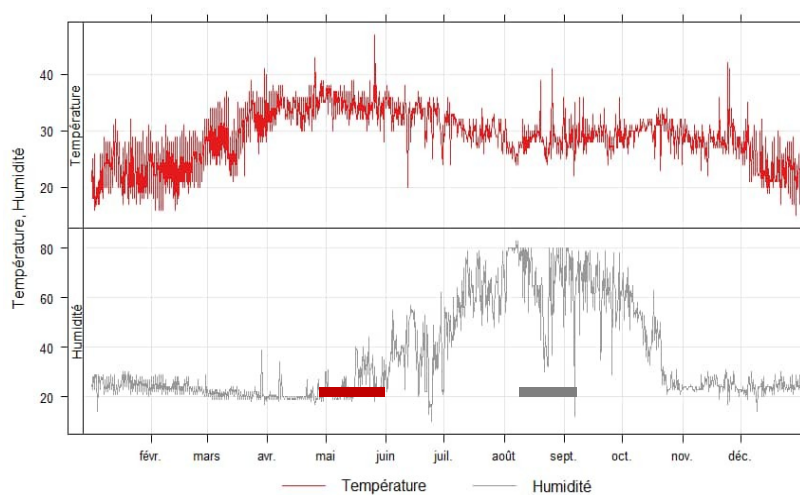


Figure 6a. Variation de la température et de l'humidité relative

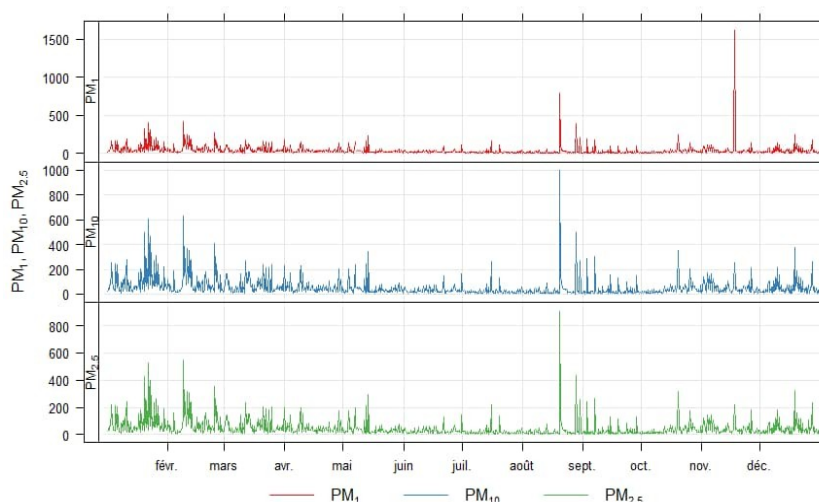


Figure 6b. Variation de la pollution particulaire

Figure 6. Conditions climatiques et pollutions particulaires

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

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

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

2.4. Niveau Global de Pollution (NGP)

Le NPG qui varie de 0% à 100% est affiché directement sur l'écran du moniteur. La figure 7 montre une relation assez forte entre le NPG et les variables PM_1 , $\text{PM}_{2,5}$ et PM_{10} . Par contre, les HCOH et COVT ne sont pas corrélés avec le NPG.

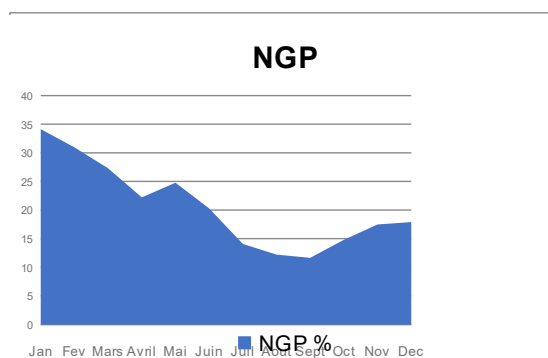
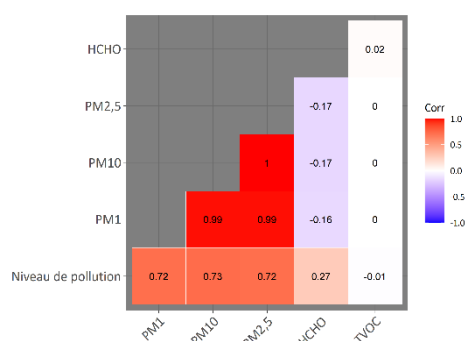


Figure 7. Corrélation entre NGP et les polluants

Figure 8. Moyenne mensuelle du NGP

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

3. Analyse et Discussions

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

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

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

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

Conclusion

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

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

Références

- Adamou A., 2020 : Morphologie urbaine à Zinder : densités urbaines et mise en valeur des espaces résidentiels, *Revue congolaise de Communication, Lettres, Arts et Sciences Sociales (CLASS), les Villes Africaines, LES EDITIONS HEMAR, N°9*.
- Adon AJ, C. Liousse, E. T. Doumbia, A. Baeza-Squiban, H. Cachier, J.F. Léon, V. Yoboué, A. B. Akpo, C. Galy-Lacaux, B. Guinot, C. Zouiten, H. Xu, E. Gardrat, and S. Keita, 2020: Physico-chemical characterization of urban aerosols from specific combustion sources in West Africa at Abidjan in Côte d'Ivoire and Cotonou in Benin in the frame of the DACCIWA program, *Atmos. Chem. Phys.*, **20**, 5327–5354.
- Avognon-Houéto L., 1997 : Journée de réflexion sur la pollution atmosphérique au Bénin. *Rapport de travaux-Cotonou, MEHU*, 40 p.
- Boubilil L., Assemat E., Borot M.-C., Boland S., Martinon L., Sciare J., Baeza-Squiban A., 2013: Development of a repeated exposure protocol of human bronchial epithelium in vitro to study the long-term effects of atmospheric particles, *Toxicol. In Vitro*, **27**, 533–542.
- Carslaw D. and Ropkins K., 2012: Openair, An R package for air quality data analysis, *Environ., Modelling and Software*, **27**--28:52-61.
- CEC, 1991: Handbook for Urban Air Improvement, Commission of the European Communities. *Environmental Resources Ltd, London*, 340p.
- Charvolin F., Frioux S., Kamoun L., Mélard F., et Roussel I., 2015 : Un air familial ? Sociohistoire des pollutions atmosphériques, *Presse des mines, Sciences sociales*, Paris.
- Goudie AS., 1996: Climate: Past and present. In: *Adams WM, Goudie AS, Orme ARD, eds. The physical geography of Africa. New York : Oxford University Press*, 34-59.
- INERIS, 2017 : Pollution atmosphérique : mesurer, prévoir et agir, *INERIS mag, n°41*.
- Michael S., Montag M., Dott W., 2013: Proinflammatory effects and oxidative stress in lung macrophages and epithelial cells induced by ambient particulate matter, *Environ. Pollut.* **183**, 19–29.
- Moudachirou M., 2005 : Étude de la pollution atmosphérique de la ville de Cotonou. *Rapport final*.
- OMS, 2015 : Directives de la qualité de l'air de l'organisation mondiale de la santé - janvier 2015, *Bruxelles environnement-ibge, collection fiches documentées, thématique air*.
- Ozer P., 2005 : Estimation de la pollution particulaire naturelle de l'air en 2003 à Niamey (Niger) à partir de données de visibilité horizontale Environnement, *Risques & Santé*, Volume **4**, Numéro 1, 43-9.
- Quénel P., Dab W., Festy B., Viau C. et Zmirou D., 2003 : Qualité de l'air ambiant, *In Environnement et santé publique- Fondement et pratiques*, pp 291- 315.
- Val S., Liousse C., Doumbia E. H. T., Galy-Lacaux, C., Cachier H., Marchand N., Badel A., Gardrat E., Sylvestre A. and Baeza-Squiban A., 2013: Physico-chemical characterization of African urban aerosols (Bamako in Mali and Dakar in Senegal) and their toxic effects in human bronchial epithelial cells: description of a worrying situation, *Part. Fibre Toxicol.*, **10**(1), 10.

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

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

Antonin SOULIE¹, Claire GRANIER^{1,2}, Hugo DENIER VAN DER GON³, Jeoren J. P. KUENEN³, Santiago Arellano⁴, Sabine DARRAS⁵, Thierno DOUMBIA¹, Bo GALLE⁴, Michael GUAUSS⁶, Marc GUEVARA⁷, Jukka-Pekka JALKANEN⁸, Sekou KEITA¹, Cathy LIOUSSE¹, Jana DOUBALOVA⁹, David SIMPSON⁶, Katerina SINDELAROVA⁹

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

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

³TNO, dept. Climate, Air and Sustainability, Utrecht, The Netherlands

⁴Department of Space, Earth and Environment, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden

⁵Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse, France

⁶Norwegian Meteorological Institute, P.O. 43 Blindern, 0313 Oslo, Norway

⁷Barcelona Supercomputing Center, 08034 Barcelona, Spain

⁸Finnish Meteorological Institute, P.O. Box 503, 00101 Helsinki, Finland;

⁹Charles University in Prague, Prague, Czech Republic

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

Keywords: CAMS, Air pollutants, GHG, Emissions

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

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

Introduction

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

1. Global anthropogenic emissions: CAMS-GLOB-ANT

CAMS-GLOB-ANT is a global inventory of anthropogenic emissions of the main atmospheric pollutants and greenhouse gases: NO_x, SO₂, black carbon (BC), organic carbon (OC), NH₃, non-methane volatile organic compounds (NMVOCs) with 25 speciated individual VOCs, CO₂ (excluding/including short cycle), CH₄, N₂O. CAMS-GLOB-ANT provides emissions on a monthly basis at a 0.1x0.1 degree resolution for the 2000-2022 period. 19 sectors of emissions are taken in account.

1.1. General methodology

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

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

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

To develop the current version of the CAMS-GLOB-ANT inventory, the EDGARv5 gridded data were extrapolated from 2015 to 2022 by multiplying the emissions for each year starting in 2015 by a factor calculated from the CEDS country data, using the following formula: $e_{t+1} = q \cdot e_t$ where e_t is the emissions on year t and q the growth factor: $q = \frac{c_{2019}}{\text{mean}(c_{2014 \rightarrow 2019})}$ with c_t being the CEDS emissions at year t . This growth factor q is calculated for each country and sectors. The emissions are then gridded on the EDGARv5/CAMS grid (0.1x0.1 degree) and used to extrapolate the emissions up to 2022.

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

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

An example of the NO_x emissions in July 2021 from version 5.3 of the CAMS-GLOB-ANT inventory is shown in Figure 1.

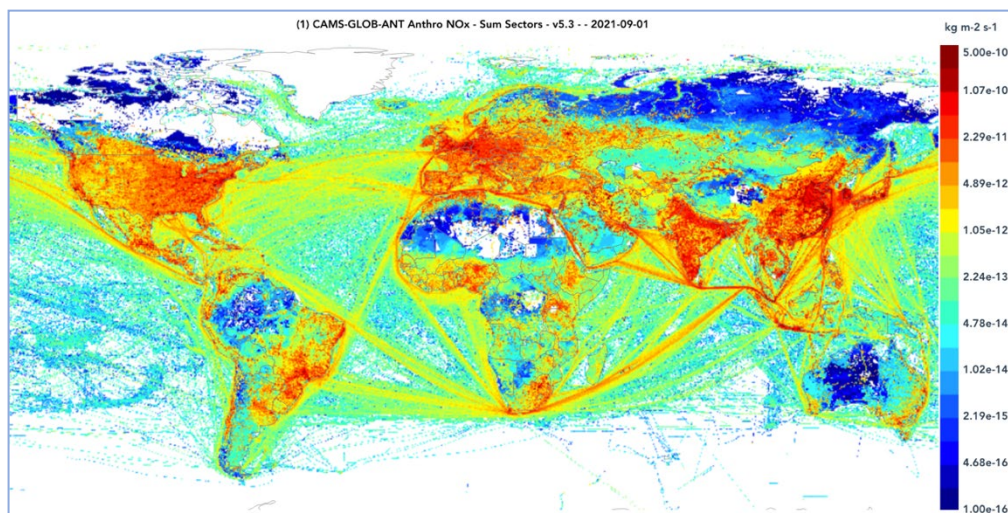


Figure 1: NOx emissions (in kg/m²/s) in July 2021 as given by version 5.3 of CAMS-GLOB-ANT

1.2. Individual VOCs

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

1.3. Temporal variation, ship and aircraft emissions

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

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

2. European anthropogenic emissions: CAMS-REG

The CAMS-REG anthropogenic emissions (Kuenen et al., 2022) are inventories providing air pollutants and greenhouse gases regional emissions for the European domain. The emissions are given for the 2000-2017 period with a 0.05x0.1 grid resolution. The emissions are based on 2017 national emissions reporting combined with other sources. The main air pollutants are included: NO_x, SO₂, NMVOCs, NH₃, CO, PM₁₀ and PM_{2.5}, and also CH₄. To stay as close as possible to the emissions as officially reported and used in policy assessment, the inventory uses the officially reported emission data by European countries to the UN Framework Convention on Climate Change, the Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution and the EU National Emission Ceilings Directive as the basis where possible. Emissions are collected at the high sectoral level, distinguishing around 250 different sector–fuel combinations, whereafter a consistent spatial distribution is applied for Europe. Along with the resulting annual emission maps, profiles for splitting particulate matter (PM) and NMVOCs into individual components are provided, as well as information on the height profile by sector and temporal disaggregation down to the hourly level to support modelling activities.

3. Temporal profiles: CAMS-GLOB-TEMPO

CAMS-GLOB-TEMPO (Guevara et al., 2021) provides gridded monthly, daily, weekly and hourly weight factors for atmospheric chemistry modelling for the 2000-2017 period. CAMS-GLOB-TEMPO includes temporal profiles for the main air pollutants (NO_x ; SO_x ; NMVOCs; NH_3 ; CO; PM_{10} ; and $\text{PM}_{2.5}$) and the greenhouse gases (CO_2 and CH_4) for each of the following anthropogenic source categories: energy industry (power plants), residential combustion, manufacturing industry, transport (road traffic and air traffic in airports) and agricultural activities (fertilizer use and livestock), ships emissions from CAMS-GLOB-SHIP (see below). The temporal factors take in account weather variations impacts on emissions (from residential heating for example) and human activities, electricity production, traffic counts variations.

4. Ship emissions: CAMS-GLOB-SHIP

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

5. Natural emissions: CAMS-GLOB-OCE, CAMS-GLOB-SOIL, CAMS-GLOB-BIO, CAMS-GLOB-VOLC and CAMS-GLOB-TERM

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

CAMS-GLOB-OCE provides natural emissions of dimethyl sulfide (DMS), halogens carbonyl sulfide (OCS) and carbonyl disulfide (CS_2) from oceans. The methodology and the emissions of OCS and CS_2 are described in Lennartz et al. (2021). The CAMS dataset includes the emissions of OCS, DMS and Halogens (bromoform (CHBr_3), methyl iodide (CH_3I), dibromomethane (CH_2Br_2)). The emissions are provided with a spatial resolution of 0.5×0.5 or 1×1 degree and cover the 2000 to 2020 period.

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

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

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

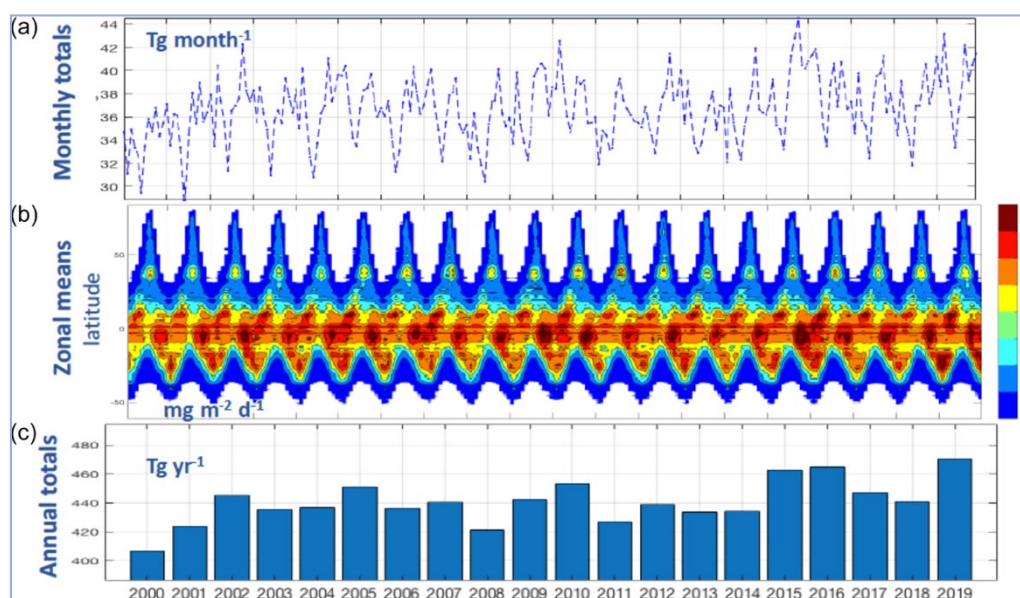


Figure 2 : Global monthly totals (a), zonal means (b) and global annual totals (c) of the isoprene emissions for the period of 2000–2019 in the CAMS-GLOB-BIOv3.1 inventory (from Sindelarova et al., 2022)

CAMS-GLOB-VOLC (Arellano et al., 2021) provides the emissions of SO₂ from constant degassing volcanoes, based on the compilation of results of homogenized post-analysis of measurements of SO₂ flux and plume parameters obtained during the period March 2005 to January 2017 of 32 volcanoes from the NOVAC (Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change: novac-community.org) network.

CAMS-GLOB-TERM provides emissions of methane from termites. The emissions of CH₄ from termite nests were estimated based on the methodology by Sanderson (1996). 11 ecosystems from the Olson vegetation database (Olson et al., 1989) were identified as termite habitats. Each of these ecosystems was assigned termite biomass per m² and CH₄ emission flux per g of termite and hour. Long-term monthly means of precipitation were used to introduce seasonality based on the observations. More details can be found in Granier et al. (2019).

Conclusion and availability of the emissions data

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

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

Bibliography

Arellano, S., Galle, B., Apaza, F., Avarid, G., Barrington, C., Bobrowski, N., Bucarey, C., Burbano, V., Burton, M., Chacón, Z., Chigna, G., Clarito, C. J., Conde, V., Costa, F., De Moor, M., Delgado-Granados, H., Di Muro, A., Fernandez, D., Garzón, G., Gunawan, H., Haerani, N., Hansteen, T. H., Hidalgo, S., Inguaggiato, S., Johansson, M., Kern, C., Kihlman, M., Kowalski, P., Masias, P., Montalvo, F., Möller, J., Platt, U., Rivera, C., Saballos, A., Salerno, G., Taisne, B., Váscónez, F., Velásquez, G., Vita, F., and Yalire, M., 2021: Synoptic analysis of a decade of daily measurements of SO₂ emission in the troposphere from volcanoes of the global ground-based Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change, *Earth Syst. Sci. Data*, **13**, 1167–1188, <https://doi.org/10.5194/essd-13-1167-2021>

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

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

Matthieu DAVID¹, Olivier CANTAT¹, Éline GÉRARD²

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

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

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

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

Introduction

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

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

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

1.1. La canicule, un aléa aux caractéristiques spatio-temporelles particulières

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

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

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

1.2. Les mobilités temporaires comme moyen d'adaptation

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

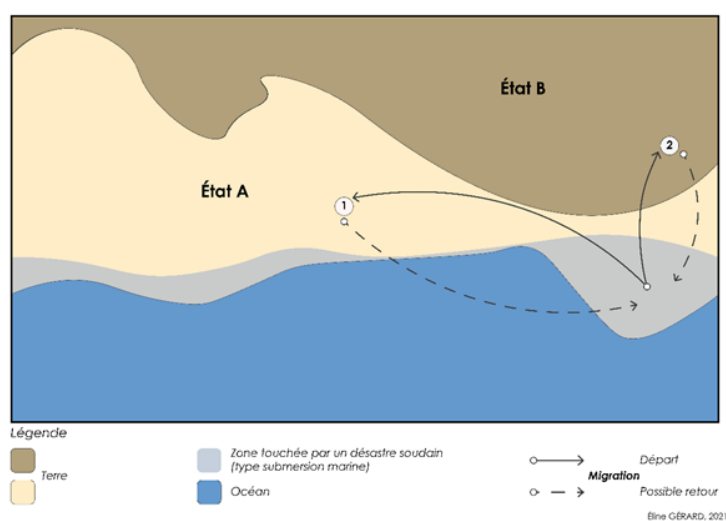


Figure 1. Scénario n°1 de Walter Kälin : *Sudden-onset disasters*

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

Les caractéristiques spatio-temporelles du tourisme, semblables à celles des mobilités décrites par le scénario n°1 des migrations environnementales, en font la forme d'adaptation retenue comme indicateur. Il est susceptible d'être le premier à enregistrer cette tactique, voire cette stratégie, d'adaptation. En effet, le tourisme est une migration temporaire choisie, et par ailleurs flexible d'un point de vue spatial, en ce sens qu'elle n'oblige pas le touriste à retourner dans une destination précédemment visitée autrement que par choix. Il est à noter que la flexibilité, qui fait la force du tourisme dans une optique d'adaptation, en fait également un objet d'étude complexe, soumis à des soubresauts et des variations rapides imputables à diverses causes dont la pandémie de COVID-19 est une bonne illustration : elle limite directement (fermeture des frontières) et indirectement (décision personnelle) les déplacements internationaux et nationaux. Les résultats présentés ici ne doivent pas être pris pour le compte-rendu d'une situation cristallisée mais plutôt considérés comme une photographie à un instant T d'une situation qui peut évoluer très rapidement, d'une année sur l'autre.

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

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

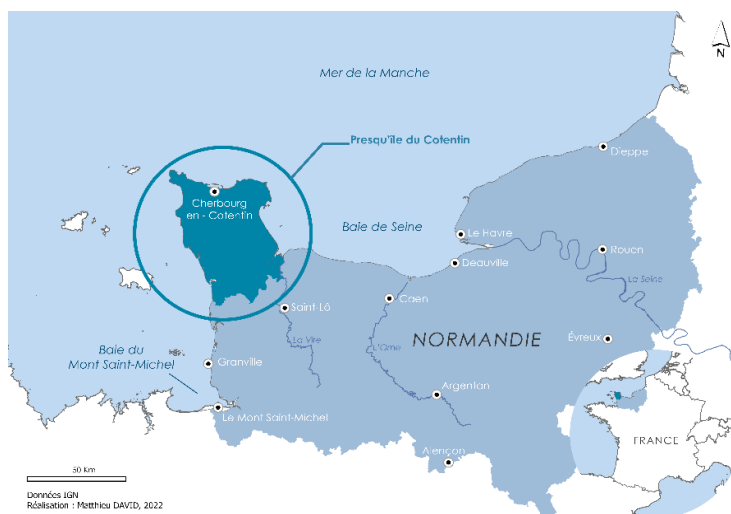


Figure 2. Situation géographique de la presqu'île du Cotentin

Les données sur le tourisme sont généralement trop imprécises pour passer de la simple hypothèse, fondée sur l'observation d'une corrélation (comme c'était le cas dans *l'Insee Flash Normandie* de Novembre 2018, attribuant à la fraîcheur de la Normandie sa bonne saison touristique estivale), à la mise en lumière d'un véritable lien de causalité. Les données disponibles ont un maillage spatio-temporel trop large (échelle départementale et pas de temps mensuel) pour être mis en face de vagues de chaleur ou de canicule de quelques jours (hors épisode exceptionnel, type 2003). Un pan entier du tourisme est par ailleurs occulté : l'excursionnisme. Il diffère du tourisme dans sa définition traditionnelle par l'aspect temporel. Les excursionnistes ne passant pas de nuit hors de leur domicile, en conséquence ils sont difficilement identifiables et quantifiables. Cela va sans dire que les traitements purement quantitatifs que ces données permettent ne fournissent pas de compréhension plus fine des motivations, notamment climatiques, des touristes dans le choix du Cotentin.

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

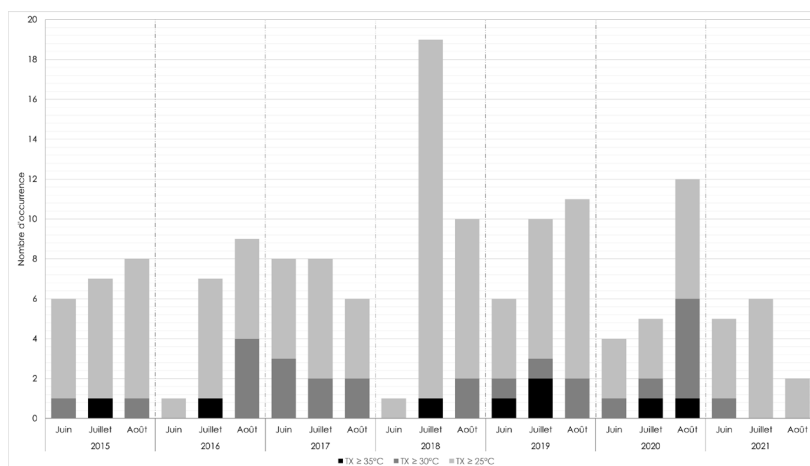


Figure 3. Nombre de jours de chaleur (TX ≥ 25°C), de fortes chaleurs (TX ≥ 30°C) et très fortes chaleurs (TX ≥ 35°C) pour les mois de Juin, Juillet et Août à Caen de 2015 à 2021 – Données Météo-France.

2. Relations entre tourisme dans le Cotentin et contexte météo-climatique

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

2.1. La dimension temporelle comme facteur discriminant

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

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

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

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

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

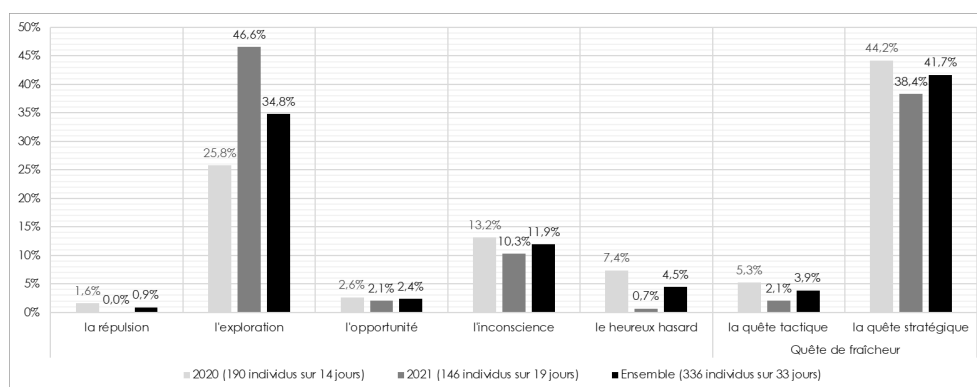


Figure 4. Répartition des touristes interrogés lors des périodes estivales 2020 et 2021

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

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

destinations vers lesquelles ils tendent à aller de manière récurrente. Ils expérimentent au cours des années une diversité de situations météorologiques et climatiques.

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

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

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

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

Discussion et conclusion

Le recours aux îlots de fraîcheur comme le Cotentin semble d'ores et déjà être une réalité et pose ainsi les premiers jalons de l'émergence d'un refuge climatique. Se pose dès lors la question de la manière dont doivent être considérées certaines formes de tourisme, notamment les quêtes de fraîcheur tactique par la population locale. Est-ce une forme de tourisme parmi d'autres ou bien diffère-t-elle en ce qu'elle est le témoin de l'émergence de l'adaptation aux canicules par la mobilité ? Cette question devrait précéder toutes les autres sur ce sujet car de sa réponse dépendra les mesures qui pourront être prises pour traiter les conflits naissants entre touristes et locaux dans certains secteurs du Cotentin (La Presse de la Manche, 8 juillet 2021).

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

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

Bibliographie

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

RESPIRATORY DISEASES – RELATIONS TO CLIMATE PARAMETERS

Eduarda Rebelatto BRANDALISE¹, Pedro MURARA².

