

Mesures et spatialisation de données climatiques et de qualité de l'air en milieu urbain en France

Measurement and spatialization of climate and air quality data in urban environments in France

Sarah Duché¹, Vincent Dubreuil², Malika Madelin³, Vincent Dupuis⁴, Xavier Foissard⁵, Yann Gripay⁶, Sandra Rome⁷, Sylvie Servigne⁶

¹ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Sciences Po Grenoble*, Pacte, 38000 Grenoble, France *School of Political Studies Univ. Grenoble Alpes, sarah.duche@univ-grenoble-alpes.fr

² Université Rennes 2, LETG-Rennes, UMR 6554 CNRS, Place du Recteur H.Le Moal, 35000 RENNES, vincent.dubreuil@univ-rennes2.fr

³ Université Paris Cité, UMR PRODIG, 8 place Paul Ricœur, 75013 Paris, France, malika.madelin@u-paris.fr

⁴ Sorbonne Université, UMR PHENIX, 2 place Jussieu, 75005 Paris, France, vincent.dupuis@sorbonne-universite.fr

⁵ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, INRAE, IRD, Grenoble INP*, IGE, 38000 Grenoble, France, France. **Institute of Engineering and Management Univ. Grenoble Alpes, xavier.foissard@univ-grenoble-alpes.fr

⁶ LIRIS, INSA-Lyon, CNRS, sylvie.servigne@insa-lyon.fr, yann.gripay@insa-lyon.fr

⁷ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, INRAE, IRD, Grenoble INP*, IGE, 38000 Grenoble, France, France. **Institute of Engineering and Management Univ. Grenoble Alpes, sandra.rome@univ-grenoble-alpes.fr

RÉSUMÉ. L'îlot de chaleur urbain et la pollution de l'air en ville, risques sanitaires majeurs en ville, peuvent être mesurés par des réseaux de stations fixes ou des mesures mobiles en milieu urbain. Des protocoles ont été mis en place pour avoir une représentativité de problématiques climatiques et de pollution de l'air à différentes échelles spatiales et temporelles. L'objectif de cet article est de présenter les réseaux de mesures existants, les protocoles mis en place dans les recherches françaises, et les représentations spatiales des données issues de ces mesures. Le panorama fait permet d'avoir une vision des questions scientifiques et techniques à avoir pour mettre en place des mesures climatiques et de pollution de l'air.

ABSTRACT. The urban heat island and urban air pollution, major health risks in cities, can be measured by networks of fixed stations or mobile measurements in urban environments. Protocols have been set up to ensure that climate and air pollution issues are representative at different spatial and temporal scales. The aim of this article is to present the existing measurement networks, the protocols implemented in French research, and the spatial representations of the data derived from these measurements. This overview provides an insight into the scientific and technical issues involved in setting up climate and air pollution measurements.

MOTS-CLÉS. Réseaux d'observation, ICU, services climatiques, LCZ, pollution de l'air, sciences participatives.

KEYWORDS. Observation networks, air pollution, UHI, climate services, LCZ, participatory research.

1. Introduction

Les îlots de chaleur et la pollution de l'air présentent un risque sanitaire important pour les populations en milieu urbain. L'îlot de chaleur urbain (ICU) se caractérise par un différentiel de température, principalement nocturne, observé entre les zones urbaines et les zones rurales et/ou naturelles environnantes, avec une relation entre le nombre d'habitants d'une ville et l'intensité maximum de l'ICU [OKE 73]. L'augmentation des vagues de chaleur liées au changement climatique et l'urbanisation amplifient l'ICU et l'exposition des citoyens à l'inconfort thermique, pouvant être la cause de morbidité et de mortalité [PAS 23]. De plus, les différences de performance énergétique dans les bâtiments peuvent engendrer un inconfort thermique plus important pour certains individus. En ville, la pollution de l'air, due à la concentration d'activités anthropiques, présente aussi un fort risque sanitaire à court et long terme pour les populations urbaines. En 2021, Santé publique France, estime que 40 000 décès par an

sont attribuables chaque année aux particules fines (PM_{2,5}). De plus, la densité du bâti en milieu urbain favorise l'ICU et la concentration de pollution de l'air. À l'échelle de l'individu, les impacts sanitaires de l'ICU et de la pollution de l'air varient selon les lieux fréquentés, les activités et leur durée, mais selon les facteurs physiopathologiques propres à chaque individu (âge, sexe, état de santé, fréquence pulmonaire, etc.).

Afin d'améliorer les enjeux climatiques urbains et de mieux comprendre les phénomènes, il est nécessaire de quantifier et de spatialiser les données climatiques et de pollution de l'air à plusieurs échelles, de l'échelle de l'agglomération urbaine à celle de l'individu, et avec un réseau suffisamment dense. Plusieurs réseaux de mesures se sont développés dans le monde et dans les agglomérations françaises depuis plusieurs années dans des projets de recherche, au sein de collectivités territoriales et/ou dans le cadre de services climatiques, comme à Marseille [MES 05], Toulouse [PIG 07], Rennes [DUB 08], Strasbourg [KAS 10], Nice [CAR 13], Dijon [RIC 18] [MAR 23a], Lyon [REN 19] ou encore Grenoble [FOI 24]. L'apparition des capteurs de température plus performants et des stations météorologiques automatiques permet l'enregistrement de données simultanées sur plusieurs sites (e.g. mesure de l'îlot de chaleur urbain), dans les bâtiments (e.g. plateforme expérimentale de bâtiment intelligent SoCQ4Home ; [SER 16]) ou en mesure mobile [LEC 15] avec une spatialisation fine. Les capteurs miniaturisés et à bas coût de polluants de l'air ont aussi facilité les mesures mobiles de la pollution de l'air [RED 22]. Ils permettent aussi de réaliser des mesures participatives, avec une cohorte de citoyens volontaires. Ces mesures ont pour objectif de sensibiliser les individus à la pollution de l'air et de récolter des mesures par un grand nombre de personnes à une échelle fine.

Comme il n'est pas possible de mesurer ces paramètres de manière exhaustive (bien que les collectivités souhaitent disposer d'une réponse « en tout point du territoire » et « à tout moment »), des protocoles ont été mis en place pour tenter de répondre à cette question d'offre de services climatiques : en premier lieu, la mesure elle-même, par essence ponctuelle (là où se situe le capteur), mais dont la représentativité spatiale et temporelle peut varier fortement. L'espace étant hétérogène, se pose ensuite la question de la densité de cette information : quel réseau de capteurs, quel échantillonnage spatial ? Un autre niveau de questions concerne la généralisation de la spatialisation de l'information, souvent au moyen d'outils géomatiques : dans ce cas, des couches d'informations supplémentaires peuvent être ajoutées dans la mesure où l'on sait qu'elles ont un impact sur la répartition spatiale du phénomène étudié (par exemple la densité du bâti pour l'îlot de chaleur urbain). Ce passage au spatial pose la question de la pertinence du détail de la cartographie finale : à quelle résolution l'information est-elle restituée ? le paramètre en question ne présente-t-il pas des modes de variabilités plus grands à échelle plus fine ? Enfin, la question de la mise à disposition de la donnée spatialisée doit aussi être posée.

L'objectif de ce chapitre est de faire un état des lieux sur les réseaux de mesures fixes et mobiles existants, répondant à différentes problématiques climatiques et de pollution de l'air, leur mise en place et en réseau, le traitement des données et leur visualisation. La première partie se focalise sur les réseaux de mesures fixes en ville, et l'intégration dans un réseau en relation avec les collectivités territoriales, à travers notamment des services climatiques. Une seconde partie se concentre sur les mesures itinérantes, avec plusieurs exemples de projets français. La dernière partie traite du traitement, de la représentation et de la spatialisation des données, ainsi que de la diffusion et de la visualisation des données climatiques et de pollution de l'air collectées. Au niveau international, les réseaux de mesures sont exhaustifs, mais nous choisissons ici d'illustrer nos propos à partir de projets de recherches françaises.

2. Les sites d'observation fixes en milieu urbain

2.1. Réseaux de mesure et services climatiques et au service des collectivités territoriales

« Climate services involve the generation, provision, and contextualization of information and knowledge derived from climate research for decision making at all levels of society » [VAU 14].

Si la littérature sur les services climatiques (SC) s'est considérablement étoffée dans les vingt dernières années, ce n'est pas nouveau : les réseaux nationaux (Météo-France, Associations Agréées pour la Surveillance de la Qualité de l'Air) et internationaux (Organisation météorologique mondiale) répondent déjà depuis plusieurs décennies à la définition ci-dessus de mise à disposition d'informations au service des décideurs. Les réseaux de mesures de qualité de l'air des Associations agréées pour la surveillance de la qualité de l'air (AASQA) avec mise à disposition d'informations ont été rendus obligatoires dès 1996 avec la loi LAURE à l'échelle des collectivités territoriales. Cependant, les réseaux de mesures nationaux sont peu denses dans les milieux urbains pour spatialiser l'ICU et la pollution de l'air à partir du réseau de mesures.

Trois facteurs de changement (globaux, politiques, technologiques) ont contribué depuis le début des années 2000 à accélérer la réflexion des scientifiques et le fleurissement des offres de SC en milieu urbain :

- D'une part, la récurrence des enjeux climatiques globaux, rappelés par les rapports successifs du GIEC et la préoccupation croissante face aux manifestations du changement climatique (à Rennes la mise en place du premier réseau de mesures climatiques a été bien « aidée » par la canicule de 2003) ;
- D'autre part, la nécessité de décliner ces enjeux à des échelles territoriales autres que nationales, qui sont plus proches de l'action publique locale et en milieu urbain [BIG 17] : de ce point de vue, les réseaux synoptiques traditionnels n'ont pas une densité suffisante pour répondre aux questionnements des collectivités territoriales et encore moins à l'échelle urbaine, fortement hétérogène. En France, la mise en œuvre des plans climat-air-énergie territoriaux (PCAET) a pu être l'occasion de faire le constat de la pauvreté des données mobilisables dans les établissements publics de coopération intercommunale (EPCI) et donc de montrer la nécessité de collecter (ou faire collecter) ce type de données.
- Par ailleurs, la diffusion de technologies à bas coût, la possibilité de recourir à des solutions simples et répandues (internet, réseau cellulaire, LoRaWAN, satellite) amène sur le marché de nouveaux jeux de données, largement en accès libre. Elle permet potentiellement de faire participer les citoyens aux enjeux territoriaux via des mesures participatives et le crowdsourcing.

Thématique globale du changement climatique, nécessité politique pour les collectivités de réaliser des diagnostics pour leurs stratégies d'adaptations et évolution technologique permettent donc de comprendre la multiplication des fournisseurs et des options disponibles aujourd'hui sur le marché des services climatiques. Dans la sphère académique, les géographes, géomaticiens ou non, se sont ainsi trouvés impliqués dans des dynamiques locales de forte demande institutionnelle offrant la possibilité de valoriser des compétences acquises aux échelles fines depuis plusieurs décennies [CAR 92] [BEL 02].

Pour toutes ces raisons, les principaux réseaux fonctionnels de suivi du climat urbain en France aujourd'hui résultent de partenariats forts entre des équipes de recherches et les collectivités territoriales (généralement les Métropoles) où elles se trouvent : historiquement, ce fut le cas à Rennes dès 2004 avec le programme ECORURB entre la Métropole et le LETG [DUB 20], à Dijon en 2014 avec le CRC [RIC 18] puis Toulouse en 2016 [DUM 21]. Aujourd'hui la mise en œuvre de nouveaux réseaux de mesures (par exemple, Grenoble, Metz, Nantes, Nice, Paris...) poursuit cette forte dynamique partenariale entre équipes de recherche disposant des compétences scientifiques et techniques reconnues et des collectivités avides de disposer de l'information climatique la plus dense possible. On doit cependant rappeler que les premières recherches ont pu s'inscrire dans des cadres institutionnels différents, par exemple avec des campagnes intensives, mais de courte durée (ESCOMPTE à Marseille, CAPITOUL à Toulouse) qui ont fourni des jeux de données scientifiquement très riches. Il existe aussi de nombreux exemples où des recherches de qualité sont menées sans la mise en place d'un réseau structuré et permanent d'observation (Strasbourg, Lyon, Bordeaux ...). Des réseaux de surveillance denses de la qualité de l'air ont aussi été déployés, comme le réseau Quality of Air Module for Environmental Learning Engineering and Observation Network (QameleON-Dijon) [MAR 23a].

