

ÉTUDE DU CLIMAT URBAIN : POUR UNE MISE À DISPOSITION DE NOUVEAUX SERVICES CLIMATIQUES

Sylvain BIGOT, Sarah DUCHÉ, Malika MADELIN, Sandra ROME

Résumé

Cet article fait un état des lieux sur la notion de services climatiques, et sur le déficit actuel de leurs orientations et applications à l'échelle urbaine. Il détaille particulièrement les enjeux que représentent ces nouveaux services dans le cadre de projets liés à l'adaptation aux changements climatiques pour les municipalités. Le constat de l'inadéquation des mesures climatiques collectées et des réseaux de mesures est également proposé, en les mettant en perspective avec de nouvelles approches de veille climatique, en particulier la mesure citoyenne et les nouvelles sources d'observation associées. L'exemple français de la ville de Grenoble sert ensuite à illustrer le déficit actuel de données climatiques utiles aux diagnostics et services urbains, alors même que les problématiques locales sur les extrêmes thermiques sont stratégiques, en particulier pour la plateforme municipale participative et d'anticipation 'Grenoble Ville de Demain'.

Mots-clés

climat urbain, services climatiques, adaptation, Grenoble, ville de demain

Abstract

This paper provides an overview of the concept of climate services and the current shortfall in their orientations and applications at the urban scale. It details the issues that these new services represent in projects related to adaptation to climate change for municipalities. The observation of the inadequacy of the collected climate measurements and of the climate networks is also done, putting them in perspective with new approaches to climate monitoring, in particular the citizen observations and the associated new sources of monitoring. The example of the French city of Grenoble is then used to illustrate the current deficit of climate data useful for urban diagnostics and services, even though the local issues on temperature extremes are strategic, especially for the municipal sharing platform 'Grenoble City of Tomorrow'.

Keywords

urban climate, climate services, adaptation, Grenoble, city of tomorrow

I. INTRODUCTION

Les espaces urbains consomment environ 75 % de l'énergie mondiale et représentent en moyenne entre 53 et 87 % des émissions globales de CO₂, alors que les villes de plus de 50 000 habitants correspondent à moins de 3 % de la surface terrestre (GIEC, 2014 ; Habitat For A Better Urban Future, 2016). Leur rôle dans les études sur le changement climatique (impacts, mesures d'adaptation, innovations technologiques, cadrages programmatiques, financiers et politiques) doit donc être déterminant. Pourtant, l'étude actuelle du triptyque climat-nature-ville porte surtout sur la nouvelle question du rôle des écosystèmes dans l'adaptation urbaine au changement climatique

(Rankovic *et al.*, 2012), encore appelé 'Ecosystem-based adaptation' (EbA). Cette adaptation se définit comme l'utilisation de la biodiversité et des services écosystémiques pour s'adapter aux effets négatifs du changement climatique en incluant la gestion, la conservation et la restauration des écosystèmes (Geneletti et Zardo, 2016). Mais la majorité des études de cas d'EbA sont liées aux zones naturelles, aux zones côtières, à l'agriculture et à la sylviculture, les espaces urbains étant encore peu déclinés, alors que tous les auteurs concluent que la planification au niveau urbain est un axe clé pour les principales actions d'adaptation au changement climatique (AEE, 2012) ; le principe de gouvernance anticipative doit se composer de trois étapes : l'analyse des futurs possibles, la création

de stratégies d'adaptation flexibles ainsi que le monitoring et l'action (Quay, 2010). Les risques climatiques associés en milieu urbain sont à la fois environnementaux (feux, sécheresses, vagues de chaleur, inondations, ...), par conséquent sanitaires (santé des populations fragiles, vagues épidémiques, accidentologie du travail et de la route, ravageurs agricoles, ...) mais aussi évidemment socio-économiques (coûts d'infrastructures, de transports, variations des marchés locaux, du tourisme, ...). Ces enjeux ont été largement rappelés lors des dernières conférences internationales dédiées au climat mondial (COP21 à Paris en 2015) et aux espaces urbains (HABITAT3 à Quito en 2016).

L'adaptation au changement climatique connaît cependant des progrès significatifs en matière de politiques, de pratiques et de recherche portant spécifiquement sur les zones urbaines (Carter *et al.*, 2015). Il existe par exemple des programmes de recherches abordant ce thème au travers des espaces naturels, en particulier pour les villes de Toulouse, Porto, Paris ou Montréal (Simonet et Blanc, 2012). Les capacités scientifiques qui fournissent de meilleures estimations des risques climatiques montrent un potentiel croissant au niveau mondial, mais aux niveaux régionaux et locaux, elles sont souvent limitées par les observations, la compréhension des processus de base, la faible capacité de modélisation et de la puissance informatique (Karl *et al.*, 2010).

Les projets et ces recherches sont encore très orientés sur des méga-cités mondiales (Paris, New York, Londres, Le Caire, Pékin, Rio de Janeiro...), et les aides à la décision ou programmations techniques ne sont pas aussi évidentes pour les activités de la majorité des villes et des zones urbaines de taille inférieure. Les plateformes d'information ne contiennent ainsi généralement pas de détails sur les liens entre les éventuelles mesures locales et les questions liées au climat. Or la plupart des nombreuses études sur les impacts du changement climatique et la vulnérabilité induite fournissent des résultats à des échelles spatiales supérieures (pays et région), limitant leur utilité pour développer des stratégies d'adaptation à l'échelle locale (urbaine et infra-urbaine).

En conséquence, au-delà de la très large gamme couvrant les services écosystémiques, ce sont bien

plus précisément en amont les services climatiques qui font encore largement défaut à l'échelle urbaine (Tang, 2008). La publication en 2015 par la Commission Européenne du rapport 'A European research and innovation roadmap for climate services' marque cette prise de conscience de l'intérêt des services climatiques. On note en parallèle la création d'une nouvelle revue scientifique anglo-saxonne dédiée intitulée 'Climate services' (revue Elsevier en accès libre). Mais, en dehors d'un seul cas asiatique étudié, l'ensemble de ces publications abordent pour le moment seulement des échelles et cadrages continentaux ou nationaux, et pas d'exemples spécifiquement urbains.

En effet, la variabilité spatiale des phénomènes météorologiques et climatiques, en lien avec les états de surface, influence et diversifie les impacts du changement climatique à l'échelle locale, et façonne donc la cartographie du risque induit. Alors que la planification spatiale fournit un levier politique clé pour lutter contre le changement climatique, elle doit être appliquée aux échelles urbaines (métropoles, districts, quartiers, bâtiments) et pas seulement à celles souvent conventionnelles d'ordre mondial et macroéconomique.

Devant les évolutions théoriques et organisationnelles rapides de cette nouvelle dimension de la climatologie opérationnelle, cet article, essentiellement conceptuel, fait un point sur la notion de services climatiques urbains, leurs enjeux et leur complexité. Il cherche à expliquer comment l'ensemble des capacités (mesure, observation, analyse, modélisation, communication, diffusion...) doivent être mobilisées et revues pour mieux développer une aide à la décision à l'échelle urbaine. Une partie insiste en particulier sur la dimension participative des services climatiques urbains, qui doivent développer de nouvelles relations entre la sphère des experts, des gestionnaires et des usagers/habitants. Un exemple ponctuel est ensuite présenté sur le cas de la ville de Grenoble, espace de montagne aux nombreux enjeux socio-économiques et potentiellement plus vulnérable au changement climatique, et pour lequel la notion de services climatiques urbains est déjà particulièrement intégrée dans les différentes réflexions, expérimentations et attentes de la collectivité, en associant scientifiques, services techniques et usagers.

II. L'ÉTUDE DU CLIMAT URBAIN POUR PROPOSER DE NOUVEAUX SERVICES

A. La notion de services climatiques

Les services climatiques sont définis comme « l'ensemble des informations et prestations qui permettent d'évaluer et de qualifier le climat passé, présent ou futur, d'apprécier la vulnérabilité des activités économiques, de l'environnement et de la société au changement climatique et de fournir des éléments pour entreprendre des mesures d'atténuation et d'adaptation » (Allenvi, 2014 ; Commission Européenne, 2015). L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) parle encore plutôt de services climatologiques (GFCS, 2014), qui offrent des produits et des conseils de façon à aider des particuliers ou des organisations à prendre des décisions. Elle les décline en quatre grandes catégories, en fonction de leur degré de précision, des objectifs et des prestataires qui les délivrent (Figure 1). La notion de prestataire (ou expert ou consultant) fait plutôt ici référence aux établissements, organismes régionaux ou nationaux dépendant des Services Météorologiques et Hydrologiques nationaux. Mais on observe déjà que pour beaucoup de cas urbains, ces réseaux inter-organismes qui élaborent et diffusent des informations, des produits et des avis climatologiques « faisant autorité, crédibles, exploitables et fiables fondés sur la science qui intéressent des organismes gouvernementaux, des secteurs socio-économiques et la collectivité en général » (GFCS, 2014) sont peu valorisables pour des études urbaines où la spécificité et la grande variabilité sont la règle.

Observations climatologiques Gestion de données climatologiques Rapport avec les usagers	<i>Services climatiques fondamentaux (catégorie 1)</i>
Evolution probable du climat saisonnier Surveillance du climat	<i>Services climatiques essentiels (catégorie 2)</i>
Produits climatologiques spécialisés Prévisions climatiques décennales Projections climatiques à long terme	<i>Services climatiques complets (catégorie 3)</i>
Produits climatologiques personnalisés Outils d'applications climatologiques	<i>Services climatiques avancés (catégorie 4)</i>

Figure 1. Les types de produits et de services climatiques selon quatre grandes catégories essentiellement dépendantes des prestataires nationaux (adapté d'après GFCS, 2014).

Dès 2011, un projet Joint Programming Initiative (www.jpi-climate.eu) intitulé 'Connecting Climate Knowledge for Europe' débute en associant 17 pays européens pour mieux fédérer les recherches sur le climat et orienter les processus de transformation sociétale à la lumière du changement climatique. Dans ce programme, les recherches sur les services climatiques forment l'un des quatre piliers prioritaires pour produire des informations scientifiques reposant sur les projections des changements climatiques régionaux et leurs impacts sectoriels, en recherchant une bonne valorisation auprès des utilisateurs (Monfray et Bley, 2016).

Dans la suite de cette programmation européenne, un appel d'offre de type ERA-NET a été lancé spécifiquement sur les services climatiques en 2016, intitulé 'European Research Area for Climate Services' (www.ERA4CS.eu). Actuellement, ERA4CS vient compléter des actions comme H2020, C3S (Copernicus Climate Change Service), Climate ADAPT (European Climate Adaptation Platform) ou encore Climate-KIC (Knowledge and Innovation Communities).

La priorisation des recherches pour faire progresser les services climatiques est aussi observée dans les documents de l'Organisation Météorologique Mondiale, ainsi que dans les programmes WCRP (World Climate Research Program), PRCCVIA (Programme of Research on Climate Change Vulnerability, Impacts and Adaptation), the US National Weather Services et tous les nombreux projets européens en cours (en reprenant la liste de Vaughan *et al.*, 2016, on citera : DRIAS, EUPORIAS, SPECS, NACLIM, CLIM-RUN, CORE-CLIMAX, ECLISE).

Malgré ces échanges et expertises émergentes exponentielles, les concepts et objectifs attachés aux services climatiques demeurent récents, surtout en France. L'élaboration et la mise en place de ces services sont pourtant stratégiques en termes d'égalité territoriale, face aux défis environnementaux auxquels les villes doivent faire face dès aujourd'hui, et aussi parce que c'est un enjeu de compétitivité internationale (PFVT, 2015). La synthèse fonctionnelle qui en est faite en 2016 par la Commission Européenne montre toute la complexité pluridisciplinaire et analytique des services climatiques attendus, dans une logique d'interactions (Figure 2).

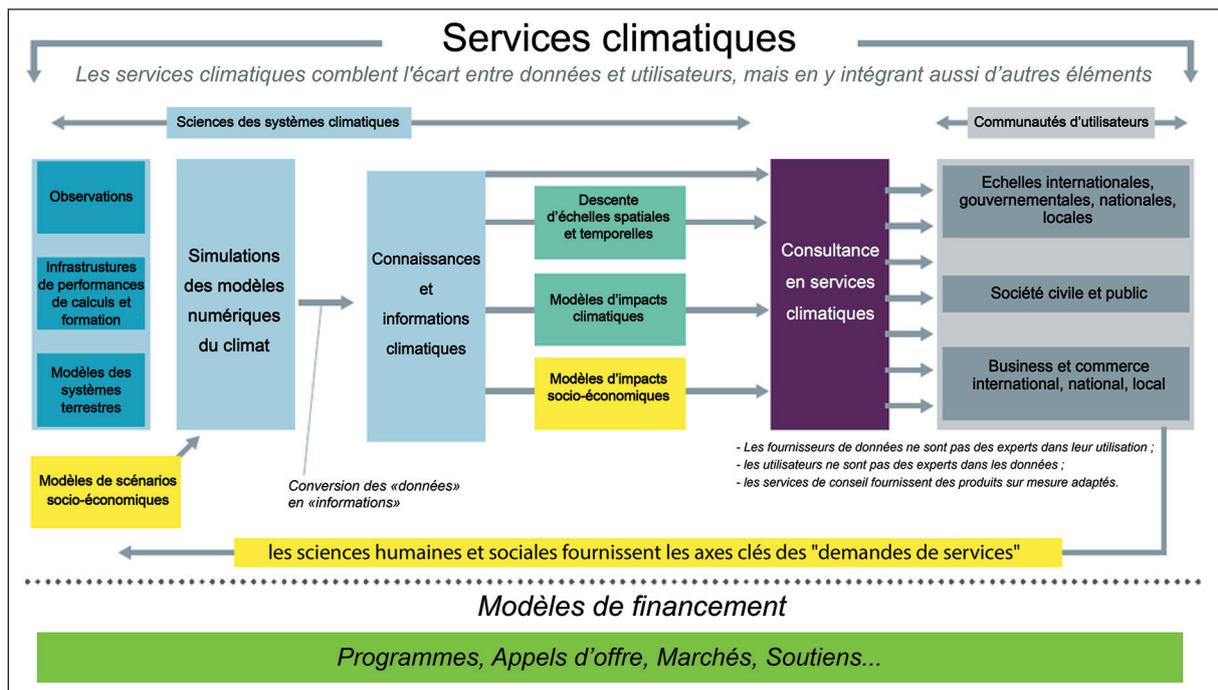


Figure 2. Les éléments clés permettant la mise en place de services climatiques (adapté en français d'après un document de la Commission Européenne, 2015).