¹Federal University of Santa Catarina, PhD student, brandalise.duda@gmail.com

²Federal University of Fronteria Sul, research professor, pedro.murara@uffs.edu.br

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

Keywords: Climate and health; Pneumonia; Mapping

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

Mots clés : Climat et santé ; Pneumonie ; Cartographie

Introduction

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

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

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

Materials and methods

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

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

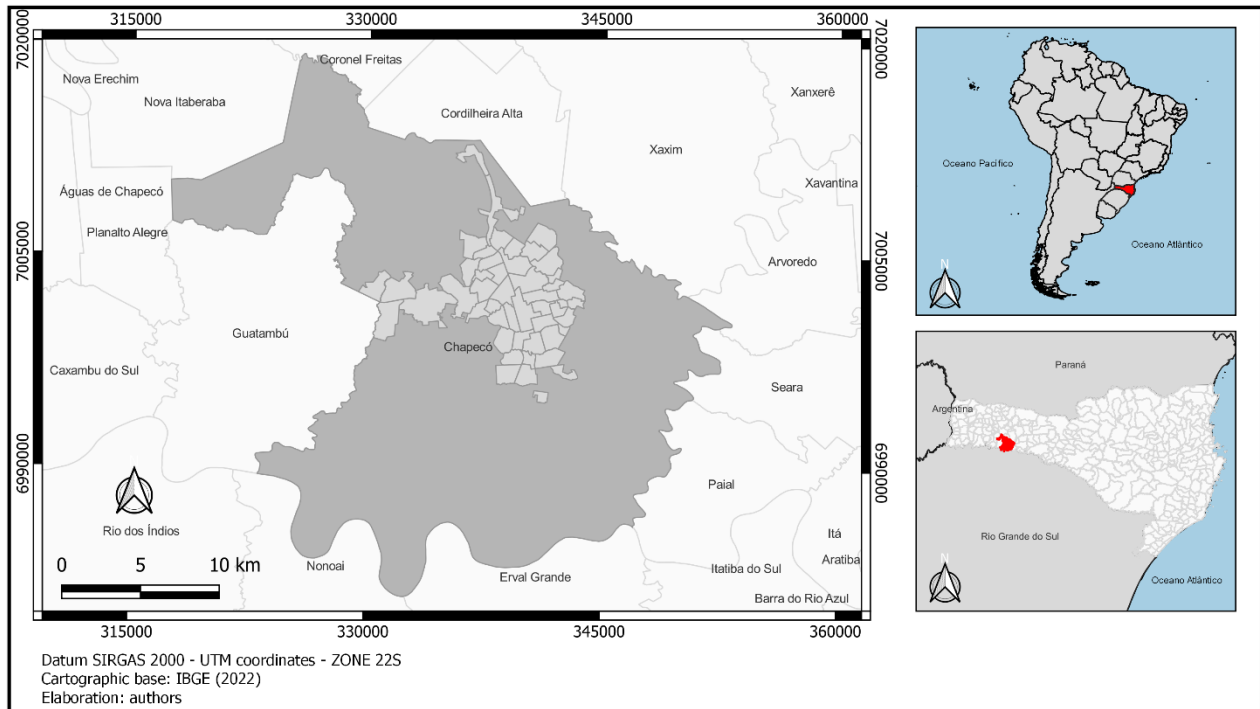


Figure 1. Location of the study area – Chapecó-SC, Brazil.

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

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

Results and discussion

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

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

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

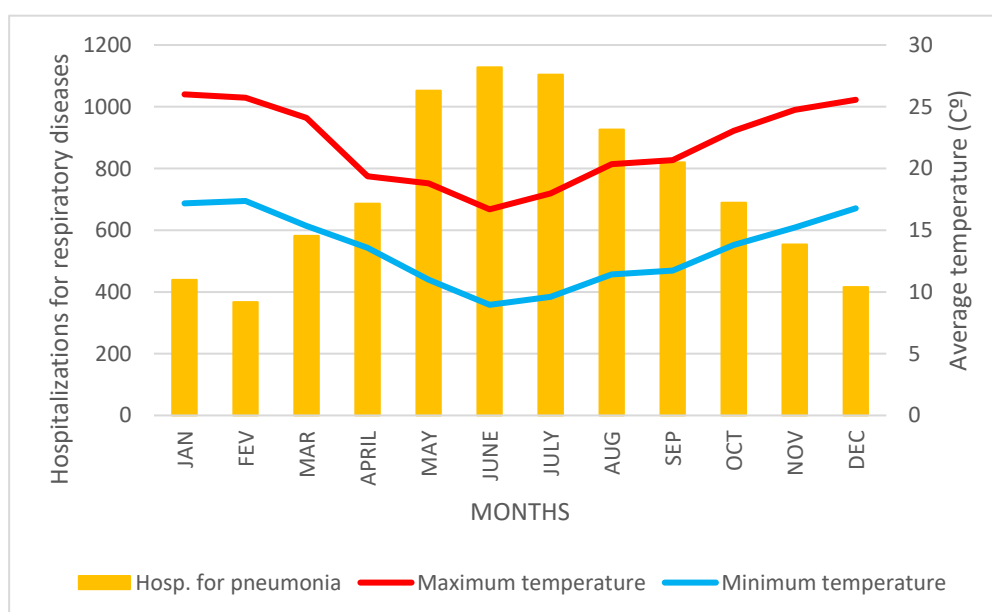


Figure 2. Monthly average of hospitalizations for respiratory diseases, average temperatures in Chapecó during the period from 2008 to 2019.

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

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

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

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

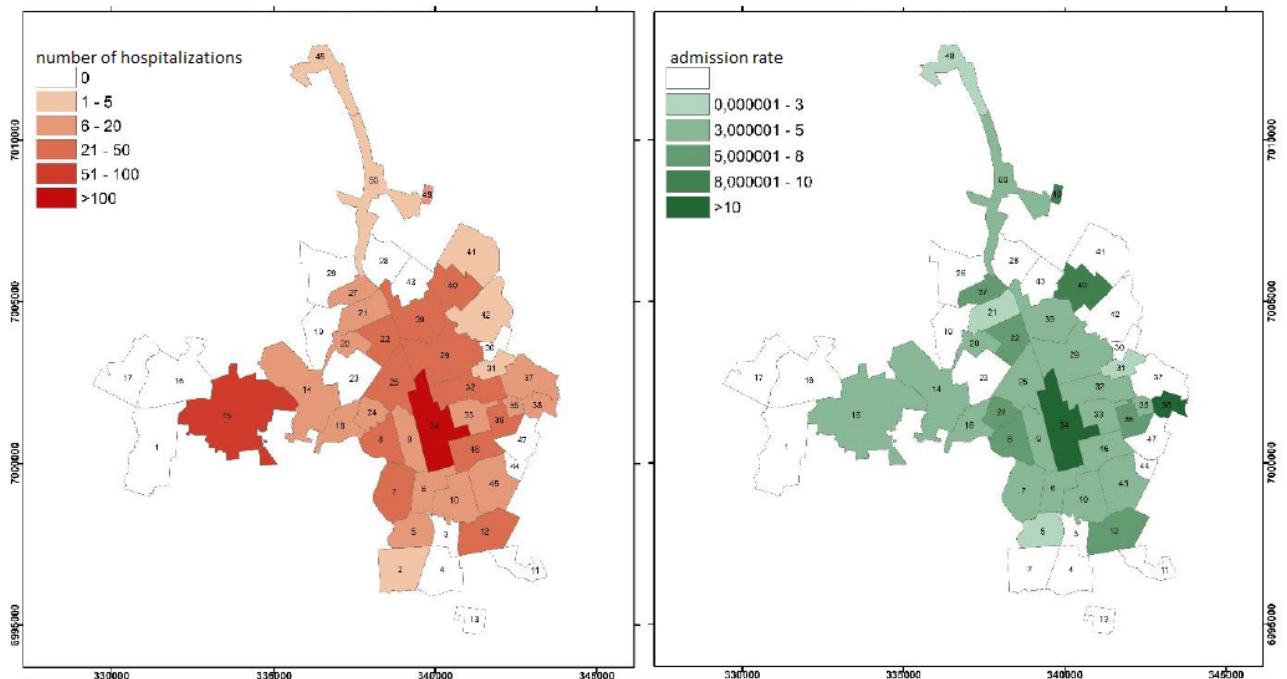
Tmax	Tmin	Rain	RH
-0,22	-0,27	-0,05	0,04

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

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

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

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

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

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

Conclusion

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

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

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

Acknowledgement

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

Bibliography

BAKONYI, S. M. C. ; DANNI-OLIVEIRA, I. M. ; MARTINS, L. C. ; BRAGA, A. L. F. 2004. Poluição atmosférica e doenças respiratórias em crianças na cidade de Curitiba, PR. *Revista de Saúde Pública*. 2004; **38**(5):695-700.

BESANCENOT, J-P. 2002. *Climat et santé*. Médecine et société, PUF, Paris, 128, p.

BRASIL, Ministério da Saúde. 2020. Banco de dados do Sistema Único de Saúde - DATASUS. Disponível em: <<http://www.datasus.gov.br>> Acesso em: janeiro de 2020.

BRITTO, N.D.S.S.; SPINELLI, J.; CATALÃO, I. 2021. *Explorações urbanas sobre o Programa Minha Casa Minha Vida em Chapecó, SC*. In: CALIXTO, M.J.M.S.; MORENO REDÓN, S. (Org.). O Programa Minha Casa Minha Vida e seus desdobramentos socioespaciais: os novos vetores da produção do espaço em cidades médias brasileiras. 1ed. Porto Alegre: TotalBooks, 2021, p. 108-143.

HOSSAIN, M.Z.; TONG, S.; BAMBRICK, H.; KHAN, A.F.; HORE, S.K.; HU, W. 2019. Weather factors, PCV intervention and childhood pneumonia in rural Bangladesh. *International Journal of Biometeorology*, v. 64, n. 4, p. 561-569.

JOHNSTON JR, R.B. 1991. Pathogenesis of pneumococcal pneumonia. *Reviews of Infectious Diseases*, v. 13, n. Supplement_6, p. S509-S517.

MOTA, L. M. M. 2009. Perfil das Hospitalizações por Doenças Respiratórias no Sistema Único de Saúde em Porto Alegre. *Boletim de Saúde*, Porto Alegre. v. **23**, n. 1, p. 23-30. Jan. /jun.

MURARA, P. AMORIM, M. C.C.T. 2010. Clima e saúde: variações atmosféricas e óbitos por doenças circulatórias. *Revista Brasileira de Climatologia*. Ano **6**, v.6.

NASCIMENTO, E. *Chapecó: Evolução urbana e desigualdades socioespaciais*. In: NASCIMENTO, E.; BRANDT, M. Oeste de Santa Catarina: território, ambiente e paisagem. São Carlos: Pedro & João Editores; Chapecó, UFFS, 2015, 242p.

NOGUEIRA, V. B. M.; NOGUEIRA, R. N. CÂNDIDO, G. A.; SOUZA, V. C. de; SILVA, S. S. F. da. 2011. Efeitos das alterações climáticas e antrópicas na saúde do idoso. *Revista Brasileira de Ciências do Envelhecimento Humano - RBCEH*. Passo Fundo, v. **8** n. 1 p. 88-106, Jan. /abr.

OLIVEIRA, T. G.; MORAES, J. S. B.; MOREIRA, F. T.; ARRELARO, R. C.; RICARDI, V. A.; BERTAGNON, J. R. D.; JULIANO, Y. 2011. Avaliação das internações de crianças de 0 a 5 anos por infecções respiratórias em um hospital de grande porte. *Einstein*; **9**(4 Pt 1):514-527.

- PANET, M. F.; ARAÚJO, V. M. D.; ARAÚJO, E. H. S. 2015. Vulnerabilidades da saúde da população geriátrica às variações climáticas em Campina Grande/PB. *Anais XIII encontro nacional e IX encontro latinoamericano de conforto no ambiente construído*. Campinas/SP: Pontifícia Universidade Católica de Campinas/SP, 2015. v.1. p. 01-10.
- PONTES, C. C.; LEITE, M. de L.; GAVÃO, N.; VIRGENS FILHO, J. S. das. 2016. Efeitos do clima na saúde: análise das internações de crianças menores de cinco anos por pneumonia no município de Ponta Grossa – PR. *Revista Brasileira de Climatologia*, Curitiba, ano 12, v. 18, p. 38-52, Jan. /jun.
- ROSA, A. M. IGNOTTI, E.; HACON, S. S.; CASTRO H. A. 2008. Análise das internações por doenças respiratórias em Tangará da Serra – Amazônia Brasileira. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*. **34**(8):575-582.
- SÄYNÄJÄKANGAS, P.; KEISTINEN, T.; TUUPONEN, T. Seasonal fluctuations in hospitalisation for pneumonia in Finland. 2001. *International Journal of Circumpolar Health*, v. **60**, n. 1, p. 34-40.
- SILVA, J. F.; SALDANHA, T. L.; SOARES, S. A. N. 2016. Clima e Saúde - uma abordagem sobre pneumonia na população de Caucaia - Ceará em 2013. *Anais SBCG XII*, 2016. Goiânia. p. 2416- 2423.
- TOYOSHIMA, M.T.K.; ITO, G.M.; GOUVEIA, N. 2005. Morbidade por doenças respiratórias em pacientes hospitalizados em São Paulo/SP. *Revista da Associação Médica Brasileira*. Vol. **51**, n. 4, p. 209-213.

VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DES PM_{2.5} ET NO₂, DANS LE XIIIÈME ARRONDISSEMENT DE PARIS

A. ABDMOULEH¹, S. DAHECH²

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

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

Résumé : Ce travail a pour objectif d'analyser les variations spatiotemporelles du niveau de la pollution de l'air aux PM_{2.5} et NO₂ dans le XIIIème arrondissement pendant et en dehors des confinements. Pendant le confinement et durant un temps stable, nous avons enregistré des dépassements de la norme préconisée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour les NO₂ durant les deux périodes de confinement en 2020 (250 µg/m³) notamment dans les rues de Tolbiac, de Chevaleret, au boulevard Périphérique et dans la place d'Italie. Les résultats issus des campagnes de mesures semi-itinérantes, montrent que les concentrations en PM_{2.5} pendant et en dehors des confinements, varient en fonction de la densité du trafic routier et des conditions météorologiques. Ces derniers justifient certains dépassements, pendant le confinement. En effet, par temps radiatif, nous avons enregistrées des valeurs dépassant la norme (OMS) allant jusqu'à 35 µg/m³ comme à rue de Tolbiac, rue Château des Rentiers. Par contre par temps perturbé le niveau baisse de 5 µg/m³ en moyenne et la fréquence d'obtention de concentrations supérieures à 20 µg/m³ était largement plus faible.

Mots clés : COVID-19, Paris XIII, PM_{2.5} et NO₂, temps

Abstract : The objective of this work is to analyze the spatiotemporal variations in the level of air pollution with PM_{2.5} and NO₂ in the XIIIth arrondissement during and outside the confinements. During confinement and during stable weather, we recorded exceedances of the standard recommended by the World Health Organization (WHO) for NO₂ during the two confinement periods in 2020 (250 µg/m³), particularly in the streets rue Tolbiac, rue Chevaleret, boulevard Périphérique and in the place d'Italie. The results from the semi-itinerant measurement campaigns show that PM_{2.5} concentrations during and outside confinement vary according to the density of road traffic and weather conditions. The latter justify certain overruns, during confinement. Indeed, in radiative weather, we recorded values exceeding the standard (WHO) up to 35 µg/m³ as in rue de Tolbiac, rue Château des Rentiers. On the other hand, in disturbed weather, the level drops by 5 µg/m³ on average and the frequency of obtaining concentrations above 20 µg/m³ was much lower.

Key words : COVID-19, Paris XIII, PM_{2.5} and NO₂, weather

Introduction

La pandémie du COVID-19 a provoqué des crises sanitaires et socio-économiques désastreuses à travers le monde (McKee et Stuckler, 2020). Depuis le 30 janvier 2020, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) a déclaré la pandémie du COVID-19 comme une urgence sanitaire mondiale. Pendant cette pandémie, le trafic routier est devenu plus fluide d'où l'amélioration de la qualité de l'air (Keshtkar et al, 2021). La France, comme le monde entier, a été touchée par cette pandémie qui a impacté les déplacements des hommes et des bien notamment dans les grandes villes comme Paris. En effet, pendant la deuxième phase du confinement (en automne 2020), une adoption généralisée de politiques du travail à distance et des fermetures temporaires d'entreprises ont limité les déplacements habituels de la population. Ceci a provoqué des changements importants dans la qualité de l'air (Dutheil et al., 2020). Brunet et al (2020) confirment que des pics de pollution des particules fines ont été observés lors du premier confinement dépassant 65 µg/m³ pour les PM_{2.5} ayant comme origine le trafic routier et le chauffage en bois. Cette étude examine comment ces changements

soudains dans les modèles de circulation ont affecté les concentrations des polluants problématiques à Paris, à savoir, les $PM_{2.5}$ et NO_2 . Nous nous focalisons sur le XIIIème arrondissement, terrain d'une thèse en cours et nous tenons compte des types de temps. Pour cerner la variation spatiotemporelle des polluants précités, nous nous sommes basés sur des campagnes de mesures semi-itinérantes réalisées moyennant des stations portables « Aeroqual series 500 versions pro » pour couvrir 272 points de mesure du 03/11/2020 au 30/04/2021. Outre la couverture spatiale, à échelle fine, cette étude permettrait d'évaluer les concentrations de deux polluants atmosphériques qui ne sont pas enregistrés par la seule station de surveillance de la qualité de l'air du réseau AIRPARIF du XIIIème arrondissement. Les mesures sont réalisées par type de temps radiatif (stable) et perturbé.

1. Zone d'étude, méthodes et données

Au nord de la France, la région Île-de-France est source d'un dynamisme économique à l'échelle nationale, européenne et mondiale. Elle concentre la moitié des emplois de l'économie française (Camors et al., 2016). Suivant le dernier rapport de l'Institut National de la Statistique et des Études Économiques (INSEE, 2020), l'Île-de-France compte 12 213 447 habitants. La région concentre diverses activités industrielles et tertiaires avec un trafic routier dense en raison des multiples déplacements de la population et des marchandises qui y convergent, notamment vers Paris intra-muros. Selon le dernier recensement de l'INSEE (2016), la densité moyenne de la population, XIIIème arrondissement, atteint 25 392 hab/km² pour une superficie de 7,2 km². Sont plus denses, les quartiers anciens construits dans les années 70 ; comme Olympiade, place Nationale et place Pinel. Paris jouit d'un climat océanique de transition, la vitesse moyenne du vent ne dépassent pas 3m/s et des situations anticycloniques y sont probables durant toute l'année. La partie centrale enregistre des températures plus élevées et un ralentissement du vent par rapport à la périphérie rurale (Dahech et al., 2021). Nous avons réalisé des campagnes de mesures semi-itinérantes au XIIIème arrondissement de Paris pendant et en dehors du confinement automnal en 2020. Nous avons retenu 272 points de mesure, soit un enregistrement tous les 100m(fig.1). Les mesures mobiles ont été réalisées moyennant des stations portables « Aeroqual series 500 » par deux opérateurs. La collecte des données sur les rues a été divisée en deux sessions durant la journée : une première de 7h30 à 9h00 puis une deuxième de 17h00 à 19h00, donc pendant les deux pics du trafic routier, durant les jours ouvrables. En parallèle, nous mesurons le bruit induit par le trafic routier et la vitesse du vent. Chaque mesure dure 5 minutes par point, soit 20 enregistrements pour chaque polluant (à un pas de temps de 15 secondes). Quinze campagnes de mesures ont été réalisées du 03/11/2020 au 26/11/2020 pendant le confinement. En dehors du confinement, les mesures ont été réalisées au mois de juillet, septembre et octobre 2020 ainsi que durant janvier et février 2021. Les mesures ont été réalisées par temps stable (anticyclonique, faible nébulosité (<4octas), vent faible (<4m/s), et par temps perturbé dépressionnaire avec un ciel couvert (<7 octas), et un vent fort(>8m/s). Nous avons opté ensuite pour cartographier les points de mesure dépassant le percentile 75.

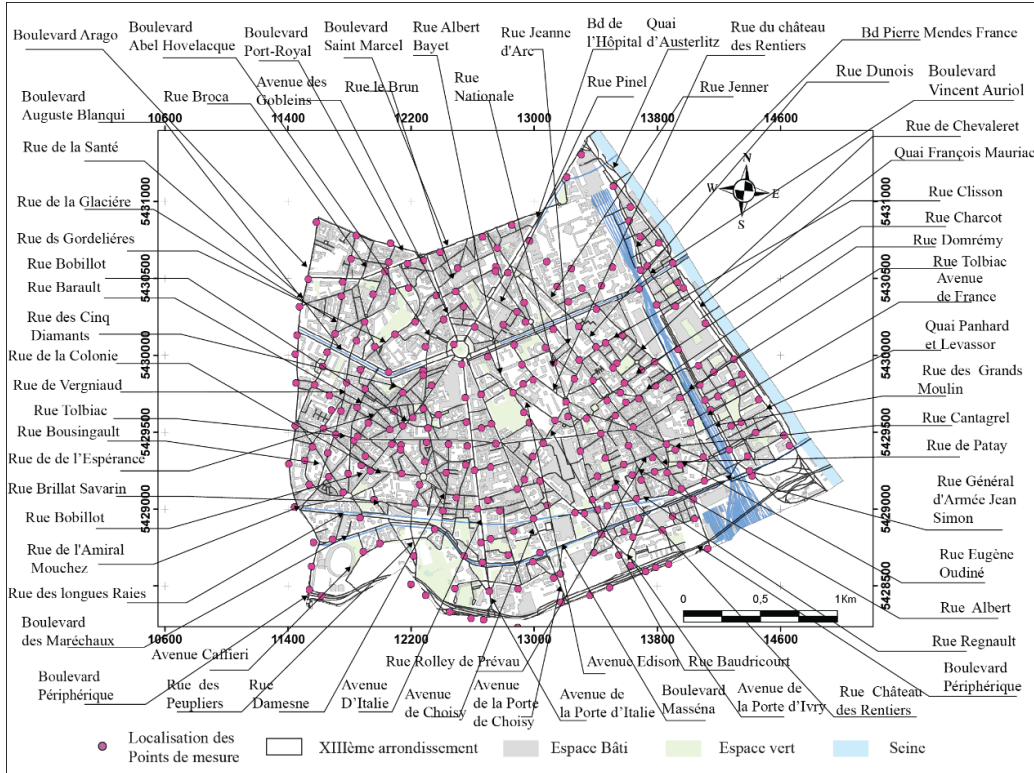


Figure 1. Localisation des points de mesures (source : www.data.gouv.fr)

2. Variabilité spatio-temporelle des concentrations en NO₂

2.1. Répartition des NO₂ pendant le confinement suivant le type de temps

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

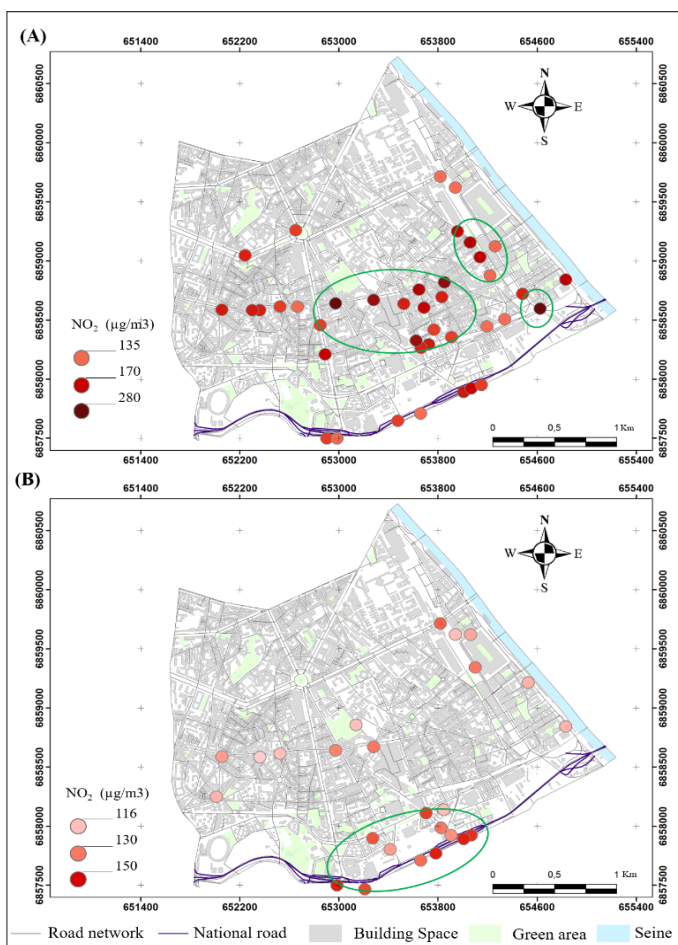


Figure 2. La distribution des concentrations en NO_2 au XIIIème arrondissement en 2020 et 2021 pendant le confinement par temps stable(A) et temps perturbé (B) (Mesures par capteurs Aeroqual 500, nombre de campagnes 25 (Dahech et al, 2022).

2.2. Répartition des NO_2 en dehors du confinement par type de temps

Par un temps stable, deux clusters sont identifiés, un à l'ouest à l'avenue d'Italie et l'autre au sud le long du boulevard périphérique et Avenue de la porte d'Ivry. Ces clusters abritent des concentrations allant jusqu'à $190 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Entre le boulevard des Maréchaux et avenue de la Porte d'Ivry ainsi que dans la rue Tolbiac, les concentrations dépassent $160 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Il s'agit presque des mêmes « points noirs » relevés pendant le confinement (fig.3). Les résultats issus des campagnes de mesures du NO_2 sont concordants avec ceux obtenus pour le bruit : ils confirment la corrélation entre le trafic routier et le niveau sonore d'une part et entre le premier et la pollution atmosphérique de l'autre. Potentiellement, à l'échelle de la zone d'étude, la pollution sonore diminue en s'éloignant des routes nationales comme le boulevard périphérique et les routes principales comme rue Tolbiac.

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

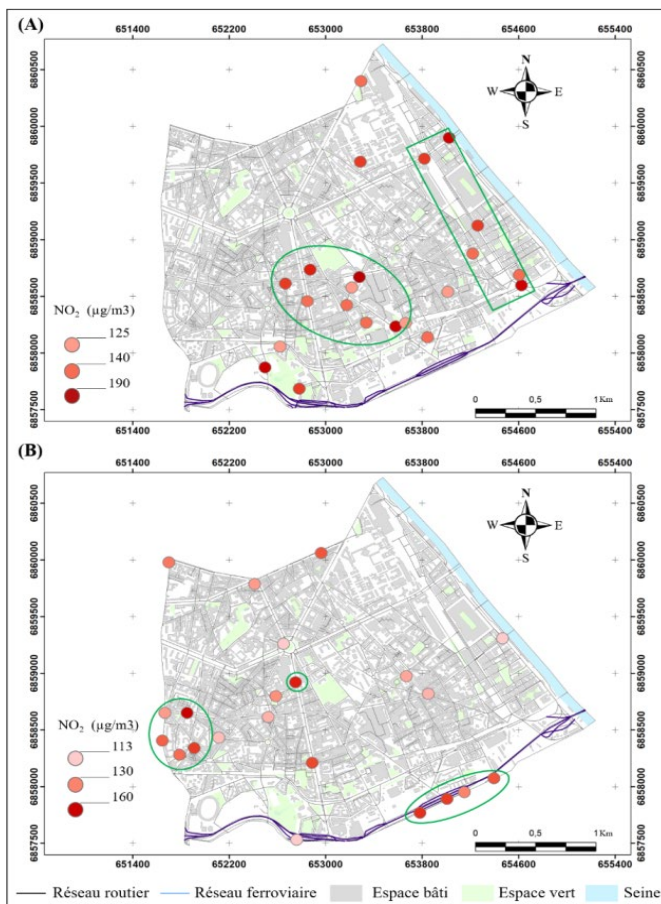


Figure 3. Répartition des concentrations en NO₂ au XIIIème arrondissement en 2020 et 2021 en dehors du confinement (A) par temps stable, (B) par temps perturbé (Mesures par capteurs Aeroqual 500, 25 campagnes de mesures (Dahech et *al*, 2022).

3. Variabilité spatio-temporelle des concentrations journalières de PM_{2.5}

3. 1. Répartition des PM_{2.5} pendant le confinement par temps stable et perturbé

Pendant le confinement, le percentile 75 des concentrations en PM_{2.5} atteint 19 µg/m³ pour le temps stable (fig4.A) et 17 µg/m³ pour un temps perturbé (fig4.B). Néanmoins, des valeurs dépassant la norme OMS (fig.4) sont observées par les deux types de temps le matin comme en fin de journée.

Nous avons enregistré des valeurs plus élevées par temps stable avec deux clusters : l'un à l'est, entre la rue des Grands Moulins et l'avenue de France, et l'autre au milieu du XIIIème arrondissement, au niveau rue de Tolbiac, rue Château des Rentiers, rue de Patay. Ces clusters ont des concentrations allant jusqu'à 35 µg/m³. En effet, le long de l'Avenue de France et à la jonction de la Rue Tolbiac, des concentrations maximales ont été enregistrées près des bouches d'aération du métro et notamment à proximité des chantiers de constructions.