Les travaux des scientifiques et des collectivités territoriales tendent aujourd'hui à se structurer à différents niveaux. Les travaux menés dans le cadre de l'Association Internationale de Climatologie ont permis des rencontres sur ce thème du climat urbain dès les premiers colloques organisés à partir de 1988 en France ou à l'étranger. Plus récemment, un Service National d'Observation (OBSERVIL) a été labellisé par le CNRS et permet des échanges sur le sujet entre une dizaine de sites (dont Toulouse, Rennes et Dijon). Un nouveau Réseau Thématique, "Climat urbain", coordonné par l'Université Gustave Eiffel, a plus récemment élargi le périmètre des interlocuteurs qui se retrouvent régulièrement pour échanger sur ces questions. L'émergence de ces questions urbaines dans les prospectives des Instituts du CNRS (INSU, INEE, InSHS, ...) facilite les sources de financement de ces recherches, avec par exemple, le PEPR Villes durables. La mise en réseau des projets de recherche permet aussi de faciliter la mise en place et le déploiement de campagne de mesures, comme pour Paname 2022 [MAS 22]. Au niveau européen, plusieurs réseaux se sont constitués : COST FAIRNESS, et au niveau international, les échanges sont réguliers dans le cadre des rencontres de l'ICUC (International Conference on Urban Climate). De leur côté, les collectivités ne sont pas en reste et les partenariats se nouent également dans le cadre du « réseau des Maires des grandes villes », la « convention des villes », le réseau français Villes-Santé et au niveau international l'Urban Climate Change Research Network.

2.2. Mise en place de réseaux de stations fixes extérieures en ville

Les réseaux d'observation permanents ou temporaires disposent de points fixes de mesures de paramètres météorologiques ou de polluants de l'air qui sont placés pour être représentatifs du climat [MUL 13] ou de la qualité de l'air à différentes échelles, dépendant des objectifs du réseau de mesures. Il est donc nécessaire de réfléchir à la représentativité des stations, du territoire d'observation et de les placer selon le phénomène que l'on souhaite observer.

La zone d'étude dépend des objectifs du réseau et de l'échelle de représentation, mais aussi des limites fixées par les commanditaires et les partenaires du réseau de mesures. Les échelles des réseaux de mesures météorologiques varient entre le microclimat (micro-échelle), le climat local (quartier/échelle locale) ou le climat régional (mésoéchelle) [OKE 04] [MUL 13]. L'ICU est souvent mesuré à l'échelle de la commune ou des communautés de communes partenaires ou commanditaires du réseau de mesures. Par exemple, la commune d'Échirolles (au sud de Grenoble) a souhaité se doter d'un réseau d'observation de l'ICU sur sa commune (Figure 1). La limite de la commune permet de guider des choix d'aménagement au niveau de la ville. Dans le cadre de cet objectif, il peut être pertinent de réaliser des mesures uniquement que dans la ville étudiée. Cependant, l'ICU est un phénomène plus large qu'une ville et ne s'arrête pas à la frontière communale, tout comme la pollution de l'air. Si l'on souhaite observer ces phénomènes, il est intéressant d'avoir un réseau de mesures plus large au niveau de la métropole (allant du centre jusqu'aux territoires périurbains et ruraux).

Il n'est pas possible d'avoir des stations en tout point du territoire pour des questions de coûts et d'emplacement des stations. Il est donc nécessaire de bien choisir leur zone de représentativité selon les objectifs. Pour observer les températures en milieu urbain, Stewart et Oke [STE 09] ont proposé une classification en zones climatiques locales (Local Climate Zone - LCZ). Les LCZ permettent de diviser l'espace en 17 zones, 10 zones urbaines selon la hauteur et la densité des bâtiments (de 1 à 10), 4 classes « végétalisées » (de A à D), 2 classes avec des sols minéraux (E, F) et une classe pour les surfaces d'eau (G). Cette classification est maintenant disponible pour beaucoup de villes (Wudapt : www.wudapt.org), grâce à une standardisation de la méthode [DEM 21] et les classes sont générées par des données satellites. Il existe aussi des outils nationaux, tels que GeoClimate+ de la Fondation GEOMANUM (<https://geomanum.org/fr/projets/geoclimate>), utilisant les données de la BDTopo V2.2 de l'IGN et OpenStreetMap à l'échelle du globe. Cette classification peut aussi être réalisée à partir d'une couche spatiale d'occupation du sol, avec l'implantation du bâti, leur hauteur, l'occupation du sol et la végétation (Figure 1) [FOI 22].

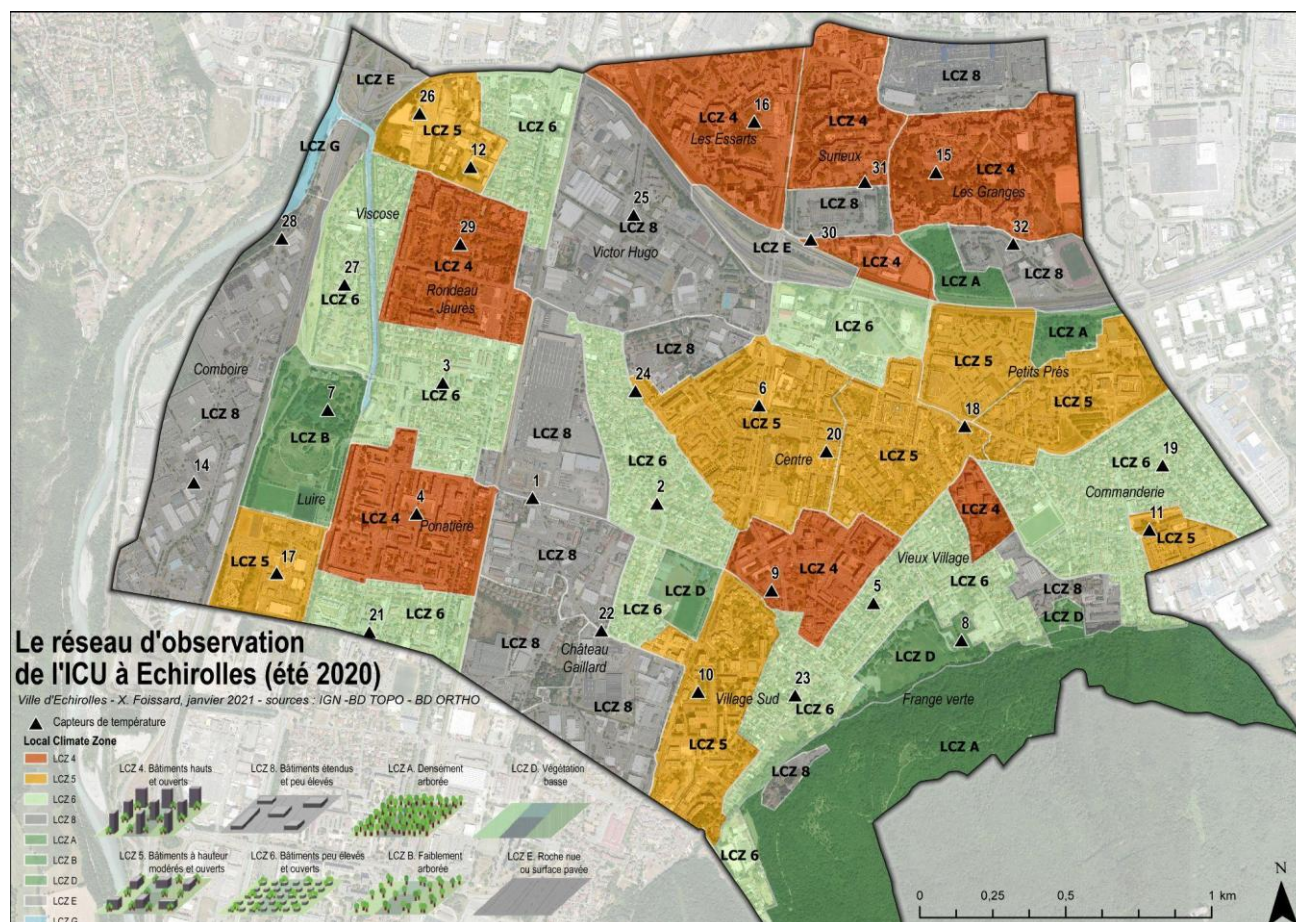


Figure 1. Réseau d'observation de l'îlot de chaleur urbain à Échirolles

Pour les réseaux de mesures fixes climatiques, le guide actualisé de l'Organisation météorologique mondiale [WMO 23] et le précédent de Tim Oke [OKE 04], réalisé pour le même organisme, permettent de choisir l'emplacement des stations tout en prenant en compte les effets du milieu urbain (changement de la circulation de l'air, rayonnement des bâtiments et de la couverture superficielle des sols, chaleur et vapeur d'eau provenant des activités humaines). Le choix des lieux est aussi souvent dépendant de la sécurité du capteur et des autorisations administratives locales. Enfin, les capteurs peuvent être connectés ou non, selon l'objectif des mesures. Dans le cadre d'un service climatique, il peut être intéressant d'avoir les données en temps réel et donc des capteurs connectés, même si le capteur connecté est plus coûteux. Dans le cadre d'une étude de l'ICU qui n'a pas besoin d'être en temps réel, des capteurs non connectés peuvent être mis en place. Cette solution demande de la maintenance pour récolter les données.

À Rennes, les premiers tests pour l'implantation d'un réseau permanent d'observation de l'ICU ont commencé en 2003 et un réseau de 15 stations automatiques a été déployé à partir de 2004. Constitué de stations DAVIS-Instruments (modèles Weather Monitor-2 puis Vantage Pro-2), le dispositif a été financé par la Métropole, le LETG et le CAREN (Centre Armoricaire de Recherche en Environnement devenu Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes) sur crédits CPER. Le réseau s'est progressivement étendu pour atteindre une trentaine de stations en 2018 (Figure 2) : jusqu'à cette date, les relevés étaient manuels, l'étude et le suivi étant réalisés a posteriori. À partir de 2019, de premiers tests ont permis de connecter les stations à internet et d'interroger les données à distance via la plateforme [meteodata.fr](https://run.letg.cnrs.fr/). Une nouvelle étape a été franchie en 2020 avec le déploiement de capteurs connectés à bas coût utilisant la technologie LoRaWAN. Une centaine de capteurs de température et humidité communicants sont maintenant déployés sur toute la métropole et accessibles en temps réel sur la plateforme RUN (Rennes Urban Network : <https://run.letg.cnrs.fr/>). À toutes les étapes de l'installation du réseau, les photographies aériennes et les classifications des LCZ ont été utilisées pour optimiser la répartition des points de mesures et couvrir au mieux la diversité du territoire [DUB 22].

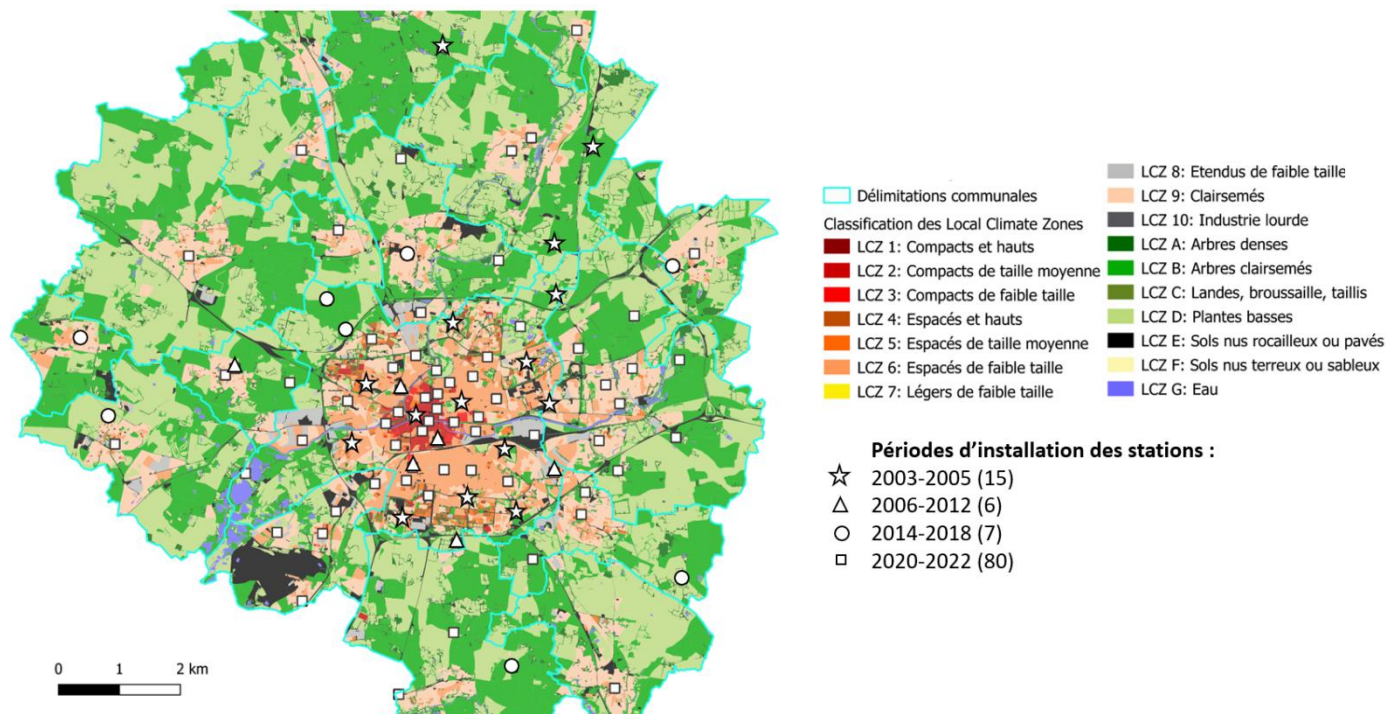


Figure 2. *Étapes de déploiement du réseau rennais de suivi des ICU d'après [DUB 22]*