Il faut en particulier dépasser la partie réservée aux ajustements sur les données et aux sciences des systèmes climatiques, pour y allier celles provenant des communautés d'acteurs et des modes de financement. Le lien entre communauté scientifique et communauté d'acteurs passe théoriquement par un intermédiaire de consultance en service. Elle doit être perçue comme à la fois experte mais également citoyenne, et pas seulement provenant d'organismes nationaux ou internationaux, mais aussi des échelles locales. Ces nouveaux acteurs sont souvent appelés 'intermédiaires' ou 'courtiers en connaissances climatiques' (*climate knowledge brokers*) et jouent différents rôles dans les services climatiques, à l'interface des utilisateurs finaux (Vaughan *et al.*, 2016).

La dimension nationale et internationale demeure essentielle pour les pays du Sud qui développent ou initient encore leurs services climatiques, notamment les capacités de base en systèmes de mesure et de diffusion pérennes (pour des systèmes d'alerte précoce). Mais l'échelle urbaine demeure encore l'échelon mal défini dans cette logique de transfert d'informations et de prestations climatiques spécialisées vers les collectivités et vers la société civile, en lien avec les habitants, les acteurs et les usages de la ville. Car si l'OMM pose des questions fondamentales au sujet des services

climatiques en partant de principes nationaux ou supra-nationaux dans leur gouvernance et fonctionnement (Figure 3), elle ne s'interroge encore pas suffisamment sur la dimension urbaine (le mot 'ville' n'apparaît d'ailleurs pas dans l'ensemble du dernier rapport du GFCS sur le renforcement des capacités). On notera ainsi la question de la réglementation autorisant la collecte, la transmission, l'archivage et la production d'informations climatologiques. Les résultats du sondage mené par Vaughan *et al.* (2016) pour identifier les demandes provenant des parties prenantes internationales qui contribuent potentiellement à la communauté des services climatiques sont évocateurs : près d'un tiers des répondants se considèrent comme des utilisateurs de l'information sur le climat, mais seulement quelques pourcents lorsqu'on examine l'échelle municipale.

En effet, même si les zones urbaines connaîtront généralement les mêmes expositions générales aux principales tendances et variations climatiques que leur région environnante, le cadre urbain – par sa forme et son activité socio-économique – peut modifier les expositions ainsi que les impacts à l'échelle locale. Certaines caractéristiques géographiques et/ou morphométriques peuvent ainsi intensifier ou modérer les changements et variations d'origine anthropique observés par ailleurs

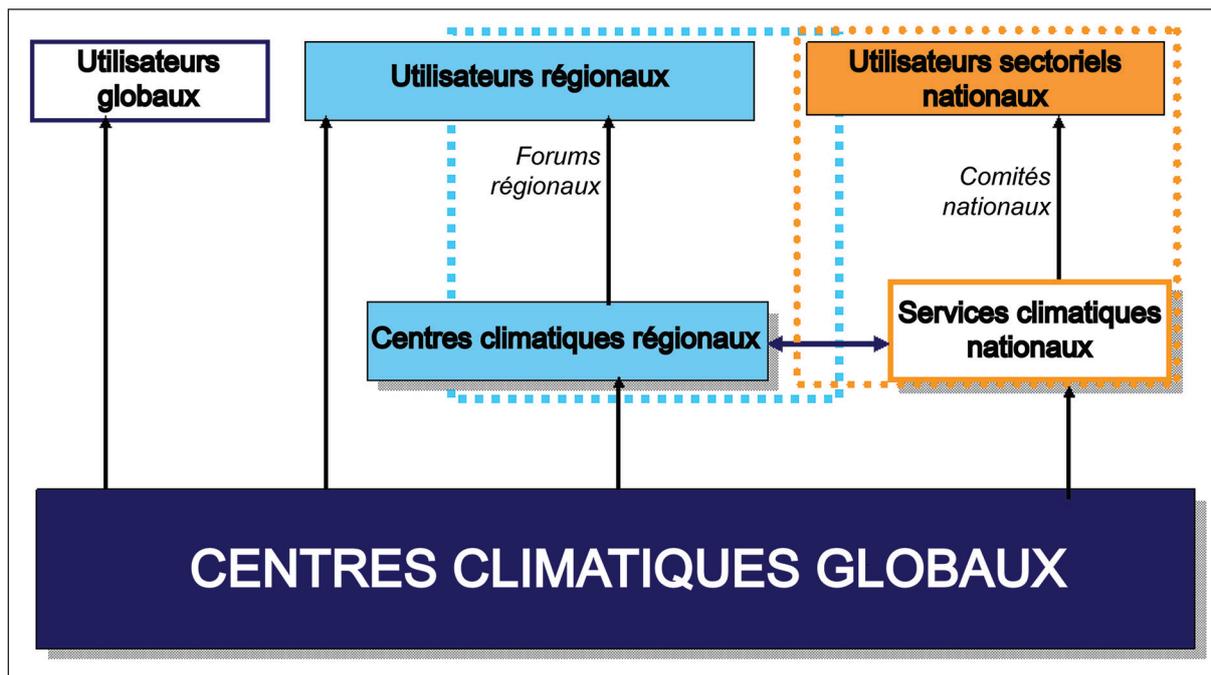


Figure 3. L'exemple des services climatiques vus par le CSIS (Climate Services Information System) de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) ; adapté en français d'après un document du WMO (Tang et Terblanche, 2015).

(Unger *et al.*, 2014). Les zones bâties dans les villes créent des microclimats uniques en raison du remplacement de la végétation naturelle par des surfaces artificielles qui affectent en particulier la température de l'air, la direction du vent et les précipitations. Le changement climatique affectera vraisemblablement toutes ces composantes, exacerbant certaines d'entre elles et diminuant les autres. C'est ce diagnostic qui n'est pas encore connu, actualisable et diffusé à l'heure actuelle et qui forme l'enjeu majeur des services climatiques urbains. Car les changements climatiques mondiaux se caractérisent par des niveaux élevés d'incertitude et les capacités d'adaptation d'une région sont souvent difficiles à reconnaître, sans possibilité de déterminer une stratégie unique au niveau local, national ou international (Hagen, 2016).

B. Le renforcement des capacités grâce aux services climatiques urbains

Le Global Framework for Climate Services (GFCS), initiative de l'Organisation Météorologique Mondiale, a été créé en 2009 dans le cadre de la Conférence mondiale sur le climat (WCC-3) dans le but d'orienter le développement et l'application de services climatologiques basés sur la science, pour aider à la prise de décision dans les

secteurs sensibles au climat (Freires Lucio et Grasso, 2016). Le GFCS a ainsi identifié cinq composantes essentielles intégrant la production, la fourniture et l'application de services climatiques : 1) les plateformes d'interface utilisateur, 2) les systèmes d'informations, 3) les observations et la veille, 4) la recherche, modélisation et prévision, 5) le renforcement des capacités existantes. Dans le cadre du GFCS, une boîte à outils technique et analytique (le CST - Climate Services Toolkit) est même proposée par l'OMM pour aider à établir ces services climatiques opérationnels. La résilience des villes au changement climatique nécessite certes le soutien et l'encadrement à l'échelle gouvernementale, mais les expérimentations de la ville sont essentielles pour informer, remanier et améliorer les politiques régionales et nationales d'adaptation, en fonction des progrès, des besoins mais aussi des échecs.

Seule une connaissance fine des variations climatiques locales passées, en cours ou projetées, peut permettre de développer des composantes adaptées aux cas urbains. Les applications dédiées et attendues sont par exemple des informations sur la variabilité du climat actuel, sur les scénarios du changement climatique potentiel ou modélisé, surtout en termes d'analyse de risque, des services éducatifs liés aux impacts, l'élaboration de prévi-

sions saisonnières, ... La représentation graphique des données est, dans la mesure du possible, recommandée car elle demeure un bon outil de visualisation « du changement et des risques possibles ou probables » pour expliquer et convaincre un gestionnaire et planificateur (Carter *et al.*, 2015). Certaines conditions météorologiques et climatiques ne sont peut-être pas observées et analysées dans la série historique disponible pour certains sites urbains (quand ceux-ci possèdent un référentiel pertinent, disponible et avec une série pluridécennale), alors que ces mêmes conditions pourraient pourtant devenir courantes ou probables à l'avenir. Ainsi, toutes les planifications urbaines qui reposent encore seulement sur « des retours d'expériences » fondés sur des événements et risques climatiques historiques passés sont au mieux très lacunaires, et au pire, totalement fausses étant donné certains changements régionaux attendus. Certains auteurs pensent même que s'appuyer essentiellement sur des réponses reposant sur l'expérience passée peut bloquer et réduire

des options futures en adaptation urbaine (Adger *et al.*, 2011). En effet, les défis du changement climatique imposent des changements drastiques dans la gestion des villes et des régions, de sorte que des solutions innovantes sont nécessaires, parallèlement aux mesures traditionnelles (AEE, 2012). La gamme des ressources et des moyens techniques doit donc être fondamentalement revue (Figure 4). Cela implique de 1) partager l'information et construire des connaissances pour les citoyens, les administrations et les entreprises, 2) favoriser et promouvoir l'innovation, 3) permettre une large participation à la planification et la mise en œuvre des connaissances locales pour éduquer les décideurs, 4) modifier la planification à long terme pour mettre en œuvre des approches transversales, entre secteurs et niveaux.

L'incertitude liée aux différentes projections climatiques, surtout aux échelles régionales et locales, ne doit pas être un obstacle à la capacité d'intégrer et de développer des solutions

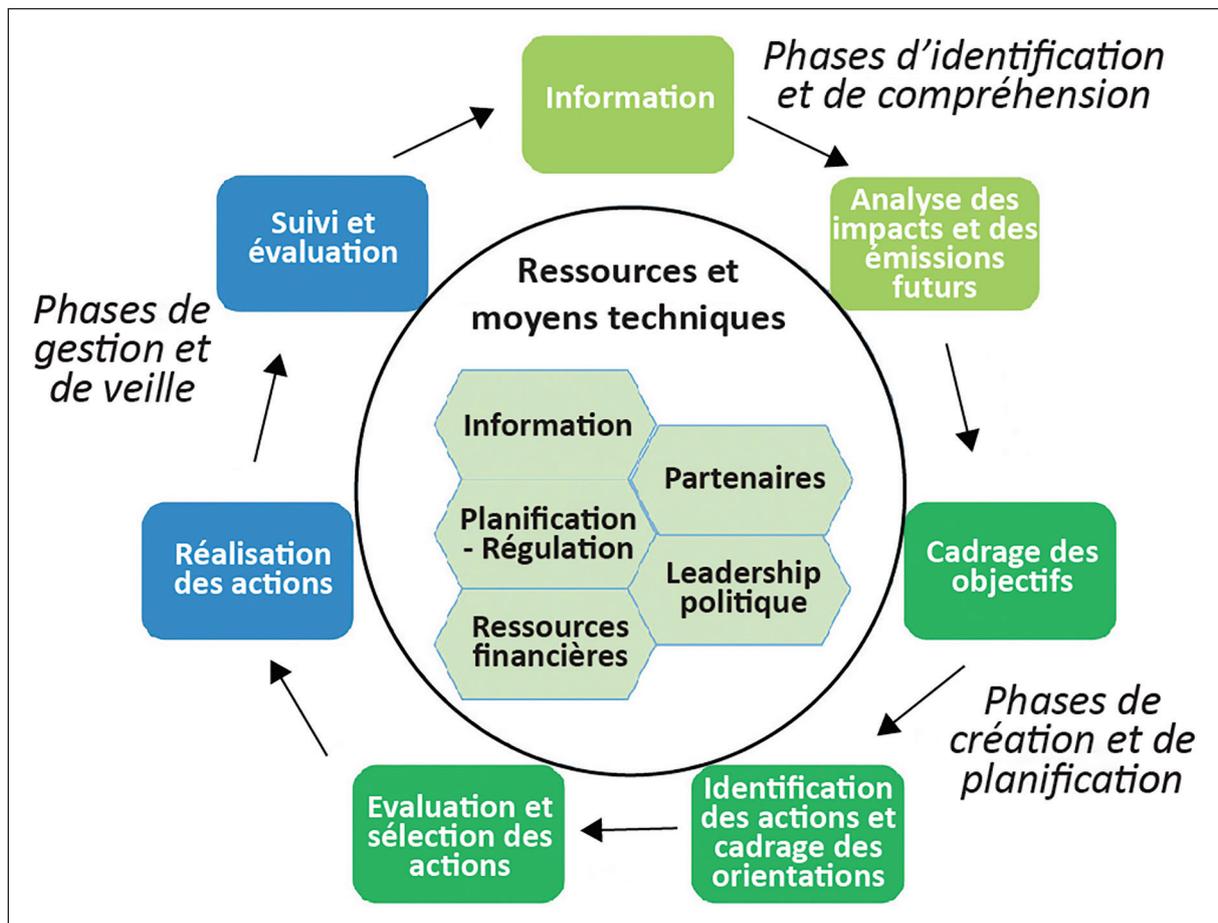


Figure 4. Principales ressources et moyens techniques pouvant être utilisés par les villes dans leur planification pour intégrer l'atténuation et l'adaptation au changement climatique (adapté en français d'après Rosenzweig *et al.*, 2015).

d'adaptation, dans l'élaboration de politiques et programmes stratégiques urbains. En dehors de la seule connaissance des risques climatiques, la sensibilisation aux différents niveaux d'atteinte, aux types et à la répartition de la vulnérabilité doit aussi être considérée comme un facteur crucial pour réduire le risque climatique (Rosenzweig *et al.*, 2011).