En revanche, lorsque le temps était perturbé, le percentile 75 a légèrement baissé. Les fortes concentrations variaient de 17 µg/m³ à 30 µg/m³. Elles sont réparties sur tout l'arrondissement. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées principalement au quai de Panhard et Levassor, au Boulevard du Générale d'Armé Jean Simon, à la jonction entre rue Tolbiac et Avenue de France (fig. 4B). La fréquence d'obtention de concentrations supérieures à 20 µg/m³ était largement plus faible par temps perturbé.

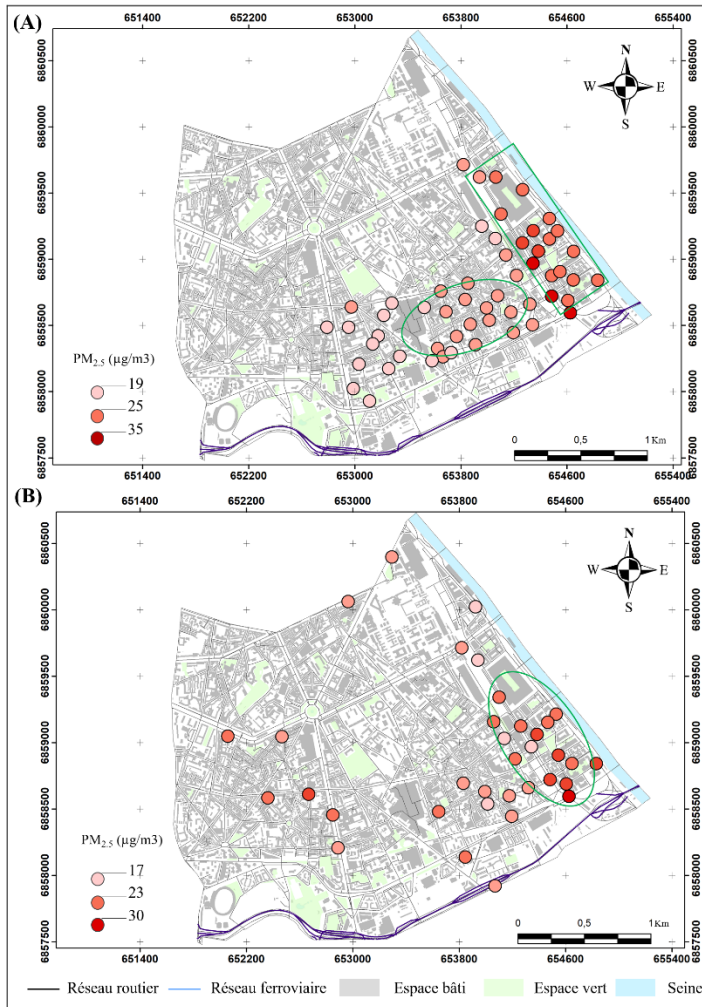


Figure 4. Répartition des concentrations en $PM_{2.5}$ au XIIIème arrondissement en 2020 pendant le confinement (A) par temps stable, (B) par temps perturbé (Mesures par capteurs Aeroqual 500, 25 campagnes de mesures).

3. 2 Répartition des $PM_{2.5}$ en dehors du confinement par temps stable et perturbé

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

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

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

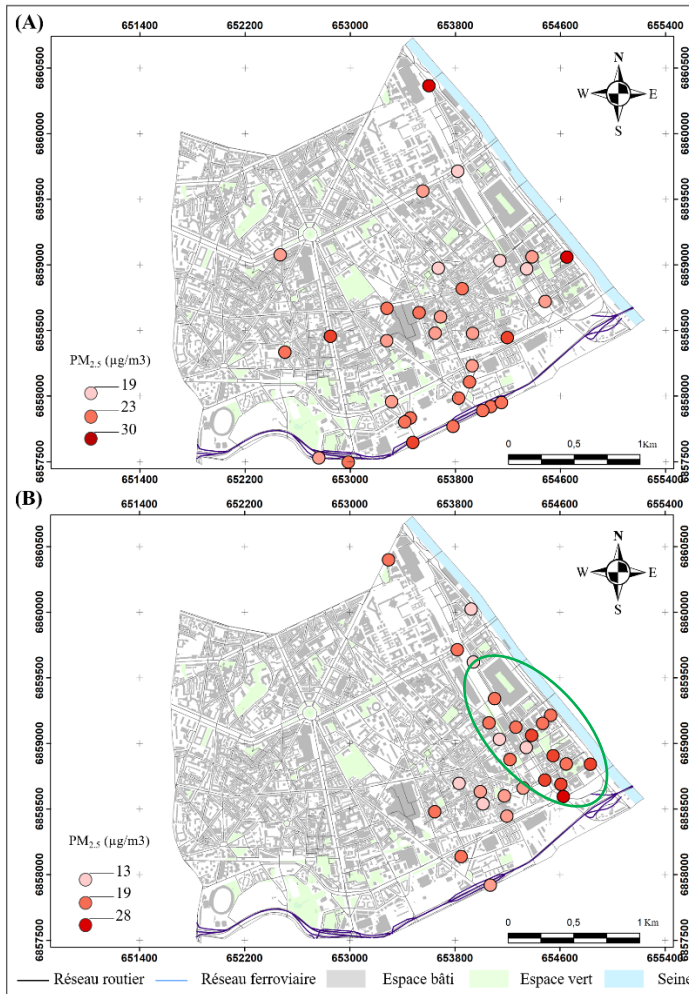


Figure 5. Répartition des concentrations en PM_{2.5} au XIII^{ème} arrondissement en 2020 pendant le confinement (A) par temps stable, (B) par temps perturbé (Mesures par capteurs Aeroqual 500, 25 campagnes de mesures).

Conclusion

L'étude de cas du XIII^{ème} arrondissement à Paris pendant le deuxième confinement est représentative de ce qui s'est passé à l'échelle de Paris, elle signale des valeurs de PM_{2.5} et de NO₂ relativement élevées qui pourraient dépasser les valeurs recommandées par l'OMS. Nos mesures demeurent ponctuelles dans le temps et ne permettent pas de les comparer aux normes journalières de l'OMS. Nous avons conclu d'après les mesures de terrain que la probabilité d'avoir des fortes concentrations de NO₂ par temps stable est supérieure à celui perturbé en période de confinement. Des valeurs qui dépassent 250 µg/m³ sont enregistrées principalement dans trois endroits : la zone comprise entre rue Tolbiac et rue national, à rue de Chevaleret et au boulevard Périphérique. En dehors du confinement nous n'avons pas enregistré des valeurs supérieures aux norme OMS par temps perturbé. Durant le deuxième confinement nous avons enregistré pour les PM_{2.5} des concentrations supérieures à 32 µg/m³ par temps radiatif dans l'Avenue de France, près des chantiers de construction. Par Temps perturbé les concentrations des PM_{2.5} baissent à l'exception de certains sites proches des bouches d'aérations des métros et des chantiers de constructions. Les valeurs dépassant le percentile 75 deviennent plus dispersées dans l'espace. En dehors du confinement le niveau de PM_{2.5} n'a pas beaucoup changé. Toutefois de nouveaux clusters apparaissent au boulevard périphérique, avenue d'Italie et quai d'Austerlitz où le trafic routier devient plus congestionné.

Bibliographie

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

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

Dahech, S. ; Abdmouleh , M.A. ; Lagmiri, S. Spatio temporal Variation of Air Quality (PM and NO₂) in Southern Paris during COVID-19 Lockdown Periods. *Atmosphere*, 2022, vol. 13, no 2, p. 289. <https://doi.org/10.3390/atmos13020289>.

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

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

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

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

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

TOPOCLIMAT DE LA RÉGION DE ZAHLE (LIBAN ORIENTAL)

Rabih ZEIN AL DINE¹, Salem DAHECH².

¹ Université de Paris, laboratoire PRODIG, UMR 8586, rabihzeineddin@hotmail.com

² Université de Paris, laboratoire PRODIG, UMR 8586, salemdahech@gmail.com

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

Mots-clés : Zahlé, brises thermiques, topoclimat

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

Key words: Zahle, thermal breezes, topoclimate

Introduction

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

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

règne : l'anticyclone subtropical couvre toute la région, l'air est chaud, subsident et stable (Blanchet., 1979). Ces conditions atmosphériques estivales stables sont idéales pour l'apparition des brises thermiques.

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

Cadre de l'étude

Le caza¹ de Zahlé couvre 425 km², doté comme le Liban par un climat typiquement méditerranéen avec une présence de deux périodes bien déterminées : une période sèche et chaude qui prédomine du mois de juin au mois de septembre, et une période humide et douce d'octobre jusqu'au mois de mai (Figure 1).

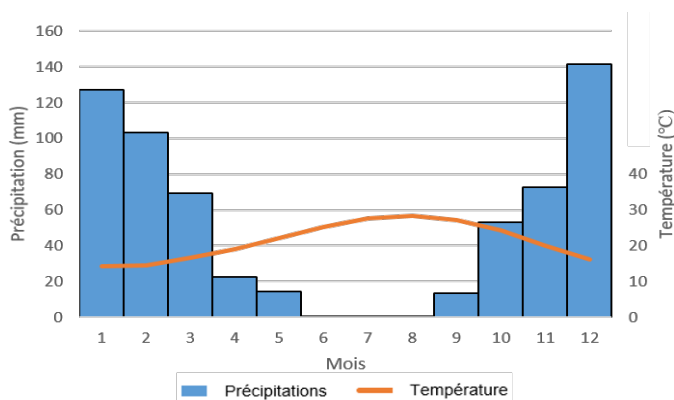


Figure 1. Diagramme ombrothermique entre 1995 et 2015. Source : données météorologiques de la station de l'aéroport de Beyrouth.

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

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

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

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

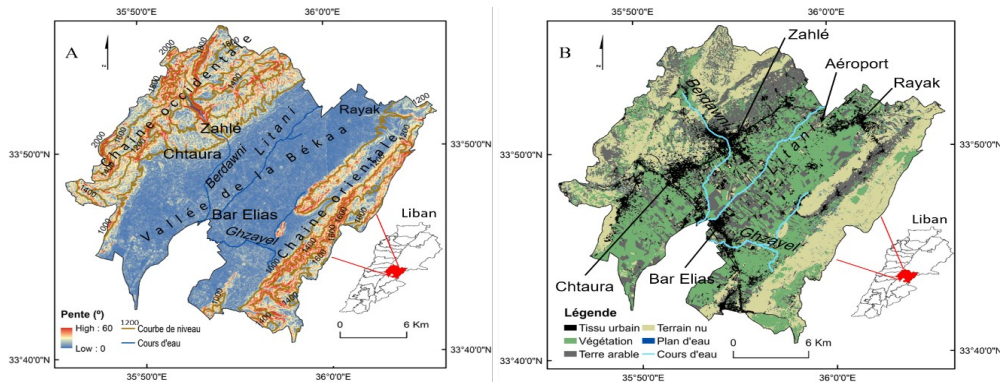


Figure 2. A : topographie, source des données : image SRTM du Liban 2004, projection stéréographique; B : occupation du sol, source des données : image landsat 8 datée de 2017, projection stéréographique.

Données et méthodes

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

Les données des stations fixes

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

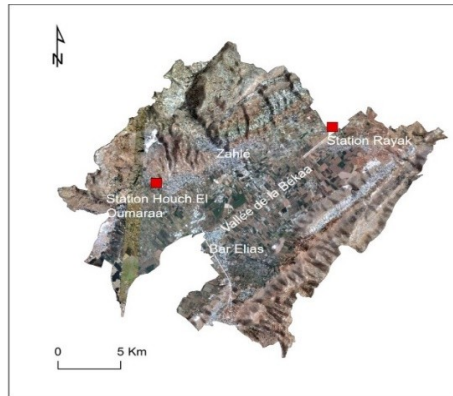


Figure 3. Localisation des stations météorologiques fixes dans la zone de l'étude

Résultats

Brises thermiques

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

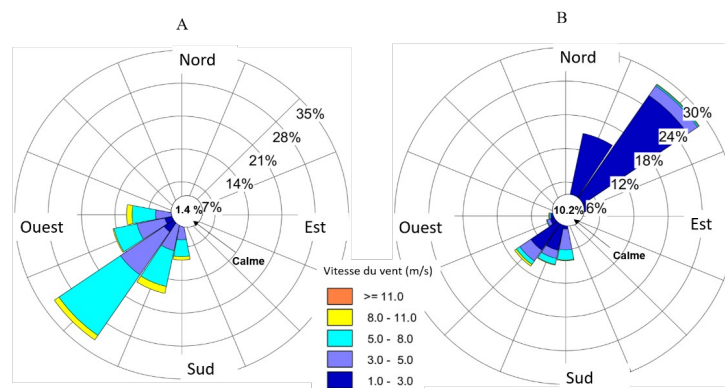


Figure 4. Roses estivales des du vent par tranches de vitesse à Rayak le jour (TU +2 : 8, 11, 14, 16, 17, 18 h, A) et la nuit (20, 21, 22, 23, 2, 3, 5 h, B). Données horaires de la station météorologique de Rayak entre 1994 et 2009, source : NOAA

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

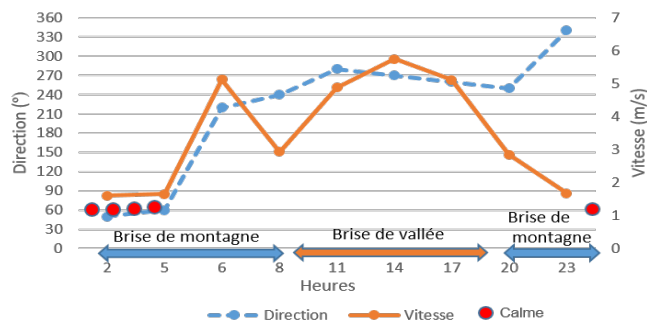


Figure 5. Anémogramme montrant l'alternance entre brise de montagne et brise de vallée à Rayak, données horaires (TU+2) de la station météorologique de Rayak en été entre 1994 et 2009, directions dominantes (mode), vitesses et directions moyennes, heures locales, source : NOAA

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

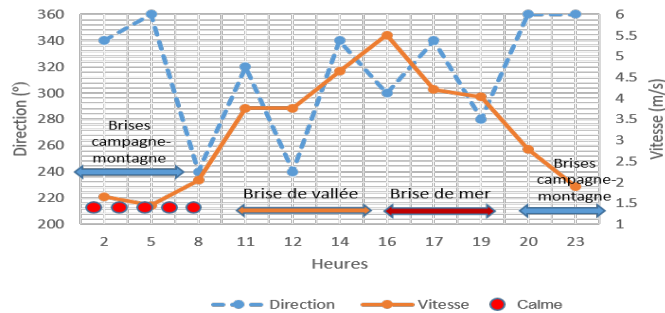


Figure 6. Anémogramme montrant l'alternance entre les brises vallée / mer durant la journée et les brises campagne / montagne durant la nuit à Houch El Oumaraa en été (données horaires de la station de Houch El Oumaraa de 1994 à 2021, TU +2, directions dominantes (mode), vitesses moyennes, source : NOAA)

Conclusion

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

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

Bibliographie

- Beltrando G., Chemery L., 1995: Dictionnaire du climat. Paris, Larousse, 344 p.
- Blanchet G., 1976 : Le temps au Liban, approche d'une climatologie synoptique. Thèse de 3ème cycle, Lyon. T. 1 : 477 p.
- Carrega P., 1994: Analyse spatiale quantitative et appliquée. Topoclimatologie et habitat. Revue de Géographie du Laboratoire d'Analyse Spatiale Raoul Blanchard, UFR Espaces & Cultures - Université de Nice-Sofia Antipolis **35** et **36**, 408 p.
- Carrega P., 2013 : Le climat urbain de Nice en milieu géographique contrasté : synthèse par approche inductive. Climatologie, Association internationale de climatologie.
- Carrega P. et Martin R., 2017 : Le climat urbain de Nice, dans un contexte méditerranéen. XXXème colloque de l'association internationale de climatologie. Sfax 2017.
- Dahech S., 2007 : Le vent à Sfax (Tunisie), impacts sur le climat et la pollution atmosphérique (Thèse de Doctorat). Université Paris VII, France.
- Dahech S., 2014 : Impact de la brise de mer sur le confort thermique au Maghreb oriental durant la saison chaude. Cybergeographie : European Journal of Geography [En ligne]. Environnement, Nature, Paysage, document 695, mis en ligne le 02 décembre 2014. URL : <http://cybergeographie.revues.org/26555> ; DOI : 10.4000/cybergeographie.26555
- Michelot N. et Carrega P., 2014 : Topoclimatologie et pollution de l'air dans les Alpes-Maritimes : mécanismes et conséquences en images. Echo Géo, 29.
- Simpson J. E., 1994: Sea breeze and local winds. Cambridge University Press, 234 p.
- Traboulsi M., 1981 : Le climat de la Syrie, exemple de dégradation vers l'aride du climat méditerranéen. Géographie. Université de Lyon II, 1981. Français.
- Sites Web : www.ncdc.noaa.gov

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

Souad LAGMIRI¹ et Salem DAHECH²

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

Correspondance : ¹souad.laqmiri@gmail.com ; ²salem.dahech@gmail.com

Résumé : Ce travail détermine les types de temps associés aux jours de dépassement de la norme préconisée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour les PM₁₀. L'analyse s'est basée sur les champs de pression au niveau de la mer, le géopotential 500 hPa et les variables climatiques enregistrées par la station de « Cormeilles en Vexin ». Les concentrations horaires en PM₁₀ ont été fournies par AIRPARIF pour la période 2009-2020. La quasi-totalité des dépassements de la norme OMS ont été enregistrés entre novembre et avril. Trois types de temps distincts ont été déterminés pendant cette période. La grande partie des épisodes de pollution était associée aux types anticycloniques (2 sur 3) marqués par des inversions thermiques la nuit et le matin. Par ailleurs, lors d'un type de temps dépressionnaire, les concentrations étaient plutôt liées au chauffage urbain pendant le grand froid.

Mots clés : PM₁₀, pollution de l'air, types de temps, Cergy-Pontoise

Abstract : This work determines the types of weather associated with days when the standard recommended by the World Health Organization (WHO) for PM₁₀ is exceeded. The analysis was based on the pressure fields at sea level, the 500 hPa geopotential and the climatic variables recorded by the "Cormeilles en Vexin" station. Hourly PM₁₀ concentrations were provided by AIRPARIF for the period 2009-2021. Almost all of the exceedances of the WHO standard were recorded between November and April. Three distinct types of weather have been determined during this period. Most of the pollution episodes were associated with anticyclonic types (2 out of 3) marked by thermal inversions at night and in the morning. Moreover, during a type of low pressure weather, the concentrations were more related to district heating during the extreme cold.

Key words : PM₁₀, air pollution, weather Types, Cergy-Pontoise

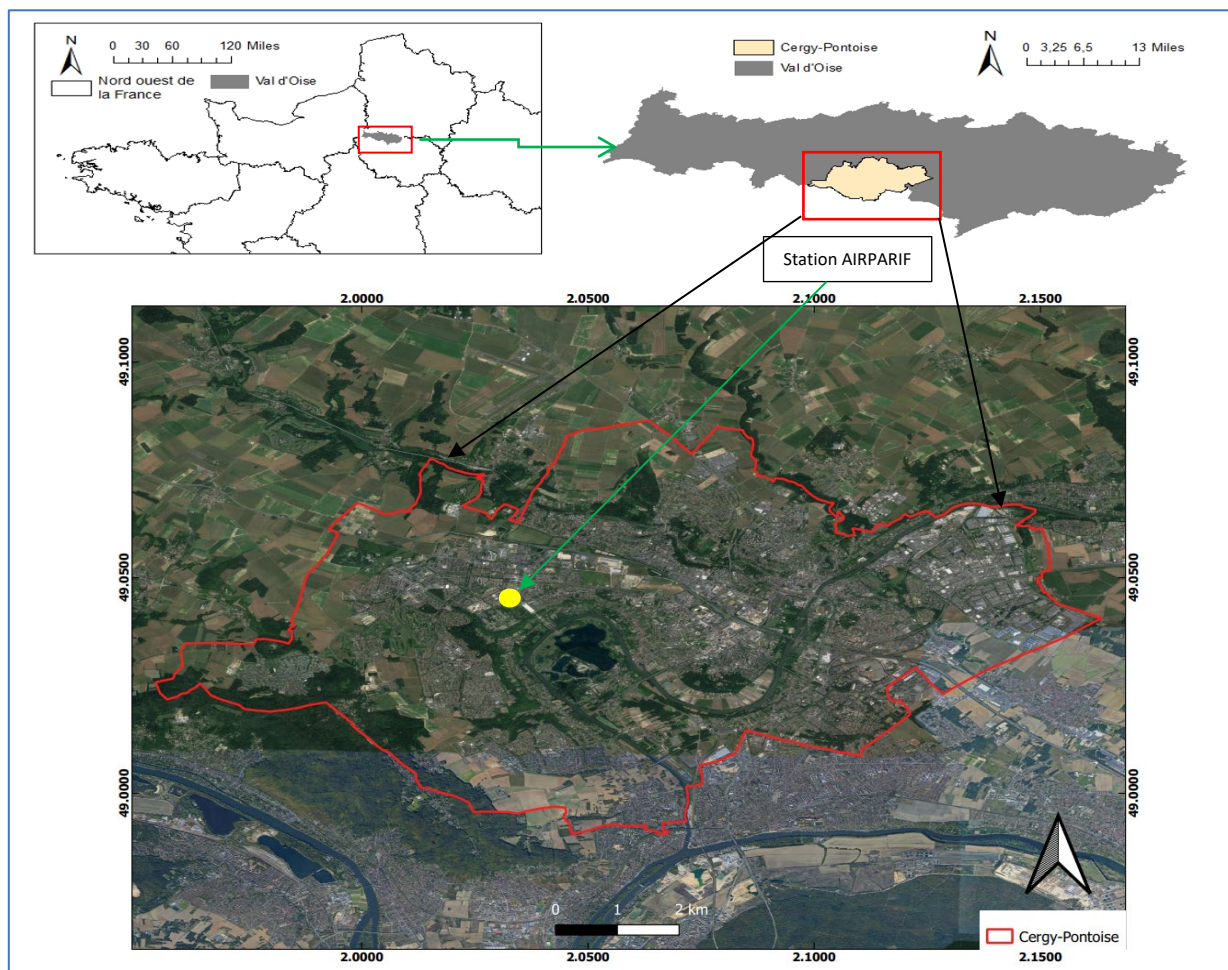
Introduction :

La pollution de l'air est depuis longtemps, une préoccupation des pouvoirs publics. En France, bien que l'application d'une législation stricte ait permis de réduire significativement certains polluants, en Ile-de-France les particules PM₁₀ restent l'un des polluants problématiques (AIRPARIF, 2019). La Communauté d'Agglomération de Cergy Pontoise (CACP), depuis sa création dans la grande banlieue parisienne, se confronte à des journées de pollution aux PM₁₀. En moyenne 16,5 jours/an de dépassement des normes OMS, sont enregistrés entre 2009 et 2020. Bien que les activités anthropiques affectent de manière significative les concentrations élevées des PM₁₀, les paramètres météorologiques, notamment le vent et la pression atmosphérique, ont également un impact sur les niveaux de pollution de l'air (Li et al., 2015 ; Rimetz-Planchon et al., 2008; Rodriguez et al., 2001; Triantafyllou 2000; Querol et al., 2004). Des recherches approfondies montrent que la connaissance de la relation entre pollution et type de temps s'améliore lorsque l'approche utilisée examine les variables météorologiques dans un ensemble plutôt que de les isoler dans une analyse une à une (McGregor 1999). Dans le présent travail nous mettons l'accent sur les types de temps associés aux fortes concentrations en PM₁₀ de 2009 à 2020.

Zone d'étude

L'agglomération de Cergy-Pontoise, située à 49°02'20" N ; 2°04'37" E, est à 30 kilomètres au nord-ouest de Paris sur l'axe reliant Paris à Rouen. Sa superficie de 84,20 km² est à peu près équivalente à celle de Paris intra-muros. Localisée dans le département du Val d'Oise (95), elle est aux portes du Parc naturel régional du Vexin. L'Oise traverse le territoire sur environ 18 km en passant au cœur de Cergy. Elle irrigue une base de loisirs de 250 ha. La CACP est située dans un bassin sous l'influence, d'un climat tempéré océanique de transition.

Carte 1 : Localisation de l'agglomération de Cergy-Pontoise et la station référentielle de mesure de pollution (AIRPARIF)



Données et méthodes

Les données horaires sur les PM₁₀, fournies par Airparif de 2009 à 2020, sont utilisées pour calculer les moyennes journalières. Les données météorologiques de surface ont été utilisées pour des analyses conjointes. Elles couvrent la même période et sont issues de la station située à Cormeilles en Vexin, la plus proche de la zone d'étude (à 5,6 km de la station Airparif). Les séquences de pollution aux PM₁₀ ont été identifiées et classées suivant leurs durées en : cas isolés, courts et longs épisodes. Un traitement préalable a été réalisé pour identifier les concentrations des PM₁₀ qui dépassent les normes édictées par l'OMS (45 µg/m³ en moyenne journalière). Pour déterminer les types de temps associés aux épisodes de pollution au PM₁₀, des cartes synoptiques archivées dans le site de la météorologie allemande « Wetterzentrale.de » et les bulletins quotidiens de renseignements fournis par Météo-France ont été consultés. Une classification des types de temps est appliquée selon un regroupement

des séquences qui présentent des conditions météorologiques proches (vent, température, humidité, visibilité, état du ciel, configuration isobarique au sol et à 500hPa).

Résultats

Étude fréquentielle des jours de dépassement des normes OMS

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

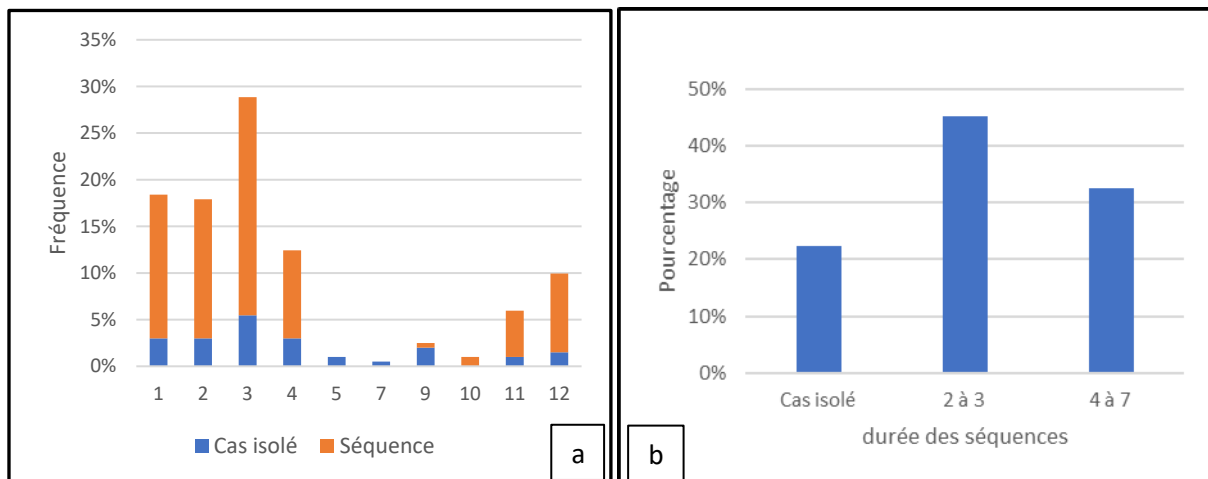


Figure 1 : Répartition mensuelle des séquences de pollution aux PM₁₀ (a) ; persistance de pollution en nombre de jours (b) (données PM₁₀ de 2009-2020 à partir de la station AIRPARIF)

Types de temps associés aux épisodes de pollution au PM₁₀

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

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

Premier type (T1) : C'est le type le plus dominant. Il est observé en hiver quand l'anticyclone des Açores déborde en surface sur l'Europe centrale et de l'est et surplombé par une dorsale étendue sur toute la France en altitude (géopotential 500 hPa). La France, sur le flanc ouest de cet anticyclone, ou sud

quand il est centré sur les îles britanniques, est affectée par une masse d'air venant du sud-est en surface alors qu'un flux sud-ouest domine en altitude. Le ciel est clair car l'air est subsident (la pression au sol avoisine 1025 hPa). Le vent est faible (2-3m/s) avec des températures au-dessus des normales de saison (+3 °C). La formation des brouillards est expliquée par l'inversion thermique persistant sur plusieurs heures.