Il existe aussi des réseaux de stations météorologiques et de pollution de l'air non conventionnels, de stations individuelles, comme celles du réseau Netatmo (<https://weathermap.netatmo.com/>) ou de SensorCommunity (<https://sensor.community/>), permettant de modéliser l'ICU et d'étudier les LCZ. Ces réseaux de mesures permettent une très haute résolution temporelle et spatiale, avec plusieurs milliers de stations à Paris pour le réseau Netatmo par exemple. Les stations sont placées par des non scientifiques, généralement sans protocole précis. Il est nécessaire de les analyser et de les trier avant de faire des études avec [MEI 17] [MAD 20b] [MAR 23b]. Les études récentes sur les données Netatmo montrent une différence avec des températures plus élevées dans les LCZ urbaines que celle végétalisée [FEN 17] [VAR 21], conforme au phénomène de l'ICU. Cependant, M. Madelin et V. Dupuis [MAD 22] ont montré des différences parmi les températures mesurées au sein d'une même classe de LCZ, qui nécessiterait d'être étudiées et complétées par un réseau de stations conventionnelles.

Les réseaux d'observation de la pollution de l'air ne sont pas installés selon les mêmes critères, car même si la densité du bâti peut jouer sur la concentration ou la dispersion de la pollution de l'air, l'échelle des LCZ basée sur les températures ne leur permet pas d'être représentatives d'une zone. Les stations de mesure de polluants atmosphériques sont principalement placées selon la proximité et l'éloignement des sources d'émission [MAT 16]. Les stations sont classées selon la densité de population, le type d'espace et d'émissions de polluants autour des stations. Globalement, ce classement se base sur des recommandations de l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) et des lignes directrices pour l'Union européenne. Les réseaux de mesures des associations agréées pour la surveillance de la qualité de l'air sont fondés sur ce modèle, et leur installation est réalisée avec l'aide technique du Laboratoire central de surveillance de la qualité de l'air (LCSQA). Les réseaux issus de la recherche et des collectivités territoriales utilisent aussi le même classement [MAR 23a]. Comme pour les stations météorologiques, il existe aussi des réseaux de stations de pollution de l'air non conventionnels, comme le réseau SensorCommunity (<https://sensor.community/>) utilisant des capteurs moins précis, mesurant principalement les particules fines. Tout comme pour les réseaux individuels de stations météorologiques, les micro-capteurs de polluants de l'air, non conventionnels, sont intéressants dans l'objectif d'informer et de sensibiliser des individus [RED 22], avec une exactitude moins importante que les stations de mesures fixes des associations officielles, certifiées par le LCSQA ou des réseaux de mesures de recherches scientifiques plus robustes. Cependant, tout comme pour la température du réseau Netatmo, la densité d'un réseau de micro-capteur de pollution de l'air permet d'avoir une information

spatiale moyennée représentative du phénomène observé. Si la densité du réseau est suffisamment importante, des variations spatiales et temporelles pourront alors être observées à l'aide des réseaux de stations non conventionnelles. Il est nécessaire cependant d'analyser et de trier les données avant de tirer des conclusions.

2.3. Mesures climatiques fixes dans les bâtiments

La question du confort thermique est aussi présente à l'échelle du bâtiment. Les mesures climatiques au sein des bâtiments permettent de spatialiser le confort thermique à l'intérieur. La plateforme expérimentale de bâtiment intelligent SoCQ4Home du laboratoire LIRIS [SER 16] a par exemple pour objectif de comprendre les phénomènes énergétiques de l'habitat grâce à un réseau de mesures (température, humidité, luminosité, présence, contact porte). Un étage d'un bâtiment du Campus LyonTech, hébergeant une partie du Département Informatique de l'INSA de Lyon et du Laboratoire LIRIS est instrumenté. Environ 70 capteurs ont été installés dans une vingtaine de salles : des bureaux d'enseignants-chercheurs, une salle de repos, des salles d'enseignement (salles de TD, amphi). Ces capteurs utilisent la technologie EnOcean et sont autonomes en énergie (grâce à des cellules photovoltaïques rechargeant leurs réserves d'énergie). 5 types de capteurs ont été déployés : Température (36), Température & Humidité (2), Température & Humidité & CO₂ (7, non autonomes en énergie), Contact de porte ou fenêtre (11), Luminosité & Présence (10). La figure 3 montre la distribution des capteurs dans le bâtiment et les tableaux de bord par bureau.

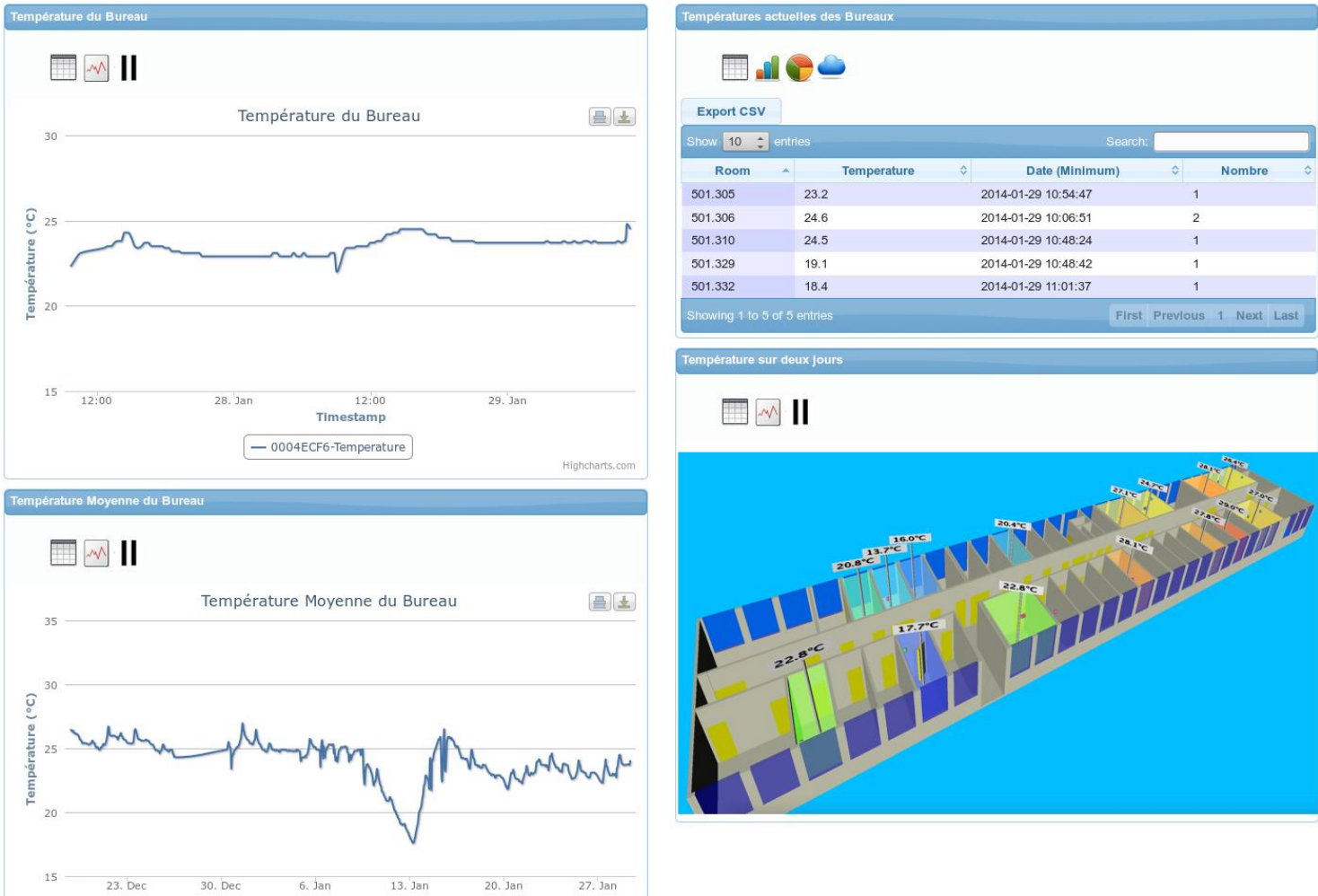


Figure 3. Tableau de bord : Projection 3D de la température sur les bureaux équipés de l'étage du bâtiment (bas droite) et courbes de température concernant un des bureaux du bâtiment (gauche), à partir des données collectées par la plateforme SoCQ4Home du LIRIS

a été réalisée pour valider un modèle, afin de déterminer le comportement réel d'un bâtiment dans son environnement, de quantifier les besoins thermiques et d'évaluer le climat local [ROD 18]. Ces mesures permettent de conseiller sur les stratégies à adapter, par exemple, durant la zone estivale, comme une synergie de stratégies passives d'été pour réduire les impacts de la surchauffe dans les bâtiments [YAQ 21].

3. Les campagnes de mesures et mesures mobiles en milieu urbain

Les mesures mobiles de paramètres météorologiques ou de concentration de polluants atmosphériques permettent de mesurer un phénomène climatique avec une résolution spatiale et temporelle plus fine que les réseaux de mesures fixes. Ils permettent de mieux mettre en évidence l'hétérogénéité des phénomènes et d'observer des micro-environnements (*i.e.* : différences selon les modes de transports, selon la morphologie urbaine). Elles permettent aussi d'être au plus proche des individus et donc d'évaluer l'exposition individuelle à la chaleur et à la pollution de l'air [AMB 05]. Ces mesures sont possibles et se démultiplient depuis une vingtaine d'années grâce à des appareils de mesures plus légers, ergonomiques, l'utilisation de smartphones et la facilitation de la géolocalisation [LAR 17]. Les capteurs à coûts plus réduits permettent aussi d'être portés par un nombre plus important de personnes. Les mesures mobiles sont sur des périodes définies avec des plages temporelles plus ou moins longues selon le phénomène étudié et le coût. Elles sont réalisées uniquement par des scientifiques, par des personnes non scientifiques ou les deux en collaboration, selon les objectifs des mesures. Elles sont exhaustives au niveau international, nous nous concentrons ici sur des exemples français.

3.1. Campagnes de mesures mobiles

Dans le cadre de projets de recherche ou d'études réalisées par des collectivités territoriales ou associations, des campagnes de mesures mobiles de paramètres météorologiques et de polluants de l'air sont faites par des scientifiques sur des durées plus ou moins longues et à plusieurs périodes. Elles peuvent avoir plusieurs objectifs : observer un phénomène à une résolution spatiale et temporelle fine, valider ou compléter un modèle ou une observation, et/ou de comparer différents trajets et modes de transports. Ces campagnes sont réfléchies pour répondre précisément aux objectifs, avec un protocole précis sur le choix et l'emplacement des capteurs, le choix des itinéraires et des jours et heures de collecte selon les conditions météorologiques et d'émission de polluants.