Le fait de partir de diagnostics climatiques urbains précis, adaptés et partagés doit favoriser les voies de transformation urbaine qui constituent le cadre fondamental pour le développement et la mise en œuvre réussie d'actions visant à l'atténuation et à l'adaptation au changement climatique. Rosenzweig *et al.* (2015) recensent ainsi cinq opportunités qui doivent s'appuyer sur des services climatiques beaucoup plus élaborés qu'actuellement : 1) la réduction des risques de catastrophe et l'adaptation au changement climatique pour des villes résilientes ; 2) la mise en œuvre de mesures 'gagnant-gagnant', qui réduisent les émissions de gaz à effet de serre et augmentent la résilience urbaine ; 3) l'évaluation des risques climatiques et l'élaboration de plans d'action créés conjointement, et de manière plus efficace, en collaboration avec l'ensemble des intervenants, gestionnaires et scientifiques ; 4) la prise en compte des besoins des citoyens les plus défavorisés et vulnérables dans la planification et l'action urbaine liées au changement climatique ; 5) l'amélioration de la solvabilité des villes, avec le développement d'institutions urbaines solides et leur participation et intégration aux échelons et réseaux nationaux ainsi qu'internationaux.

Les concepteurs et planificateurs urbains ont besoin d'informations météorologiques utiles pour aider à réaliser des villes plus durables (Mills *et al.*, 2010). Pour tous les types de villes, l'information météorologique et climatique devrait faire partie du corpus de connaissances qui sous-tend la philosophie et la pratique de la conception et de la planification. Lorsque les données existent, il est nécessaire que leur collecte et analyse génèrent des informations utiles pour le projet urbain. À court terme, ces données et services sont par exemple nécessaires pour produire des prévisions biométéorologiques, établir un système d'alerte sanitaire aux vagues de chaleur et établir des plans d'intervention d'urgence adaptés localement.

C. Les verrous à lever dans le cas de l'expertise du climat urbain

Les villes, à part quelques exceptions (et rarement françaises), n'ont pas encore mis en œuvre des approches intégrées d'adaptation au changement climatique qui s'appuient à la fois sur des services climatiques pérennes ainsi que sur différentes formes et techniques parmi le vaste potentiel de transformations déjà possibles et identifiées. La question climatique reste un sujet très technique et complexe, difficile à restituer de manière simple et cependant robuste, à un élu, à un gestionnaire ou à un citoyen. En outre, l'évolution très rapide des outils et des informations peut engendrer de la confusion, ce qui demande une grande capacité d'adaptation de la part de l'expert mais aussi de l'usager. À ce niveau, la sensibilisation à la nécessité d'adaptation, la capacité de développer les options disponibles, l'aptitude à les évaluer et à les mettre en œuvre sont cruciales pour la capacité d'adaptation. Cette compréhension du problème est le pivot pour obtenir l'appui du public et promouvoir les activités d'adaptation. Le développement de plateformes d'informations virtuelles est particulièrement utile pour cela, leur réplcation ne pouvant pas être l'usage pour les cas urbains, tous différents. Là encore, la qualité des analyses et des scénarios fondés sur des données locales est déterminante.

Le développement des services climatiques urbains reste également dépendant d'un besoin de modélisation d'autant plus grand qu'il n'existe pas de modèle-type à l'échelle d'une ville, chaque territoire devant créer ou redéfinir son modèle spécifique (qu'il soit conceptuel ou à bases physiques, dans une approche spatiale et/ou numérique), pour dépasser les diagnostics régionaux certes pertinents mais peu précis pour les problématiques urbaines à échelle fine (risques, mobilités, consommations, aménagements,...). Des services climatiques fondés sur la modélisation et à des échelles saisonnières et interannuelles sont désormais proposés, mais toujours à partir d'approches régionales, par exemple en lien avec le projet CORDEX (Coordinated Regional climate Downscaling Experiment) et ses produits dérivés (Mercier *et al.*, 2016 ; Ouzaux *et al.*, 2016). Les formes de contrôle *a posteriori* des résultats obtenus sont aussi soit encore totalement absentes, soit trop récentes pour

en tirer toutes les conclusions pertinentes. Ainsi, le mode de suivi, de communication des données et d'évaluation (MRE – Monitoring, Reporting and Evaluation), proposé par l'EEA et calé sur le mode emprunté au GIEC, permet certes de déterminer l'efficacité des mesures mises en œuvre, liées aux processus d'adaptation urbaine, d'ajuster la performance des systèmes, des étapes de planification et de mise en œuvre (Agence Européenne de l'Environnement, 2016). Mais parce que le sujet des services climatiques urbains est novateur, de nombreux points de blocages conceptuels existent encore en amont, en dehors de la disponibilité et de l'accès aux données météo-climatologiques élémentaires et des informations climatiques associées sur l'espace urbain. Le PFVT (Partenariat Français pour la Ville et les Territoires) liste par exemple plusieurs paramètres bloquants ou pouvant permettre d'améliorer les études sur le changement climatique urbain (PFVT, 2015). On citera, par exemple, la nécessité de disposer de séries d'observation mais aussi de données modélisées, la complexité et l'inadaptation des méthodes 'importées', l'accompagnement des autorités locales pour l'accès aux ressources, le renouvellement du partenariat P4 (Partenariats-Publics-Privés-Populations), l'alliance des connaissances expertes à celles des usages citoyens, ou bien encore l'aide au droit à l'expérimentation locale.

Ce premier bilan montre les lacunes des services climatiques urbains et la marge de manœuvre encore considérable pour les améliorer, en particulier en favorisant le socle fondamental représenté par les données et informations climatiques urbaines conventionnelles et celles plus récentes provenant d'autres sources non institutionnelles.

III. BESOINS ET INITIATIVES POUR INFORMER SUR LE CLIMAT URBAIN

A. Des réseaux inadaptés pour mesurer et étudier le climat urbain

Certains pays européens utilisent encore le système du climatope (*i.e.* climat local) pour classer les espaces et climats urbains, notamment dans des perspectives de planification (Scherer *et al.*, 1999). Les climatopes sont donc dérivés des connaissances locales du vent, de la température, de l'utilisation du sol, de la structure des bâtiments, du relief de surface et de la densité de population.

Mais il est rare que des données issues de l'observation directe et appropriées (*i.e.* représentatives des particularités des sites urbains) existent, et communément, ces données proviennent alors surtout du site de mesure disponible le plus proche utilisé comme substitut, voire d'un référentiel très éloigné de la ville qu'on cherche à qualifier.

En cas de choix de mesures et d'observations climatiques urbaines, les décisions peuvent plutôt se faire en fonction des UTZ (Urban Terrain Zone), typologie établie par Ellefsen (1991) à l'échelle des quartiers à partir de la géométrie, de la configuration des rues et des matériaux de construction. Ces différents travaux ont permis ensuite de définir une classification simple et générique des zones urbaines pour améliorer théoriquement l'implantation d'instruments météorologiques représentatifs dans les zones urbaines (Stewart et Oke, 2012). Ce schéma divise le terrain urbain en sept régions homogènes appelées 'zones de climat urbain' (UCZ - Urban Climate Zones) qui vont des sites ruraux et périurbains à ceux densément urbanisés, et qui se discriminent par leur structure urbaine (dimensions des bâtiments et des rues), le type de substrat (et de perméabilité), les matériaux, les activités humaines et le potentiel de modification du climat naturel (encore qualifié de 'pré-urbain'). Une autre typologie est proposée par Loridan et Grimmond (2011) qui ont développé des zones urbaines pour caractériser le partitionnement énergétique (UZE - Urban Zones for characterizing Energy partitioning), à partir de seuils de fractions végétales et de type de substrats ; cette typologie est plus adaptée pour les modélisateurs atmosphériques dans les analyses des bilans radiatifs et énergétiques.

Cependant, la plupart du temps, même avec ce cadre potentiel, les mesures urbaines manquent, les réseaux d'instruments sont quasi inexistantes, et rarement à l'ordre du jour des programmations de l'ingénierie urbaine. La rareté des données est un obstacle majeur à la création et à l'évaluation de l'exactitude et de la précision des interpolations spatiales des champs climatiques d'échelles fines (Vaughan *et al.*, 2016). La précision des évaluations *in situ* est pourtant essentielle si on veut tenir compte explicitement de tous les déterminants de l'îlot de chaleur urbain ; ainsi, les derniers travaux de Bassett *et al.* (2016) indiquent clairement que cet îlot est certes une construction liée à la chaleur

urbaine dépendante de l'utilisation du sol, mais aussi de la chaleur advectée des sources périphériques, quelquefois jusqu'à plus de 10 km. Cela remet donc en cause les analyses purement fondées sur des enregistrements climatiques à long terme réalisés seulement en ville, puisqu'il faut aussi tenir compte des évolutions et influences périphériques.

En outre, malgré l'intérêt évident du partage et de l'accès aux données climatiques, les meilleures façons d'organiser et de structurer ces informations sont encore dans de nombreux cas une question de recherche ouverte. Car les utilisateurs restent souvent interrogateurs devant le large panel de portails en ligne fournissant diverses informations climatiques plus ou moins élaborées. Alors qu'avec ces données, il faudrait pourtant pouvoir comprendre l'impact net (physique et bioclimatique) des interventions dues à la planification urbaine, il est finalement rare que l'information climatique soit considérée explicitement dans les plans stratégiques de la ville, même si ces décisions et aménagements d'échelles fines influenceront sur les climats urbains et détermineront la vulnérabilité aux impacts climatiques (Mills *et al.*, 2010). Les informations climatiques doivent être transférées et communiquées aux décideurs et au public pour être intégrées, mais également utiles afin de les convaincre qu'une stratégie de planification et de conception est nécessaire. L'information basique qui est alors souvent utilisée reste sous la forme d'une année météorologique typique (TMY - Typical Meteorological Year) qui sert par exemple à calibrer des besoins de chauffage et/ou de refroidissement. En fait, les analyses climatiques devraient être effectuées dès le début des processus de conceptions urbanistiques, avant que les évolutions possibles ne soient bloquées par des décisions mal informées (Mills *et al.*, 2010). Des stratégies climatiques appropriées peuvent rarement être appliquées rétroactivement et efficacement pour corriger les erreurs commises au cours des phases initiales de la conception.

Face à ces lacunes et outils insuffisants, un besoin prioritaire doit être donné aux données climatiques *in situ* urbaines pour obtenir des diagnostics et modèles plus pertinents, car les projections des principaux changements attendus à moyen et long termes, en particulier ceux touchant les conditions thermiques diurnes et nocturnes, indiquent

qu'une très forte population urbaine sera affectée, notamment en Europe (Figure 5). Outre les changements climatiques moyens à plus ou moins long terme, le nombre, l'intensité et la durée des vagues de chaleur, les précipitations extrêmes et la sécheresse devraient augmenter, mais sans avoir des répercussions uniformes en Europe (GIEC, 2014 ; AEE, 2016). Au-delà de l'image générale, les conditions de vulnérabilité et d'adaptation ne seront pas les mêmes pour toutes les villes, y compris celles proches géographiquement et/ou de même taille. De plus, aucune analyse précise ne repose sur un ensemble de référentiels climatiques urbains, mais souvent sur des stations, servant d'exemples, essentiellement des grandes aires urbaines européennes. La plateforme européenne Climate-ADAPT ou d'autres outils numériques en ligne existent déjà pour mettre à disposition certaines données et projections climatiques. En France, on citera par exemple le portail Drias ou l'application ClimatHD de Météo-France ; cependant, ils restent encore dédiés à un niveau relativement expert ou à des utilisateurs possédant certains pré-requis, et le diagnostic proposé est soit très général, soit il demande un investissement conséquent en traitement de données. Les problématiques directement liées au climat urbain y sont absentes.