Deuxième type (T2) : Il se produit quand la France est coincée entre deux talwegs séparés par une dorsale qui monte jusqu'au pays Scandinaves en surface aussi bien qu'en altitude. En surface, un flux dominant d'est à nord-est est enregistré. L'extension de l'anticyclone sibérien à l'ouest (1022hPa) favorise l'infiltration d'un air très froid et sec sur toute l'Europe d'où la baisse de la température qui descend parfois jusqu'à -12°C. Parallèlement l'insolation avoisine 430Wh/m² et le vent est modéré (3-7m/s). Un temps ensoleillé mais très froid augmente le recours massif au chauffage.

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

Tableau 1: Valeurs moyennes des concentrations des PM₁₀ et nombre de jours appartenant aux trois types des temps

Type des temps	Nombre des jours	Moyenne de PM ₁₀	Max. de PM ₁₀	Min. de PM ₁₀
T1	142	62	162	47
T2	19	55	78	46
T3	37	54	74	45

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

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

Conclusion

Le classement des jours de dépassement en catégories homogènes a permis de comprendre la relation complexe entre la pollution et les conditions météorologiques. Les résultats révèlent que, outre les émissions, la stabilité de l'atmosphère est le principal facteur explicatif de l'accumulation des PM₁₀ près de la surface. Cela concorde avec d'autres recherches (Xiaolan et al., 2019 ; Qianhui et al., 2020; Xu et al., 2011). Toutefois, en région parisienne un temps froid, au début du printemps avec un vent modéré peut expliquer certains épisodes de forte pollution au PM₁₀ car, durant cette saison l'utilisation du chauffage s'ajoute à la forte activité pollinique mesurée également dans la fraction des PM₁₀. Un réseau de 16 stations fixes de mesures de la qualité de l'air de type « Ecosmart » est mis en place à

partir de mars 2022 dans l'agglomération de Cergy Pontoise pour mieux observer la variationspatiotemporelle des PM₁₀ à échelle fine.

Bibliographie

Airparif., 2019. Bilan de la qualité de l'air Année 2018. Surveillance et information en Île-de-France. 98 p.

Li, H. , Guo, B. , Han, M. , Tian, M. and Zhang, J. (2015) Particulate Matters Pollution Characteristic and the Correlation between PM (PM_{2.5}, PM₁₀) and Meteorological Factors during the Summer in Shijiazhuang. *Journal of Environmental Protection*, **6**, 457-463. doi: 10.4236/jep.2015.65044.

McGregor GR. Winter ischaemic heart disease deaths in Birmingham, United Kingdom. A synoptic climatological analysis. *Clim Res* 13:17–**31**. <https://doi.org/10.3354/cr013017>, 1999.

Qianhui Li, Bingui Wu, Jingle Liu, Hongsheng Zhang , Xuhui Cai , Yu Song. Characteristics of the atmospheric boundary layer and its relation with PM_{2.5} during haze episodes in winter in the North China Plain. *Atmospheric Environment*, Volume **223**, 15 February 2020, 117265 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117265>

Querol, X., Alastuey, A., et al., 2004. Levels of particulate matter in rural, urban and industrial sites in Spain. *The Science of Total Environment* **334**–335, 359–376.

Rimetz-Planchon J, Perdrix Esperanza, Sobanska Sophie, Bremard Claude. PM₁₀ air quality variations in an urbanized and industrialized harbor. *Atmospheric Environment* **42** (2008) 7274–7283. Doi:10.1016/j.atmosenv.2008.07.005

Rodriguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Kallos, G., Kakaliagou, O., 2001. Saharan dust contributions to PM₁₀ and TSP levels in Southern and Eastern Spain. *Atmospheric Environment* **35**, 2433–2447.

Triantafyllou. PM₁₀ pollution episodes as a function of synoptic climatology in a mountainous industrial area. *Environmental Pollution*. Volume **112**, Issue 3, May 2001, Pages 491-500. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00131-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00131-7)

VIGNEAU J.P. Géoclimatologie. Ellipses. 334 p. 2000

Xiaolan Li, Xiao-Ming Hu, Yanjun Ma, Yangfeng Wang, Liguang Li, Ziqi Zhao. Impact of planetary boundary layer structure on the formation and evolution of air-pollution episodes in Shenyang, Northeast China. *Atmospheric Environment*. Volume **214**, 1 October 2019, 116850 <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.116850>

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

ANTHROPOGENIC EMISSIONS, AEROSOL POLLUTION AND HEALTH IN WESTERN AFRICA

C. LIOUSSE¹, V. YOBOUE², S. KEITA^{1,2}, T. DOUMBIA¹, J.F. LEON¹, J. ADON¹, S. GNAMIEN², E. N'DATCHOH TOURE², A. BAEZA-SQUIBAN³, I. ANNESI-MAESANO⁴, S. BECERRA⁵, M. BELLAND⁵, A. AKPO⁶, J. DJOSSOU⁶, K. KOUAME⁷, M. OUAFO⁸, E. ASSAMOI², J. BAHINO², A. BONNASSIEUX⁵, H. CACHIER¹, M. DIAS-ALVES¹, M. DOUMBIA², C. GALY-LACAUX¹, E. GARDRAT¹, C. GRANIER¹, G. OSSOHO², L. ROBLOU¹, F. SOLMON¹ and H. XU⁹

¹Laboratoire d'Aérodologie, CNRS/UPS, Toulouse, France, lioc@aero.obs-mip.fr

²Laboratoire des Sciences de la Matière, de l'Environnement et de l'énergie Solaire, Université Félix Houphouët-Boigny, Abidjan, Côte d'Ivoire, yobouev@hotmail.com

³Université Paris Diderot, Unité de Biologie Fonctionnelle et Adaptative-RMCX, CNRS, UMR 8251, Paris, France, armelle.baeza@u-paris.fr

⁴IDESP, Université de Montpellier, France, isabella.annesi-maesano@inserm.fr

⁵GET, CNRS, Toulouse, France, sylvia.becerra@get.omp.eu

⁶Laboratoire de Physique du Rayonnement, Université d'Abomey-Calavi, Abomey-Calavi, Benin, akpoarist@yahoo.fr

⁷Institut Pasteur, Abidjan, Côte d'Ivoire, kouadiokouame@yahoo.com

⁸Université de Douala, Douala, Cameroun, ouafoleumberoumy@gmail.com

⁹Xi'an Jiaotong University, China, xuhongmei@xjtu.edu.cn

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

Keywords: anthropogenic emissions, aerosol pollution, health, mitigation

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

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

Introduction

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

on West Africa with local studies in Bamako (Mali), Dakar (Senegal), Abidjan (Ivory Coast), Korhogo (Ivory Coast), and Cotonou (Benin) are discussed in this paper.

1. Anthropogenic emissions

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

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

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

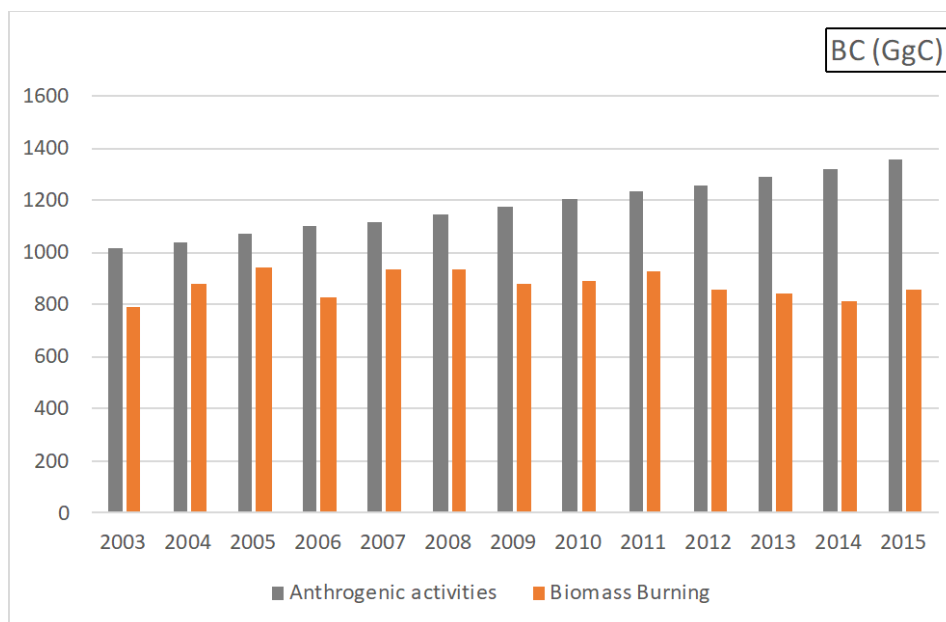


Figure 1. Black carbon (BC) emissions in Africa.

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

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

2. Aerosol pollution

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

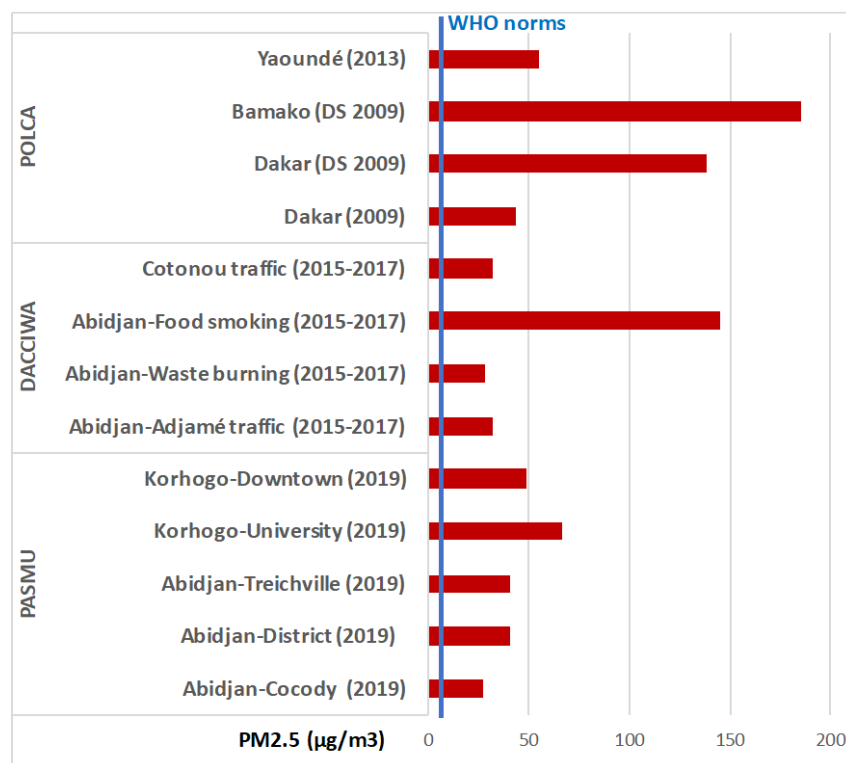


Figure 2. Mean annual PM_{2.5} concentrations in different African cities. The blue line represents the recommended WHO standard. DS is for dry season.

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

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

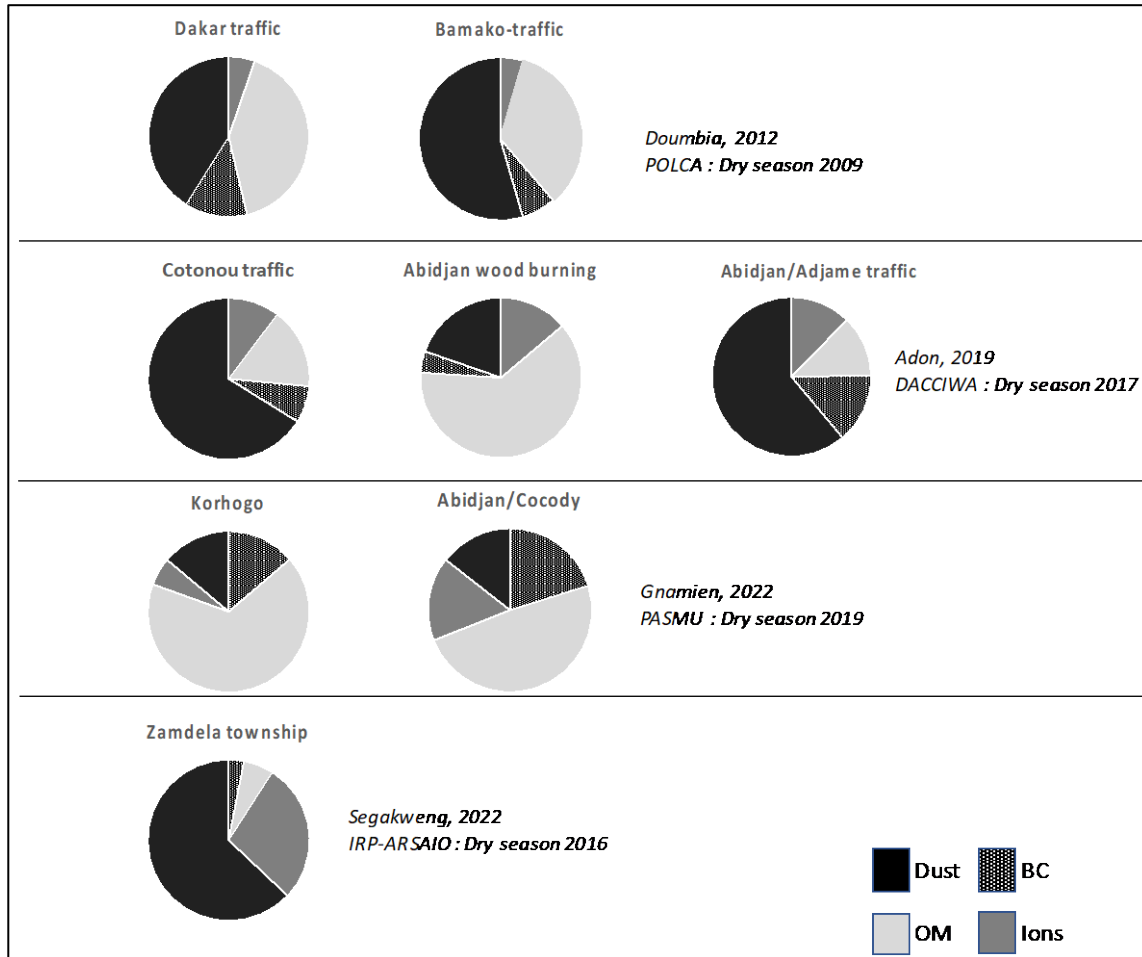


Figure 3. Aerosol chemical composition in different African cities (BC = Black Carbon, OM = Organic matter).

3. Health effects due to air pollution

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

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

3.2. Aerosol and premature deaths

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

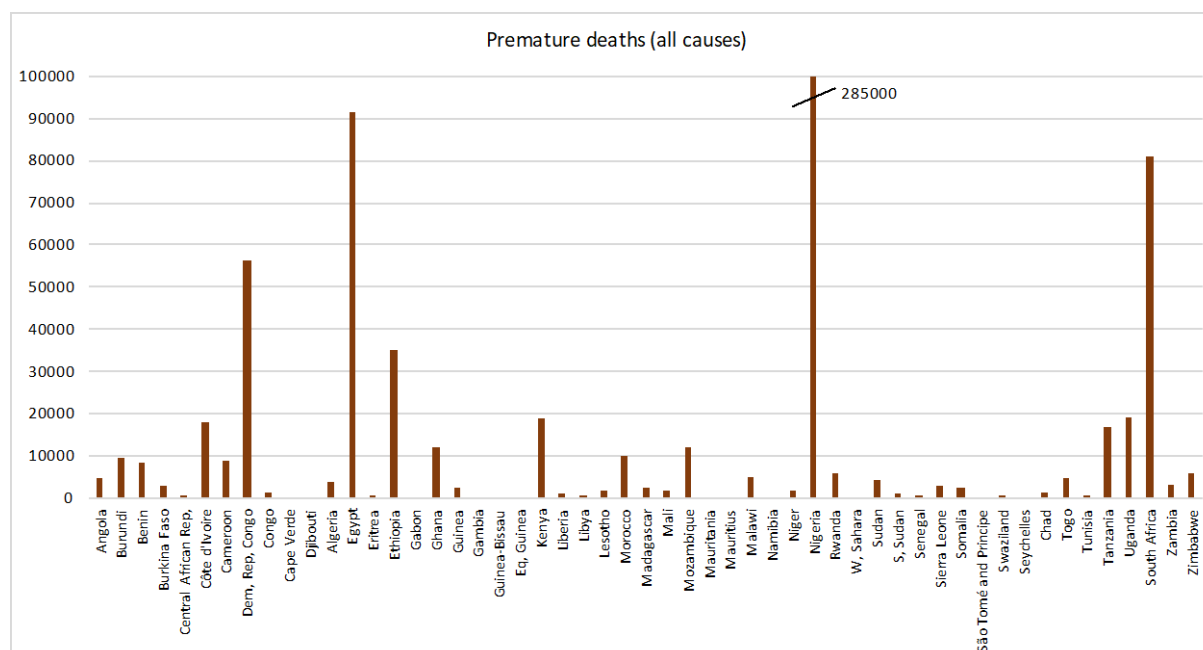


Figure 4. Simulated premature deaths due to fine particles for African countries in January 2015.

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

Conclusion

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

References

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

- Adon J., 2019. *Impact sur la santé de l'aérosol de combustion pour différentes sources urbaines en Afrique de l'Ouest : caractérisation physico-chimique et toxicologique*, Doctoral thesis, Toulouse University, France.
- Anenberg S. C., Talgo K., Arunachalam S., Dolwick P., Jang C., and West J. J., 2011. Impacts of global, regional, and sectoral black carbon emission reductions on surface air quality and human mortality, *Atmos. Chem. Phys.*, **11**, 7253–7267, <https://doi.org/10.5194/acp-11-7253-2011>.
- Bahino J., Yoboué V., Galy-Lacaux C., Adon M., Akpo A., Keita S., Liousse C., Gardrat E., Chiron C., Ossouhou M., Gnamien S., and Djossou J., 2018. A pilot study of gaseous pollutants' measurement (NO₂, SO₂, NH₃, HNO₃ and O₃) in Abidjan, Côte d'Ivoire: contribution to an overview of gaseous pollution in African cities, *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 5173–5198, <https://doi.org/10.5194/acp-18-5173-2018>.
- Becerra S., Belland M., Bonnassieux A., and Liousse C., 2020. Living with" air pollution in Abidjan (Cote d'Ivoire): a study of risk culture and silent suffering, *Health, Risk & Society*. doi: 10.1080/13698575.2020.1721443.
- Djossou J., Léon J.F., Akpo A. B., Liousse C., Yoboué V., Bedou M., Bodjrenou M., Chiron C., Galy-Lacaux C., Gardrat E., Abbey M., Keita S., Bahino J., Touré N'Datchoh E., Ossouhou M., and Awanou C. N., 2018. Mass concentration, optical depth and carbon composition of particulate matter in the major southern West African cities of Cotonou (Benin) and Abidjan (Côte d'Ivoire), *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 6275–6291, <https://doi.org/10.5194/acp-18-6275-2018>.
- Doumbia T., Liousse C., Galy-Lacaux C., Seydi Ndiaye A., Diop B., Ouafou M., Assamoi E., Gardrat E., Castera P., Rosset R., Akpo A., and Sigha L., 2012. Real time black carbon measurements in West and Central Africa urban sites, *Atmos. Env.*, **54**, 529-537, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.02.005>.
- Doumbia T., 2012. *Caractérisation physico-chimique de la pollution atmosphérique en Afrique de l'Ouest et étude d'impact sur la santé*, Doctoral thesis, Toulouse University, France.
- Doumbia T., Liousse C., Keita S., Granier L., Granier C., Elvidge C.D., and Law K., 2018. Flaring emissions in Africa: distribution, evolution and comparison with current inventories, *Atmos. Env.*, **199**, 423-434, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.11.006>.
- Gnamien S., Yoboué V., Liousse C., Ossouhou M., Keita S., Bahino J., Siélé S. and Diaby L., 2020. Particulate Pollution in Korhogo and Abidjan (Cote d'Ivoire) during the Dry Season, *Aerosol Air Qual. Res.*, <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.05.0201>.
- Gnamien S., 2022. *Caractérisation de la pollution particulaire à Abidjan et Korhogo en lien avec la santé des populations*, Doctoral thesis, UFHB, Cote d'Ivoire.
- Keita S., Liousse C., Yoboué V., Dominutti P., Guinot B., Assamoi E.-M., Borbon A., Haslett S. L., Bouvier L., Colomb A., Coe H., Akpo A., Adon J., Bahino J., Doumbia M., Djossou J., Galy-Lacaux C., Gardrat E., Gnamien S., Léon J. F., Ossouhou M., N'Datchoh E. T., and Roblou L., 2018. Particle and VOC emission factor measurements for anthropogenic sources in West Africa, *Atmos. Chem. Phys.*, **18**, 7691–7708, <https://doi.org/10.5194/acp-18-7691-2018>.
- Keita S., Liousse C., Assamoi E.M., Doumbia T., N'Datchoh Touré E., Gnamien S., Elguindi N., Granier C., and Yoboué V., 2021. African Anthropogenic Emissions Inventory for gases and particles from 1990 to 2015, *Earth Syst. Sci. Data*, **13**, 3691–3705, 202, <https://doi.org/10.5194/essd-13-3691-2021>.
- Liousse C., Assamoi E., Criqui P., Granier C. and Rosset R., 2014. African combustion emission explosive growth from 2005 to 2030, *Environ. Res. Lett.* 9 035003 [doi:10.1088/1748-9326/9/3/035003](https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/035003).
- Ouafou M., 2017. *Aérosols en zone rurale et urbaine*, Doctoral thesis, Yaoundé University, Cameroon.
- Segakweng K., 2022. *Size-revolved chemical characterisation of aerosols on low-income settlements in South Africa and their health-related effects*, Doctoral thesis, North-West University, South Africa.
- Val S., Liousse C., Doumbia T., Galy-Lacaux C., Cachier H., Marchand N., Badel A., Gardrat E., Sylvestre A. and Baeza-Squiban A., 2013. Physico-chemical characterization of African urban aerosols (Bamako in Mali and Dakar in Senegal) and their toxic effects in human bronchial epithelial cells: description of a worrying situation, *Particle and Fibre Toxicology*, **10** : 10, doi: 10.1186/1743-8977-10-10.

Acronyms:

AMMA: African Monsoon Multidisciplinary Analyses (2002-2009)

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

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

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

ECCAD: Emissions of atmospheric Compounds and Compilation of Ancillary Data

GEIA: Global Emission Initiatives (existing from 1990)

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

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

POLCA : Pollution des Capitales Africaines (2008-2011)

WHO: World Health Organization

RECENT WEATHER AND AIR POLLUTION CHANGES IN BRAZIL

**Francisco Jablinski CASTELHANO¹ , Ana Clara Neme PEDROSO² , Igor Cobelo FERREIRA³,
Weeberb J. REQUIA⁴**

¹ *Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brazil, francisco.castelhana@ufrn.br*

² *Fundação Getúlio Vargas, Brasília, Brazil, acneme507@gmail.com*

³ *Fundação Getúlio Vargas, Brasília, Brazil, cobelo.igor@gmail.com*

⁴ *Fundação Getúlio Vargas, Brasília, Brazil, weeberb.requia@fgv.br*

Abstract : Weather changes play an essential role in air quality levels due to the sensitivity of the air pollutants to weather conditions. In this study, we estimate the changes in ambient air pollution (CO, NO₂, SO₂, O₃, and PM_{2.5}) and weather variables (Temperature, Precipitation, Relative humidity, and Wind Speed) in Brazil between 2003 and 2018. We obtained air pollution concentrations on a 6-hour scale from the Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS)-Reanalysis and the meteorological data from the ERA-Interim model. Overall, ambient air pollution levels during the study period have decreased in most of the Brazilian states whereas meteorological variables indicate increases in temperature, relative humidity, and wind speed.

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

Résumé : Le changement climatique et les conditions météorologiques jouent un rôle essentiel sur la qualité de l'air. Dans cette étude, nous avons estimé les variations de la pollution de l'air (CO, NO₂, SO₂, O₃ et PM_{2.5}) et des paramètres météorologiques (température, précipitations, humidité relative et vitesse du vent) au Brésil entre 2003 et 2018. Les concentrations des polluants proviennent de la base de données CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) et les données météorologiques, du modèle ERA-Interim. Au cours de la période d'étude, la pollution de l'air a diminué dans la plupart des États brésiliens, tandis que des augmentations de température, d'humidité relative et de vitesse du vent sont observées.

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

Introduction

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

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

Several studies also highlighted that weather changes play an important role in air quality levels due to the sensitivity of some pollutants such as nitrogen dioxide (NO₂), sulphur dioxide (SO₂) among others, to weather dynamics. (Fernandes et al. 2021, Borge et al., 2019; Requia et al, 2020, Fang et al., 2013).

The literature also suggests an association between ozone (O₃), sunlight, and temperature. The pollutant genesis results from photochemical reactions between nitrogen oxides (NO_x) and

organic compounds. However, low humidity, low nebulosity, lightning flashes, high temperature, and low wind speed are also related to meteorological factors related to O₃ formation (Lu et al., 2019).

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

Our research focused its analysis on this gap, quantifying the average changes in weather factors (temperature, precipitation, relative humidity, and wind speed) and on ambient air pollutants (PM_{2.5}, carbon monoxide (CO), NO₂, O₃, and SO₂) for every state of Brazil.

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



Figure 1. States of Brazil

1.Data and Methods

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

The meteorological data were collected from the ERA-Interim model consisting of a global atmospheric reanalysis performed by the ECMWF. The meteorological dataset was also retrieved

at a temporal resolution of 6 hours and a spatial resolution of 12.5 km. As for the air pollution data, we calculated the daily means over the entire period of interest for each weather variable, then aggregated the data by the Brazilian state. We removed the weather values above the 95th percentile and aggregated both datasets into a daily scale to remove the effects from outliers.

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

2. Results

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

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

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

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

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

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

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

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

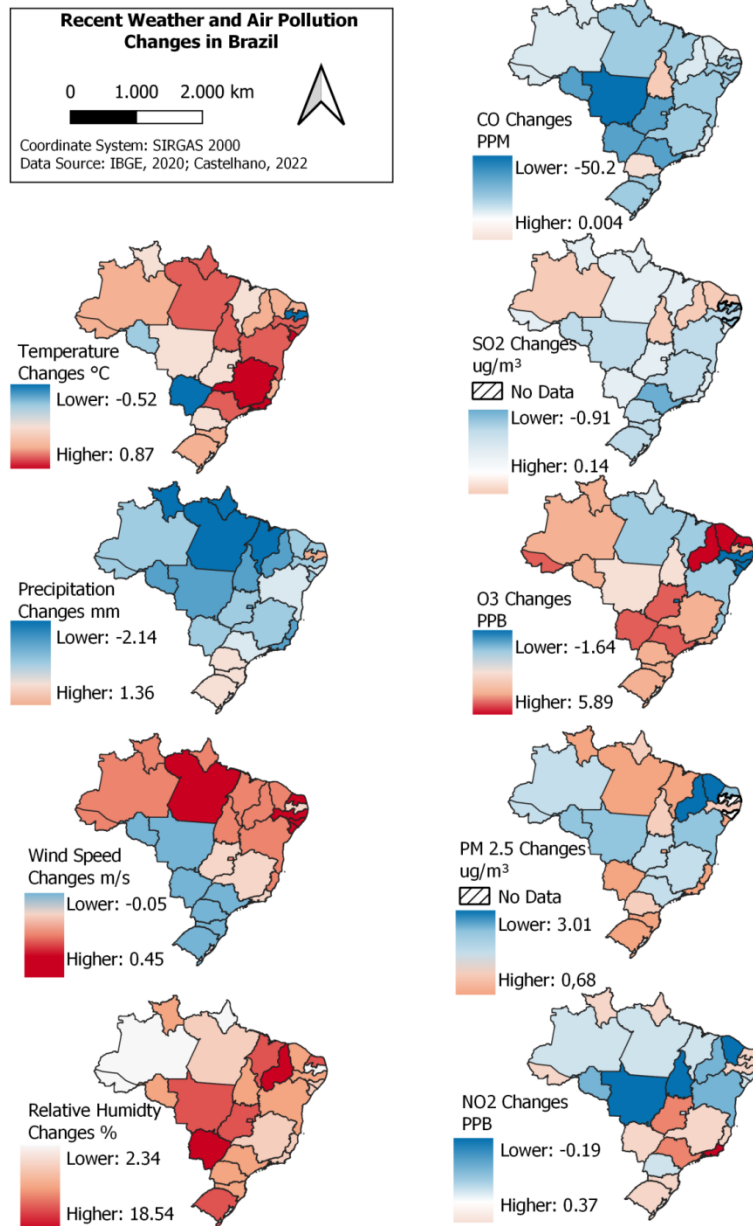


Figure 2. Recent Weather and Air Pollution Changes in Brazil

Concerning air pollutants, both CO and SO₂ have registered decreases in the majority of the states during the study period. CO registered an increase only at Paraná, in the South region (0.002 ppb) and the Tocantins in the North region (0.004 ppb). SO₂ registered increases only in five states, three of them in the Northeast region (Rio Grande do Norte, Ceará and Piauí), and the others in the North region (Amazonas and Tocantins).