F. Leconte, dans sa thèse [LEC 14], a évalué la méthode de calcul des LCZ à partir de mesures mobiles dans l'agglomération de Nancy. Les mesures de température de l'air ont été réalisées à l'aide de capteur embarqué sur une voiture avec des itinéraires passant par plusieurs LCZ. Durant l'été 2012, l'itinéraire de 2h30 a été fait pour passer dans 6 LCZ, en détaillant chacune des LCZ, permettant de comparer les mesures de températures inter-LCZ, mais aussi d'évaluer les variations de température intra-LCZ. Durant l'été 2013, l'itinéraire aussi de 2h30 passait par 13 LCZ, avec une diversité de type de LCZ. Pour les deux périodes, les mesures ont été réalisées à la fois en période diurne et en période nocturne durant des conditions anticycloniques avec peu ou pas de vent, et une faible nébulosité. Pour la période diurne, le but est de réaliser des mesures mobiles au moment où la température d'air atteint son maximum journalier. Les mesures nocturnes ont été effectuées à minuit, au moment où l'amplitude maximale de l'ICU peut être observée. Des mesures itinérantes nocturnes ont aussi été réalisées à Rennes, avec pour objectif d'analyser les caractéristiques spatiales et temporelles de la température de l'air et de les mettre en relation avec les températures de surface terrestre, calculée à l'aide d'images satellites [BAR 20]. Il s'agissait ici d'augmenter sensiblement le nombre de points de mesures de températures de l'air pour construire un modèle statistique faisant le lien entre température de surface et température de l'air. Le même type de campagne de mesures peut être utilisé pour la pollution de l'air. Dans le cadre d'un travail doctoral, N. Martin [MAR 08] a réalisé onze campagnes itinérantes de mesures à vélo de concentration d'ozone au printemps et à l'été entre 2006 et 2008 à Nice et dans ses alentours. L'objectif était de caractériser les conditions météorologiques favorables à la formation et la concentration de l'ozone à

une échelle locale. Les campagnes de mesures de pollution de l'air permettent aussi d'analyser les différences de concentration de polluants selon les transports et les trajets.

3.2. Mesures itinérantes par des cohortes ou participatives

Les mesures de paramètres météorologiques et de polluants de l'air peuvent aussi être réalisées par des personnes non scientifiques volontaires dans le cadre de cohorte en recherche : *e.g.*, les mesures réalisées en déplacement et à l'intérieur par la cohorte de femmes enceintes et enfants SEPAGES, <https://cohorte-sepages.fr/>, ou des mesures de l'exposition à la pollution de l'air en zones urbaines dans le cadre de l'ANR Polluscope [TOU 22], les mesures citoyennes de la qualité de l'air (*e.g.* projet AirCitizen <https://aircitizen.org/>), ou encore grâce à des capteurs embarqués dans des véhicules particuliers ou collectifs (*e.g.* sur des bus à Rennes dans le cadre du projet AQMO [MOR 20]). Ces mesures constituent potentiellement pour la recherche une information scientifique très riche, dans la mesure où la grande quantité de données produites sont à des échelles spatiales et temporelles fines (typiquement quelques mètres et quelques secondes), et elles permettent d'étudier l'exposition individuelle dans différent contexte morphologique ou d'émission. Le protocole peut être guidé : par exemple, en conseillant sur la hauteur du port du capteur et/ou sur les itinéraires et leur fréquence. Cependant, il est moins contrôlé que les mesures réalisées par des scientifiques. Les volontaires qui portent un capteur peuvent choisir leur déplacement, sans prendre en compte les conditions favorables pour les mesures, faire leur propre test avec les capteurs ou bien mal porter le capteur (le laisser dans un sac, par exemple). L'absence de protocoles communs bien suivis associés à ces mesures, tout comme le manque d'information sur le contexte de la mesure, rendent ces données complexes à analyser et à exploiter (avec en particulier une très forte variabilité des moments et des lieux de mesure). Pour démultiplier les mesures, les capteurs utilisés sont des capteurs à bas coût et miniaturisés pour être portables. Les capteurs à bas coût sont moins précis que des instruments destinés à un usage professionnel ou scientifique. Les mesures mobiles nécessitent aussi un système de localisation géographique (contenu dans le capteur ou avec un GPS à côté) qui peut être peu précis, de ± 5 -10 m (surtout dans des milieux urbains denses, complexes), avec souvent des pertes de localisation lors de passage en intérieur, dans des rues encaissées, dans les transports en commun ou avec des problèmes de GPS.

Dans le cadre des cohortes scientifiques, la mesure faite par les volontaires s'accompagne d'information sur les activités et les modes de transport, soit avec une application ou un carnet de mobilité papier. Par exemple, le projet InterMob est une étude interventionnelle dont l'objectif principal consiste à identifier les leviers et freins à la réduction de l'usage de la voiture individuelle dans les mobilités quotidiennes sur la métropole grenobloise, le pays voironnais et la vallée du Grésivaudan [TER 22]. Depuis 2021, une cohorte d'environ 150 participants volontaires est suivie sur plusieurs semaines de mesures sur 2 ans. Au cours de ces deux années, les participants portent pendant trois périodes de sept jours un capteur de particules fines, qui mesure les taux de PM_{2,5} toutes les deux minutes et qui est équipé d'un filtre pour déterminer la composition chimique des particules. Les participants ont pour consigne de porter le capteur dans un sac avec le tuyau qui aspire l'air au niveau de leur voie respiratoire. Ils n'ont pas d'autres consignes. Ils ont aussi un capteur GPS et un accéléromètre, permettant de connaître leur position toutes les secondes et leur niveau d'activité physique. En parallèle, les participants remplissent pour chaque déplacement leur mode de transport et les activités aux lieux où ils se déplacent. L'objectif de ces mesures est de mesurer s'il existe une différence d'exposition individuelle à la pollution de l'air des participants en cas de changement de mobilité de la voiture vers des modes de transports plus actifs et durables (vélo, à pied, transport en commun). Dans cette étude, les participants sont des capteurs pour le projet de recherche, mais ils n'ont pas de retour avant la fin du projet sur les mesures, contrairement à ce qui peut être fait avec des mesures participatives.

Les initiatives de mesures itinérantes sont parfois directement issues de projets scientifiques en recherche participative. Les non-scientifiques peuvent y être plus ou moins impliqués et accompagnés (voir à ce propos la typologie de [HAK 13] [20 MAD a]). D'autres mesures peuvent être réalisées par

des non scientifiques grâce à la possibilité d'acheter des capteurs et leurs données mesurées sont mises à disposition (e.g. capteurs IoT comme AirCasting). Ces données peuvent être réalisées par des scientifiques de manière opportuniste, sans connaître précisément le dispositif de leur production. Ce qui peut poser des difficultés dans l'interprétation des résultats obtenus. Dans le cadre du projet "Respirons mieux dans le XXe arrondissement" de Paris, le collectif AirCitizen (aircitizen.org/wiki) a mis en place des recommandations pour la prise de mesures de particules (PM2.5 et PM10), afin de s'approcher d'un protocole commun : des recommandations sur le port du capteur, l'intégration du temps de réponse en multipliant, par exemple, les mesures lorsqu'une source est détectée, l'importance de la répétition des mesures sur des itinéraires donnés, et idéalement toujours dans le même créneau horaire, etc. De plus, des informations contextuelles ont été demandées aux participants, via des outils d'annotations (carnets de mesures, notes/tags sur applications mobiles, etc.), afin de permettre une exploitation scientifique de ces nouvelles données. Dans le cas de cet exemple de mesures mobiles avec des capteurs de qualité de l'air portés, l'un des principaux biais rencontrés lorsque l'on cherche à comparer la qualité de l'air à l'échelle des rues et à la relier à la morphologie urbaine ou au trafic routier est le croisement de fumeurs. En effet, la présence de fumeurs peut entraîner un signal de capteur très intense, ce qui peut augmenter très fortement les niveaux de particules mesurés, sans être représentatifs de la zone observée. Sans information de contexte, la prise en compte de ces pics associés aux fumeurs est délicate par son caractère aléatoire, mais aussi par la dépendance du signal à la distance capteur-fumeur. De même, la comparaison de traces GPS bruitées n'est pas facile et des opérations de type *map-matching* sont nécessaires (cf. partie 4.1).

L'interprétation de ces nouvelles données corrigées nécessite le croisement avec d'autres données, comme les conditions météorologiques ou l'état du trafic routier, et la comparaison de ces mesures mobiles à celles effectuées par des stations fixes et/ou à celles générées par des modèles, par exemple les modèles de pollution provenant des ASQAA. Enfin, la question de l'exploitation de ces données se pose ensuite (variabilité spatio-temporelle, fusion de données pour contraindre des modèles, interpolations multicritères de type LUR) et du niveau d'agrégation spatiale et temporelle à appliquer, en fonction du type d'application, de cartographie ou de visualisation envisagée.

Même si ces nouveaux jeux de données avec des micro-capteurs portatifs sont complexes, la quantité des données disponibles et leur analyse, en prenant en compte les différents biais possibles mentionnés précédemment, ouvrent la voie vers une quantification de la variabilité spatio-temporelle à des échelles jusqu'ici non atteintes par les mesures conventionnelles. Par exemple, dans le cas des mesures de qualité de l'air, cela permet de quantifier et de consolider les concepts de micro-environnements proposés pour l'analyse des expositions des populations à la pollution de l'air au moyen des bilans espace-temps-activité (e.g. [TOU 22]).

4. De la mesure ponctuelle à sa représentation cartographique et aux indicateurs

4.1. Prétraitement des données brutes

Pour toutes les données, il est nécessaire de les prétraiter et/ou de mettre en œuvre une vérification et une validation des données, en vérifiant les extrêmes, s'il n'y a pas de valeurs aberrantes et de valeurs manquantes. Elles peuvent être aussi comparées à des réseaux officiels pour vérifier la cohérence des données [MEI 17] [FEN 21].

Une fois les données vérifiées, il peut être intéressant d'agrégier la donnée pour faciliter l'analyse et la communication. Par exemple, dans le projet de la plateforme expérimentale de bâtiment intelligent SoCQ4Home, les données ont été produites périodiquement, environ toutes les 15 minutes, ou ponctuellement à l'occasion d'un événement particulier (grande variation de température, présence détectée, etc.). Elles ont été agrégées toutes les heures, avec une visualisation sur la plateforme tous les jours (Figure 4).

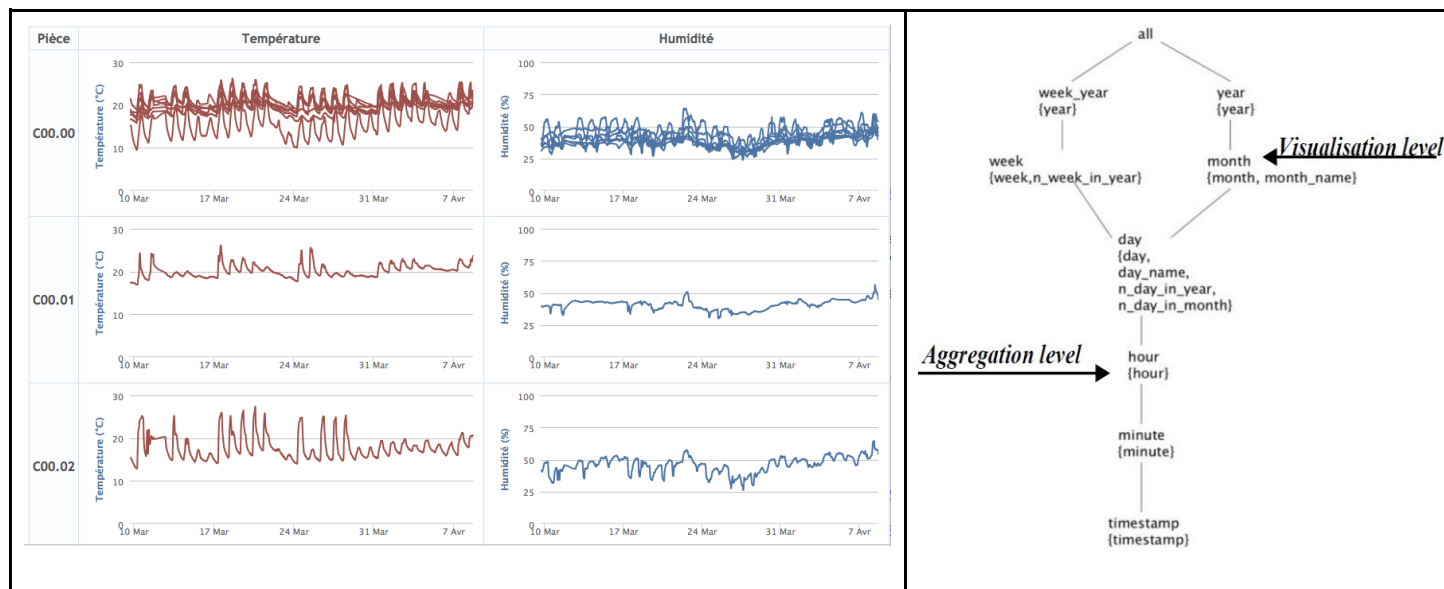
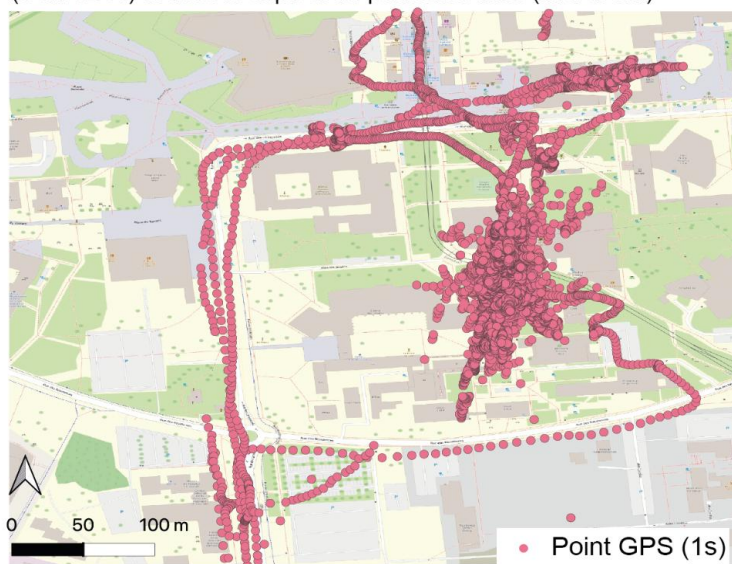