B. Des expériences et réseaux *ad hoc* pour comprendre le climat urbain

Beaucoup d'initiatives existent ou émergent sur le plan international pour mieux analyser le cadre environnemental urbain dans la perspective de changements globaux. Une synthèse des principaux axes de recherche et de réflexion a été réalisée durant la 9^{ème} Conférence Internationale du Climat Urbain (www.meteo.fr/icuc9/index.html) qui s'est tenue à Toulouse en 2015 sous l'égide de l'International Association of Urban Climate (IAUC) et de l'American Meteorological Society (AMS). Une initiative portée par les collectivités urbaines et créée depuis 2005 à l'échelle internationale est par exemple le réseau C40 (www.c40.org), qui rassemble des grandes villes pour fournir une gamme de services à l'appui des efforts de changement climatique en milieu urbain, sous les thèmes de l'atténuation, de l'adaptation et de la durabilité, pour accélérer l'action climatique. Ces réseaux d'échanges révèlent notamment que la valeur ajoutée et les diagnostics issus des don-

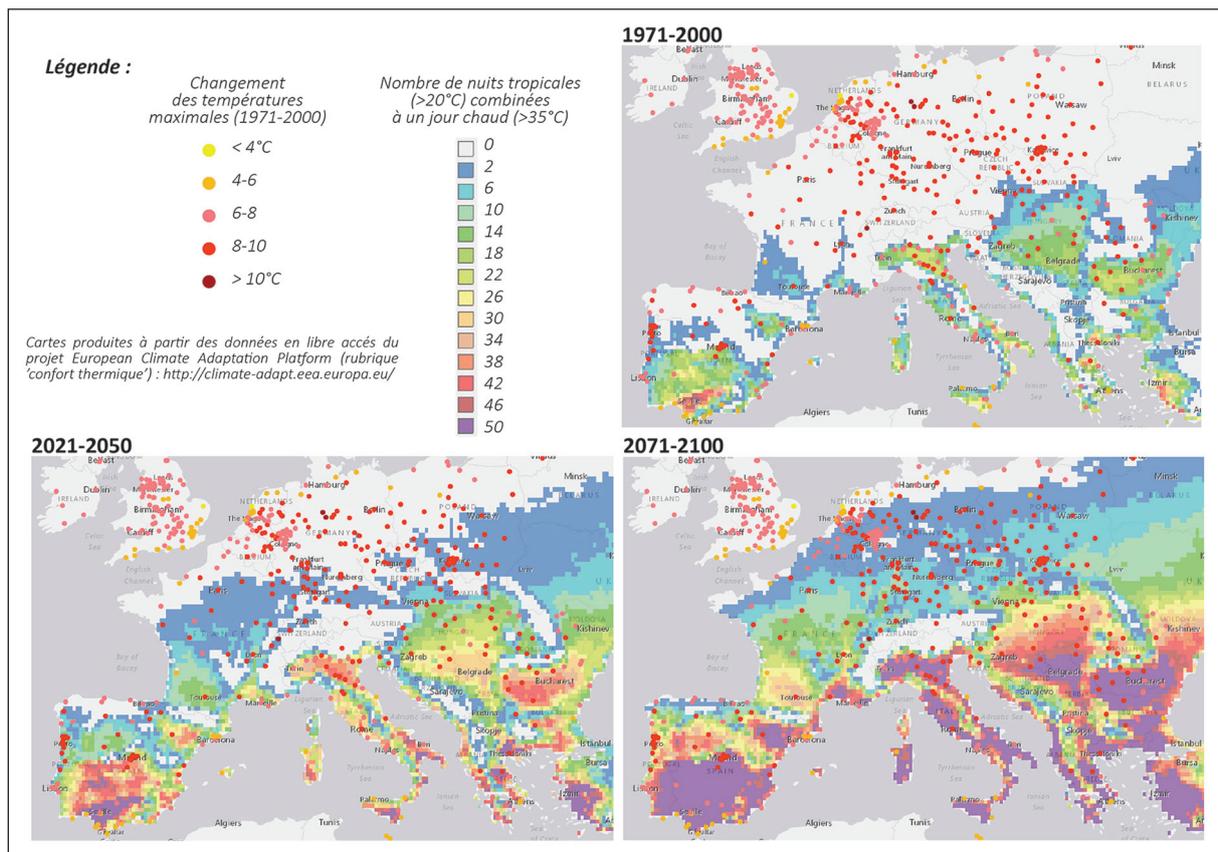


Figure 5. Changements des conditions thermiques observées et projetées à l'échelle européenne sur trois périodes de référence (1971-2000, 2021-2050 et 2071-2100), indiqués par les points ; représenté par les surfaces colorées, le nombre de jours ayant des conditions combinées de nuits tropicales (>20°C) et de jours chauds (>35°C) ; construit d'après des données et outils provenant de la plate-forme Climate-ADAPT – Sharing adaptation information across Europe).

nées climatiques relatives aux zones urbaines sont grandement améliorés lorsqu'ils sont combinés aux informations et réalités socio-économiques afférentes aux activités humaines de la région (Manton *et al.*, 2010). Avec un objectif de modélisation, on peut aussi citer le programme RAMSES (Reconciling Adaptation, Mitigation and Sustainable Development for Cities) qui utilise des modèles numériques pour générer des projections climatiques urbaines (De Ridder *et al.*, 2014), notamment les modèles UrbClim (climat urbain à l'échelle d'agglomération, avec un niveau modeste de complexité mais capable de réaliser de nombreuses simulations), Enviro-HIRLAM (modèle méso-échelle complet, plus sophistiqué et coûteux en temps de calcul) ou ENVI-Met (modèle climatique à échelle fine utile pour de courtes périodes). En France, des travaux récents (le projet Extrémoscope de Météo-France) portent spécifiquement sur le raffinement des méthodes d'identification et de recensement des vagues de chaleur

passées et futures (Soubeyrou *et al.*, 2016). Riches en informations sur les tendances et l'augmentation des risques induits, les applications demeurent cependant encore régionales ou départementales, sans un éclairage à l'échelle urbaine, et même si plusieurs projets de recherche ont été réalisés dernièrement ou sont en cours actuellement sur les variations climatiques au sein des espaces urbains (on citera pour exemple certains projets portés par Météo-France comme : VURCA - Vulnérabilité URbaine aux épisodes Caniculaires et stratégies d'Adaptation ; MUSCADE - Modélisation URbaine et Stratégies d'adaptation au Changement Climatique pour Anticiper la Demande et la production Energétique ; BRIDGE - Sustainable Urban planning Decision support accountinG for urban metabolism ; ACCLIMAT - Adaptation au Changement CLIMatique de l'Agglomération Toulousaine ; MApUCE - Modélisation Appliquée et droit de l'Urbanisme : Climat urbain et Énergie).

Une solution *sine qua non* évidente est de maintenir les stations météorologiques urbaines existantes et d'investir dans de nouvelles stations de bonne qualité dans les territoires en croissance urbaine rapide, en particulier dans les régions et pays les moins développés (Mills *et al.*, 2010). Le manque de réseaux météorologiques urbains denses de haute qualité restreint typiquement l'étude des caractéristiques et des effets de l'îlot de chaleur urbain, cette absence étant surtout due à la difficulté et au coût d'implantation et de maintien de ces réseaux urbains (Chapman *et al.*, 2014). Cela conduit alors à des études qui reposent essentiellement sur des observations provenant de transects spécifiques et sur des approches en modélisation limitées par un manque de données d'évaluation.

En effet, la modélisation numérique ne peut pas à ce jour remplacer l'observation et la mesure *in situ* en milieu urbain, et celle-ci est même essentielle pour améliorer et valider les nombreuses phases expérimentales en cours des différents types de modèles de climat urbains. Pour des raisons économiques et/ou de choix stratégiques, l'évolution actuelle n'est pourtant pas au déploiement de nouvelles stations météorologiques par les agences nationales, et c'est même plutôt l'inverse qui est observé dans beaucoup de pays européens, en particulier en France.

En parallèle des réseaux nationaux, des expérimentations ont lieu en milieu urbain, en lien direct avec les collectivités locales (qui sont d'ailleurs souvent initiatrices), afin de mesurer et analyser le climat urbain. À l'échelle française, on peut ainsi citer des travaux à l'échelle de Nice (Carrega, 2013 ; Martin et Adnes, 2014), Strasbourg (Kastendeuch et Najjar, 2015), Lyon (Soto *et al.*, 2015), Rennes (Dubreuil *et al.*, 2011), Toulouse (Houet et Pigeon, 2011) ou Dijon (De Lapparent *et al.*, 2015). Les objectifs sont de développer localement des outils, campagnes et réseaux de mesure, afin d'établir une meilleure cartographie opérationnelle à des échelles très fines et actualisées. L'apport des géographes-climatologues dans ces problématiques, développements, mises en oeuvre, valorisations et liens avec les collectivités est souvent déterminant, indiquant bien que la problématique est pluridisciplinaire, et dépasse la seule modélisation physique et/ou spatiale du climat local.

Ces campagnes de mesures, expérimentations et réseaux spécifiques sont utiles et incontournables pour augmenter nos connaissances sur les climats urbains. Cependant, elles ne peuvent à elles seules représenter la solution pérenne pour établir la veille du climat urbain nécessaire à toutes les applications et attentes des différentes communautés d'acteurs liées à la ville (scientifiques, gestionnaires, élus, services de santé, ...). Comme le rappelle L. Chapman (2015), chaque ville dans le monde ne peut et ne doit pas essayer de déployer un réseau météorologique urbain spécifique, ces réseaux météorologiques urbains survivant rarement à leur phase de démonstration et valorisation. Le paradigme de la mesure et observation climatique urbaine doit être revu et de nouvelles approches sont nécessaires pour permettre d'instrumenter durablement l'environnement urbain à une résolution sans précédent, sans chercher à se baser sur un ou quelques lieux représentatifs (souvent d'ailleurs théoriques). Le recours aux nouvelles solutions et technologies de la mesure, de la diffusion et de l'information est obligatoire. La science du climat urbain rejoint alors les disciplines qui abordent les smart cities et les web-services. L'usage de techniques innovantes doit être au coeur de ces nouvelles approches (capteurs-enregistreurs miniaturisés et embarqués, usage de mesures réalisées par téléphone portable, équipement des modes de transport...). Car même si les techniques de télédétection sont de plus en plus utilisées pour étudier et cartographier les conditions thermiques urbaines, les cartographies dérivées des données satellites (dépendantes des conditions de surface) ne sont pas toujours directement comparables à celles de l'îlot de chaleur urbain, liées aussi à la température de l'air et à la ventilation (Bassett *et al.*, 2016 ; Azevedo *et al.*, 2016).

C. La mesure participative : veille et informations climatiques pour les études de qualité de l'air

D'autres sources d'information, non conventionnelles et produites par des amateurs, peuvent contribuer à créer et à enrichir des informations climatiques à une échelle fine. Les sources de données faisant autorité (par exemple, les recensements nationaux, les registres municipaux, les cadastres et bases cartographiques, les dossiers

macroéconomiques) ont historiquement servi de base pour quantifier, analyser et comprendre les mécanismes qui régissent et organisent une ville. Bien que ces sources de données continuent à fournir des informations précieuses, les sources de données non autorisées (*i.e.* provenant d'individus ou de groupes sans statut officiel) augmentent en volume et en disponibilité. L'accroissement de productions participatives (*crowdsourcing*), des appareils mobiles, l'engouement pour les sciences citoyennes et les objets connectés, facilités par de l'électronique à bas prix et accessibles à presque tous, le web 2.0, les *smartphones* et les objets connectés ouvrent de nouvelles possibilités de mesures et de données créées par un large nombre de personnes (Dickinson *et al.*, 2012 ; Goodchild et Li, 2012 ; Muller *et al.*, 2015).

Les sciences citoyennes (« citizen science ») ou sciences participatives, désignent principalement la production de savoir scientifique par des volontaires en collaboration avec ou sous la direction de chercheurs et de scientifiques (Irwin, 1995). Le premier programme de science citoyenne a été initié pour le comptage d'oiseaux en 1900 par la société nationale Audubon aux États-Unis. Depuis les années 1990, plusieurs programmes naturalistes ont vu le jour (Dupré et Micoud, 2007). Alors que ces programmes sur la flore et la faune sont actuellement bien documentés, particulièrement dans les pays anglo-saxons, avec des questionnements sur les bénéfices et les challenges, et des recommandations (Cohn, 2008 ; Bonney *et al.*, 2009 ; Silverton, 2009 ; Conrad et Hilchey, 2011), cette méthode de collecte de données par des citoyens s'ouvre de plus en plus à d'autres domaines de l'environnement, et en particulier sur des questions climatiques. Muller *et al.* (2015) détaillent une grande partie des différents types de programmes, avec des protocoles variés, faisant appel directement ou indirectement à des non experts pour observer et/ou mesurer des phénomènes climatiques variés.

Les projets participatifs peuvent utiliser les informations climatiques observées par des citoyens et relayées de différentes manières : sur des sites web permettant l'échange de données (e.g., Infoclimat), dans les réseaux sociaux (tweets localisés sur les précipitations neigeuses par exemple : Muller, 2013 ; uksnowmap.com ; snowtweets.uwaterloo.ca), par des applications sur *smart-*

phones souvent développées pour aider à la gestion de risques (Kouadio et Douvinet, 2016) ou par téléphone en signalant un phénomène à une collectivité territoriale ou une association (e.g., la pollution de l'air avec le réseau de nez du projet RespiraLyon, www.respiralyon.org). Ces données permettent de mettre en évidence un épisode météorologique souvent extrême et elles pourraient être réutilisées pour un retour d'expérience sur cet épisode.

Les projets participatifs ont aussi recours à des mesures avec des protocoles simples et accessibles à tous (e.g., la mesure des précipitations par des citoyens à l'aide de bouteilles en plastique ; Illingworth *et al.*, 2014) ou de plus en plus, à l'aide de nouvelles technologies, telles que des *smartphones* (appareil photo, GPS, micro, accéléromètre) ou des capteurs à bas coût mesurant des paramètres météorologiques ou des polluants. Ainsi, Chapman *et al.* (2016) étudient l'îlot de chaleur urbain à Londres à l'aide des stations météorologiques de type Netatmo. Chaque propriétaire peut partager, via une application *smartphone*, ses données mesurées sur une carte participative qui est disponible sur internet «crowdmap» (weathermap.netatmo.com). Le résultat de cette étude indique que l'îlot de chaleur urbain est mis en évidence grâce à ce réseau météorologique amateur et qu'il est comparable à des réseaux de stations plus robustes. Des différences sont cependant observées dues au placement aléatoire des stations, sans protocole commun.