PM 2.5 registered increases in fourteen states, with the peak at Roraima (northern region, 0.68 µg/m³) and Rio Grande do Sul (south region, 0.55 µg/m³). All states with decreases in precipitation registered increases on PM2.5.

The reduction of ambient air pollutants concentration was expected, specifically for CO, PM2.5, and SO₂. Indeed, the Brazilian government has been implementing a continuous program to

reduce traffic emissions since 1986. The Brazilian Motor Vehicle Air Pollution Control Program (PROCONVE) aims to reduce atmospheric contamination by setting emission standards at the country level, thereby inducing technological improvements in industrial processes and monitoring new vehicles and engines to reach the emission limits standardized. This program is based in the U.S. Program Low Emission Vehicle (LEV) from the California Air Resources Board (CARB) (Ribeiro et al., 2021; Saldiva, 2018).

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

NO₂ registered a similar pattern, with increases in fourteen states and decreases in thirteen. The majority of northern and northeastern states registered decreases with a peak of -0.19 ppb of average decrease on Tocantins (Northern region). On the other hand, South, Midwest, and Southeast states registered increases on this pollutant, with a peak of an average increase of 0.37 at Rio de Janeiro state (Southeast region).

The pollutant with the most registers of increases along the Brazilian states is the tropospheric ozone. Eighteen states registered increases in this pollutant, highlighting the northeast region with Rio Grande do Norte and Ceara reaching the highest values (5.89 ppb and 4.43 ppb respectively). The ozone results can be associated with an increase in temperature and decrease in precipitations faced by most of the Brazilian states since ground-level O₃ is formed through photochemical reactions in the atmosphere, involving NO_x and VOCs in the presence of sunlight.

Conclusion

Our study revealed that most of the ambient air pollution levels in Brazil during the period 2003-2018 have been decreasing in most of its states for CO and SO₂. Tropospheric ozone is been increasing in the majority of the states whereas PM_{2.5} and NO₂ for half of the states. Regionally, we identified that the southern states of Brazil (Paraná, Santa Catarina, and Rio Grande do Sul) are where most pollutants (O₃, PM_{2.5} and NO₂) are increased. At the same period, we also identified significant trends in meteorological factors. There has been an increase in temperature, relative humidity, and wind speed in every Brazilian region. Concerning temperature, the Southeast region registered the most intense increases, while the midwest registered increases in relative humidity and the Northeast region at wind speed levels.

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

Bibliography

Borge R., Requía W. J., Yagüe C., Jhun I. and Koutrakis P., 2019, Impact of weather changes on air quality and related mortality in Spain over a 25 year period [1993–2017], *Environment International*, **133**, 105272

Costa R. L., Baptista G.M.M., Gomes H.B., Silva F.B.S., Rocha Júnior R.L., Salvador M.A., Herdies D.L., 2020, Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014, *Weather and Climate Extremes*, **28**.

Dubreuil V., Fante K. P., Planchon O. and Sant'Anna Neto J. L., 2019, Climate change evidence in Brazil from Köppen's climate annual types frequency, *International Journal of Climatology*, **39**, 1446–1456.

Fang Y., Naik V., Horowitz L. W. and Mauzerall D. L., 2013, Air pollution and associated human mortality: The role of air pollutant emissions, climate change and methane concentration increases from the preindustrial period to present, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **13**, 1377–1394.

Fernandes T., Hacon S. D. S. and Novais J. W. Z., 2021, Mudanças Climáticas, Poluição Do Ar E Repercussões Na Saúde Humana: Revisão Sistemática, *Revista Brasileira de Climatologia*, **28**.

Inness A., Ades M., Agusti-Panareda A., Barré J., Benedictow A., Blechschmidt A.-M., Dominguez J.J., Engelen R., Eskes, H., Flemming J., Huijnen V., Jones L., Kipling Z., Massart S., Parrington M., Peuch V.-H., Razinger M., Remy S., Schulz M. and Suttie M., 2019, The CAMS reanalysis of atmospheric composition, *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**, 3515–3556.

IPCC. 2021, Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Lu X., Zhang L., Chen Y., Zhou M., Zheng B., Li K., Liu Y., Lin J., Fu T.-M. and Zhang Q., 2019, Exploring 2016--2017 surface ozone pollution over China: source contributions and meteorological influences. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **19**, 8339–8361.

Mannucci, P.M and Franchini, M., 2017, IHealth Effects of Ambient Air Pollution in Developing Countries. *Environmental Research and Public Health*, **14 (9)**, 1048.

Marengo J. A., Torres R. R. and Alves L. M., 2017, Drought in Northeast Brazil—past, present, and future, *Theoretical and Applied Climatology*, **129**, 1189–1200.

Requia W. J., Coull B. A. and Koutrakis P., 2020, Where air quality has been impacted by weather changes in the United States over the last 30 years? *Atmospheric Environment*, **224**.

Ribeiro I.O., Andreoli R. V., Kayano M.T., Sousa T.R., Medeiros A.S., Godoi R.H.M., Godoi A.F.L., Duvoisin S., Martin S.T. and Souza R.A.F., 2018, Biomass burning and carbon monoxide patterns in Brazil during the extreme drought years of 2005, 2010, and 2015, *Environ. Pollut.*, **243**, 1008–1014.

Rocha M.I.S. and Nascimento D.T.F., 2021, Distribuição espaço-temporal das queimadas no bioma Cerrado (1999/2018) e sua ocorrência conforme os diferentes tipos de cobertura e uso do solo, *Revista Brasileira de Geografia Física*, **14 (3)**, 1220-1235.

Saldiva P., 2018, *Vida Urbana e Saúde: os desafios dos habitantes das metrópoles*. Editora Contexto.

Schmidt I.B. and Eloy L., 2020, Fire regime in the Brazilian Savanna: Recent changes, policy and management, *Flora*, **268**.

Da Silva P. E., Santos e Silva C. M., Spyrides M. H. C. and Andrade L. de M. B., 2019, Precipitation and air temperature extremes in the Amazon and northeast Brazil, *International Journal of Climatology*, **39**, 579–595.

WHO, 2016, *Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease*, Available at: <https://www.who.int/phe/publications/air-pollution/global-assessment/en/>.

Wood S. N., 2017, *Generalized Additive Models: An Introduction with R*, Chapman and Hall, 496 pages.

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

**Sihem GUERNOUTI¹, Auline RODLER², Jeremy BERNARD³, Marjorie MUSY⁴, Benjamin MORILLE⁵,
Adrien GROS⁶.**

¹ Cerema Ouest, Equipe BPE et Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, 9 rue René Viviani, 44262 Nantes, sihem.guernouti@cerema.fr

² Cerema Ouest, Equipe BPE et Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, 9 rue René Viviani, 44262 Nantes, auline.rodler@cerema.fr

³ Université de Göteborg et chercheur associé au Lab-STICC, Guldhedsgatan 5a - 41320 Göteborg, jeremy.bernard@qu.se

⁴ Cerema Ouest, Equipe BPE et Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville, 9 rue René Viviani, 44262 Nantes, marjorie.musy@cerema.fr

⁵ Soleneos, benjamin.morille@soleneos.fr

⁶ Soleneos, adrien.gros@soleneos.fr

Résumé :

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

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

Abstract:

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

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

Introduction

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

température sèche de l'air, rayonnement global horizontal, humidité relative de l'air, vitesse du vent, direction du vent. Généralement, 20 à 30 années d'observation de ces variables météorologiques sont « moyennées » pour générer un fichier météorologique constitué d'une seule année, défini comme typique du climat du site étudié (Herrera et al., 2017). Afin de prévoir le climat futur, les climatologues utilisent des modèles climatiques globaux (MCG) et des modèles climatiques régionaux (MCR). Un MCR est généralement imbriqué dans un MCG, qui lui fournit une condition initiale et des conditions limites dépendantes du temps (Rummukainen, 2010). Cependant, la résolution spatiale et temporelle actuelle des MCR est trop grossière pour les STD. Nous pouvons trouver dans la littérature diverses méthodes pour augmenter la résolution spatiale et temporelle afin de créer des fichiers météorologiques futurs appropriés à la STD à l'échelle d'un bâtiment (Herrera et al., 2017; Nielsen and Kolarik, 2021). Ces méthodes sont communément appelées descente d'échelle. Il existe deux approches principales : la descente d'échelle dynamique basée sur une simulation des processus physiques et la descente d'échelle statistique. Les méthodes de descente d'échelle les plus utilisées sont le *morphing* ou l'outil Climate Change World Weather Generator, tous deux classés comme des méthodes de descente d'échelle statistique (Nielsen and Kolarik, 2021). Cependant, les fichiers météorologiques obtenus à partir de ces nombreuses méthodes peuvent avoir des différences importantes pour certaines variables.

L'objectif de ce travail est d'identifier le fichier météo qui semble le plus approprié pour analyser l'impact du changement climatique sur le comportement thermique des bâtiments. Ce travail est réalisé dans le contexte du projet CoolParks, dont le cas d'étude est la ville de Nantes (France) présentant un climat tempéré océanique. Nous avons sélectionné deux outils largement utilisés par la communauté scientifique, notamment pour leur facilité de générer des fichiers météo typiques (TMY¹ ou EPW²) : CCWorldWeatherGen (CCWWG) et Meteonorm (Nielsen and Kolarik, 2021). CCWWG permet de générer des fichiers météo sur le changement climatique prêts à être utilisés dans des programmes de STD. Il repose sur les données générées par le modèle HADCM3 avec le scénario A2 (CCWWG, 2013), il est basé sur la méthode de *morphing* (Belcher et al., 2005). Meteonorm permet de générer des données horaires futures à partir d'un modèle stochastique.

1. Méthodologie

Comparaison des fichiers météo

Afin de comparer les performances de CCWWG et de Meteonorm, nous avons calculé l'écart des données climatiques obtenues avec ces outils et celles issues d'observations réelles. Nous avons ainsi utilisé les données de l'ECA&D³. Plusieurs variables météorologiques sont accessibles pour plus de 18000 stations européennes et méditerranéennes qui comprennent les températures maximales et minimales journalières, les précipitations journalières, etc. Nous avons ainsi considéré la période entre 1990 et 2019 comme période de référence pour la ville de Nantes conformément aux recommandations de l'Organisation Météorologique Mondiale, qui propose d'utiliser 30 années de données pour caractériser le climat d'une période donnée. Les données observées sont les températures maximales et minimales journalières ainsi que le rayonnement global horizontal journalier. Les périodes de référence et de projection utilisées pour l'étude comparative sont présentées dans le Tableau 1. Le scénario de changement climatique A2 (RCP8.5) est utilisé, étant donné que c'est le seul qui soit disponible avec CCWG.

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

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

¹ Typical Meteorological Year version 2

² Enregyplus Weather

³ European Climate Assessment & Dataset : <https://www.ecad.eu/dailydata/predefinedseries.php>

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

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

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

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

Pour calculer des besoins de chauffage :

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

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

Pour calculer des besoins de climatisation :

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

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

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

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

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

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

Application à la simulation thermique des bâtiments

Les fichiers météo générés par CCWG et Meteonorm sont ensuite utilisés pour simuler le comportement de deux typologies de bâtiments résidentiels à Nantes (**Figure 1**). L'objectif est d'évaluer comment l'utilisation de ces deux fichiers peut impacter la consommation énergétique et le confort thermique dans chaque bâtiment par rapport à une simulation de référence basée sur des données observées. Les données observées décrites précédemment sont des données journalières et ne peuvent donc être utilisées en entrée de la STD. Nous avons donc sélectionné une année supposément représentative du climat nantais de ces 30 dernières années à partir des données observées à la station Météo-France de Bouguenais (station la plus proche de Nantes). Sur la base d'une analyse menée selon les 3 indicateurs précédemment présentés, l'année 2013 a été choisie comme année de référence parmi 5 années de données horaires (2010 à 2015) que nous avons à notre disposition. Les simulations ont été réalisées avec Trnsys17 (Klein et al., n.d.). Les masques solaires ainsi que l'utilisation des occultations n'ont pas été considérés dans les deux cas pour se placer dans la situation estivale la plus défavorable. L'indice de perméabilité à l'air a été défini selon l'année

de construction des bâtiments. Il est de $1 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ et de $3 \text{ m}^3/\text{h.m}^2$ respectivement pour les typologies 2 et 1. Une ventilation mécanique est considérée dans la typologie 2 avec un taux de renouvellement d'air de 0.6 vol/h. L'orientation est la même pour les deux cas d'étude avec la façade vitrée orientée à l'ouest. Les gains thermiques internes considérés selon l'occupation sont donnés dans la **Figure 1**.



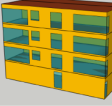

Nom	Classe	Période	Bâtiment exemple (vue Ouest)	Bâtiment exemple (Façades arrières)	composants	Coefficient de transmission thermique (W/m ² .K)	Maison individuelle		Habitat Collectif				
							Heure	Jour Ouvré	Weekend	Jour Ouvré	Weekend		
Typologie 1	1 : Maison individuelle mitoyenne	Avant 1948			Mur	1.7	0h à 7h	2,53	2,53	3,05	3,05		
						Dalle		3.55	7h à 9h	9,1	9,1	9,8	9,8
						Toit		1.35	9h à 18h	1,2	7,7	1,2	8,4
						Fenêtre		4.8	18h à 19h	7,7	7,7	8,4	8,4
Typologie 2	6 : Petit logement collectif	2012 - 2020			Mur	0.18	19h à 23h	9,1	9,1	9,8	9,8		
						Dalle	0.21	23h à 0h	2,53	2,53	3,05	3,05	
						Toit	0.15						
						Fenêtre	1.4						

Figure 1 : Gauche : Informations générales et techniques des deux cas d'étude simulés (TABULA Project Team, 2012) ; Droite : Apports internes (W/m²) selon les jours de la semaine et le type d'habitat (Jan, 2018)

2. Résultats et discussion

Comparaison des fichiers météo

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

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

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

Le calcul des degrés jours de chauffage permet de constater que les hivers projetés avec Meteonorm sont plus rudes que l'observation (**Figure 3**). Ceci est cohérent avec ce nous avons observé précédemment. En effet, nous avons constaté que l'hiver, la température max ou min calculée par Meteonorm est globalement inférieure ou égale à celle observée, c'est-à-dire que l'hiver simulé est beaucoup plus froid que l'hiver observé et par conséquent plus de chauffage est nécessaire. La même cohérence est observée pour CCWWG pour lequel les extremums sont globalement supérieurs ou égaux à l'observation, engendrant des hivers plus cléments qui nécessitent moins de chauffage (Figure 3). Les degrés jours de climatisation sont quant à eux, inférieurs aux données observées. Cependant, les Dj simulés par CCWWG sont supérieurs à ceux simulés par Meteonorm (Figure 3), ce qui signifie qu'il faut plus de climatisation avec le fichier CCWWG qu'avec celui de Meteonorm. Ceci s'explique par le fait que la température CCWWG est supérieure ou égale à la température observée pour la période estivale alors que l'inverse est constaté pour Meteonorm. Le graphique de droite de la **Figure 3** permet d'observer que pour une température max supérieure à 30°C et une température min supérieure à 18°C pendant seulement une journée, le nombre de jours de canicule dans le fichier Metenorm est le double de celui de CCWWG. Cette même observation est constatée lorsque l'on décompte le nombre de jours où ces mêmes conditions météorologiques sont présentes pendant 2 jours consécutifs. L'analyse des variations temporelles des deux fichiers météo a montré plus de pics de températures dans celui de Metenorm que CCWWG. En comparaison avec les données observées, CCWWG sous-estime le nombre de jours de canicule alors que Meteonorm les surestime. Il faut noter ici que les limites de canicule ont été

modifiées car celles définies pour la ville de Nantes ($T_{max} > 34^{\circ}\text{C}$ et $T_{min} > 20^{\circ}\text{C}$) n'ont jamais été satisfaites dans les deux fichiers météo.

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

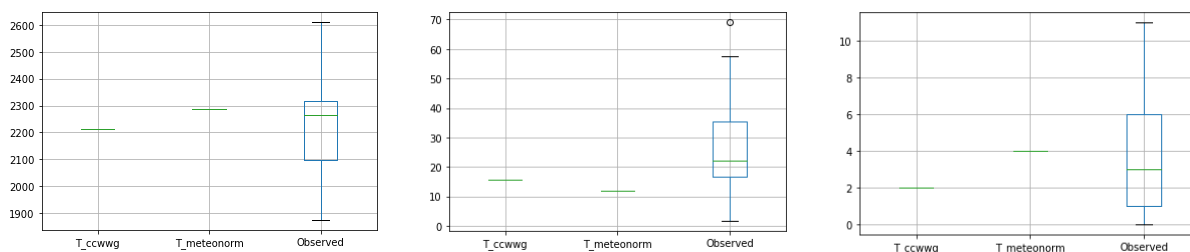


Figure 3: Degrés Jours ($^{\circ}\text{C j}$) de : gauche : chaud - milieu: froid /droite : Nombre de jours de canicule pour $T_{max} > 30^{\circ}\text{C}$ et $T_{min} > 18^{\circ}\text{C}$ pendant une seule journée

Application à la simulation thermique des bâtiments

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



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

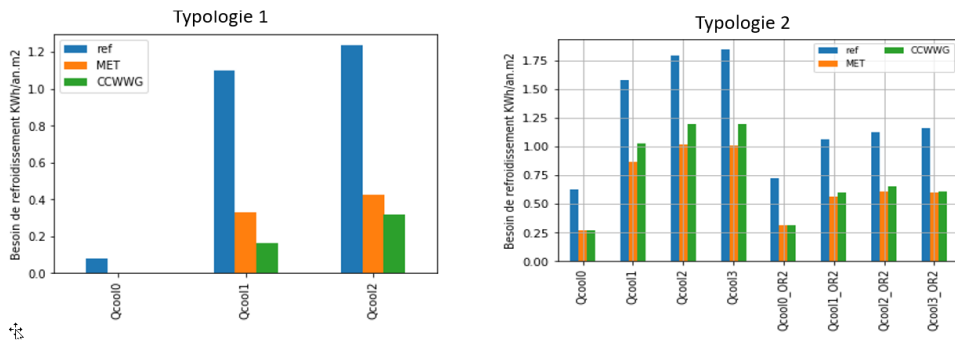


Figure 5: Besoins de refroidissement en période de canicule en 2020 (3 jours du 20/07 au 22/07) pour chaque zone thermique des typologies 1 et 2

Conclusion

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

Remerciements :

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

Bibliographie

- Belcher, S., Hacker, J., Powell, D., 2005. Constructing design weather data for future climates. *Building Services Engineering Research and Technology* **26**, 49–61. <https://doi.org/10.1191/0143624405bt112oa>
- Bernard, J., 2017. Signature géographique et météorologique des variations spatiales et temporelles de la température de l'air au sein d'une zone urbaine (phdthesis). École centrale de Nantes.
- CCWWG, 2013. Climate Change World Weather File Generator for World-Wide Weather Data - CCWorldWeatherGen [WWW Document]. University of Southampton Blogs. URL <https://energy.soton.ac.uk/climate-change-world-weather-file-generator-for-world-wide-weather-data-ccworldweathergen/>
- Day, A.R., Karayiannis, T.G., 1998. Degree-days: Comparison of calculation methods. *Building Services Engineering Research and Technology* **19**, 7–13. <https://doi.org/10.1177/014362449801900102>
- Guan, L., 2009. Preparation of future weather data to study the impact of climate change on buildings. *Building and Environment* **44**, 793–800. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.05.021>
- Herrera, M., Natarajan, S., Coley, D.A., Kershaw, T., Ramallo-González, A.P., Eames, M., Fosas, D., Wood, M., 2017. A review of current and future weather data for building simulation. *Building Services Engineering Research and Technology* **38**, 602–627. <https://doi.org/10.1177/0143624417705937>
- Jan, A., 2018. Les bâtiments résidentiels urbains face au changement climatique : étude du comportement thermique et analyse de sensibilité (Master's thesis). Ecole Nationale des travaux publics de l'état, Cerema.

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

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

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

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

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

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

**Thierno DOUMBIA¹, Claire GRANIER^{1,2}, Sabine DARRAS³, Sekou KEITA¹,
Cathy LIOUSSE¹, Antonin SOULIE¹, Rajesh KUMAR⁴, Gabriele PFISTER⁴**

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

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

³Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse, France

⁴National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, CO, USA

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

Keywords: Atlas, Air quality, Reanalysis

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

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

Introduction

As part of the AQ-WATCH (<https://www.aq-watch.eu/>) European project, an atlas of global and regional air quality has been developed at the Laboratoire d'Aérodologie in Toulouse. This atlas is primarily based on a reanalysis of global atmospheric composition (PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, O₃, CO and SO₂) performed by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) as part of the CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) project, as well as a chemical reanalysis developed by the National Center for Atmospheric Research (NCAR) using the coupled Weather Research Forecast and Community Multiscale Air Quality (WRF-CMAQ) model. The atlas also depicts the spatial and temporal distributions of NO₂ tropospheric columns from satellite instruments, as well as air quality indices at the county and state levels in the United States. This paper briefly describes the AQ-WATCH project and its goals, as well as the various types of datasets used in this work and the atlas' numerical and graphical contents.

1. The AQ-WATCH project

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

2. The input data for the atlas

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

The global atlas also includes an access to the NO₂ tropospheric columns from the satellite-based Ozone Monitoring Instrument (OMI) sensor (Boersma et al., 2011). The NO₂ tropospheric columns data observed by the OMI sensor are obtained from the temis website at: <https://www.temis.nl/airpollution/no2.php>. The data used in this project were generated as part of the QA4ECV (Quality Assurance for Essential Climate Variables) European project and are available as daily and monthly means since October 2004. We downloaded the monthly average values from version 1.1, which has a spatial resolution of 0.125°x0.125° (about 13x13 km²), for the period 2005-2020. We first converted the monthly mean ascii files to netcdf before regridding them to the same resolution as the CAMS reanalysis.

The regional atlas, which focuses on the contiguous United States, is based on atmospheric composition simulations performed by the NCAR's Research Application Laboratory (RAL) using a regional air quality model (CMAQ; Community Multiscale Air Quality) (Kumar et al., 2019). The CMAQ model uses meteorological fields derived from the Weather Research and Forecast (WRF) model, and assimilated MODIS aerosol optical depth (AOD) retrievals and other in-situ observations. The model domain is defined on a Lambert Conformal map projection centered at (40°N, 97°W) and a horizontal grid spacing of 12 km in both the longitudinal and latitudinal directions. The CMAQ outputs are available at a daily basis for the period 2005-2018 and include air quality indices, as well as some meteorological parameters (temperature, cloud fraction, solar radiation, etc.). As for satellite data, the model simulations are regridded to 0.75°x0.75° for the comparison with CAMS reanalysis.

3. The AQ-WATCH atlas of air quality

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



Figure 1. Homepage of the AQ-WATCH atlas.

The data in the atlas are derived from sub-daily and monthly CAMS reanalysis, as well as daily average CMAQ model outputs and monthly average OMI NO₂ tropospheric columns. For each of the dataset, data are averaged seasonally and yearly. All of these statistics are also calculated for every country in the world, as well as for every state and county in the United States and every province in China. The system developed for this atlas allows an interactive visualization of the different statistics for the surface concentrations of the following species: PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀, O₃, daily maximum 8h average ozone (MDA8), CO, NO₂ and SO₂. More species could be added in the future at the request of users. After choosing the species, maps of the average concentrations and trends for the dates chosen by the users can be obtained. Figure 2 depicts an example of such a map, which shows the concentration of PM_{2.5} in 2019 (top panel) and the absolute change in PM_{2.5} from 2003 to 2020 (bottom panel) at the country, state, and province levels. The user can, for example, display the PM concentration level on the map in comparison to WHO (World Health Organization) standards, as well as the trend and its significance or not for different time periods.

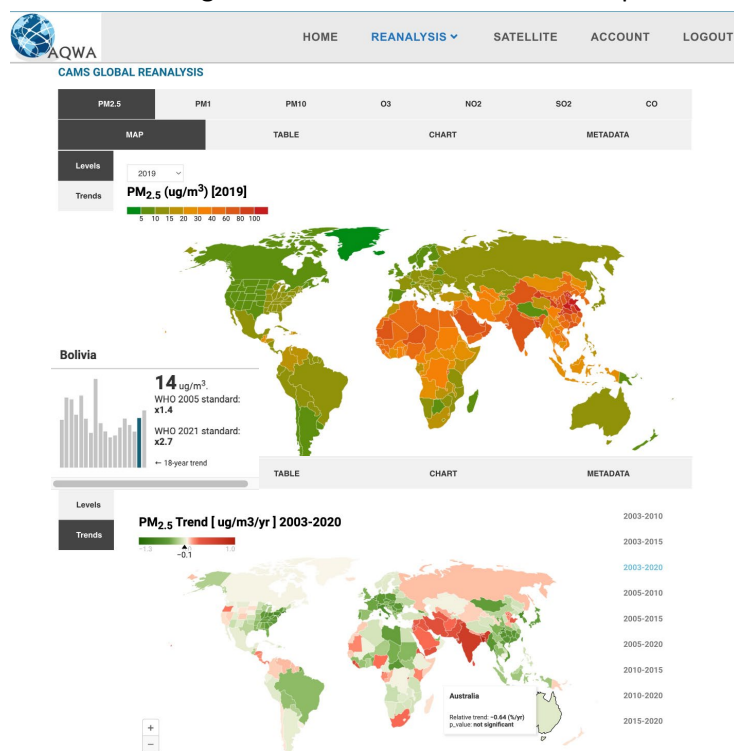


Figure 2. Average PM_{2.5} concentration in 2019 (top panel) and trend in PM_{2.5} from 2003 to 2020 (bottom panel).

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

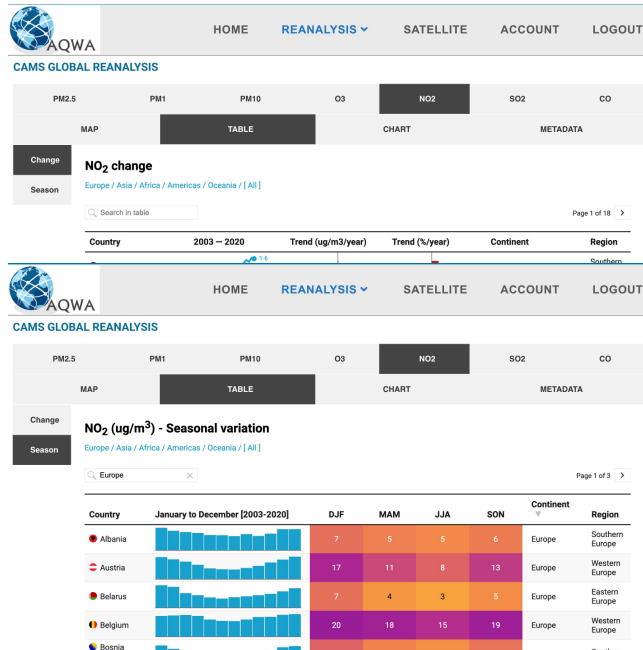


Figure 3. Change in NO₂ surface concentration (top panel) and seasonal variation (bottom panel).

The atlas also contains additional statistics. For example, the ranking of surface pollutant concentrations per continent, as well as the evolution of these concentrations in all countries in classified regions over the selected period, can be visualized. Figure 4 displays the average concentration levels in various European countries as well as the changes in average ozone mixing ratio from 2003 to 2020.