Figure 4. Visualisation personnalisée : par bureau ou salle, visualisation homogène sur 1 mois de mesures de température et humidité, agrégées par heure avec une courbe par capteur (7 capteurs dans la première salle C00.00 et un dans les bureaux suivants) à partir des données collectées par la plateforme SoCQ4Home

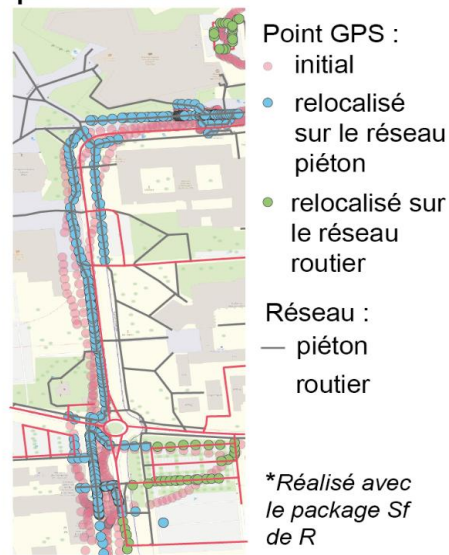
Les données avec des capteurs portatifs présentent des artefacts plus nombreux que les données issues de capteurs/stations fixes. En tout premier lieu, les capteurs sont sensibles aux variations des sources d'exposition (fumeurs, chantiers ...) ou d'exposition du capteur (ensoleillé/à l'ombre, à l'abri du vent ...). Ces variations peuvent créer des pics importants, à conserver ou non selon l'objectif. Si l'objectif est d'avoir des mesures représentatives d'une rue, par exemple, les pics peuvent être supprimés. Cependant, si l'objectif est d'avoir l'exposition individuelle, il est nécessaire de les garder. Les pics peuvent aussi être agrégés sur un pas de temps plus élevé.

En second lieu, les capteurs peuvent être utilisés uniquement en déplacement, mais ils peuvent aussi être portés en arrêt et dans des lieux. Les traces associées aux mesures ne correspondent alors pas exactement aux trajets effectués et aux lieux d'arrêt, et demandent un travail de prétraitement des données de localisation avant de visualiser les données météorologiques ou de qualité de l'air (Figure 5.a). À l'intérieur, les artefacts sont très importants avec la difficulté de capter les signaux satellites. Les traces peuvent être segmentées en arrêt-déplacement pour étudier les données climatiques ou de pollution selon ces deux modalités. Dans le projet InterMob, la localisation GPS mesurée toutes les secondes a été d'abord nettoyée avec un filtre médian qui calcule une position GPS médiane pour chaque fenêtre de la trace et les points trop éloignés de la trace médiane sont ensuite supprimés [KER 23]. Les points ont été ensuite séquencés en arrêt et en déplacement à partir de l'algorithme MBGP [MON 13] [KIM 21]. Cette méthode permet d'obtenir ensuite des paramètres statistiques descriptives de niveau de concentration de PM2.5 en déplacement sur des trajets et en arrêt sur des lieux intérieurs ou extérieurs (Figure 5.c).

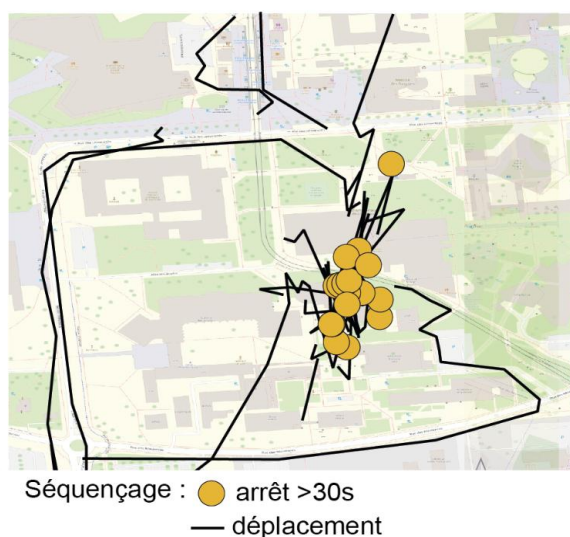
a - Extrait des points GPS d'un participant à l'étude InterMob, suivi sur une semaine avec le GPS et accéléromètre (SenseDoc) et avec le capteur de particules fines (MicroPem)



b - Mapmatching* des trajets à pied et en voiture



c - Traces GPS séquencés en arrêt et déplacement



d - Taux de PM2.5 mesurés toutes les 2 minutes, en moyenne par hexagones

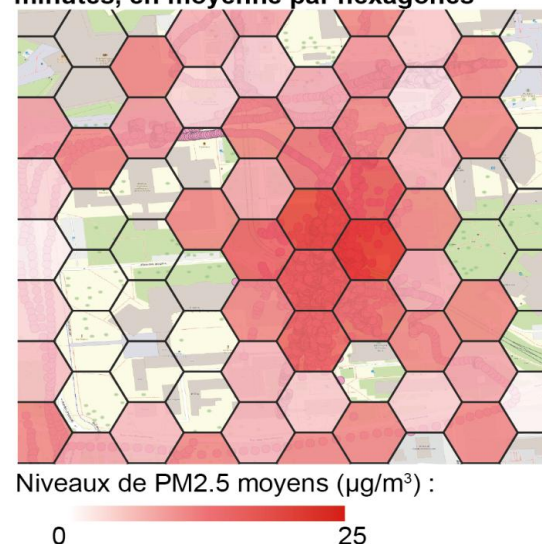


Figure 5. Prétraitement de données localisées

En troisième lieu, la localisation géographique des données mesurées en mobilité manque très souvent de précision lorsque les données sont prises dans un milieu urbain, en raison des masques des bâtiments qui créent des perturbations (Figure 5.a). Plusieurs méthodes de prétraitement sont utilisées, donnant des individus spatiaux différents, associés aux mesures réalisées en mobilité (Figure 5.a 5.d) : de nouveaux points (par corrections semi-manuelles ou par map matching, sur linéaire routier/piste, cyclable/piéton), des segments linéaires, des maillages réguliers (carrés ou hexagones) ou une segmentation arrêts/déplacement, agrégeant l'information d'un ou de plusieurs points d'échantillonnage initiaux (moyenne, médiane...). Ces différentes transformations du support de l'information (climatologiques ou sur la qualité de l'air) peuvent avoir des répercussions sur l'interprétation qu'on peut avoir des phénomènes observés. Par exemple, le *map matching* nécessite de supposer la voie sur laquelle la personne est passée. On suppose qu'une personne se déplaçant à vélo utilise les voies cyclables, mais ce n'est pas forcément le cas. Il est par ailleurs difficile de conclure la différence entre une voie de circulation routière et une voie cyclable qui sont l'une à côté de l'autre, sans savoir précisément le type de routes empruntées. Selon l'objectif, il peut être intéressant d'avoir un cahier d'observation ou une caméra.

Enfin, au-delà de ces corrections spatiales, le temps de réponse du capteur peut affecter les observations. Dans le cas d'un capteur mobile avec un temps de réponse important ou dans le cas d'un déplacement rapide, la question se pose de la localisation effective à associer à la valeur mesurée. Il faut alors accepter une certaine approximation spatiale des données.

En acceptant ces corrections, les données mobiles présentent une grande richesse, notamment du fait de leur granularité spatiale fine. On peut par exemple mesurer l'exposition aux particules fines d'une personne lors de son trajet à pied entre deux points. On peut également évaluer la distance de l'influence d'un parc dans une rue proche, ou jusqu'à quelle hauteur sur un bâtiment adjacent. En revanche, leur résolution temporelle permet difficilement de généraliser à l'ensemble des conditions atmosphériques et de dégager une information climatique ou de contexte d'émission de polluants. Pour pallier cette difficulté, il est possible de répéter les mesures sur un même itinéraire, dans des contextes météorologiques variés.

4.2. Spatialisation et création d'indicateurs spatialisés

Une fois les données prétraitées, elles peuvent être spatialisées de différentes manières. Les données brutes peuvent être représentées sur les points de mesures en étant agrégées au pas de temps temporel le plus pertinent selon l'objectif. Si le réseau de mesures est suffisamment dense, les données peuvent être interpolées, comme le montre la figure 6 sur l'intensité de l'îlot de chaleur à Grenoble selon deux conditions météorologiques différentes. Les données peuvent aussi être agrégées spatialement sous forme de grille hexagonale ou en carroyage. C'est ce qui est fait sur les plateformes de visualisation des mesures participatives (e.g., la *crowdmap* de la plateforme AirCasting <http://aircasting.habitatmap.org/> ou de Sensor.Community <https://maps.sensor.community/>).

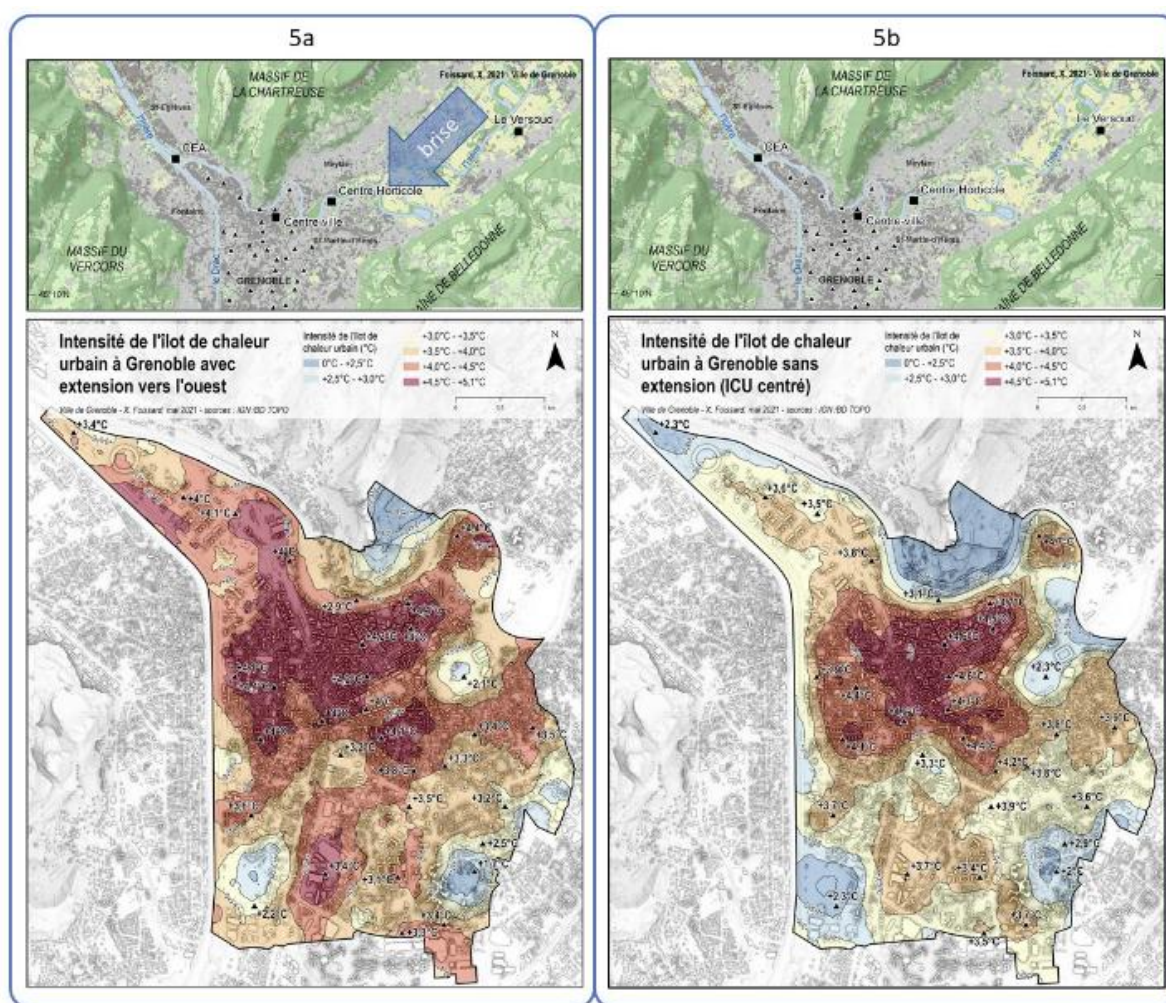


Figure 6. Intensité de l'ICU avec déplacement associé à une brise de nord-est (5a) et en l'absence d'advection (5b) pour la ville de Grenoble ; X. Foissard, 2021.