Parallèlement, la connaissance et la fabrication de ces capteurs sont facilitées et accessibles au sein des laboratoires de fabrication numérique. L'émergence de ces 'FabLab', rassemblant une communauté de 'bricoleurs numériques' et des moyens modernes de fabrication et de prototypage rapide (imprimantes 3D, découpeuse laser, microcontrôleurs de type Arduino ou Raspberry Pi, graveuse de circuits imprimés), ainsi que la disponibilité de capteurs à faible coût, incitent de plus en plus de citoyens passionnés à quantifier leur environnement. Plusieurs projets participatifs allant de la construction des capteurs à faible coût, miniaturisés et portatifs, associant téléphone et GPS, à leur utilisation jusqu'au partage des données mesurées visualisables sur une *crowdmap* ont vu le jour depuis quelques années. Citons, par exemple, des projets avec des capteurs mesurant la pollution

de l'air : AirCasting, initié à New-York en 2011, par l'association HabitatMap (www.aircasting.org), ou AirQualityEgg rassemblant des amateurs, étudiants et professionnels de l'internet des objets (*Internet of Things*) de New-York et des Pays-Bas débuté en 2012 (airqualityegg.com), ou encore le projet francilien « Quel est ton Air ? » démarré en 2015 (Figure 6).

La philosophie du libre accès à l'information est primordiale dans ces projets. Les notices de montage, les codes pour interroger les capteurs et les

données mesurées sont donc facilement accessibles à tous.

Au-delà des démarches de sciences participatives, la contribution active ou passive des utilisateurs à des services géolocalisés et au Géoweb 2.0 permet d'enrichir fortement les connaissances en information géographique, collectives et partagées, que ce soit, par exemple, via le *crowdsourcing* géographique ou encore l'information géographique volontaire / VGI - Volunteered Geographic Information (Goodchild, 2007 ; Joliveau, 2011 ;

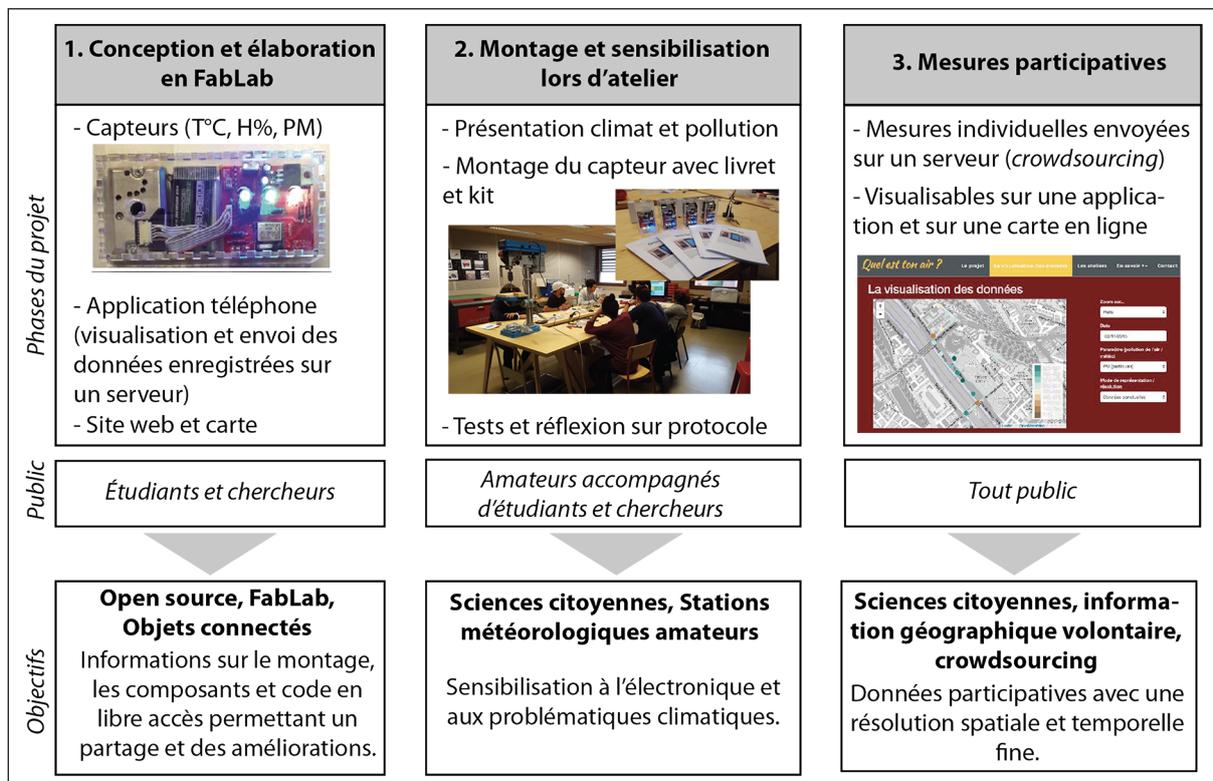


Figure 6. Présentation des étapes et objectifs du projet participatif « Quel est ton Air ? » : de la conception du capteur à destination des citoyens aux mesures participatives (Duché et Madelin, 2015 ; Madelin *et al.*, 2016).

Mericskay et Roche, 2011 ; Connors *et al.*, 2012 ; Haklay, 2013 ; Joliveau *et al.*, 2013).

Les projets participatifs qui se développent actuellement utilisent tous le *crowdsourcing* permettant ainsi d'avoir une information localisée à une échelle géographique fine. Les données mesurées de manière passive par les *smartphones* peuvent aussi contribuer à des observatoires climatiques. Par exemple, Overeem *et al.* (2013) utilisent la température des batteries de téléphones portables pour évaluer l'îlot de chaleur urbain dans huit villes dans le monde. Ces données sont accessibles grâce à une application sur le télé-

phone (opensignal.com). Les résultats sont assez concluants grâce à la masse de données permettant de pondérer les mesures 'faussées' (par exemple, un téléphone portable posé en plein soleil ou dans une poche).

Ces données '*crowdsourced*' sont une ressource inestimable parce qu'elles fournissent des observations continues spatialement et temporellement qui autrement ne seraient pas enregistrées. Le volume accru de ces données rend difficile pour la communauté scientifique de les ignorer même si ces données sont encore considérées avec scepticisme quant à leur validité scientifique.

IV. UN CAS URBAIN FRANÇAIS SITUÉ EN MILIEU DE MONTAGNE : GRENOBLE

A. Un déficit de données et une veille climatique inadaptée

La population municipale de Grenoble est d'environ 160000 habitants (recensement 2013), mais l'aire urbaine grenobloise, la 11^{ème} de France, regroupe 196 communes et plus de 684000 habitants, ce qui en fait le pôle urbain alpin français principal. Pourtant, lorsqu'on regarde la veille climatique faite à l'échelle urbaine, plusieurs interrogations se posent :

1) Le référentiel utilisé, la station de Grenoble-Saint-Etienne-Saint-Geoirs (installée sur l'aéroport de Grenoble-Isère à 370 m d'altitude), se

situe à 35 km au nord-ouest du centre urbain de Grenoble, et ne peut absolument pas être considérée comme représentative du climat urbain grenoblois (ce qui est pourtant régulièrement fait dans les interprétations médiatiques ou grand public), la ville étant par ailleurs située à 210 m d'altitude. 2) C'est cependant la seule fiche climatologique normalisée actuellement facilement disponible pour la normale 1981-2010 à l'échelle de tout le département de l'Isère (Figure 7) ; la cartographie des 253 fiches disponibles à l'échelle française métropolitaine révèle bien d'ailleurs les disparités géographiques et l'impossibilité à ce jour de dresser un bilan détaillé des différents climats urbains à l'échelle nationale, beaucoup de villes de taille moyenne ne connaissant pas leurs normales climatiques (anciennes ou actualisées), même pour

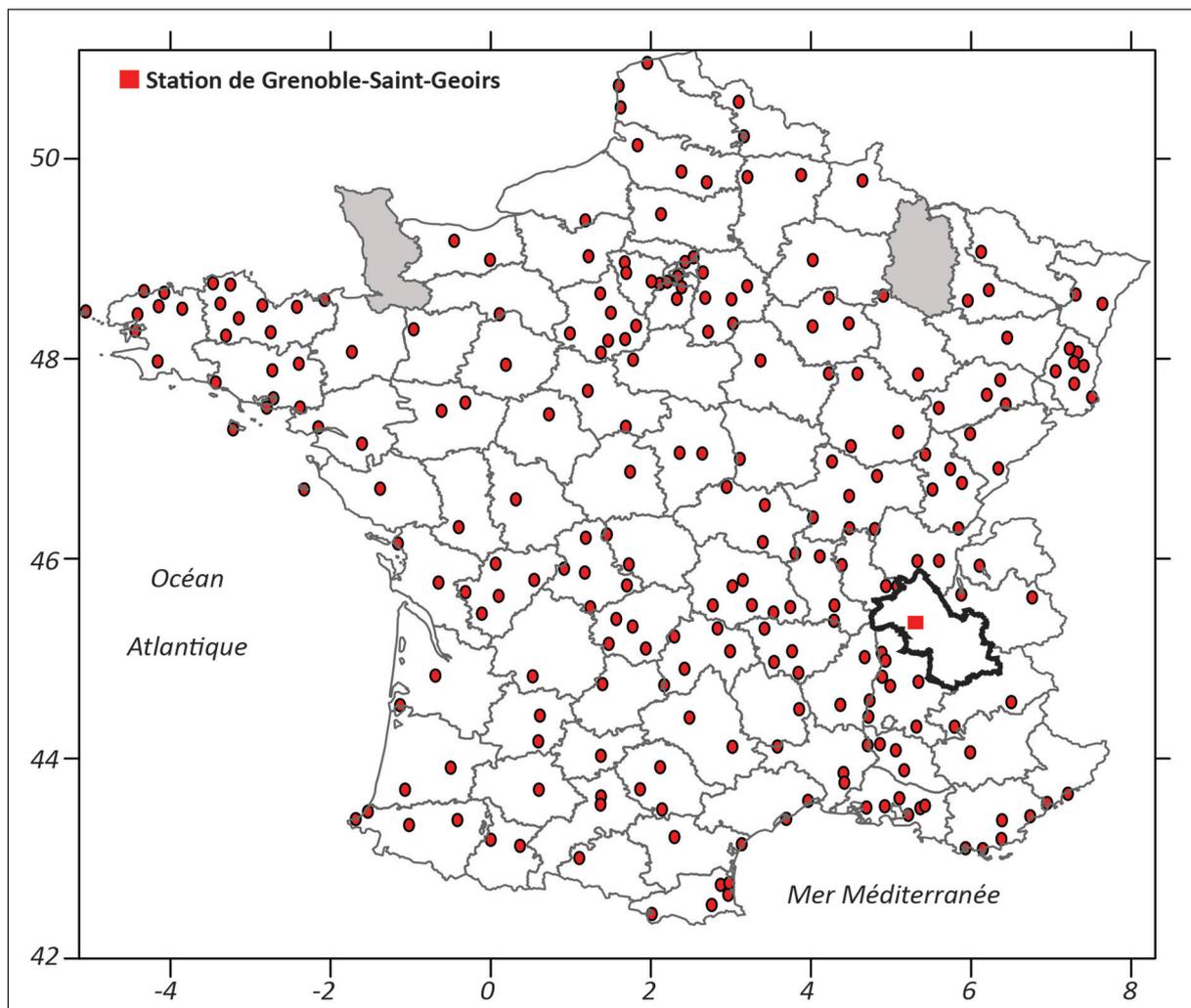


Figure 7. Carte des 253 stations météorologiques proposant (en novembre 2016) une fiche des principales normales climatologiques (1981-2010) dans la base de données publiques de Météo-France ; les 2 départements indiqués en grisé (La Manche et la Meuse) n'ont pas de stations référencées ici ; le département de l'Isère est entouré en gras (avec la station de Grenoble-Saint-Geoirs indiquée par un carré).

des paramètres essentiels comme les températures ou les précipitations.

3) Les 9 stations météorologiques du réseau Météo-France actuellement en activité dans l'aire grenobloise ne sont pas toutes représentatives du climat urbain, mélangeant des situations de fond de vallée très urbanisé et d'autres déjà à plus de 500 m d'altitude et en dehors des espaces les plus densément bâtis (Figure 8).

La longueur et la qualité des séries météorologiques urbaines sont également problématiques, le poste du Versoud ayant seulement été installé en juin 1999, alors que celui de Saint-Martin-d'Hères (pourtant situé sur le campus universitaire où se situent les services grenoblois de Météo-France) a changé de statut à partir de fin 2006, avec des séries indisponibles sur le portail de Météo-France et non expertisées. Sans précaution analytique, certaines utilisations recourent même ces différentes chroniques stationnelles pour établir une série unique certes longue, mais totalement hé-

térogène sur le plan statistique et climatique, et impropre à établir des études interannuelles et des comparaisons fiables.

De manière triviale mais incontournable, l'enjeu municipal repose donc bien ici sur l'obtention initiale de données micro-météorologiques fines et intra-urbaines suffisantes pour établir un bilan climatique général. L'objectif plus poussé d'une étude et/ou d'une cartographie du microclimat urbain doit être vu comme l'étape suivante, mais peu évidente à ce stade des connaissances, des réseaux de mesures et des données disponibles.