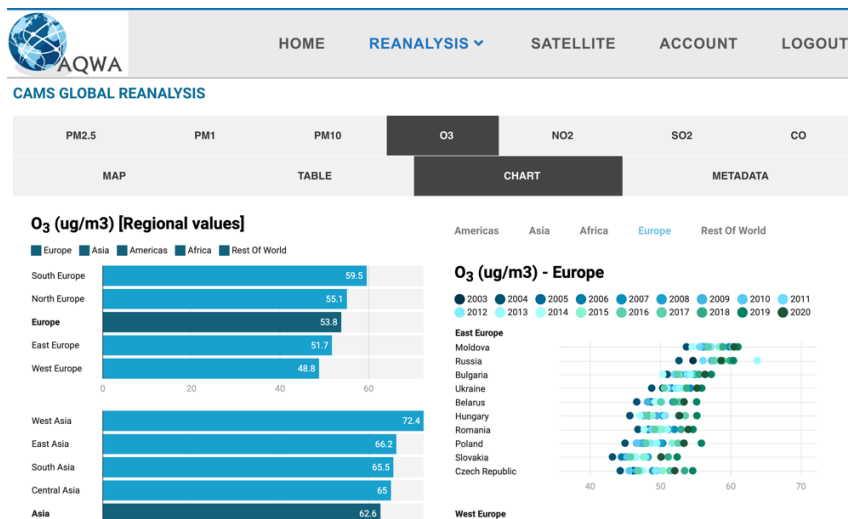


Figure 4. Annual average ozone surface concentrations in European countries from 2003 to 2020.

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

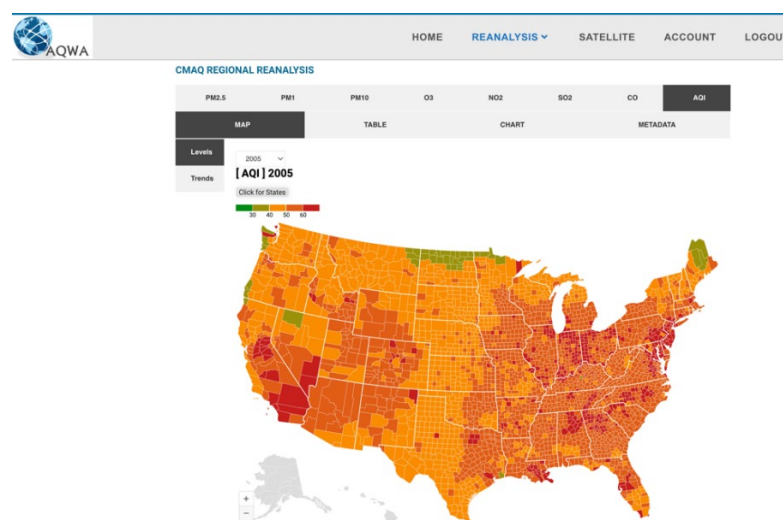


Figure 5. Map of air quality indices (AQI) at the county level in the United States in 2005.

Conclusion

An atlas of air quality at the global and regional scales has been developed at the Laboratoire d'Aerologie in Toulouse as part of the AQ-WATCH European project. This atlas is based on the CAMS reanalysis of global atmospheric composition, as well as CMAQ model simulations and satellite observations of NO₂ tropospheric columns.

This paper describes the AQ-WATCH project and the various datasets (particularly reanalysis and satellite data) that were used to create our atlas of air quality. The AQ-WATCH atlas allows us to promote reanalysis data, which are still underutilized due to a lack of information available to people who are unfamiliar with their application. Our tool allows users to better understand the chemical composition of the atmosphere in the different parts of the world, as well as their concentration levels, spatial distributions, and historical trends. This atlas may also be useful as a decision-making tool for assessing the impact of air quality policies on human health and the environment.

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

Bibliography

Boersma, K.F., Eskes, H.J., Dirksen, R. J., van der A, R. J., Veefkind, J. P., Stammes, P., Huijnen, V., Kleipool, Q. L., Sneep, M., Claas, J., Leitao, J., Richter, A., Zhou, Y., and Brunner, D., 2011 : An improved retrieval of tropospheric NO₂ columns from the Ozone Monitoring Instrument, *Atmos. Meas. Tech.* 4, 1905-1928, doi:10.5194/amt-4-1905-2011.

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

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

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

Sabine DARRAS¹, Claire GRANIER^{2,3}, Cathy LIOUSSE², Thierno DOUMBIA², Sekou KEITA², Antonin SOULIÉ²

¹Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse, France

²Laboratoire d'Aérodynamique, Université de Toulouse, CNRS/UPS, Toulouse, France

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

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

Keywords : Emissions ; Future scenario ; Data analysis; Database

Introduction

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

1. ECCAD portal

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

The portal distributes more than 80 inventories, and half the inventories include emissions from anthropogenic or biomass burning sources, for CO, NO₂, SO₂ and particles/precursors emissions.

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

2. Maps of the emissions

In ECCAD, after selecting the inventories, users can draw maps of the emissions for all the species, types of emissions and sectors. Figure 1 shows an example of maps that can be drawn by the users, for the emissions of PM_{2.5} by biomass burning from the GFAS inventory (<https://atmosphere.copernicus.eu/global-fire-emissions>), and for the PM_{2.5} anthropogenic emissions from the EDGARv5 inventory (Emission Database for Global Atmospheric Research: data.jrc.ec.europa.eu/collection/edgar) inventory.

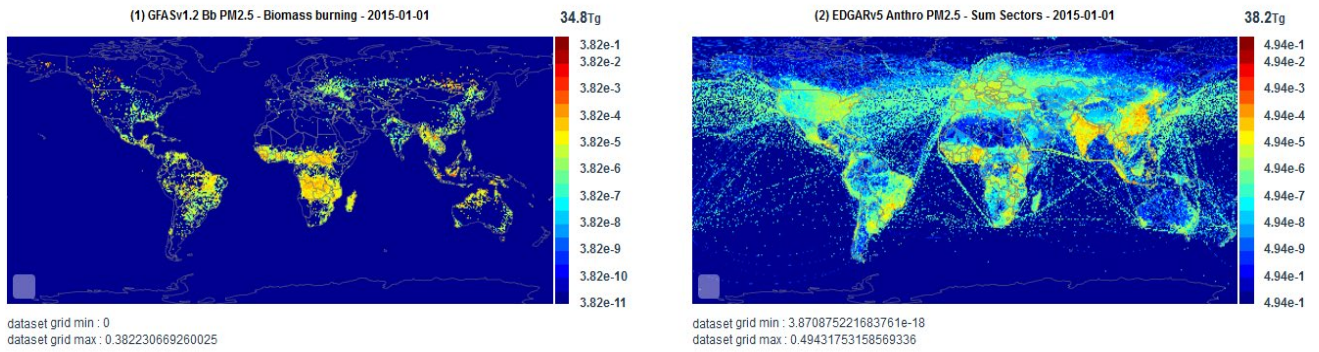


Figure 1. PM2.5 emissions from biomass burning (left) and from anthropogenic sources (right) in 2015.

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

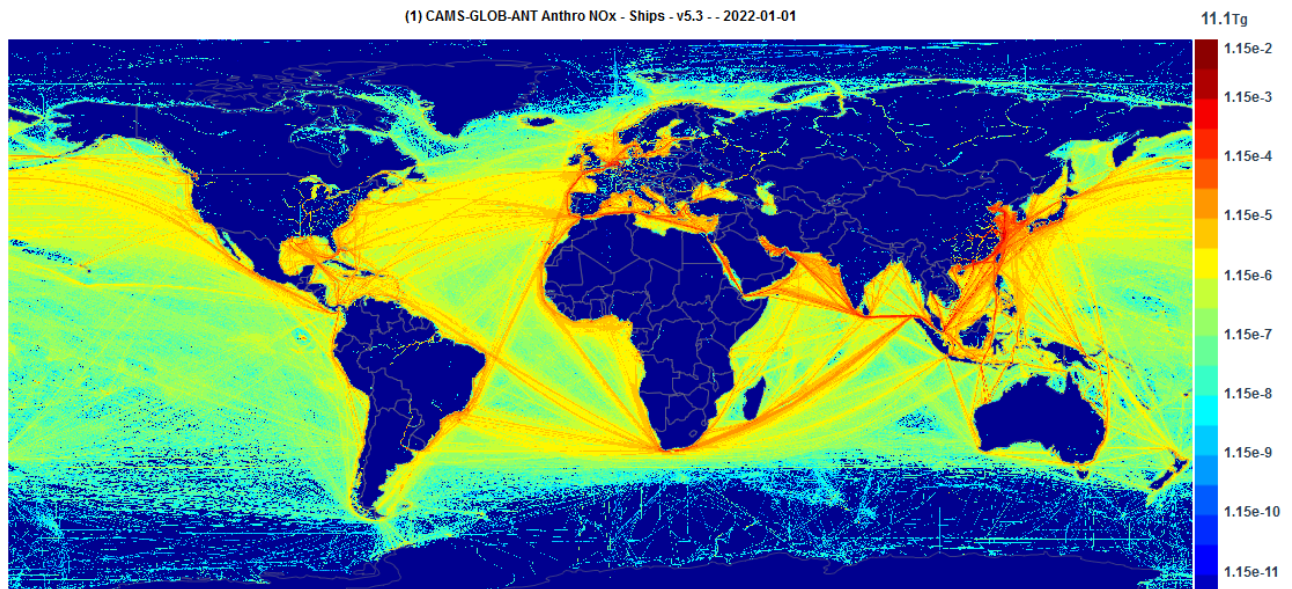


Figure 2. SO2 global ship emissions for year 2022

3. Map Comparison tool

ECCAD includes a tool allows to compare maps, in order to understand the location of the differences between two datasets, and to display the differences in the emissions provided by an inventory at different periods. An illustration is given in Figure 3 (top), which compares the CO2 distribution 2000 and 2021 from the CAMS-GLOB-ANT inventory. This comparison shows the large increase in CO2 emissions in most regions of the world, except for Europe. Figure 3 (bottom) shows another comparison, for the BC anthropogenic emissions between 1950 and 2019 from the CEDS inventory (McDuffie et al., 2020). This comparison shows the impact of the regulations in pollutant emissions in Europe and North America, as well as the large increase in emissions in most areas of Asia, Latin America and Africa.

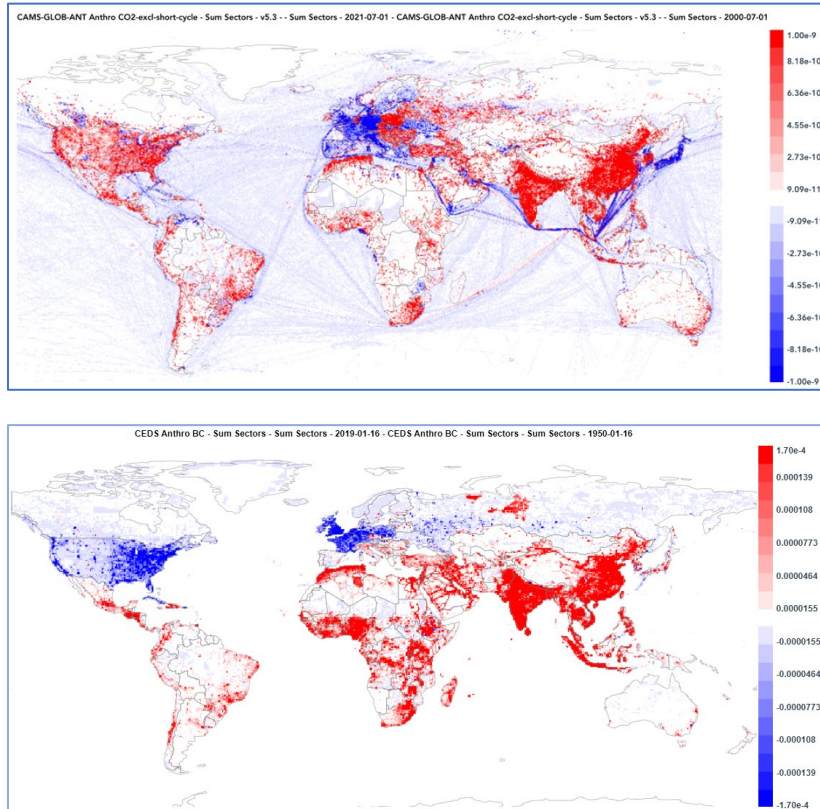


Figure 3. Change in CO2 emissions from 2000 to 2021 from the CAMS-GLOB-ANT version 5.3 inventory (top) and change in BC emissions between 1950 and 2019 from the CEDS inventory (bottom)

4. Time series tool

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

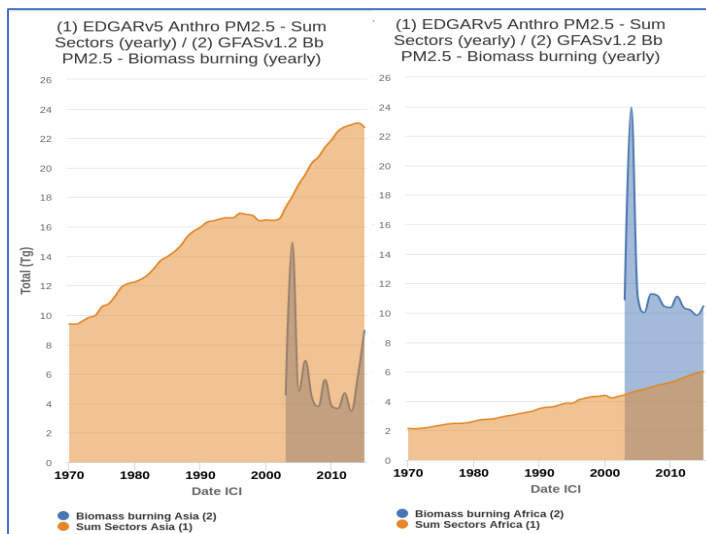


Figure 4. Biomass burning and anthropogenic black carbon emissions for year 2015 for Asia (left) and Africa (right)

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

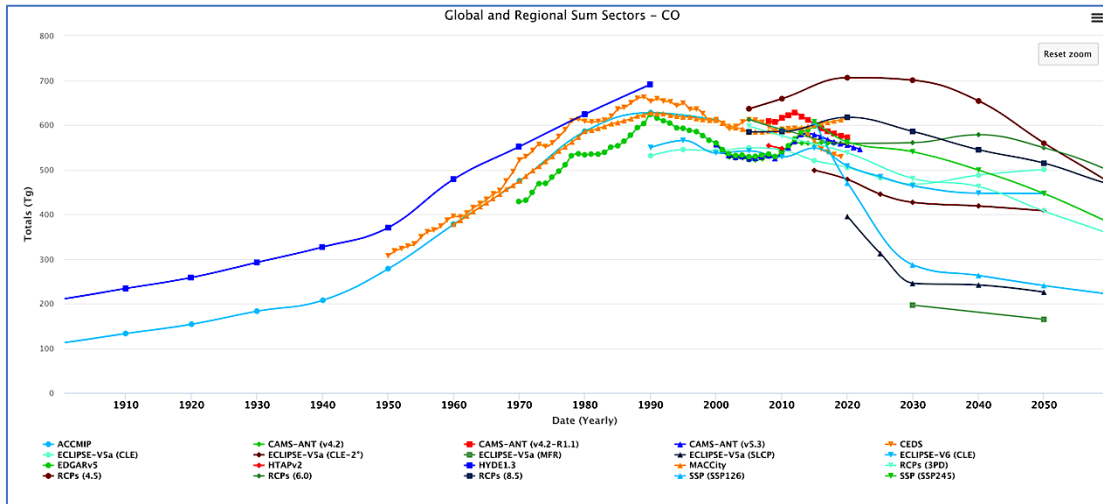


Figure 5. Yearly CO emissions for various inventories.

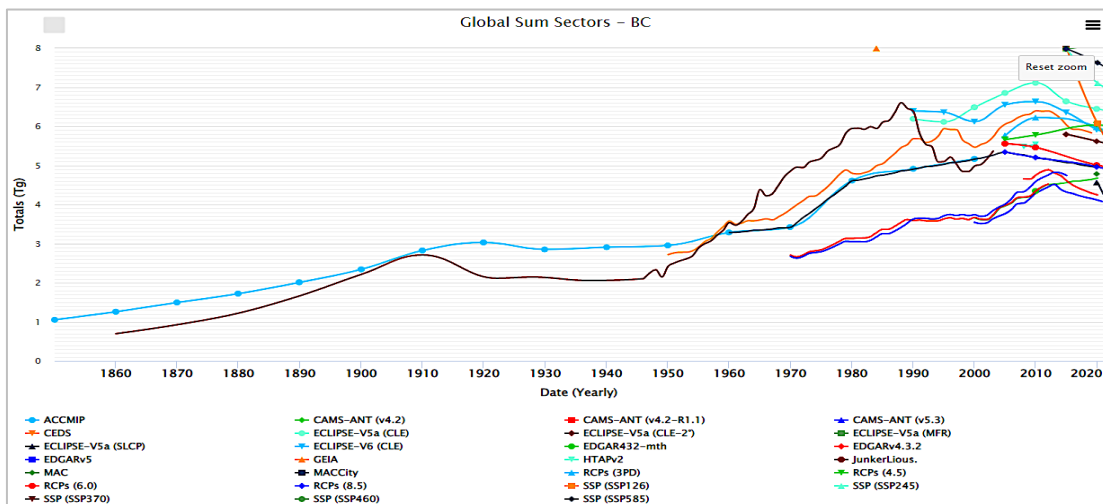


Figure 6. Black carbon time series from historical period 1860 to 2020.

5. Tool for sectors analysis

Most of the inventories available in ECCAD are provided for different sectors. Information on the different sectors are provided in the ECCAD catalog. A tool for the analysis of the emissions provided by different sectors is also available in ECCAD. Figure 7 shows two examples of the analysis that can be done, for the NO_x (left) and SO₂ (right) anthropogenic sources from the CAMS-GLOB-ANT version 5.3 inventory. This Figure highlights that the NO_x major emission sources are transportation, power generation and industry sectors. Shipping accounts for nearly the same amount than road transportation. For SO₂, power generation and industry processes account for the major part of the emissions with less than 1% contribution from road transport and up to 10% from ships.

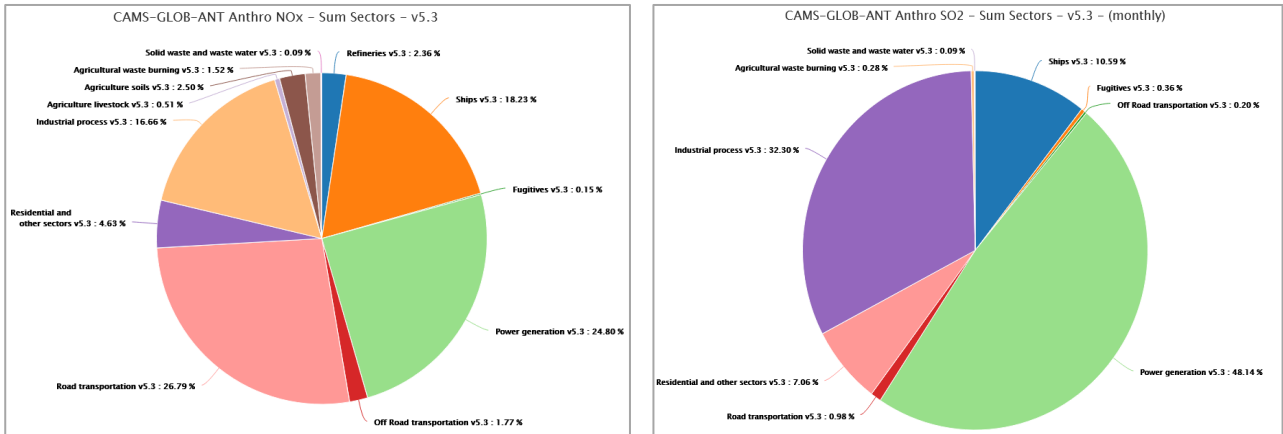


Figure 7. Contribution of different sectors to the global emissions of NOx (left) and SO2 (right) (percentage over the 2000-2020 period)

6. Tools for point source emissions

ECCAD also includes point sources emissions. An example of such sources is the emissions of SO2 from continuously degassing volcanoes. Figure 8 shows an example of these emissions, from the CAMS-GLOB-VOLC dataset, based on the observations from the NOVAC network (Arellano et al., 2021). The emissions are very variable in time, and ECCAD allows a detailed analysis of these emissions, for each volcano included in the dataset.

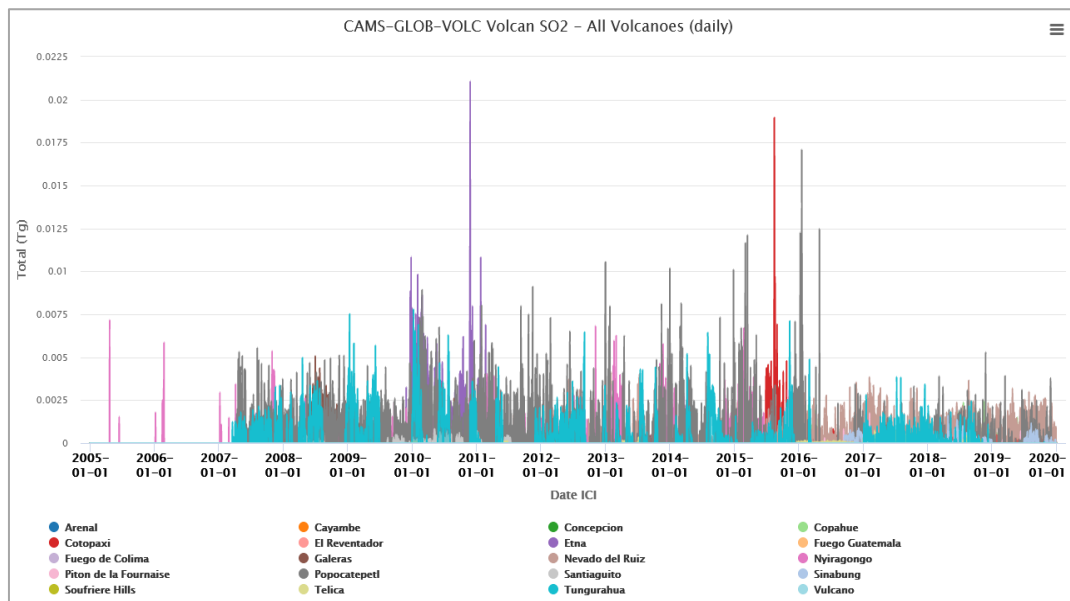


Figure 8. SO2 daily emissions from NOVAC volcanoes.

Conclusion

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

References

Arellano, S., Galle, B., Apaza, F., Avaró, G., Barrington, C., Bobrowski, N., Bucarey, C., Burbano, V., Burton, M., Chacón, Z., Chigna, G., Clarito, C. J., Conde, V., Costa, F., De Moor, M., Delgado-Granados, H., Di Muro, A., Fernandez, D., Garzón, G., Gunawan, H., Haerani, N., Hansteen, T. H., Hidalgo, S., Inguaggiato, S., Johansson, M., Kern, C., Kihlman, M., Kowalski, P., Masias, P., Montalvo, F., Möller, J., Platt, U., Rivera, C., Saballos, A., Salerno, G., Taisne, B., Vascónez, F., Velásquez, G., Vita, F., and Yalire, M., 2021: Synoptic analysis of a decade of daily measurements of SO₂ emission in the troposphere from volcanoes of the global ground-based Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change, *Earth Syst. Sci. Data*, **13**, 1167–1188, <https://doi.org/10.5194/essd-13-1167-2021>.

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

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

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

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

Antonio CARDILLO¹, Valentina DI TALIA², Giacomo ANTONIONI³.

¹ *Regione Molise, IV Dipartimento Governo del Territorio, Servizio di Protezione Civile, Responsible of the decentralized functional center (forecasting and monitoring), cardillo@protezionecivile.molise.it*

² *CIRI Frame - Unibo, Via Sant'Alberto 163, Ravenna, research fellow, valentina.ditalia2@unibo.it*

³ *CIRI Frame - Unibo, Via Sant'Alberto 163, Ravenna, associate professor, giacomo.antonioni3@unibo.it*

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

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

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

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

Introduction

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

Identifying the event scenario quickly in case of emergencies and, consequently, providing an intervention of human resources and means proportionate to the need is the main challenge to address

nowadays. The line between success and failure is very fine and the development of innovative Decision Support Systems able to include alternative data sources using new IT solutions can make a difference (Hellmund et al., 2019). Social media platforms are widely recognised as a valuable source of data during crises, but their potential is still not fully exploited, mainly because of their complex nature (Zhang et al., 2019).

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

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

1. Methodology

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

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

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

an event scenario, the operational parts of the platform that provide direct interaction with the user must have a graphic interface with display components to filter and analyse the results.

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

- The first "Integration Layer" (on the left in Figure 1) collects data from institutional sources, social media sources and non-institutional amateur sensors. It is the connection with the social world, able to scan the various platforms such as Facebook, Twitter, and Instagram, identifying pre-inserted guiding terms in geo-localised posts.
- The "Analysis and Aggregation" module contains data evaluation algorithms based on the semantic classification developed during the Project.
- The second "Integration Layer" (on the right in Figure 1) compare data with the institutional sources and sends the aggregated data to the "Decision-Maker" module to automatically classify the event.
- The "Decision-maker module will be an Artificial Intelligence component to improve the semantic analysis over time and to help an automatic decision for the ongoing event.

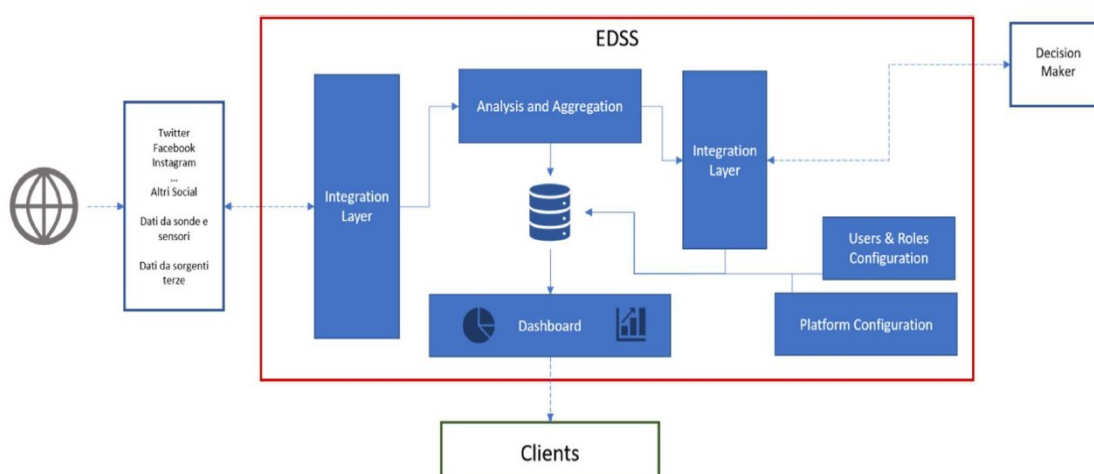


Figure 1. Emergency Decision Support System architecture.

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

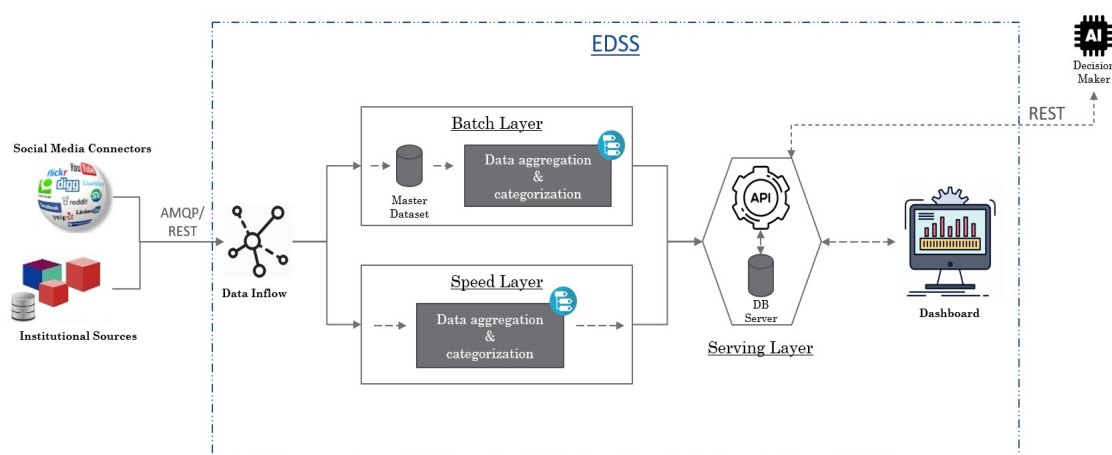


Figure 2. Scheme of the final EDSS infrastructure.