Des indicateurs spatialisés peuvent être créés à partir de paramètres météorologiques ou de qualité de l'air. C'est le cas du projet CASSANDRE (CANiculeS, SANté et Densité de REseaux météorologiques sur le territoire grenoblois, <https://www.ige-grenoble.fr/CASSANDRE>) qui étudie les extrêmes thermiques estivaux et leurs impacts sanitaires dans l'agglomération grenobloise, avec pour objectif final de proposer aux villes partenaires des éléments d'aide à la décision [ROM 22]. Le projet s'appuie sur un réseau urbain d'observations météo climatiques mis en place dans les communes d'Échirolles et de Grenoble (Isère), constitué de 62 capteurs thermiques de type Tinytag Talk 2 installés sur du mobilier urbain et de 4 stations météorologiques en plus de la station rurale (Le Versoud). Les mesures de température de l'air sont prises au pas de temps horaire. Ce réseau d'observation, très dense, permet d'évaluer d'une part, l'intensité de l'ICU nocturne à Grenoble et Échirolles et, d'autre part, la vulnérabilité socio-spatiale moyenne à cet ICU, ainsi spatialisée (Figure 7). Ici, la vulnérabilité résulte d'une combinaison sans pondération de 4 critères de sensibilité sociale (revenus, ménages isolés, personnes âgées de plus de 65 ans, présence d'enfants de moins de 3 ans) provenant de la base Filosofi de l'INSEE en 2017, associés à l'intensité locale de l'ICU moyen estival de 2020. Une forte exposition sociale peut être liée, soit à un critère fortement représenté sans le carreau (*e.g.* la prépondérance de personnes de plus de 65 ans là où l'ICU est très élevé), soit résulter de quartiers où les 4 critères et l'indice ICU sont concomitants sans être très élevés ; cette méthode traduit néanmoins une vulnérabilité socio-spatiale moyenne [ROM 23].

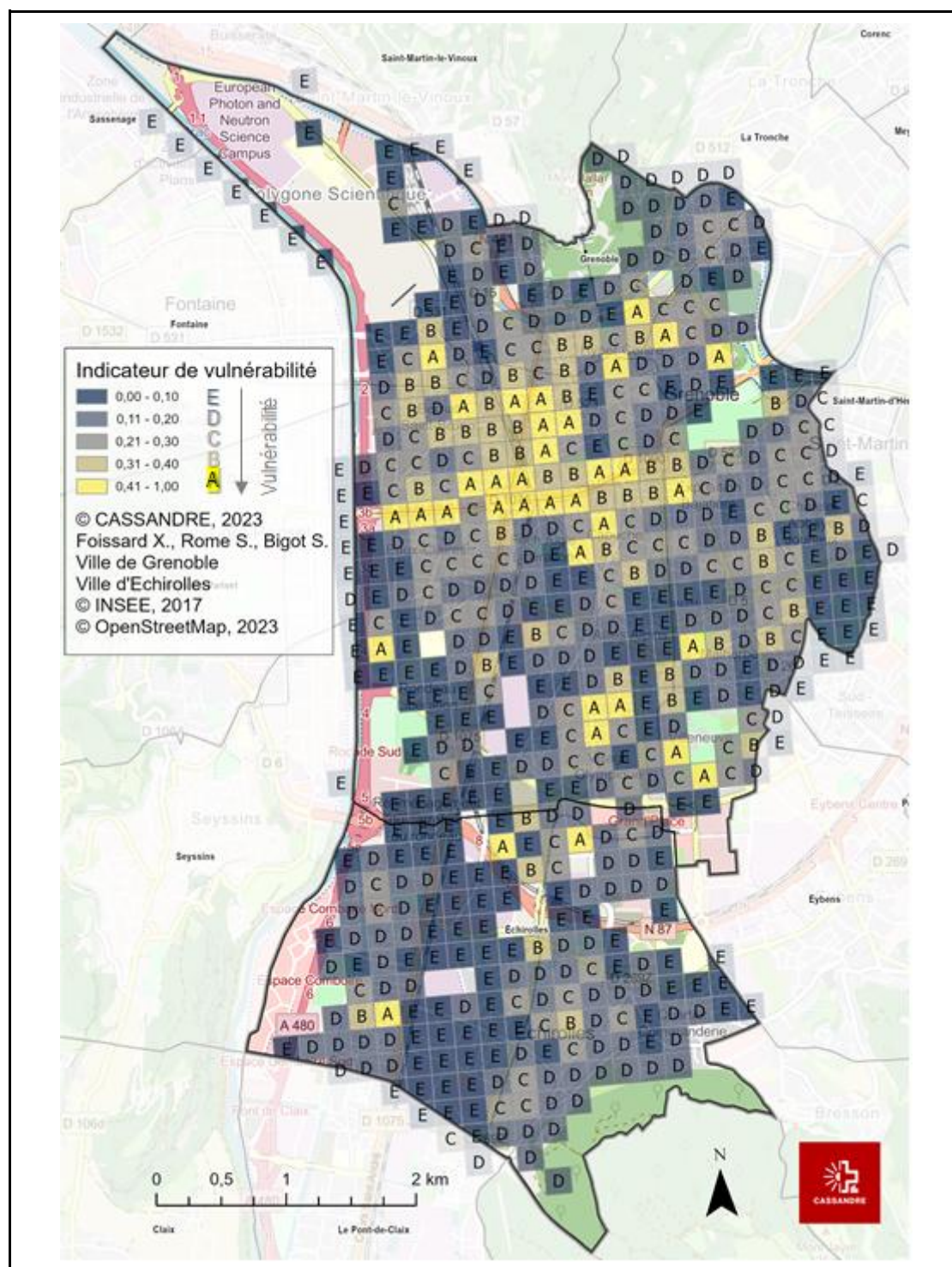


Figure 7. Vulnérabilité sociale à l'ICU à Grenoble et Échirolles. La lettre A désigne les zones de forte vulnérabilité, la lettre E celle de faible vulnérabilité. Source : adapté de Rome et al, 2023.

Ainsi, ce type de carte présente aux collectivités les zones vulnérables où il convient de prioriser certaines actions, en particulier celles où la forte exposition est engendrée soit par un fort ICU, soit parce que la vulnérabilité sociale y est élevée et nécessite une éventuelle attention des services sociaux et sanitaires.

4.3. Visualisation des données en temps réel et mise à disposition des données

À Rennes, une plateforme de visualisation en temps réel des stations connectées a été mise en place dans le cadre du RUN (Rennes Urban Network : <https://run.letg.cnrs.fr/>). L'utilisateur peut instantanément visualiser les températures (ou l'intensité de l'ICU) observées au cours de l'heure précédente ou à toute date ou heure de son choix (Figure 8). L'affichage ne permet, pour l'instant, qu'une

restitution numérique ponctuelle des valeurs de températures, mais il est déjà utilisé en routine par les services de la collectivité ou les médias et les particuliers lors des épisodes de fortes chaleurs, par exemple lors de la séquence de huit nuits tropicales consécutives observées dans le centre de Rennes début septembre 2023.

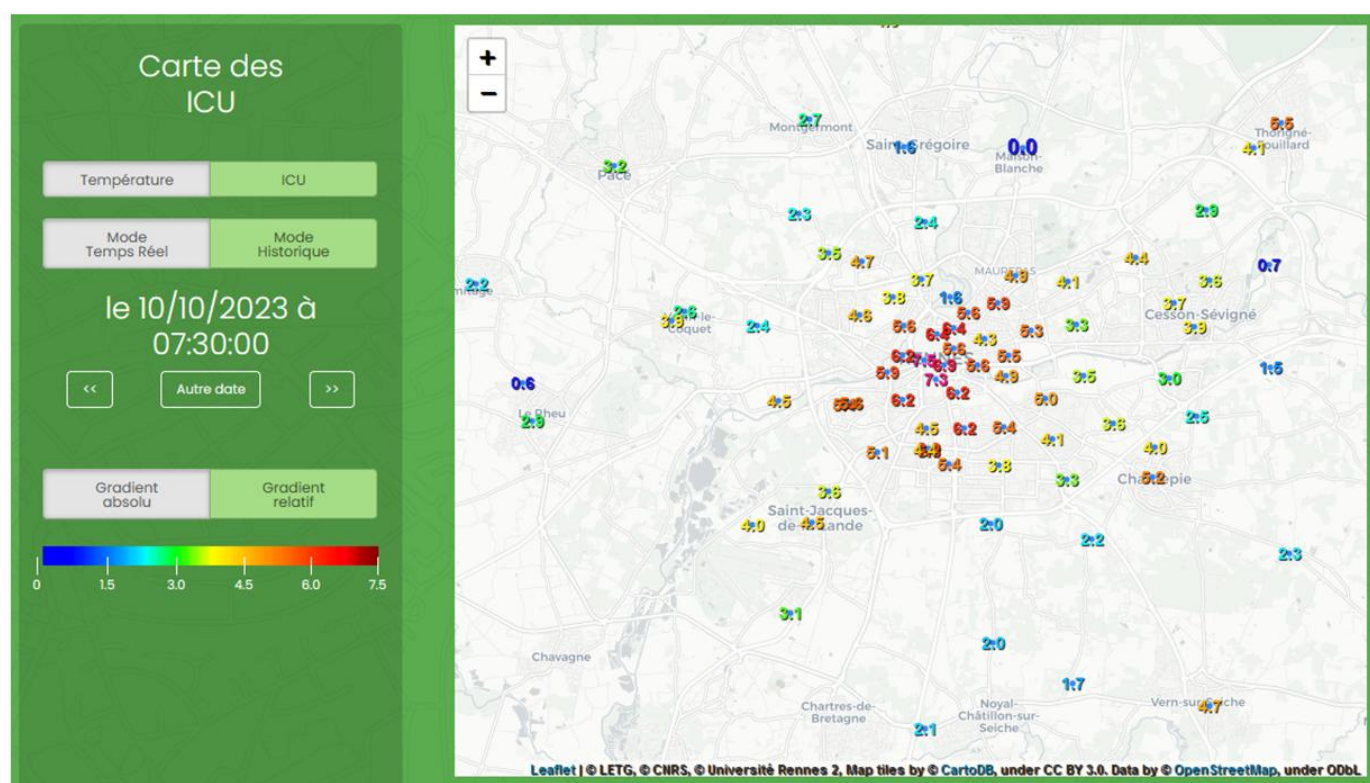


Figure 8. Plateforme de visualisation en temps réel des stations connectées dans le cadre du projet Rennes Urban Network : <https://run.letg.cnrs.fr/>

Certains projets ont pour objectif le développement de plateforme permettant la consultation et visualisation des données mesurées. C'est le cas du projet ANR CoSWoT¹ (2020-2024), qui a pour objectif d'intégrer les objets de l'IoT (Internet des Objets) dans une architecture distribuée reposant sur les outils du Web Sémantique. L'architecture déployée tient compte des contraintes des objets, depuis la collecte jusqu'à la visualisation des informations. Un Servient a été développé et déployé pour gérer les différents capteurs, en utilisant le framework node-wot² pour interagir avec les capteurs.