Cette absence de données et de diagnostics urbains conduit à des approches très caricaturales. Ainsi, l'ORECC (l'Observatoire Régional des Effets du Changement Climatique de la région Auvergne-Rhône-Alpes), créé en 2013, devient « l'outil de sensibilisation, conçu au bénéfice de tous : acteurs de la sphère publique, associations, acteurs économiques, universitaires, grand public

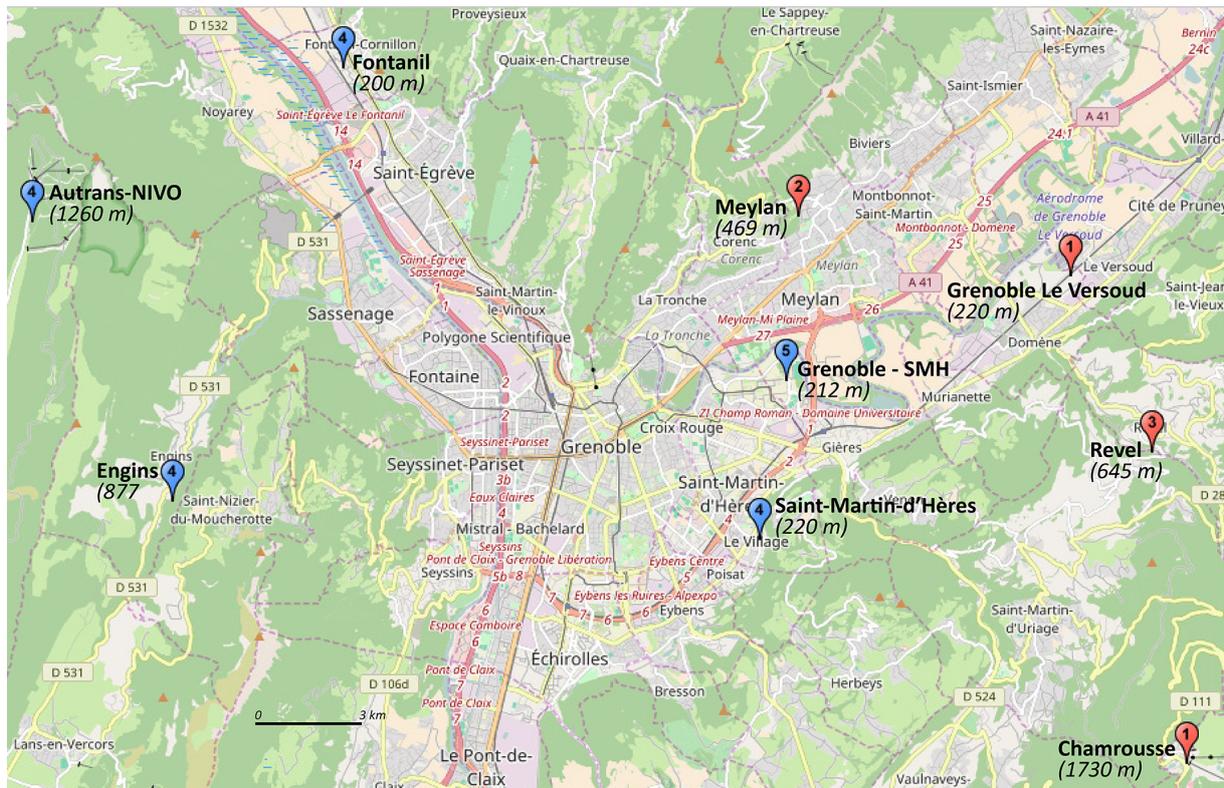


Figure 8. Localisation des 9 stations météorologiques (avec leur altitude) du réseau Météo-France en activité en 2016 dans l'aire grenobloise (carte adaptée à partir du fond de carte OpenStreetMap issu du portail PubliThèque ; le numéro correspond aux types de stations : 1 = Station automatique Radome-Resome avec personnel non Météo-France, acquisition temps réel, expertise à J+1 ; 2 = Station automatique non Radome-Resome, acquisition temps réel, expertise à J+1 ; 3 = Station automatique, acquisition temps réel, expertise temps différé ; 4 = Poste climatologique (bénévole) manuel ou station automatique, acquisition et expertise temps différé ; 5 = Station avec acquisition temps réel ou différé, disponibilité occasionnelle des données, non expertisées ou expertise non garantie).

[...] » (orecc.rhonealpes.fr). Mais le volet ‘urbanisme’ est quasi vide depuis 2014 ; les exemples à l’échelle locale sont orientés vers les mesures d’adaptation, mais pas vers le diagnostic climatique municipal initial. Parmi les indicateurs d’impacts climatiques analysés et publiés par l’ORECC, on observe par exemple celui sur les évolutions des températures moyennes. Pour l’Isère, c’est la série de la commune du Trièves de Monestier-de-Clermont (située à 846 m d’altitude ; 1400 habitants ; à 40 km au sud de Grenoble) qui est sélectionnée comme référentiel départemental car disposant de données mensuelles homogénéisées et sur au moins une période de 30 ans. Intéressante pour étudier la tendance thermique de fond régionale, cette station au topoclimat particulier n’est pas adaptée pour extrapoler une étude fine de l’aire urbaine grenobloise. C’est encore plus vrai lorsque la station de Monestier-de-Clermont est utilisée pour définir un indicateur de fortes chaleurs et de canicules, alors que la population potentiellement vulnérable y est localement peu dense, et que les contraintes d’altitude n’ont absolument rien à voir avec le milieu urbain grenoblois densément peuplé, en fond de vallée et avec une ventilation et une qualité de l’air bien moindres. Les services climatiques régionaux ont ici atteint leur limite lorsqu’il s’agit de proposer des études et orientations urbaines.

L’enjeu des impacts du changement climatique à l’échelle locale est pourtant fondamental. Uniquement en tenant compte des variations et extrêmes thermiques projetés à long terme (2056-2100), on voit que les changements potentiels seront considérables à l’échelle du bassin grenoblois, considérant ici que les évolutions transcrivent une synthèse à partir d’un seul point de grille et pour un seul modèle numérique du climat (Tableau 1). Mais ces évolutions de seuils, de durées et d’intensités thermiques n’exerceront pas les mêmes contraintes bioclimatiques sur tous les espaces intra-urbains (en fonction de la végétalisation, ventilation, ombre, présence d’eau, effet de canyon urbain, ...). Elles n’auront également pas les mêmes impacts et conséquences socio-économiques ou sanitaires en fonction des aménagements des quartiers, des conditions d’habitats, de l’accessibilité à certains équipements, etc. L’enjeu est donc désormais d’intégrer ces résultats de sorties de modèles régionaux dans des expertises tenant compte des réalités et planifications urbaines de Grenoble.

Tableau 1. Évolution du nombre d’événements thermiques extrêmes et de leur durée (en jour), calculés à Grenoble sur les périodes 1969-2015 (observation, station de Grenoble-Saint-Geoirs) et 2056-2100 (modélisation SAFRAN, selon 2 scénarios) ; les périodes chaudes sont définies comme le nombre de jours avec au moins six jours consécutifs où Tn (température minimale) ou Tx (température maximale) sont supérieures au 90ème percentile ; les simulations proviennent des sorties ALADIN de Météo-France pour les 2 scénarios RCP4.5 et RCP8.5, disponibles sur le portail Drias ; adapté d’après Le Roy, 2016).

Critères thermiques		Observation 1969-2015	RCP4.5 2056-2100	RCP8.5 2056-2100
Seuil biométéorologique Tn $\geq 19^{\circ}\text{C}$		147	897	1960
Seuil biométéorologique Tx $\geq 34^{\circ}\text{C}$		186	391	958
Période chaude Tn	Nombre	9	87	133
	Durée moyenne	7	12,3	16,8
Période chaude Tx	Nombre	10	38	84
	Durée moyenne	7,9	10,9	11,6
Vague de chaleur	Nombre	2	37	108
	Durée moyenne	4	5,5	6,6

B. Une demande en services climatiques multi-sectorielle et ciblée pour la ville

Pour différentes raisons géographiques et socio-économiques, la population de l’agglomération grenobloise a une très forte attente dans les projets et programmations environnementales, et particulièrement ceux en lien avec le climat. On citera parmi ces critères, l’histoire ancienne liée à l’énergie hydraulique, la présence d’une très nombreuse communauté scientifique pluridisciplinaire, la conjonction locale des problèmes de pollution de l’air et/ou de vagues de chaleur, les variations de l’enneigement impactant le tissu socio-économique et le tourisme local. L’un des critères importants vient aussi du fait que la municipalité est conduite depuis 2014 par un maire écologiste, qui a mis ces problématiques environnementales dans les priorités de son agenda politique. La création de la plate-forme de partage, d’anticipation et d’innovation ‘Ville De Demain’ (VDD : www.grenoble.fr/655-ville-de-demain.htm), associant scientifiques, services de la ville, élus, associations, étudiants et entreprises, vise ainsi à échanger des méthodes, données et diagnostics sur ces questionnements à l’échelle urbaine. Le thème des services climatiques y est fondamental (il a même formé la première conférence du cycle ‘des Fabriques’ organisée début 2016 dans le cadre de VDD), car recoupant beaucoup d’autres problématiques locales (qualité de l’air, santé, activités, biodiversité, agriculture, *smart and green cities*, ...).

Les enjeux des services climatiques à Grenoble concernent aussi bien des problématiques liées aux situations hivernales (vague de froid, évolutions nivologiques, blocage anticyclonique et qualité de l'air, ...) qu'estivales (îlot et vague de chaleur, pollution atmosphérique, ...). Mais là encore, les connaissances actuelles reposent toujours sur les variations climatiques établies à partir du référentiel non-urbain et non-grenoblois de Saint-Geoirs, ou bien à des comparaisons et constats généraux ne permettant pas de proposer des explications et des applications pertinentes aux gestionnaires ou élus municipaux. Ainsi, même s'il est possible de proposer et recouper des typologies annuelles ou saisonnières en s'appuyant sur les chroniques disponibles (Figure 9), ce suivi des tendances de fond n'est pas suffisant pour en déduire des stratégies d'aménagement et une sectorisation à l'échelle intra-urbaine, ou bien encore des études précises en lien avec l'évolution et les impacts de la pollution atmosphérique. Des projets existent déjà à l'échelle locale pour aller vers une réelle compréhension et communication des situations météorologiques et de la qualité de l'air (par exemple, le projet en cours Mobicit'air, fondé sur des ex-

périmentations et mesures citoyennes pour suivre la qualité de l'air et l'exposition à la pollution atmosphérique (www.mobicitair.fr). Mais il reste encore beaucoup de développements à imaginer et d'enseignements à en tirer.

C. Un exemple symptomatique : la méconnaissance des extrêmes thermiques locaux

Malgré les nombreux enjeux locaux liés à la variabilité et à l'occurrence des pics de températures estivales, aucune étude précise n'existe véritablement à l'échelle de l'aire grenobloise, en dehors de définitions très générales. Les études sur les occurrences caniculaires ou bien sur la définition de l'îlot de chaleur urbain (ICU) sont quasi absentes et absolument pas systématiques, alors que la métropole grenobloise regroupe quand même 36 % de la population du département de l'Isère. Cela s'explique en partie par la complexité du site topographique et l'absence de données, mais aussi par le fait que beaucoup d'acteurs locaux pensent que l'effet caniculaire ou l'ICU local impose les mêmes effets à l'échelle de toute la trame urbaine, négligeant les études spatio-temporelles plus fines

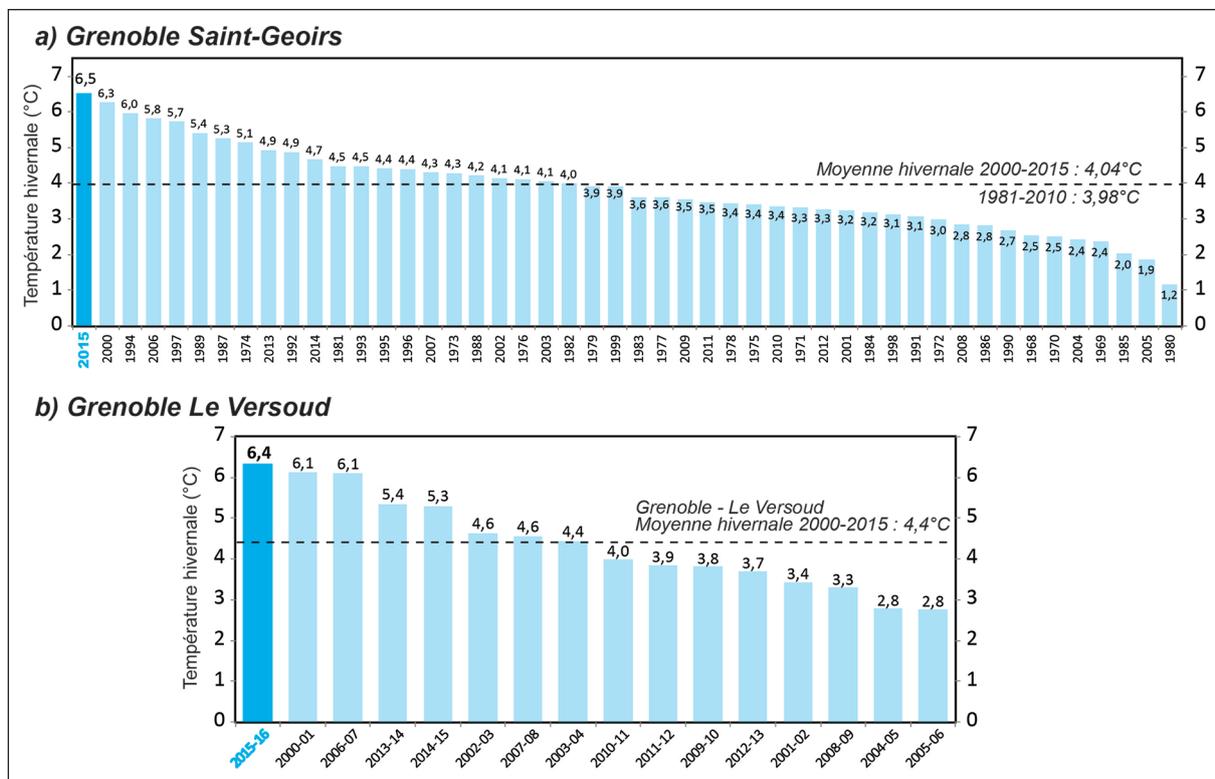


Figure 9. Classement (en °C, de la moins froide à la plus froide) des températures moyennes hivernales (NDJF) à deux stations météorologiques de l'espace grenoblois : a) station excentrée de l'aéroport Grenoble-Saint-Geoirs (1981-2010) ; b) station urbaine de Grenoble-Le Versoud (2000-2015) ; calculé à partir de séries provenant de la Publiothèque de Météo-France.

et l'importance des contrastes microclimatiques (et donc de leurs effets potentiels). Et avec cette vision simplifiée, un suivi reposant sur un descripteur même imparfait et incomplet, comme une seule série urbaine, est alors suffisant pour obtenir une information générale, mais dont on ne pourra pas tirer ensuite beaucoup d'enseignements dans un objectif de planification ou de modélisation. L'absence d'études à long terme en climatologie urbaine sur le cas grenoblois s'explique également par la focalisation historique de la communauté scientifique régionale (et des financements associés) sur les thématiques alpines prédominantes (nivologie, glaciologie, hydrologie, chimie atmosphérique, écologie de montagne...), au détriment de celles urbaines dont les méthodologies (et les données) sont encore à inventer.