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

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

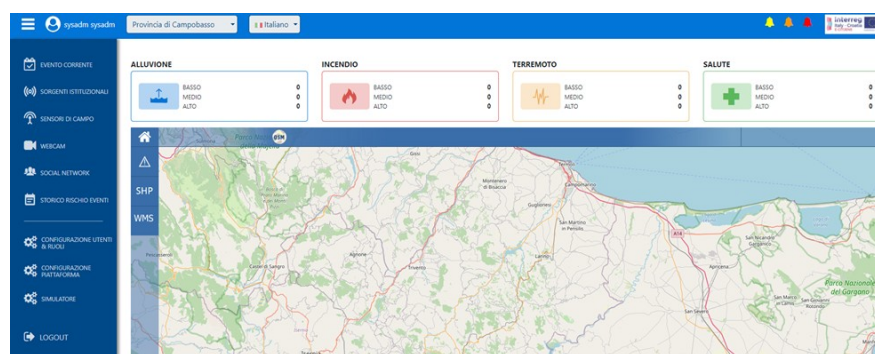


Figure 3. The EDSS platform dashboard.

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

2. Use case

Additionally, the platform will represent an essential source of data for those phenomena not otherwise monitored both due to instrumental limits (e.g. hailstorms) and lack of sensors (e.g. exceptional low-altitude snowfalls). With this innovative tool, we expect to start obtaining and improving the information

on events where, for example, information is lost due to a lack of sensors or events not correctly evaluated due to spatial exemption.

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

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

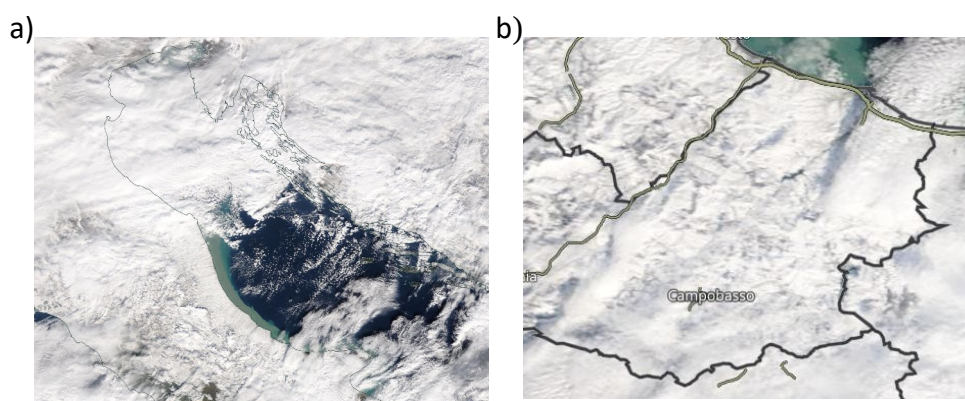


Figure 4. Example of an Adriatic coast (a) and a low-altitude snow event in the Molise region not recorded by institutional networks (b) (image NASA Worldview application, Molise Region, 11.2.2012).



Figure 5. Example of a low-altitude snow event not recorded by institutional networks (Costa Adriatica, litorale Termoli Nord, 17.12.2012) – Lat 41°59'45.75"N – Long 14°59'42.42"E.

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



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

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



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

Conclusion

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

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

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

Bibliography

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

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

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

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

Hellmund T., Schenk M., Hertweck P., Moßgraber J.: Employing Geospatial Semantics and Semantic Web Technologies in Natural Disaster Management, Proceedings of the Posters and Demo Track of the 15th International Conference on

Semantic Systems co-located with 15th International Conference on Semantic Systems (SEMANTiCS 2019), Karlsruhe, Germany, September 9th - to - 12th, 2019. Volume 2451 of CEUR Workshop Proceedings, CEUR-WS.org, 2019.

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

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

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

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

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

Federal University of Paraná – UFPR/LABOCLIMA, Brazil, chico@ufpr.br, pedrofontao@ufpr.br, feltrim@ufpr.br

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

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

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

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

1. Introduction

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

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

The speed at which the virus has been transmitted and spread over time and space has disturbed scientists and alarmed the general population, especially the elderly and those with comorbidities (hypertensive, diabetic, immunoexpressed, *etc.*). However, it should be noted that coronaviruses (CoVs) are a large family of viruses with a single-stranded RNA genome, already well known in academia, and cause respiratory, gastrointestinal, liver and neurological diseases (Weiss and Leibowitz, 2011), being generally associated with common colds (Matoba *et al.*, 2018). However, COVID-19 clearly differs from other respiratory syndromes in terms of infectious period, transmissibility, clinical severity and speed of dissemination in communities, considerably increasing the susceptibility of the population to contracting the disease and the risks related to the disease (Shi *et al.*, 2020; Wilder-Smith *et al.*, 2020).

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

2. Methodology

2.1. Study area and prior research knowledge

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

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

2.2. Data collection and analysis

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

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

3. Results

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

Regarding the dynamics of COVID-19 in the State of Paraná, it was observed, in the first pandemic quarter (since March 2020), a concentration of cases in cities near to the state capital (Curitiba) and in some cities to the north and west. In the second semester there is an expansion of this area and by cities generally located along the transport axes to the North-RMC-East (RMC: Metropolitan Region of Curitiba). In the second quarter, there is also an expansion in relation to the number of cities affected, leaving a small portion of cities without

records in the period from June to August 2020, as well as in the third quarter. In the fourth quarter, between December 2020 and February 2021, all cities in the State were affected by COVID-19 to a lesser or greater extent. A pattern of fewer cases and a lower proportion of incidence of the disease in the Center-South region of the state can be seen in all quarters, and Figure 1 summarizes the information described.

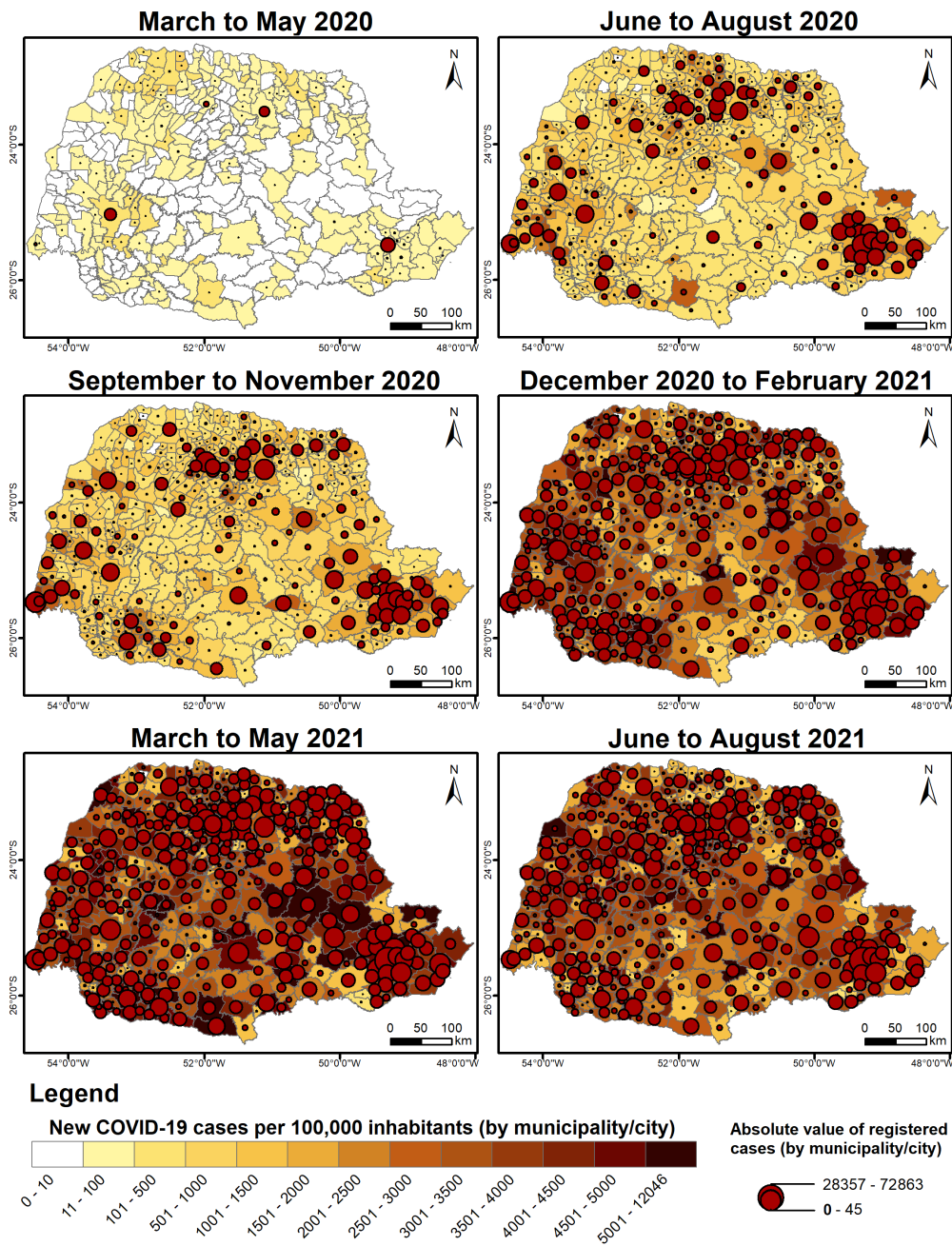


Figure 1. Quarterly maps of the temporal and spatial dynamics of COVID-19 cases in the State of Paraná (2020-2021).

The distribution of deaths recorded by COVID-19 followed, in the State of Paraná, the dynamics of cases and transmission, with results similar to Figure 1. It is important to note that the last three quarters (December 2020 to August 2021) were much more contagious and lethal than the first months of the pandemic, referring to issues such as the relaxation of social isolation measures and the entry of new variants of the virus. On August 31, 2021, although vaccination has finally advanced in Brazil, only 28.9% of the population of Paraná had access to the two recommended doses of the vaccine (and were immunized). By the end of 2020, all 399 municipalities in the state were affected by the pandemic, with no exception. In this scenario, there are several possibilities to analyze the temporal and spatial dynamics of the disease and, in a multicausal perspective and considering the different pathogenic complexes involved in the occurrence of

COVID-19, the climate must be considered as one of the variables involved in the process of transmission – not necessarily being the main factor. Figure 2 depicts the variability of meteorological elements and climate alert levels (SACER – low to high) for the four cities with the highest number of COVID-19 cases in Paraná.

3.2. Relationship between COVID-19 and climate variability

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

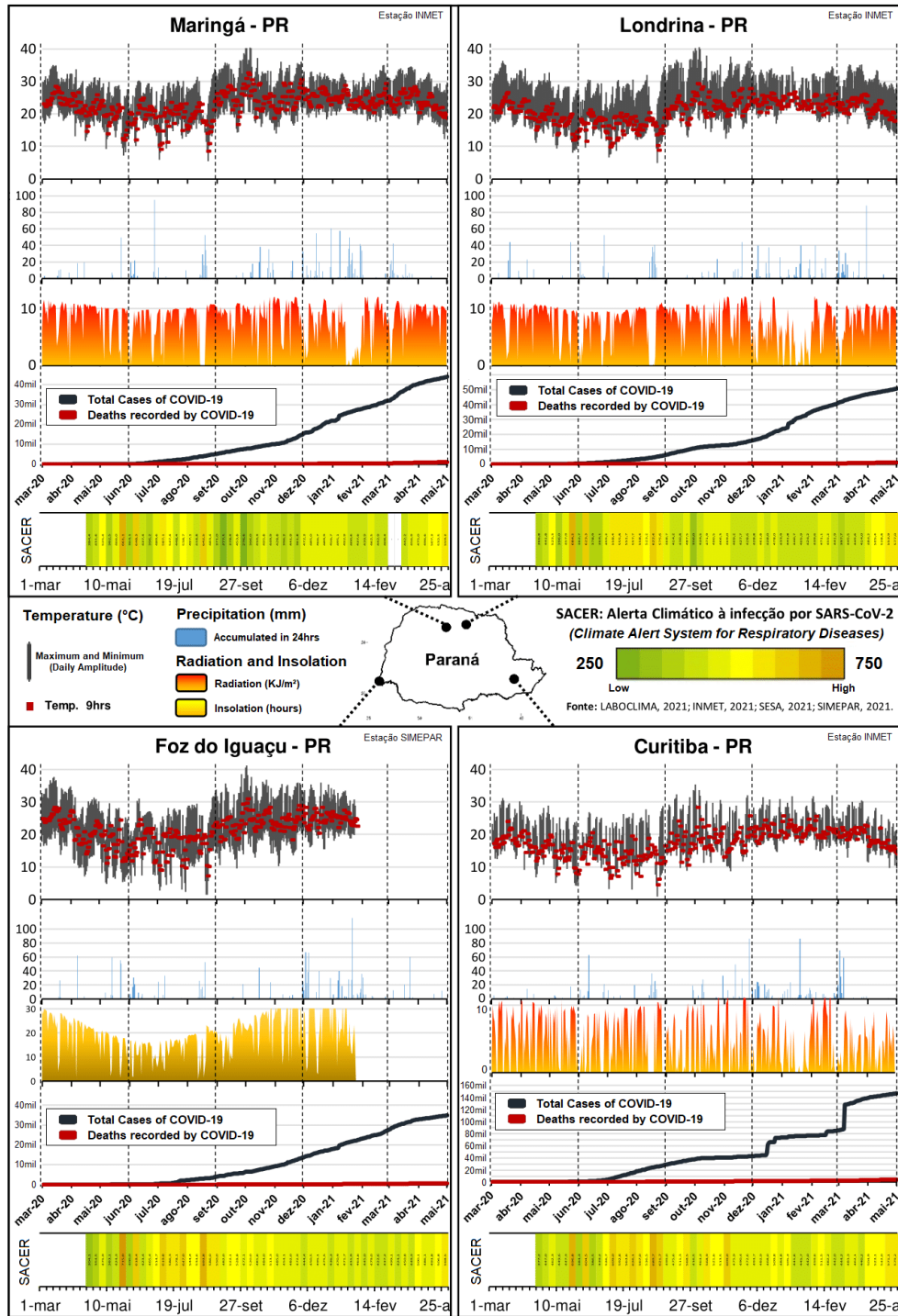


Figure 2. Climate and COVID-19: daily and weekly situation of the main cities in the State of Paraná.

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

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

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

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

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

4. Conclusion

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

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

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

Bibliography

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

Auler, A. C., Cássaro, F. A. M., Da Silva, V. O., & Pires, L. F., 2020 : Evidence that high temperatures and intermediate relative humidity might favor the spread of COVID-19 in tropical climate: a case study for the most affected Brazilian cities. *Science of the Total Environment*, 729, 139090.

Besancenot, J. P., 2015 : *Climat et santé* (Medicine et santé). Presses universitaires de France.

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

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

Mustapha RIAHI¹

¹*Université de Jendouba, Laboratoire Géomatique des Géosystèmes, riahimostapha@gmail.com*

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

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

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

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

Introduction

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

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

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

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

1. Données et méthodes

1.1 Données

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

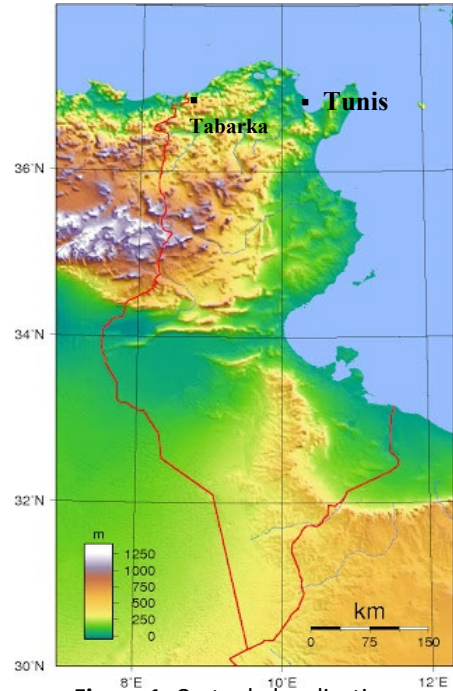


Figure 1. Carte de localisation

1.2 Méthode

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

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

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

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

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

Source : Besancenot 1990

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

2. Résultats

2.1 Répartition des ambiances contraignantes en saison chaude

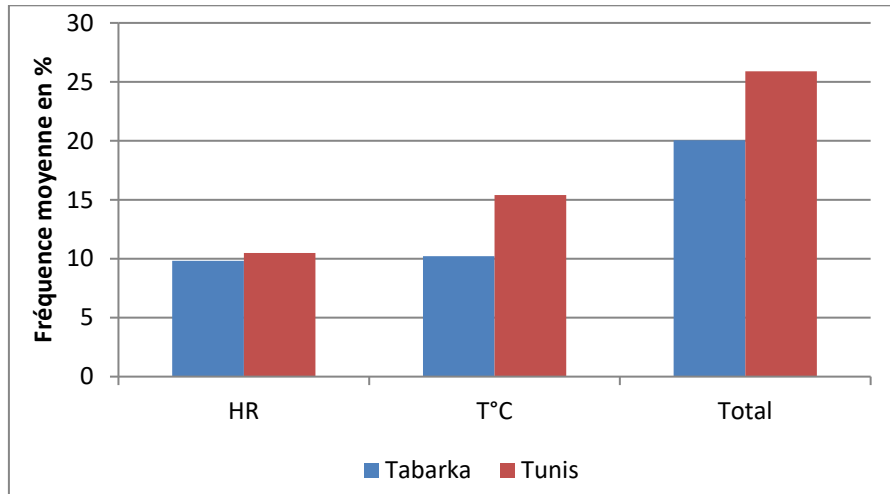


Figure 2. Répartition moyenne des ambiances contraignantes liées à l'humidité relative (HR) et à la température (T°C) en saison chaude (moyenne 1997 – 2016).

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

2.2 Répartition mensuelle

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

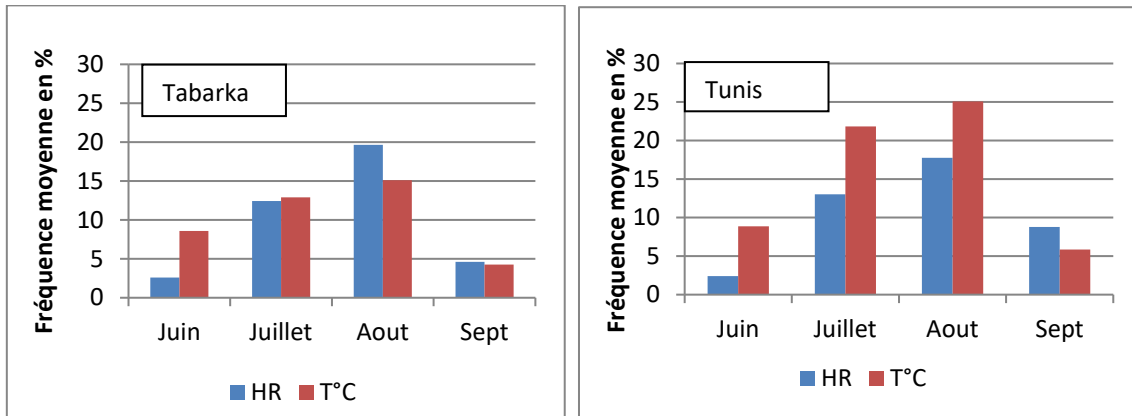


Figure 3. Répartition mensuelle des ambiances contraignantes liées à l'humidité (HR) et à la température (T°C) (moyenne 1997 – 2016).

2.3 Variation tri-horaire des ambiances contraignantes

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

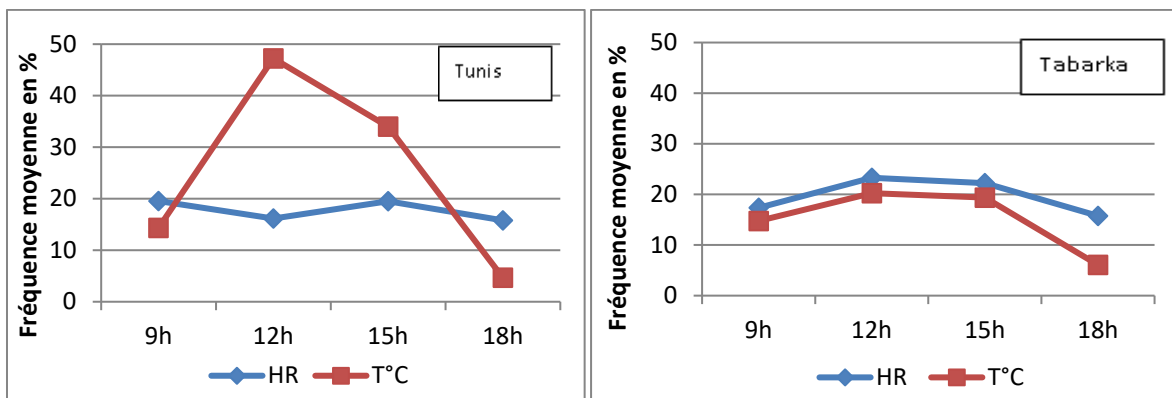


Figure 4. Répartition moyenne quotidienne des ambiances contraignantes liées à l'humidité (HR%) et à la température d'après l'indice THI (1997 – 2016).

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

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

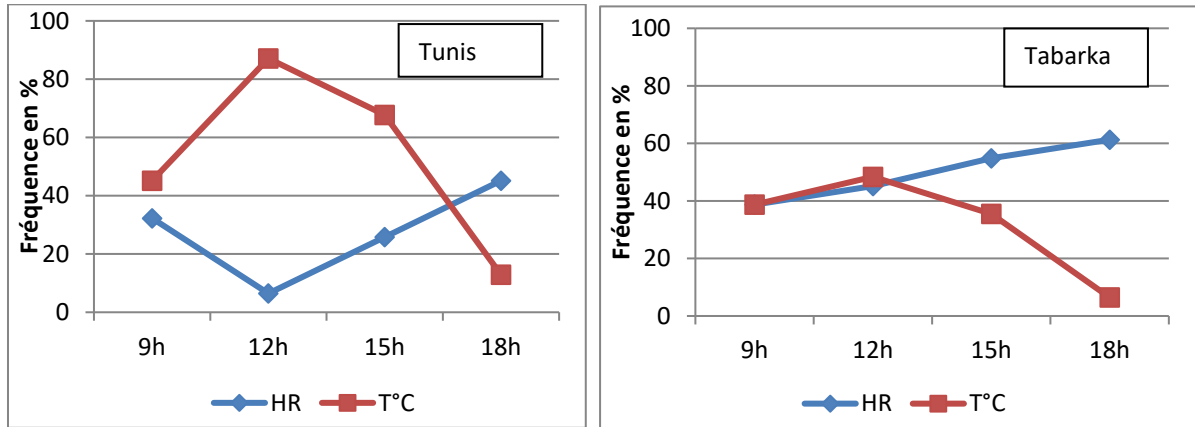


Figure 5. Répartition quotidienne des ambiances contraignantes liées à l'humidité (HR%) et à la température d'après l'indice THI (Août 2003).

2.4 Facteurs aérologiques générateurs des ambiances contraignantes chaudes

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

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

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

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

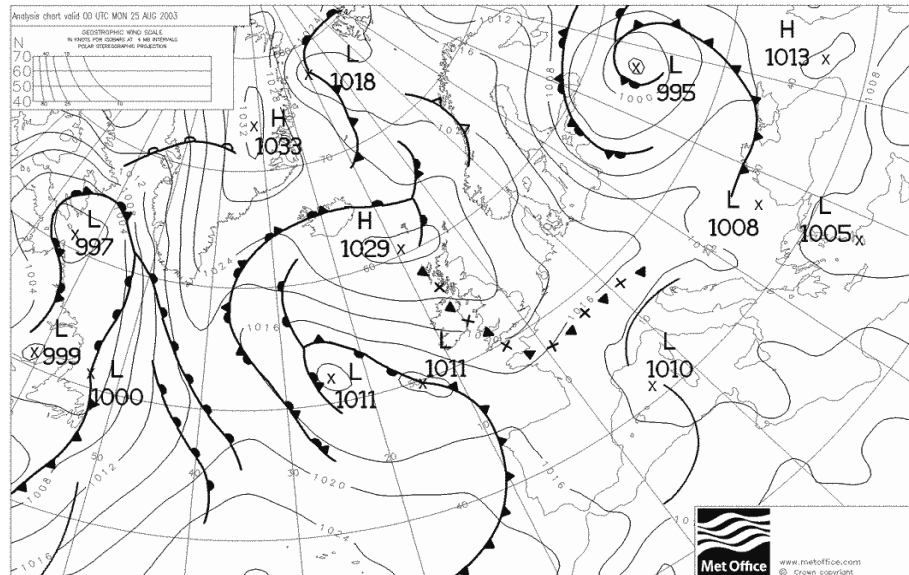


Figure 6. Champ barométrique de surface du 25 août 2003.

Conclusion

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

Bibliographie

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

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

Mohamed CHEBLI^{1et2}, Sami CHARFI¹, Salem DAHECH²

¹Université de Sfax, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, SYFACTE, (cheblimohamed3@yahoo.fr) (charfisami_geo@yahoo.fr),

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

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

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

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

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

Introduction

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

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

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

1. Cadre spatial et méthodologie

1.1. Cadre spatial

L'agglomération de Kairouan est située au Centre-Ouest de la Tunisie à 50 km du littoral (fig. 1). Elle s'étale sur 23 km² et compte 200 000 habitants (INS, 2014). Elle est marquée par la rareté des espaces verts et des plans d'eau. Le tissu urbain est dominé par les constructions de faible hauteur (fig. 1). La densité urbaine dépasse 8000 hab/km et « avoisine le double dans les secteurs populaires denses comme EL Menchia à l'ouest de l'agglomération » (Chebli et al., 2020).