- Un Servient est un outil spécifique qui permet l'exécution des applications de l'IoT.
- Node-wot est une mise en œuvre des normes du web des objets dans NodeJS.

Il prend en charge plusieurs protocoles, tels que MQTT, COAP, HTTP et différents types de médias, tels que le texte, JSON. Il suit un modèle de conception qui garantit que les différents protocoles sont utilisés via la même API.

L'objectif est de créer une interface utilisateur qui permet la consultation des données des différents capteurs du bâtiment intelligent en offrant des fonctionnalités de filtrage des données pour cibler des créneaux horaires spécifiques, des pièces spécifiques, des valeurs seuils, etc. La solution déployée permet ainsi aux occupants du bâtiment de visualiser les données des capteurs à l'aide d'un tableau de bord

¹ <https://coswot.gitlab.io/> - CoSWoT est financé par l'agence nationale de la recherche sous la référence ANR-19-CE23-0012.

² <https://github.com/eclipse/thingweb.node-wot>

personnalisé présentant les faits selon leurs préférences (localisations, seuils) à différentes échelles de temps et d'espace (Figure 9).

Node-RED 3 a été utilisé pour créer le tableau de bord. Éditeur basé sur un navigateur, Node-RED simplifie le développement graphique d'applications axées sur les flux de données. Cela permet de réduire le temps nécessaire à la création d'une application fonctionnelle [ATE 22].

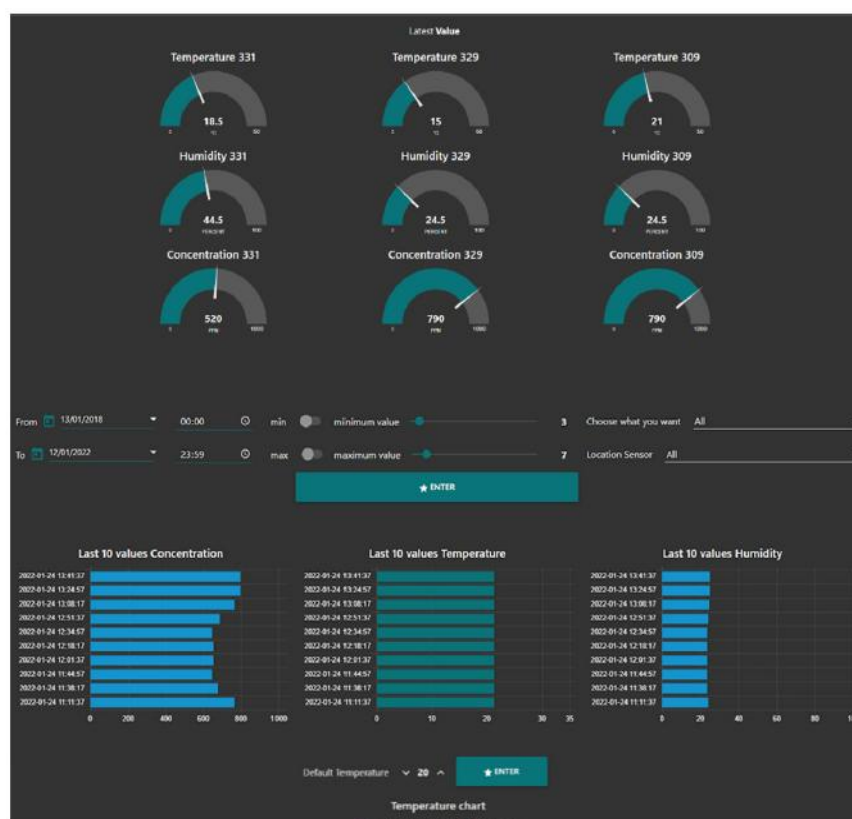


Figure 9. Tableau de bord personnalisé de suivi de données des capteurs du bâtiment dans le cadre du projet ANR CoSWoT

5. Discussion et perspectives

Les mesures de paramètres climatiques ou de polluants de l'air répondent à des problématiques en milieu urbain. Les questionnements peuvent aller de la spatialisation de l'ICU à l'échelle d'une agglomération, à des questions d'aménagement au niveau d'un quartier ou même d'un bâtiment (par exemple, de désimperméabilisation d'une cour d'école à Échirolles), jusqu'à des questions d'expositions individuelles à la pollution de l'air ou à la chaleur. Selon la problématique, on peut s'orienter vers des mesures fixes ou mobiles qui vont dépendre de la durée souhaitée des mesures, de la densité et de la zone étudiée, des coûts et des moyens disponibles. Les réseaux de mesures fixes couvrent une période qui peut être plus longue, mais ils demandent une densité de capteurs qui n'est pas toujours possible pour des questions de coût et de possibilité d'installation des capteurs. Un travail en amont doit être réalisé sur la représentativité de l'échantillonnage de la disposition des capteurs, en étudiant les LCZ par exemple dans le cas de l'ICU ou la proximité des sources d'émissions dans le cas de la pollution de l'air. Les mesures mobiles permettent de répondre à des problématiques précises avec une spatialisation plus fine et en tenant compte de l'hétérogénéité et de la diversité des zones hétérogènes traversées. Elles sont moins coûteuses dans le cadre de campagne de mesures, car elle demande l'achat de moins de capteurs et de moins de maintenance. Elles demandent cependant d'avoir une ou plusieurs personnes pour réaliser les mesures et sont plus restreintes temporellement, car il est difficile de démultiplier les jours de mesures. Les réseaux de mesures non conventionnels, fixes ou mobiles, par des capteurs individuels posés ou portés par des individus, permettent d'avoir une densité de capteur et de mesures plus importantes. L'achat des capteurs représente un coût s'il faut équiper les individus, mais des données

issues de réseaux, comme Netatmo ou SensorCommunity, permettent de visualiser des données climatiques ou de polluants de l'air par des capteurs achetés par des individus ou associations. Les mesures réalisées par des individus permettent aussi d'être au plus proche de leur exposition individuelle, pour l'étudier ou pour la sensibilisation.

La question de l'échelle dans le choix de l'emplacement des stations est indispensable à avoir, on ne place pas les capteurs de la même façon si l'on souhaite mesurer ce qu'il se passe au niveau d'une agglomération, d'un quartier ou d'une rue. De même, l'échelle choisie va avoir un impact sur la spatialisation des données mesurées. Les données mesurées peuvent être interpolées, mais cela nécessite une étude préalable de la densité des mesures, de leur échantillonnage, de leur autocorrélation spatiale et des variations temporelles. Elles peuvent aussi être agrégées au niveau d'un polygone qui peut être une grille régulière de différentes formes géométriques (hexagone ou rectangle/carré), selon un découpage territorial institutionnel (comme les IRIS de l'INSEE) ou selon un découpage répondant à une problématique (comme les LCZ). Si ce sont des mesures mobiles, elles peuvent aussi être agrégées à une polyligne, comme une rue ou une voie de circulation (cyclable, routière, piétonne...). Cette dernière agrégation dépend du niveau de précision des GPS et du pas de temps des mesures. Avant la visualisation des données par graphiques ou cartes, il est nécessaire d'avoir un temps de vérification, de nettoyage et de prétraitement des données.

Ces données corrigées peuvent être utilisées ensuite dans des approches de modélisation statistique et/ou numérique. Les modèles statistiques permettront d'identifier les facteurs expliquant la variabilité spatio-temporelle des mesures. Ces facteurs peuvent être des descripteurs relatifs aux paramètres morphologiques urbains (hauteur du bâti, Sky View Factor, part d'espaces verts autour, etc.). Ils permettront de quantifier leur importance et de spatialiser les champs thermiques et de qualité de l'air. De plus, les observations et les mesures sont aussi utilisées dans des modèles numériques [anonyme et al. 1, soumission en cours, ce numéro], afin de les calibrer, voire de valider les simulations réalisées quand cela est possible. Une approche hybride fusionne les observations et les modèles, en se basant à la fois sur les mécanismes physiques, avec comme contrainte de coïncider avec les mesures in situ.

Enfin, la mise à disposition des données, des informations traitées et analysées et des services climatiques se pose ensuite : à destination de qui ? Par quel moyen ? Les mesures climatiques sont très utiles pour l'aide à la décision et les recherches sur les enjeux environnementaux urbains, et il est donc nécessaire que les résultats des mesures soient disponibles et intelligibles. La question de la mise à disposition des données dépend de la propriété des capteurs (collectivité territoriale, bureau d'étude, laboratoire de recherche ...). L'ouverture des données dépend des conventions. L'ouverture des données publiques est encouragée, mais elles peuvent être agrégées ou publiées sous forme de rapport. Dans le cadre de mesures individuelles, les traces faites par les personnes sont des données personnelles sensibles et dépendent du Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD). Il est nécessaire d'avoir un accord des personnes qui font les mesures sur l'utilisation des données. La question de la diffusion des données et des résultats n'est pas négligeable. Elles peuvent être consultables via des publications ou des plateformes de diffusion des données ouvertes. Il est intéressant de pouvoir visualiser les données sous forme de visualisation numérique, car les données sont déjà prétraitées et agrégées pour répondre à un service et sont donc compréhensibles pour le plus grand nombre. Cependant, les plateformes numériques demandent des moyens humains et matériels pour être mise en œuvre et de la maintenance, ce qui a un coût. Il pourrait aussi être intéressant d'avoir des échanges sur les données mesurées.

Références

- [anonyme et al. 1, soumission en cours, ce numéro], Anonyme et al., « Geoclimatic modeling: tools, limits and outlooks », *Risques urbains*, soumission en cours
- [AMB 05] AMBROISE D., CHIRON M., DECHENAUX J., DERBEZ M., GRIMALDI F., MOSQUERON L., RAMBAUD J.-M., ROUSSEL I., ROZEC V. et SCHADKOWSKI C., « L'évaluation de l'exposition personnelle : comment faire et pour quoi faire ? », *Pollution atmosphérique*, n°186, p. 203-227, 2005.