Les contrastes thermiques sont pourtant remarquables à l'échelle de cette ville, et les conclusions qui se fondent uniquement sur un descripteur synthétique doivent être repensées car incomplètes ou inutiles. Ainsi, en l'illustrant à partir d'un épisode de fortes chaleurs observé durant l'été 2015, on voit que les écarts entre les stations grenobloises sont significatifs, voire considérables lors du pic enregistré le 7 juillet (Figure 10). Entre un indice calculé à partir de données de températures provenant de réanalyses climatiques (données NCEP-NCAR libres d'accès et couramment utilisées dans l'établissement de climatologies régionales) et la station rurale de Grenoble-Saint-Geoirs, l'écart est

de 7,5°C avec l'indice qui sous-estime l'ensemble des températures locales. Par ailleurs, en utilisant les données de réanalyses, on ne peut même plus détecter ni parler d'épisode caniculaire puisque les valeurs restent toujours inférieures à 29°C, alors qu'elles dépassent localement déjà 35°C comme le retranscrivent les chroniques stationnelles. L'écart atteint même 14,9°C si on compare cet indice aux données de la station intra-urbaine Les Frênes, équipement installé en 2001 dans le sud de Grenoble par l'agence régionale chargée de la qualité de l'air (Atmo Auvergne-Rhône-Alpes : www.air-rhonealpes.fr). Mais les contrastes sont également importants en comparant uniquement les stations urbaines disponibles, puisque les stations Le Versoud (maximum de 37,7°C) et Les Frênes (maximum de 42,9°C) enregistrent un écart de 5,2°C au plus fort de l'épisode caniculaire.

Un examen plus précis des deux derniers principaux épisodes caniculaires observés en juillet 2015 et juin 2016 à Grenoble renforce ce constat d'une très grande variabilité spatiale et temporelle des températures, qui nécessite en conséquence d'intégrer la connaissance de ces gradients dans les projets urbains. Les données horaires de quatre stations sont intercomparées (Tableau 2).

Les distinctions entre stations sont apparentes aussi bien le jour que la nuit, les stations qualifiées d'urbaines (Le Rondeau et surtout Les Frênes) étant les plus chaudes, celle rurale de Saint-Geoirs la plus

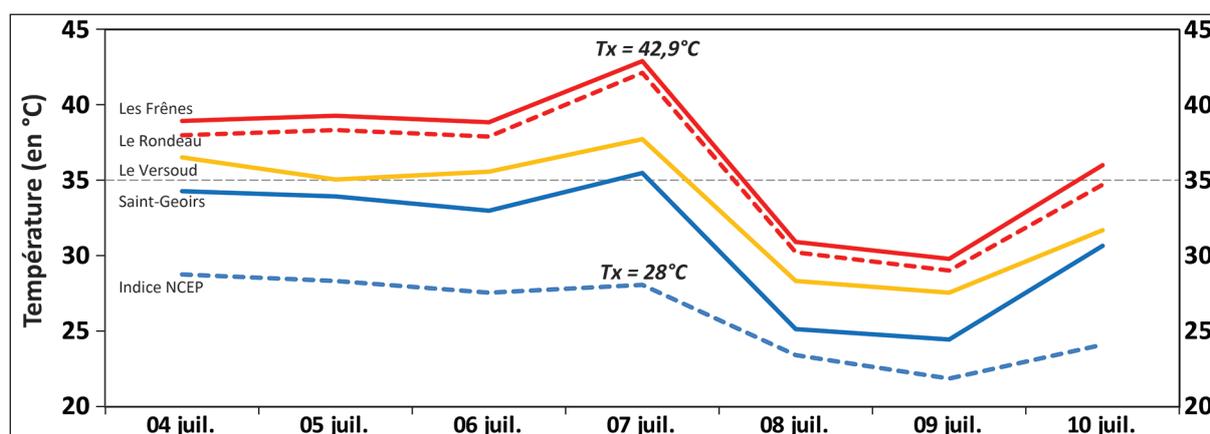


Figure 10. Comparaison des températures quotidiennes maximales (en °C) enregistrées sur la période du 4 au 10 juillet 2015 (pic caniculaire) d'une part aux stations de Grenoble-Saint-Geoirs (station rurale), Grenoble-Le Versoud (station péri-urbaine), Grenoble Le Rondeau (station urbaine) et Grenoble Les Frênes (station urbaine), et d'autre part, à partir des réanalyses NCEP-NCAR (point de grille correspondant à la région grenobloise) ; le trait horizontal en pointillés indique le seuil caniculaire diurne à 35°C ; calculé à partir de séries provenant de la Publiothèque de Météo-France pour Saint-Geoirs et le Versoud, des données fournies par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes pour Le Rondeau et Les Frênes, et des réanalyses provenant du site NCEP-NCAR.

Tableau 2. Descriptif général des quatre stations météorologiques utilisées pour étudier les extrêmes et contrastes thermiques de l'aire grenobloise durant les étés 2015 et 2016.

Nom de la station	Propriétaire	Principales caractéristiques
Saint-Etienne-de-Saint-Geoirs Aéroport	Météo-France	Qualifiée de rurale ; mise en service en août 1967 (pour l'emplacement actuel) ; située à 384 m d'altitude au nord-ouest de Grenoble, à 40 km de la station Les Frênes
Le Versoud Aéroport	Météo-France	Qualifiée de périurbaine ; mise en service en juin 1999 ; située à 220 m d'altitude, au nord-est de Grenoble, à 11,5 km de la station Les Frênes
Grenoble Le Rondeau – Rocade Sud	Atmo Auvergne-Rhône-Alpes	Qualifiée de périurbaine ; mise en service en octobre 1999 ; située à 219 m d'altitude dans le sud/sud-ouest de Grenoble, à 2,5 km de la station Les Frênes, dans un espace de réseaux routiers denses
Grenoble Les Frênes	Atmo Auvergne-Rhône-Alpes	Qualifiée d'urbaine de fond ; mise en service en janvier 2001 ; située à 214 m d'altitude, au sud de Grenoble, en périphérie du parc Jean Verlhac (14 ha) et de grands ensembles HLM ('la Villeneuve')

fraîche (Figure 11). Au pic de 42,9°C mesuré le 7 juillet 2015 à 17h à la station urbaine Les Frênes correspond à la même heure une température de (seulement) 33,5°C à Saint-Geoirs et 37,7°C à Le Versoud, soit un différentiel de 9,4°C avec la station rurale, et 5,2° avec celle péri-urbaine. Distantes de seulement 2,5 km, les 2 stations urbaines (Rondeau et Les Frênes) ont cependant une différence de presque 1°C. Par ailleurs, la station Les

Frênes, pourtant située dans un espace très végétalisé (parc de 14 ha), enregistre les records thermiques de l'espace grenoblois, indiquant bien que la végétalisation n'est pas la seule variable déterminante pour contrôler les températures imposées par les conditions météorologiques synoptiques et par les conditions microclimatiques.

Ces écarts moyens allant de 5 à 8°C en phases caniculaires révèlent d'une part le contraste majeur entre la ville et sa périphérie, mais aussi, d'autre part, les différences notables au coeur même de la métropole alpine, en lien avec les influences des substrats et du site. L'écart ville-campagne reste très distinct la nuit, et la plus forte homothermie détectée pour les quatre stations en période caniculaire intervient vers 6-7h du matin, période clé à mieux étudier pour différents projets urbains (programmations d'activités et de déplacements, gestion de la ressource en eau, gestion de systèmes et d'infrastructures). Les documents s'appuyant encore uniquement sur la température moyenne (1981-2010) maximale de Grenoble établie à 23,8°C en juin et 26,9°C en juillet à partir de la

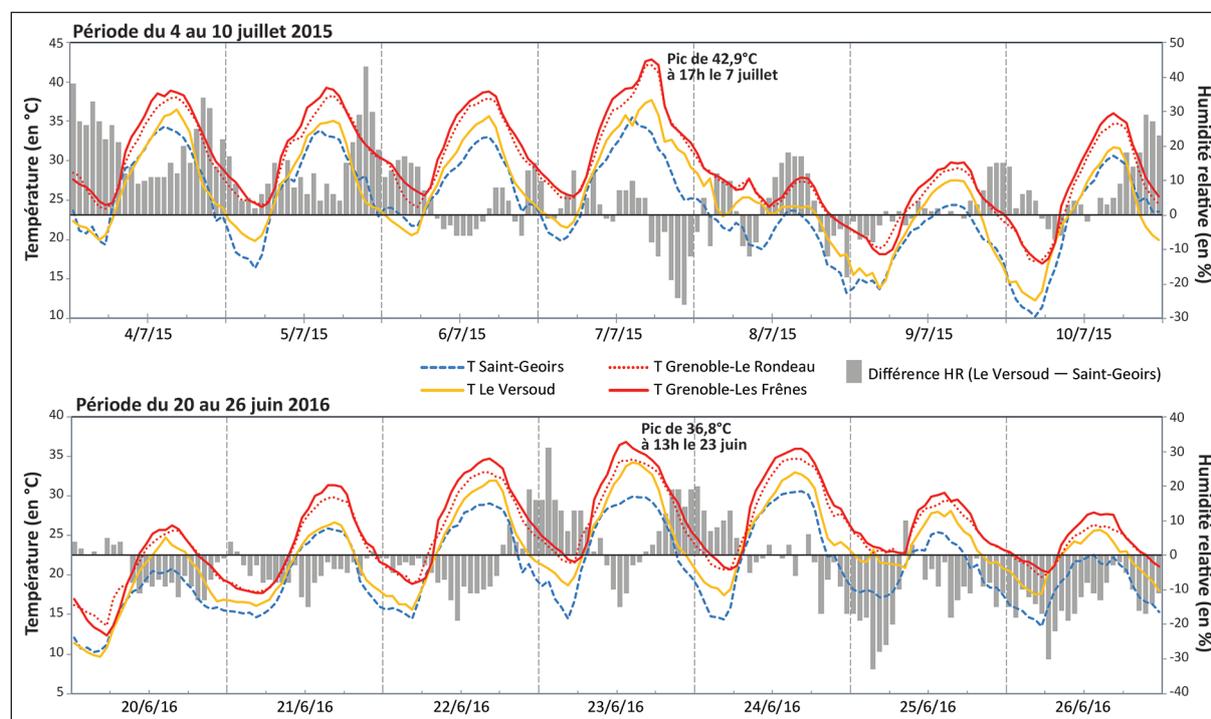


Figure 11. Variation des températures horaires moyennes (T en °C) aux stations de Grenoble-Saint-Geoirs (station rurale), Grenoble-Le Versoud (station péri-urbaine), Grenoble Le Rondeau (station urbaine) et Grenoble Les Frênes (station urbaine) lors du pic estival maximal enregistré le 7 juillet 2015 et le 23 juin 2016 ; le différentiel d'humidité relative horaire moyenne (HR en %) entre Le Versoud et Saint-Geoirs est également indiqué en histogramme ; calculé à partir de séries provenant de la Publithèque de Météo-France pour Saint-Geoirs et le Versoud, et des données fournies par Atmo Auvergne-Rhône-Alpes pour Le Rondeau et Les Frênes.

série rurale demeurent peu utiles et représentatifs des énormes variations quotidiennes. En effet, à ce jour, aucune cartographie fiable, actualisée et analysée de l'îlot de chaleur grenoblois n'existe, que ce soit en s'appuyant sur les données *in situ* et/ou la télédétection et/ou la modélisation. Les écarts thermiques locaux, dépendant des bilans énergétiques liés aux différents substrats, de la qualité physico-chimique de l'air et des conditions de ventilation, peuvent finalement être largement supérieurs à ceux observés à l'échelle régionale ou synoptique, dépendant des modes de circulation. Ces différentiels sont évidents lors des phases extrêmes caniculaires qui risquent de devenir plus fréquentes et intenses à moyen terme selon les prévisions numériques du climat (Tableau 1).

L'amélioration de ce type de diagnostic spatio-temporel des extrêmes climatiques pourrait par exemple provenir dans un premier temps d'expérimentations et d'observations menées sur un quartier, afin d'en tirer des expériences utiles pour la suite des protocoles à envisager pour la ville, et aussi surtout, pour pouvoir associer dès cette étape les habitants et les usagers dans l'établissement de ces mesures et observations urbaines. L'épisode météorologique anticyclonique de décembre 2016, accompagné de l'un des plus importants épisodes de pollution enregistrés localement, montre toute la nécessité d'une surveillance météorologique accrue, mais aussi d'une analyse climatique *a posteriori* très fine pour en comprendre les variations et évolutions, et pouvoir améliorer la modélisation urbaine. Cela demeure très théorique à ce jour sans mesure météorologique spatialisée, alors même que les modèles locaux sur la qualité de l'air sont déjà de grande qualité.