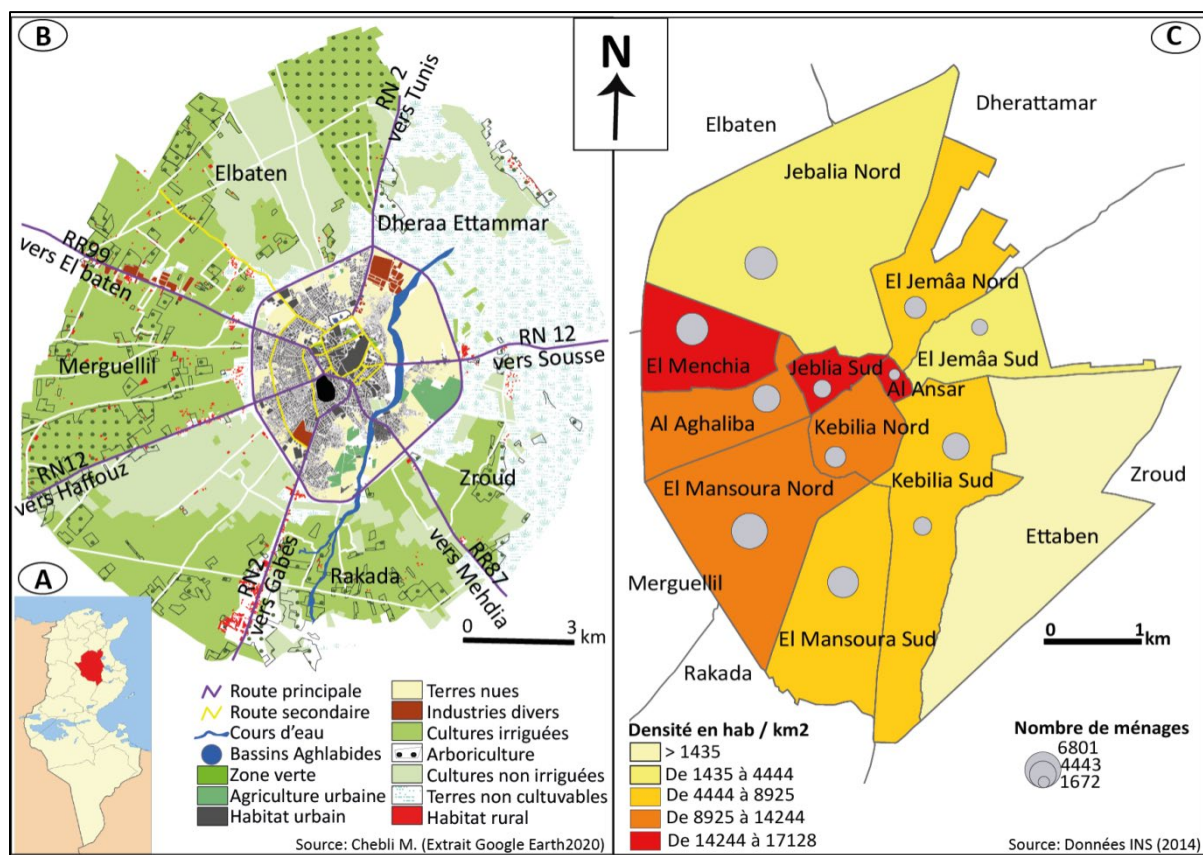


Figure 1 : Localisation (A), Occupation du sol (B), densité urbaine et nombre ménages par secteur (C) à Kairouan

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

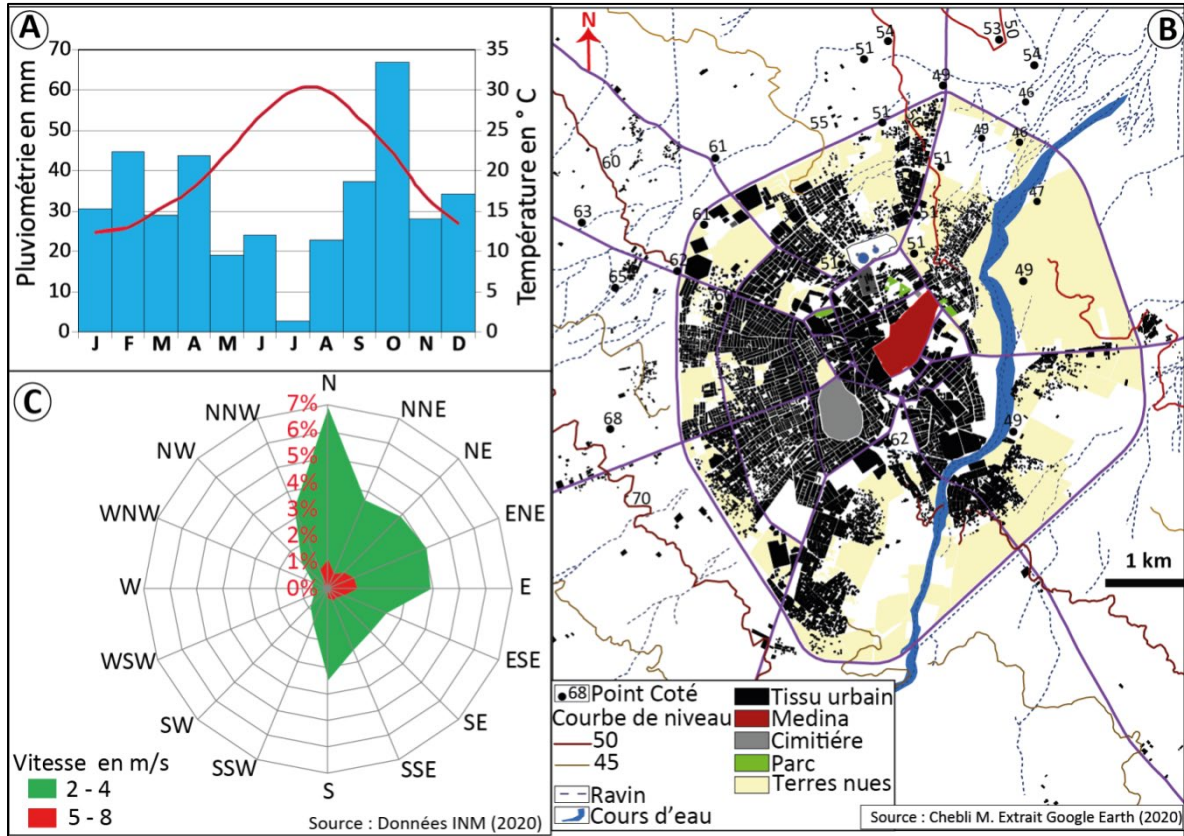


Figure 2 : Diagramme ombrothermique (A), rose moyenne annuelle du vent sur la période 1973-2019 (C), courbes de niveau et réseaux hydrologique de la ville de Kairouan (B).

1.2. Méthodologie

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

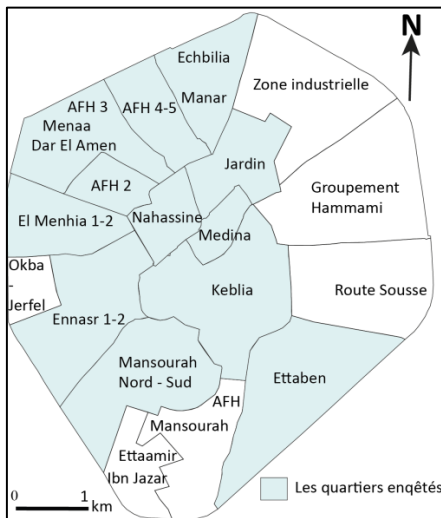


Figure 3 : Localisation des quartiers enquêtés

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

2. Résultats

2.1. Caractéristiques démographiques des répondants

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

Tableau 1 : Quelques caractéristiques démographiques des enquêtés

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

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

Source : Enquête personnelle (Mars 2021)

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

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

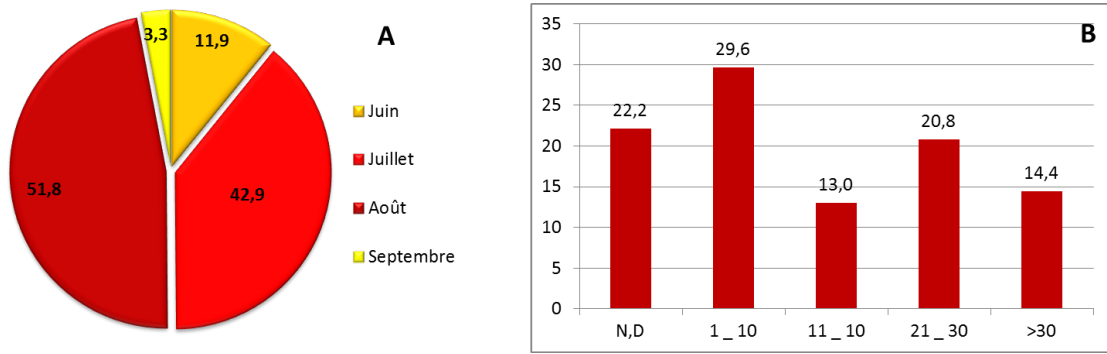


Figure 4 : Le mois le plus chaud (A) et la durée des épisodes de fortes chaleurs selon les enquêtés (B).

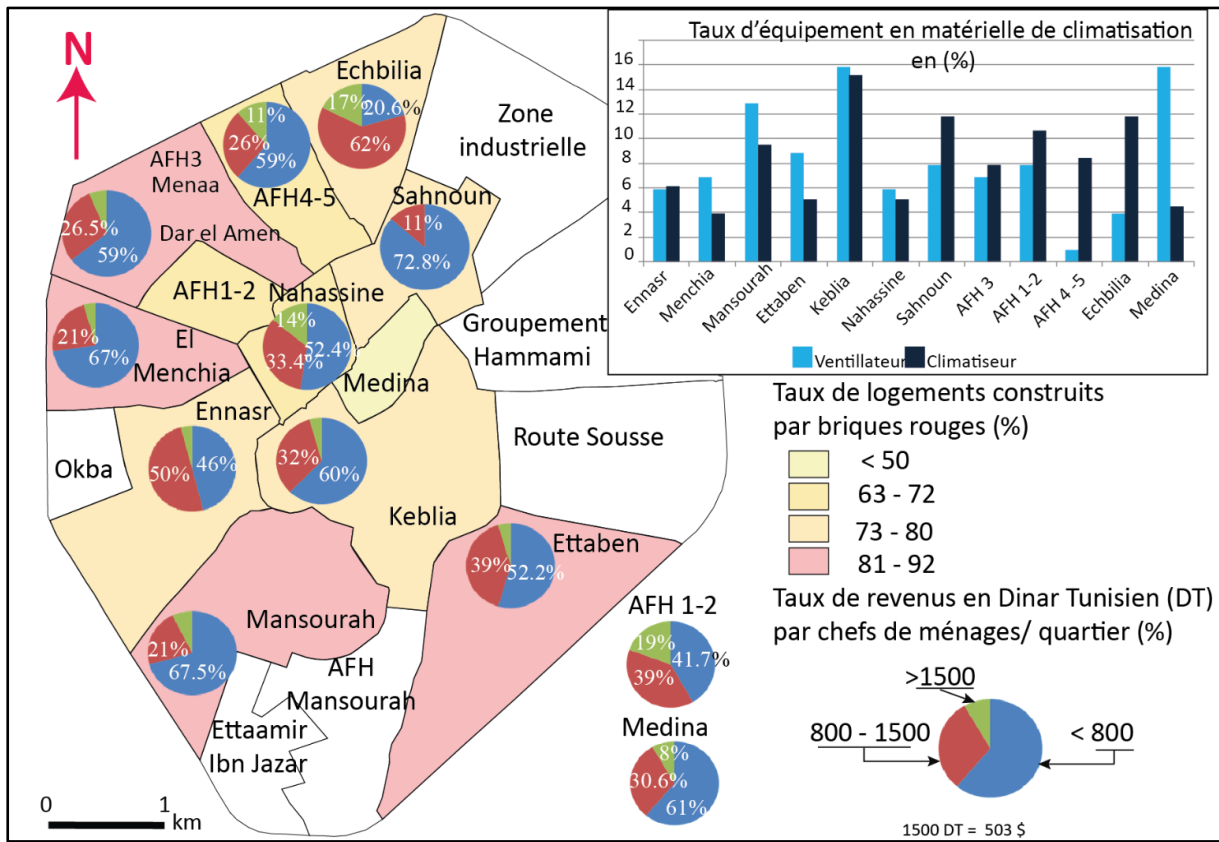


Figure 5 : Quelques aspects socio-économiques des quartiers enquêtés

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

2.3. Perception de la vulnérabilité face à la forte chaleur

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

2.4. Adaptation aux fortes chaleurs

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

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

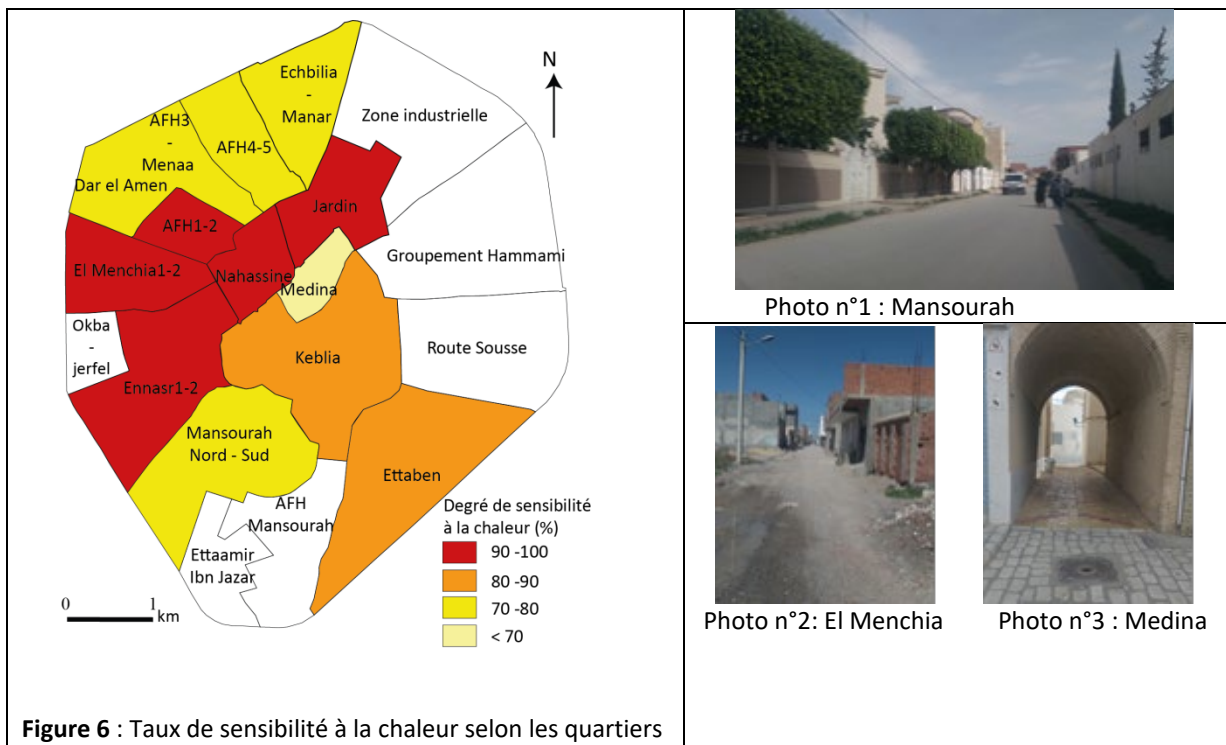


Figure 6 : Taux de sensibilité à la chaleur selon les quartiers

Conclusion

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

Remerciement

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

Bibliographie

Ben Boubaker H., 2010 : Les paroxysmes climato-thermiques en Tunisie : approches méthodologiques et études de cas, *Climatologie*, **7**, 57-87.

Chebli et al., 2020. Répartition spatio-temporelle des températures dans l'agglomération de Kairouan (Tunisie) pendant la saison chaude 2019. *Climatologie*, **17**, 14.

Costello, A., et al., 2009, Managing the health effects of climate change. *Lancet*, **373**, pp 1693–1733.

Cuesta J.G,et al., 2017, General Population Knowledge about Extreme Heat: A Cross-Sectional Survey in Lisbon and Madrid, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **122**, 14.

Michelozzi P., et al., 2005, The impact of the summer 2003 heat waves on mortality in four Italian, *Euro Surveill.* **10**(7), 11-12.

Myers S., Patz J., 2009, Emerging threats to human health from global environmental change. *Annu. Rev. Environ. Resour.*, **34**, 223–252.

Nitschke et al., 2011: Impact of two recent extreme heat episodes on morbidity and mortality in Adelaide, South Australia: a case-series analysis, *Environmental Health* **10**, 16.

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

Anaïs MACHARD ^{1,2}, Emmanuel BOZONNET ¹, Agnese SALVATI ^{3,4},
Mamak POURABDOLLAHTOOTEKABONI ⁵, Abhishek GAUR ⁶.

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

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

³ Institute for Energy Futures, Brunel University London, Uxbridge, UK

⁴ Barcelona School of Architecture ETSAB-UPC, Diagonal 649, 08028 Barcelona, Spain, agenese.salvati@upc.edu

⁵ Department of Energy, Politecnico di Torino, 10129 Turin, Italy, mamak.ptootkaboni@polito.it

⁶ National Research Council Canada, Construction Research Centre, 1200 Montreal Road, Building M24, Ottawa, ON K1A 0R6, Canada, abhishek.gaur@nrc-cnrc.gc.ca

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

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

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

Keywords: heatwaves, overheating, buildings, resilience

Introduction

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

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

(Miller et al. 2021 ; Attia et al. 2021 ; Zhang et al. 2021). Afin de qualifier et quantifier ces impacts thermiques, il a été également nécessaire de déterminer l'exposition à la chaleur, qui impacte directement le risque de surchauffe des bâtiments. Un groupe de travail spécifique à sa caractérisation, et à la production de séquences climatiques, a été mis en place. Les fichiers météorologiques créés ont été utilisés comme données d'entrée du groupe de travail pour les simulations thermiques de bâtiment (Zhang et al. 2021).

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

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

1. Méthodologie

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

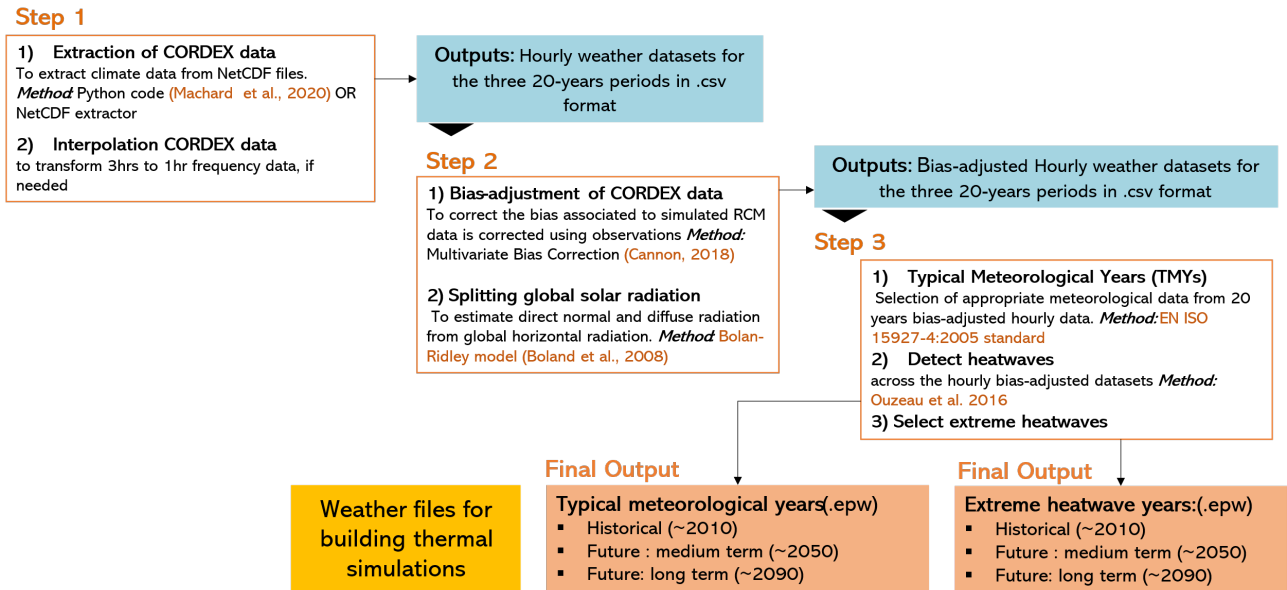


Figure 1 – Méthodologie de reconstitution des fichiers météorologiques à partir de la base de données CORDEX

1.1. Sélection des villes

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

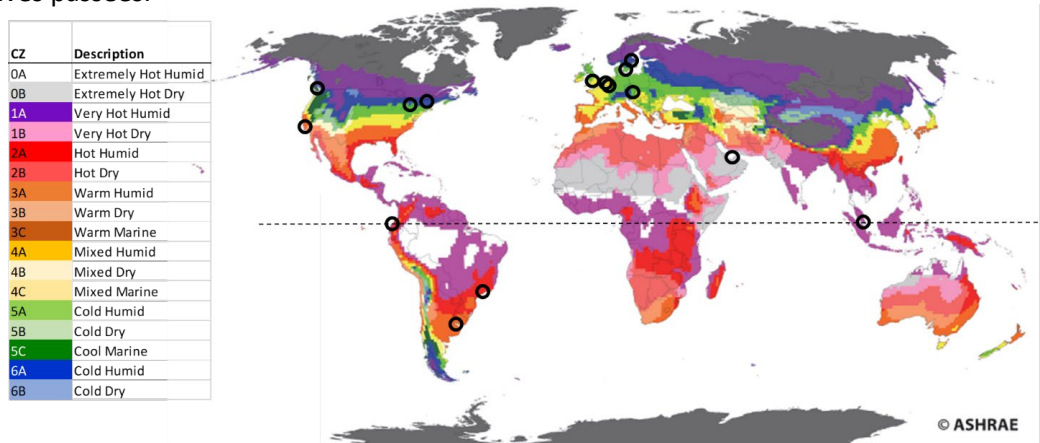


Figure 2 - Villes sélectionnées et zones climatiques de l'ASHRAE selon la norme 169-2013 (ASHRAE 2013)

1.2. Sources des données climatiques

Les données climatiques sont issues de la base de données CORDEX. Trois modèles de climat régional proposaient des données sur tous les domaines, nous avons sélectionné le modèle global MPI-M-MPI-ESM-LR couplé au modèle régional REMO-2015 par manque de ressources pour utiliser les trois modèles. Ce modèle est connu pour être un modèle médian comparé aux autres modèles en ce qui concerne les projections de température (Flato et al. 2013). Le scénario socio-économique RCP 8.5 a été choisi pour étudier le risque le plus élevé. Les données sont disponibles à une échelle de 12.5 km sur le domaine européen et à 25 km

pour les autres domaines. Elles sont à un pas de temps horaire sur le domaine européen et trihoraire sur les autres domaines. Les variables téléchargées sont présentées sur le **Tableau 1**.

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

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

1.3. Correction du biais

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

1.4. Élection des vagues de chaleur

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

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

2. Analyse des résultats : Vagues de chaleur futures extrêmes sélectionnées

Nous avons ainsi obtenu le nombre, l'intensité et la durée des vagues de chaleur pour chaque ville et chaque période (**Figure 3**). Alors qu'aucune des villes n'a fait face à plus de dix vagues de chaleur durant la période contemporaine, on constate une augmentation très forte du nombre de vagues de chaleur dans le futur, notamment dans les quatre villes les plus proches de l'équateur (zones climatiques de l'ASHRAE 0 à 2). En effet, à Singapour cela correspondrait à une moyenne de trois canicules par an d'ici le milieu de siècle, et sept par ans d'ici la fin du siècle contre une tous les trois ans aujourd'hui. A Guayaquil et Sao Paulo le nombre

de vague de chaleurs détecté sur la fin du siècle est également impressionnant, supérieur à 150. L'augmentation dans les autres villes est moins contrastée mais toujours élevée, la plupart des villes présentent plus de vingt vagues de chaleurs dans le futur moyen-terme, soit en moyenne une vague de chaleur chaque année.

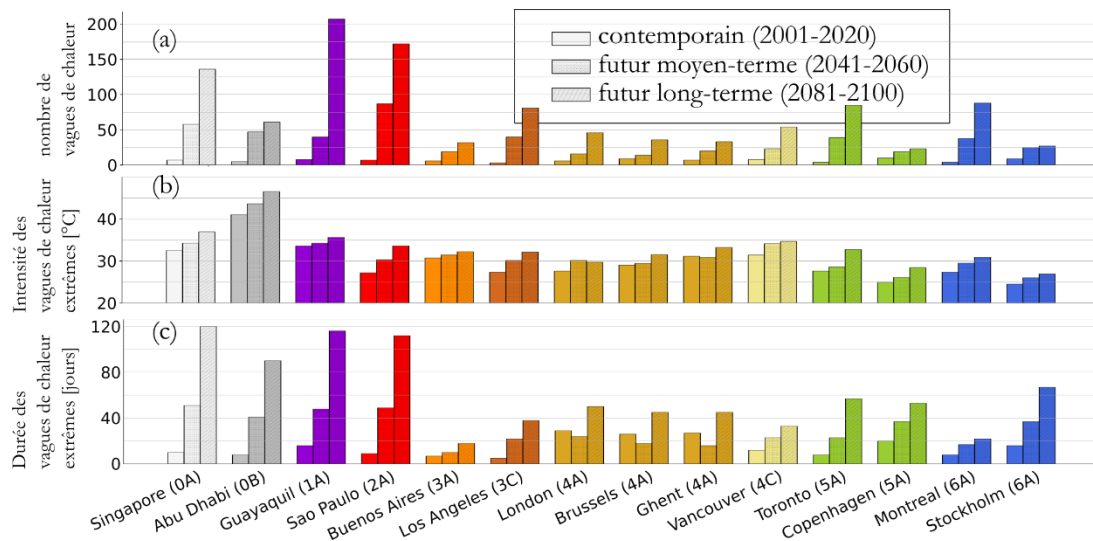


Figure 3 – Vagues de chaleurs (nombre, intensités, et durées), par ville et périodes d'étude (modèle climatique MPI-M-MPI-ESM-LR/REMO 2015, scénario socio-économique RCP 8.5)

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

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

Conclusion et Perspectives

Les fichiers météorologiques incluant les différents types de canicules futures selon les critères définis ici sont nécessaires pour le développement des solutions de rafraîchissement étudiées dans la communauté de l'énergétique du bâtiment. Ce travail marque une première étape dans la constitution de fichiers de référence permettant l'inter-comparaison de stratégies face aux vagues de chaleur futures, représentatives de toutes les zones climatiques de l'ASHRAE. Ces fichiers seront accessibles en open data, et pourraient être réutilisés pour des études d'adaptation à la chaleur dans des domaines proches (ex. cultures, serres, élevage). La méthodologie répliquable est adaptable, p. ex. pour d'autres modèles ou scénarios socio-économiques, ou encore pour quantifier les incertitudes liées aux modèles de projections climatiques utilisés. Par ailleurs, alors que la plupart des bâtiments sont situés en ville, ces fichiers n'incluent pas l'îlot de chaleur urbain (ICU) qui a été étudié aussi en première approche par des modèles simplifiés (Machard, et al. 2020). Enfin, les périodes de vingt années futures de données corrigées développées dans ce travail ouvrent des perspectives d'amélioration de la sélection de canicules spécifiques au climat local de certaines villes (par exemple, ajouter l'humidité comme paramètre de détection pour les villes où le climat est très humide).

Remerciements

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

Bibliographie

ADEME. 2021. « La climatisation dans le bâtiment - Etat des lieux et prospective à 2050 ».

Agence Internationale de l'Énergie. 2018. « The Future of Cooling », **92**.

ASHRAE. 2013. *ANSI/ASHRAE standard 169-2013, Climatic Data for Building Design*.

Attia, Shady, Ronnen Levinson, Eileen Ndongo, Peter Holzer, Ongun Berk Kazanci, Shabnam Homaei, Chen Zhang, et al. 2021. « Resilient Cooling of Buildings to Protect against Heat Waves and Power Outages: Key Concepts and Definition ». *Energy and Buildings* 239 (mai): 110869. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110869>.

Cannon, Alex J. 2018. « Multivariate Quantile Mapping Bias Correction: An N-Dimensional Probability Density Function Transform for Climate Model Simulations of Multiple Variables ». *Climate Dynamics* **50** (1-2): 31-49. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3580-6>.

Cannon, Alex J., Stephen R. Sobie, Trevor Q. Murdock. 2015. « Bias Correction of GCM Precipitation by Quantile Mapping: How Well Do Methods Preserve Changes in Quantiles and Extremes? » *Journal of Climate* **28** (17): 6938-59. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00754.1>.

Flato, G., J. Marotzke, B. Abiodun, P. Braconnot, S.C. Chou, W. Collins, P. Cox, et al. 2013. « Evaluation of Climate Models. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change ». Cambridge University Press.

« IEA EBC Annex 80 - Resilient Cooling of Buildings ». 2022. *Energy in Buildings and Communities Programme 2022*. <https://annex80.iea-ebc.org/>.

ISO. 2006. *NF EN ISO 15927-4 Performance hygrothermique des bâtiments - Calcul et présentation des données climatiques. Partie 4 : Données horaires pour l'évaluation du besoin énergétique annuel de chauffage et de refroidissement*.

Machard, Anaïs, Christian Inard, Jean-Marie Alessandrini, Charles Pelé, et Jacques Ribéron. 2020. « A Methodology for Assembling Future Weather Files Including Heatwaves for Building Thermal Simulations from the European Coordinated Regional Downscaling Experiment (EURO-CORDEX) Climate Data ». *Energies* **13** (13): 3424. <https://doi.org/10.3390/en13133424>.

Machard, Anaïs, Simon Martinez, Emmanuel Bozonnet, Eleonora Lacedra, et Christian Inard. 2020. « How to Assess Ecodistrict Resilience to Urban Heat Stress under Future Heatwaves? A Case Study for the City of Paris ». *ICRBE Procedia*, septembre, 11-24. <https://doi.org/10.32438/iCRBE.202044>.

Miller, Wendy, Anaïs Machard, Emmanuel Bozonnet, Nari Yoon, Dahai Qi, Chen Zhang, Aaron Liu, et al. 2021. « Conceptualising a Resilient Cooling System: A Socio-Technical Approach ». *City and Environment Interactions* **11** (août): 100065. <https://doi.org/10.1016/j.cacint.2021.100065>.

Ouzeau, G., J.-M. Soubeyroux, M. Schneider, R. Vautard, et S. Planton. 2016. « Heat Waves Analysis over France in Present and Future Climate: Application of a New Method on the EURO-CORDEX Ensemble ». *Climate Services* **4** (décembre): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.09.002>.

Zhang, Chen, Ongun Berk Kazanci, Shady Attia, Ronnen Levinson, Sang Hoon Lee, Peter Holzer, Agnese Salvati, et al. 2021. « IEA EBC Annex 80 - Dynamic Simulation Guideline for the Performance Testing of Resilient Cooling Strategies », **28**.

Zhang, Chen, Ongun Berk Kazanci, Ronnen Levinson, Per Heiselberg, Bjarne W. Olesen, Giacomo Chiesa, Behzad Soudagar, et al. 2021. « Resilient Cooling Strategies – A Critical Review and Qualitative Assessment ». *Energy and Buildings* **251** (novembre): 111312. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111312>.