

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.

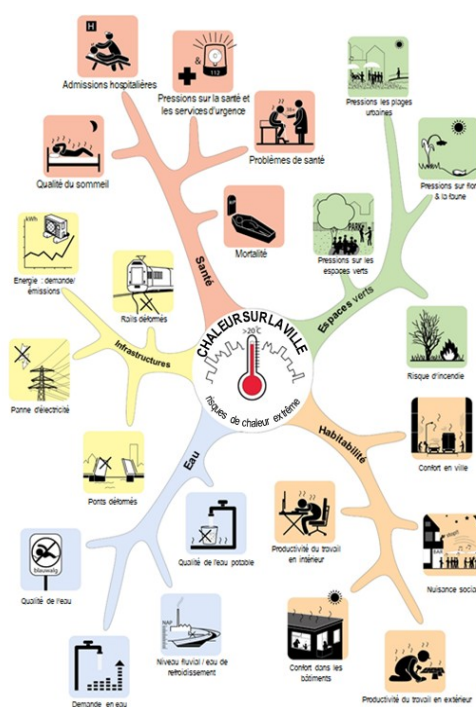


figure 1. Carte mentale des principaux impacts des épisodes de chaleur extrême sur les environnements urbains (traduit d'après Klok et Kluck, 2018).

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).

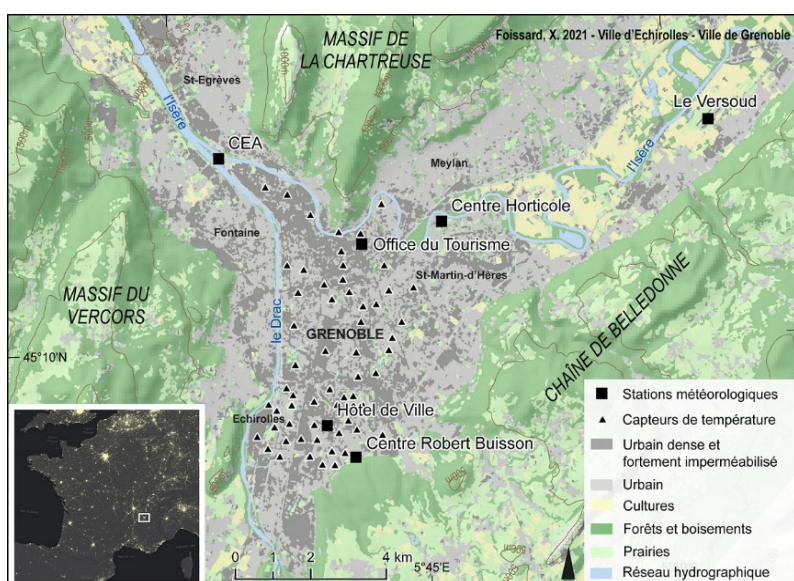


figure 2. Réseau d'observation météoclimatique urbain (6 stations météorologiques + 62 capteurs thermiques) installé au cœur de l'agglomération grenobloise depuis 2019.

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.

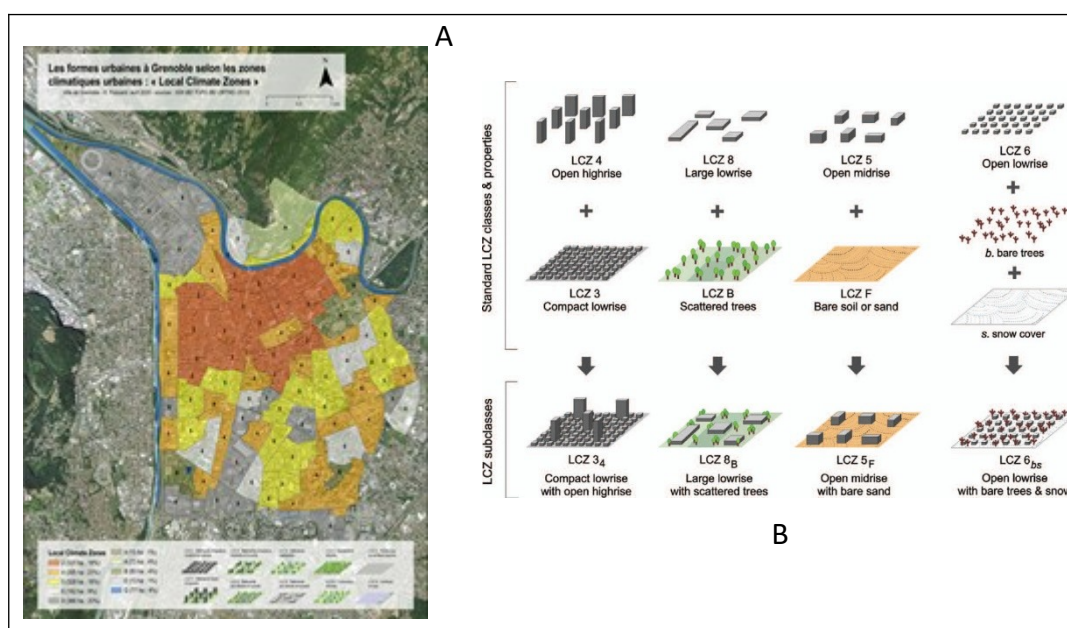


figure 3. L'approche par Local Climate Zones (LCZ). A gauche : Cartographie des formes urbaines selon les LCZ réalisée dans le cadre de l'étude préliminaire de l'ICU à Grenoble (Foissard, 2020). A droite : Sous-classes LCZ pour représenter les combinaisons de types de "bâti" et de "couverture terrestre"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

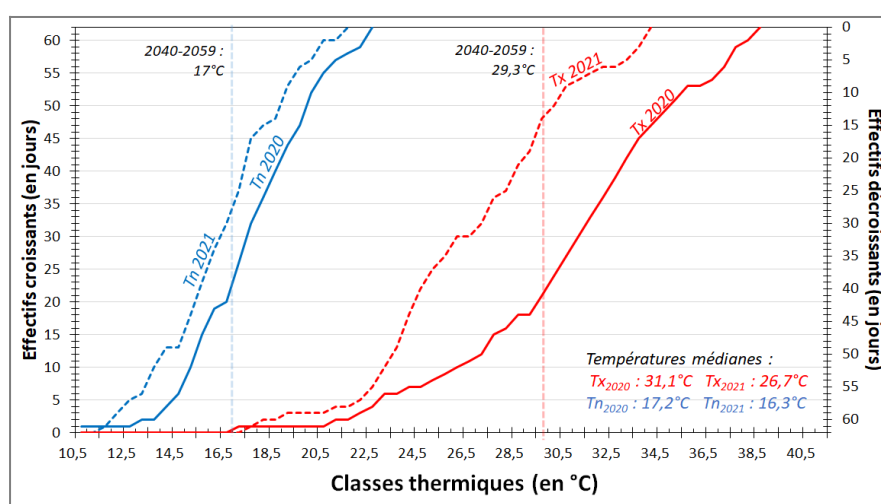


Figure 4. Nombre de jours cumulés croissants (ordonnée de gauche) ou décroissants (ordonnée de droite) selon des classes de températures de 0,5°C (abscisse) calculés à partir des températures minimales (Tn) et maximales (Tx) de la station Grenoble-CEA-Radôme en juillet-août (N = 62) des années 2020 et 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., Ragetli 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>