- [ATE 22] ATEMEZING G. A., GRIPAY Y., SERVIGNE S., LAFOREST F. « Visualisation Node-RED de données sémantiques du bâtiment », dans *Plateforme Intelligence Artificielle*, Saint Etienne, 2022.
- [BAR 20] BARBOSA H. P., DUBREUIL V., « L'utilisation des transects mobiles nocturnes et des données satellitaires pour caractériser les îlots de chaleur urbains dans l'agglomération rennaise (Bretagne, France) », dans V. BONNARDOT et H. QUENOL (dir.), *Changement climatique et territoires*, Actes XXXIIIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rennes, 2020.
- [BEL 02] BELTRANDO G., 2002 (dir.), *Les échelles fines en climatologie*. Numéro spécial de la revue Hommes et Terres du Nord, 2002.
- [BEN 21] BENJAMIN K., LUO Z., WANG X., « Crowdsourcing urban air temperature data for estimating urban heat island and building heating/cooling load in London », *Energies*, n°14(16), p.5208, 2021.
- [BIG 17] BIGOT S., DUCHE S., MADELIN M., ROME S., « Étude du climat urbain : pour une mise à disposition de nouveaux services climatiques », *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, Société Géographique de Liège, n°68, p.17-36, 2017.
- [CAR 92] CARREGA P., Topoclimatologie et habitat, Thèse de doctorat, Université de Nice, 1992.
- [CAR 13] CARREGA P., « Le climat urbain de Nice en milieu géographique contrasté : synthèse par approche inductive », *Climatologie*, n°10, p. 9–34, 2013.
- [DEM 21] DEMUZERE M., KITTNER J., Bechtel B., « LCZ Generator: A Web Application to Create Local Climate Zone Maps. Frontiers », *Environmental Science*, n°9, 2021.
- [DUB 08] DUBREUIL V., QUENOL H., PLANCHON O., CLERGEAU H., « Variabilité quotidienne et saisonnière de l'îlot de chaleur urbain à Rennes : premiers résultats du programme ECORURB », dans F. Vinet (dir.), *Climats et risques climatiques en Méditerranéens*, Actes XXIe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Montpellier, 2008.
- [DUB 20] DUBREUIL V., FOISSARD X., NABUCET J., THOMAS A., QUENOL H. « Fréquence et intensité des îlots de chaleur à Rennes : bilan de 16 années d'observations (2004-2019) », *Climatologie*, n°17 (6), p. 1-17, 2020.
- [DUB 22] DUBREUIL V., BRABANT C., DELAUNAY G., NABUCET J., QUENOL H., CLAIN F., LEPRINCE F., DREANO J., GEORGET L., « Rennes, une ville climato-intelligente ? L'IoT au service du suivi des îlots de chaleur », *Les technologies numériques au service de la ville et de la personne*, Editions Techniques de l'Ingénieur, 2022.
- [DUM 21] DUMAS G., Co-construction d'un réseau d'observation du climat urbain et de services climatiques associés : cas d'application sur la métropole toulousaine, Thèse de doctorat, Université de Toulouse 3, 2021
- [FEN 17] FENNER D., MEIER F., BECHTEL B., OTTO M. et SCHERER D., « Intra and inter 'local climate zone' variability of air temperature as observed by crowdsourced citizen weather stations in Berlin, Germany », *Meteorologische Zeitschrift*, n°26 (5), p. 525-547, 2017.
- [FEN 21] FENNER D., BECHTEL B., DEMUZERE M., KITTNER J., MEIER F., 2021. « CrowdQC+—A Quality-Control for Crowdsourced Air-Temperature Observations Enabling World-Wide Urban Climate» *Applications. Front. Environ. Sci.*, n°9, 720747.
- [FOI 22] FOISSARD X., ROME S., BIGOT S., FOUVET A.-C., « Réseau de mesures et analyses spatio-temporelles de l'îlot de chaleur urbain grenoblois : l'été 2020 », dans J.-M. SOUBEYROUX, D. SERÇA, *Le changement climatique, les risques et l'adaptation*. Actes XXVe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Toulouse, 2022.
- [FOI 24] FOISSARD X., ROME S., BIGOT S., ROUSSET E., FOUVET A.-C., 2024. « A new high spatial density temperature dataset in the Grenoble alpine valley (France) for urban heat island investigation and climate services dedicated to municipalities purposes », *Data in Brief* 55, 110553.
- [HAK 13] HAKLAY M., « Citizen Science and Volunteered Geographic Information. Overview and typology of participation », dans D. SUI, S. ELWOOD, M. GOODCHILD (éds.), *Crowdsourcing Geographic Knowledge: Volunteered Geographic Information (VGI) in Theory and Practice*, Berlin, Springer, p. 105-122, 2013.
- [KAS 10] KASTENDEUCH P., NAJJAR G., LACARRERE P., COLIN J., « Modélisation de l'îlot de chaleur urbain à Strasbourg », *Climatologie*, n°7, p. 21–38, 2010.
- [KIM 21] KIM E.-K., EBERT E., WEIBEL R. (2021), « The Effect of Post-Processing in Stop-Move Detection of GPS Data: A Preliminary Study », dans *LBS: Proceedings of the 16th International Conference on Location Based Service*, pp. 24–25, 202.

- [KER 23] KEROUANTON C., CHARDONNEL S., DUCHE S., GINOUX C., CHALABAEV A., « Lieux, déplacements et activité physique au quotidien », dans *Les Environnements de l'Activité Physique et Sportive*, Actes de colloques ACAPS, Oct 2023, Reims (France), France, 2023.
- [LAR 17] LARKIN A., HYSTAD P., « Towards Personal Exposures: How Technology Is Changing Air Pollution and Health Research », *Current Environmental Health Reports*, n°4, p. 463–471, 2017.
- [LEC 14] LECONTE F., Caractérisation des îlots de chaleur urbain par zonage climatique et mesures mobiles : Cas de Nancy, Thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2014.
- [LEC 15] LECONTE F., BOUYER J., CLAVERIE R., PETRISSANS M., « Using Local Climate Zone scheme for UHI assessment: Evaluation of the method using mobile measurements », *Building and Environment*, n° 83, p. 39–49, 2015.
- [MAD 20a] MADELIN M., « La géographie biophysique participative », dans S. Dufour, L. Lespez (dir.). *Géographie de l'environnement. La nature au temps de l'anthropocène*, Armand Colin, Paris, pp. 95–106, 2020.
- [MAD 20b] MADELIN M., DUPUIS V., « Intensité et spatialisation de l'îlot de chaleur urbain parisien à partir de données participatives », *Climatologie*, n°17 (9), 2020.
- [MAD 22] MADELIN M., DUPUIS V., « Structure fine de l'îlot de chaleur urbain parisien à partir d'un réseau de stations non conventionnelles », dans J.-M. SOUBEYROUX, D. SERÇA (dir.), *Le changement climatique, les risques et l'adaptation*. Actes XXVe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Toulouse, 2022.
- [MON 13] MONTOLIU R., BLOM J., GATICA-PEREZ D., « Discovering places of interest in everyday life from smartphone data », *Multimed Tools and Applications*, n°62, p.179-207, 2013.
- [MAR 08] MARTIN N., La pollution par l'ozone et la climatologie dans un espace méditerranéen : les Alpes-Maritimes Thèse de doctorat, Université Nice Sophia Antipolis, 291 p., 2008.
- [MAR 23a] MARTINY N., MARILLEAU N., MARION S., DIALLO-DUDEK J., CANOVAS L., BISQUERRA A., REGA M., THEVENIN T., « Quality of Air Module for Environmental Learning Engineering and Observation Network (QameleON-Dijon) : un réseau dense de mesures de la qualité de l'air à Dijon », *Climatologie*, n°20(4), 2023.
- [MAR 23b] MARQUES E., Étude à fine échelle de l'îlot de chaleur urbain par modélisation bayésienne à partir de données opportunes, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP), 162 p., 2023.
- [MAS 22] MASSON V., LEMONSU A., MARTINET P., DENJEAN C., BOISSARD C., CANTRELL C., MICHOUD V., GROS V., HAEFFELIN M., KOTTHAUS S., LEYMARIE J., MADELIN M., PRICE J., « Une campagne de mesures sur le climat urbain et la qualité de l'air de la région parisienne », *La Météorologie*, n°118, p. 4-6, 2022.
- [MAT 16] MATHE F., MALHERBE L., *Guide méthodologique sur les stations françaises de surveillance de la qualité de l'air*, Guide méthodologique LCSQA, 2016.
- [MEI 17] MEIER F., FENNER D., GRASSMANN T., OTTO M., SCHERER D., « Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research », *Urban Climate*, 19, p. 170-191, 2017.
- [MES 05] MESTAYER P. G., DURAND P., AUGUSTIN P., BASTIN S., BONNEFOND J.-M., BENECH B., CAMPISTRON B., COPPALLE A., DELBARRE H., DOUSSET B., et al., « The urban boundary-layer field campaign in Marseille (ubl/clu-escompte): set-up and first results », *Boundary-Layer Meteorology*, n°114, p. 315–365, 2005.
- [MOR 20] Morin L., Bodin F., Depardon B., Georgiou Y., « Air Quality and MObility Extensible Sensor Platform, » *2020 IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, Antwerp, Belgium, pp. 1-5, 2020.
- [MUL 13] MULLER C.L., CHAPMAN L., GRIMMOND C.S.B., YOUNG D.T., CAI X., « Sensors and the city: a review of urban meteorological networks », *Intl Journal of Climatology*, n°33, p.1585–1600, 2013.
- [OKE 73] OKE T. R., « City size and the urban heat island », *Atmos. Environ.*, n°7, p. 769–779, 1973.
- [OKE 04] OKE T. R., *Initial Guidance to Obtain Representative Meteorological Observations at Urban Sites*. IOM Report 81, World Meteorological Organization, Geneva, 2004.
- [PAS 23] PASCAL M., WAGNER V., LAGARRIGUE R., CASAMATTA D., POUHEY J., VINCENT N., BOULANGER G., *Estimation de la fraction de la mortalité attribuable à l'exposition de la population générale à la chaleur en France métropolitaine. Application à la période de surveillance estivale (1er juin -15 septembre) : 2014-2022*, Données de surveillance, Santé Publique France, 35 p.
- [PIG 07] PIGEON G., LEGAIN D., DURAND P., MASSON V., « Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France) », *Int. J. Climatol.*, n°27, p. 1969–1981, 2007.

- [RED 22] REDON N., ALLARD L., DEBERT C., GABET S., HANOUNE B., MACE T., MADELIN M., RAMALHO O., ZEITOUNI K., « Micro-capteurs pour le suivi de la qualité de l'air intérieur et extérieur - Volume 1 : De l'usage de micro-capteurs à des fins d'évaluation de l'exposition individuelle : Avis de l'Anses Rapports d'expertise collective », Saisine n° 2018-SA-0271, Anses, 318 p, 2022.
- [REN 19] RENARD F., ALONSO L., FITTS Y., HADJIOSIF A., COMBY J., « Evaluation of the Effect of Urban Redevelopment on Surface Urban Heat Islands », *Remote Sens.*, n°11, 299, 2019.
- [RIC 18] RICHARD Y., EMERY J., DUDEK J., PERGAUD J., CHATEAU-SMITH C., ZITO S., et al., « How relevant are local climate zones and urban climate zones for urban climate research? Dijon (France) as a case study », *Urban Climate*, n°26, p. 258–274, 2018.
- [ROD 18] RODLER A., GUERNOUTI S., MUSY M., BOUYER J., « Thermal behaviour of a building in its environment: Modelling, experimentation, and comparison », *Energy and Buildings*, n°168, 1p. 9–34, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.008>
- [ROM 22] ROME S., FOISSARD X., BIGOT S., FOUVET A.-C., ROUSSET E., QUESNE A., LEPEULE J., BICOUT D., DUBUS N., « Enjeux et objectifs du projet CASSANDRE (CaniculeS, SANté et Densité de REseaux météorologiques sur le territoire grenoblois) », dans J.-M. SOUBEYROUX, D. SERÇA (dir.), *Le changement climatique, les risques et l'adaptation*. Actes XXVe Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Toulouse, 2022.
- [ROM 23] ROME S., FOISSARD X., DUBUS N., BICOUT D., BIGOT S., FOUVET A.-C., ROUSSET E., *Exposition socio- spatiale au stress thermique à Échirolles et Grenoble (Isère : Rapport d'avancement n°2 du projet CASSANDRE (CaniculeS, SANté et Densité de REseaux météorologiques)*, ADEME, 40 p., 2023.
- [SER 16] SERVIGNE S., GRIPAY Y., PINARER O., SAMUEL J., OZGOVDE A., JAY J., « Heterogeneous Sensor Data Exploration and Sustainable Declarative Monitoring Architecture: Application to Smart Building ». *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. III-4/W1, pp. 97-104, 2016.
- [STE 09] STEWART I.D., OKE T., « A new classification system for urban climate sites », *Bulletin of the American Meteorological Society*, n°90, p.922–923, 2009.
- [TOU 22] TOUILI N., RADJA K., SCHEMBRI P., KTAISH A., ZEITOUNI K., CHAIX B., et al., « Une analyse des variations spatio-temporelles de l'exposition individuelle à la pollution de l'air en Île-de-France à partir de micro-capteurs », *Cybergeo: European Journal of Geography*, 2024.
- [TER 22] TERAN-ESCOBAR C., DUCHE S., BOUSCASSE H., ISOARD-GATHEUR S., JUEN P., LACOSTE L. et al., « InterMob: A 24-month randomised controlled trial comparing the effectiveness of an intervention including behavioural change techniques and free transport versus an intervention including air pollution awareness-raising on car use reduction among regular car users living in Grenoble, France », *BMC Public Health*, n°22, 2022.
- [VAR 21] VARENTSOV M., FENNER D., MEIER F., SAMSONOV T., DEMUZERE M., « Quantifying Local and Mesoscale Drivers of the Urban Heat Island of Moscow with Reference and Crowdsourced Observations », *Frontiers in Environmental Science*, n°9:716968, 2021.
- [VAU 14] VAUGHAN, C., DESSAI, S., « Climate services for society: origins, institutional arrangements, and design elements for an evaluation framework », *WIREs Clim Change*, n°5, p. 587-603, 2014.
- [WMO 23] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO), *Guidance on Measuring, Modelling and Monitoring the Canopy Layer Urban Heat Island (CL UHI)*, WMO-No. 1292, 2023.
- [YAQ 21] Yaqubi, O., Rodler, A., Guernouti, S., Musy, M., 2021, « Summer passive strategies assessment based on calibrated building model using on site measurement data ». *Actes 2021 Building Simulation Conference*, 2021.