V. CONCLUSION

De nombreuses infrastructures urbaines clés sont des aménagements fixes construits pour une durée de vie longue, et non conçus pour résister aux nouvelles contraintes climatiques actuelles ou futures (Carter *et al.*, 2015). Imaginées selon des normes en climat constant, il est difficile et surtout très coûteux de les améliorer ou d'envisager de les remplacer. La transition vers des infrastructures résilientes au climat constitue donc un défi majeur pour les zones urbaines en général. Mais la diversité des défis de l'adaptation au changement climatique fait qu'il est impossible d'éla-

borer une approche unique pour l'évaluation, la planification et la mise en œuvre des différentes mesures existant actuellement. Les approches méthodologiques doivent rester flexibles et produire des connaissances utiles aux différentes échelles décisionnelles, y compris celle urbaine encore trop souvent oubliée dans les études et programmes nationales et internationales sur les services climatiques. L'adaptation planifiée au changement climatique en milieu urbain signifie avant tout l'utilisation d'informations sur les changements climatiques actuels et futurs pour examiner la pertinence des pratiques, des politiques et des infrastructures actuelles et prévues. Mais les lacunes sur le climat urbain sont de plusieurs types, à la fois théoriques, scientifiques, et aussi liées à la communication, à la demande des collectivités et à leur vision de la durabilité urbaine.

Bien que de grands progrès aient été réalisés dans le domaine des sciences du climat au cours des 30 dernières années, la construction de services climatiques (dans une approche holistique) pour aider les sociétés à relever les défis de la variabilité et du changement climatiques, exige encore de répondre à beaucoup de questions de recherche. Cependant, les outils liés à l'observation ou la modélisation climatiques sont souvent inadaptés pour l'étudier et le discriminer à l'échelle urbaine.

En lien avec les services climatiques, d'autres services sont connexes et apportent aussi des compléments importants pour les utilisateurs et gestionnaires, comme par exemple les géoservices ou webservices, permettant notamment la cartographie assistée ou la réalisation de traitement de données. Cette approche pour autonomiser l'utilisateur va en fait aussi de pair avec une autre approche de plus en plus empruntée par les services municipaux et les organismes étatiques, celle de la transparence et de l'accès aux données, en particulier celles touchant aux aspects environnementaux.

Parmi les nombreuses expérimentations urbaines en cours en France ou ailleurs, celles portées par la ville de Grenoble grâce à sa plateforme Ville De Demain permettent d'envisager des évolutions rapides et efficaces, associant toutes les communautés d'acteurs de la ville, et ce, afin de combler les nombreuses lacunes sur les connaissances de ce climat urbain alpin en profonde mutation pour des raisons naturelles et anthropiques.

REMERCIEMENTS

Ces travaux théoriques ou pratiques se déroulent dans le cadre de la plate-forme interdisciplinaire ‘Grenoble, Ville de Demain’ (VDD) mise en place depuis 2015 par la Municipalité de Grenoble ; les auteurs remercient en particulier pour leur soutien Stéphane Letexier (Directeur de VDD) et, au travers du Maire de la ville, Eric Piolle, tous les services de la Ville pour leur soutien. Ils remercient également Atmo Auvergne-Rhône-Alpes, au travers de Camille Rieu, pour la transmission de certaines données climatiques.

BIBLIOGRAPHIE

- Adger, W.N., Brown, K., Nelson, D.R., Berkes, F., Eakin, H. & Folke, C. (2011). Resilience implications of policy responses to climate change. *Climate Change*, 2(5), 757-766, <http://dx.doi.org/10.1002/wcc.133>.
- AEE - Agence Européenne de l’Environnement (2012). *Urban adaptation to climate change in Europe. Challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies*. EEA Report No 2/2012, Copenhagen, 148 p.
- AEE - Agence Européenne de l’Environnement (2016). *Urban adaptation to climate change in Europe 2016: transforming cities in a changing climate*. EEA Report N°12/2016, Luxembourg, 140 p., [doi:10.2800/021466](https://doi.org/10.2800/021466).
- Allenvi (2014). Mise en oeuvre de la stratégie scientifique de développement des services climatiques. *Alliance nationale de recherche pour l’environnement*, note stratégique 3, 10 p.
- Azevedo, J.A., Chapman, L. & Muller C.L. (2016). Quantifying the daytime and nighttime urban heat island in Birmingham, UK: A comparison of satellite derived land surface temperature and high resolution air temperature observations. *Remote Sensing*, 8, 153, 17 p.
- Bassett, R., Cai, X., Chapman, L., Heaviside, C., Thornes, J.E., Muller, C.L., Young, D.T. & Warren, E.L. (2016). Observations of urban heat island advection from a high-density monitoring network. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142, 2434-2441.
- Bonney, R., Cooper, C.B., Dickinson, J., Kelling, S., Phillips, T., Rosenberg, K.V. & Shirk, J. (2009). Citizen Science: A Developing Tool for Expanding Science Knowledge and Scientific Literacy. *BioScience*, 59(11), 977-984.
- Carrega, P. (2013). Le climat urbain de Nice en milieu géographique contrasté : synthèse par approche inductive. *Climatologie*, 10, 9-34.
- Carter, J.G., Cavan, G., Connelly, A., Guy, S., Handley, J. & Kazmierczak, A. (2015). Climate change and the city: Building capacity for urban adaptation. *Progress in planning*, 95, 1-66.
- Chapman, L., Muller, C.L., Young, D.T., Warren, E.L., Grimmond, C.S.B., Cai, X.-M. & Ferranti, J. S. (2014). The Birmingham Urban Climate Laboratory: An open meteorological testbed and challenges of the smart city. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96, 1545-1560.
- Chapman, L. (2015). *Urban meteorological networks: An urban climatologists panacea?* 9th International Conference on Urban Climate (IAUC & AMS), open plenary speech, 20-24 juillet 2015, Toulouse.
- Chapman, L., Bell, C. & Bell, S. (2016). Can the crowdsourcing data paradigm take atmospheric science to a new level? A case study of the urban heat island of London quantified using Netatmo weather stations. *International Journal of Climatology*, [doi:10.1002/joc.4940](https://doi.org/10.1002/joc.4940).
- Cohn, J. P. (2008). Citizen Science: Can Volunteers Do Real Research? *BioScience*, 58, 3, 192-197.
- Commission Européenne (2015). *A European research and innovation roadmap for climate services*. European Commission, Research and Innovation Luxembourg, 56 p.
- Connors, J.P., Lei, S. & Kelly, M. (2012). Citizen Science in the Age of Neogeography: Utilizing Volunteered Geographic Information for Environmental Monitoring. *Annals of the Association of American Geographers*, 102(6), 1267-1289.
- Conrad, C.C. & Hilchey, K.G. (2011). A review of citizen science and community-based environmental monitoring: issues and opportunities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 176, 273-291.
- De Lapparent, B., Roux, J., Richard, Y., Pohl, B., Bientz, S., Codet-Hache, O., Dumaitre, F., Toussein, H., Tissot, A.-C., Thevenin, D. & Thevenin, T. (2015). Mesures de la température et spatialisation de l’îlot de chaleur urbain à Dijon. *Publications de l’AIC*, 28, 257-262.
- De Ridder, K., Acero, J.A., Lauwaet, D., Lefebvre, W., Maiheu, B. & Mendizabal, M. (2014). *D4.1: Validation of agglomeration-scale climate projections*. RAMSES Project report, European Union’s Seventh Programme for Research, Technological Development and Demonstration, 82 p.
- Dickinson, J.L., Shirk, J., Bonter, D., Bonney, R., Crain, R.L., Martin, J., Phillips, T. & Purcell, K. (2012). The current state of citizen science as a tool for ecological research and public engagement. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 10, 291-297.
- Dubreuil, V., Quénot, H., Foissard, X. & Planchon, O. (2011). *Climatologie urbaine et îlot de chaleur urbain à Rennes*. In Clergeau P. (ed.), *Ville et biodiversité*.

- sité : les enseignements d'une recherche pluridisciplinaire, Presses Universitaires de Rennes, 105-122.
- Duché, S. & Madelin, M. (2015). Les capteurs low cost de pollution : un nouvel eldorado pour l'évaluation de l'exposition individuelle aux particules ? *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*, 28, 140-145.
- Dupré, L. & Micoud, M. (2007). *Savoirs publics sur la nature et politiques publiques de l'environnement : rôle et place des naturalistes amateurs et des professionnels*. In Charvolin F., Micoud A., Nyhart L. (eds.), *Des sciences citoyennes ? La question de l'amateur dans les sciences naturalistes*, La Tour d'Aigues, Editions de l'Aube, 219-232.
- Ellefsen, R. (1991). Mapping and measuring buildings in the urban canopy boundary layer in ten US cities. *Energy and Buildings*, 15-16, 1025-1049.
- Freires Lucio, F.D. & Grasso, V. (2016). The Global Framework for Climate Services (GFCS). *Climate Services*, 2-3, 52-53.
- Geneletti, D. & Zardo, L. (2016). Ecosystem-based adaptation in cities: An analysis of European urban climate adaptation plans. *Land Use Policy*, 50, 38-47.
- GFCS (2014). *Annexe du Plan de mise en oeuvre du Cadre mondial pour les services climatologiques – Renforcement des capacités*. Global Framework for Climate Services, OMM, Genève, 79 p.
- GIEC (2014). *Human settlements infrastructure & spatial planning*. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*, 5th Assessment Report.
- Goodchild, M.F. (2007). Citizens as sensors: the world of volunteered geography. *GeoJournal*, 69, 4, 211-221.
- Goodchild, M.F. & Li, L. (2012). Assuring the quality of volunteered geographic information. *Spatial Statistics*, 1, 110-120.
- Habitat For A Better Urban Future (2016). *United Nations Habitat*. Consulté sur unhabitat.org/urban-themes/energy.
- Hagen, B. (2016). The role of planning in minimizing the negative impacts of global climate change. *Urban Planning*, 1, 3, 13-24.
- Haklay, M. (2013). *Citizen Science and Volunteered Geographic Information - overview and typology of participation*. In Sui D.Z., Elwood S., Goodchild M.F. (eds.), *Crowdsourcing Geographic Knowledge: Volunteered Geographic Information (VGI) in Theory and Practice*, Berlin, Springer, 105-122.
- Houet, T. & Pigeon, G. (2011). Mapping Urban Climate Zones and quantifying climate behaviors – An application on Toulouse urban area (France). *Environmental Pollution*, 159(8-9), 2180-2192.
- Illingworth, M.S., Muller, L.C., Graves, R. & Chapman, L. (2014). UK Citizen Rainfall Network: a pilot study. *Weather*, 69, 203-207.
- Irwin, A. (1995). *Citizen science: a study of people, expertise and sustainable development*. Londres et New York, Routledge, 198 p.
- Joliveau, T. (2011). Le géoweb, un nouveau défi pour les bases de données géographiques. *L'Espace géographique*, 40(2), 154-163.
- Joliveau, T., Noucher, M. & Roche, S. (2013). La cartographie 2.0, vers une approche critique d'un nouveau régime cartographique. *L'Information géographique*, 77(4), 29-46.
- Karl, T.R., Diamond, H.J., Bojinski, S., Butler, J.H., Dolman, H., Haeberli, W., Harrison, D.E., Nyong, A., Rösner, S., Seiz, G., Trenberth, K., Westermeyer, W. & Zillman, J. (2010). Observation needs for climate information, prediction and application: capabilities of existing and future observing systems. *Procedia Environmental Sciences*, 1, 192-205.
- Kastendeuch, P.P. & Najjar, G. (2015). Une simulation des interactions ville-atmosphère à différentes échelles : application sur Strasbourg. *Climatologie*, 12, 44-64.
- Kouadio, J.S.A. & Douvinet, J. (2016). Diffuser une alerte aux crues rapides via une application smartphone en France. *Revue des Sciences et Technologies de l'Information - Série ISI : Ingénierie des Systèmes d'Information*, 21, 49-66.
- Le Roy, B. (2016). *Caractérisation des températures estivales et des extrêmes chauds à Grenoble, évolution présente et future*. Mémoire de master 1 réalisé au Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement (LTHE), Université Grenoble Alpes, 57 p.
- Loridan, T. & Grimmond, C.S.B. (2011). Characterization of energy flux partitioning in urban environments: Links with surface seasonal properties. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51, 219-241.
- Madelin, M., Duché, S. & Dupuis, V. (2016). *Mesures participatives de l'exposition individuelle à la pollution de l'air*. Conférence Sagéo 2016, 6 au 9 décembre 2016, Nice.
- Manton, M.J., Belward, A., Harrison, D.E., Kuhn, A., Lefale, P., Rösner, S., Simmons, A., Westermeyer, W. & Zillman, J. (2010). Observation needs for climate services and research. *Procedia Environmental Sciences*, 1, 184-191.
- Martin, N. & Adnes, C. (2014). Ozone spatialization in urban and hinterland areas. *Climatologie*, 11, 79-84.
- Mercier, S., Dubois, G. & Giraud, X. (2016). Utiliser CORDEX pour enrichir l'offre de services climatiques. *La Météorologie*, 94, 27-34.
- Mericskay, B. & Roche, S. (2011). Cartographie 2.0 : le grand public, producteur de contenus et de savoirs géographiques avec le web 2.0. *Cybergeo*, 522 [cybergeo.revues.org/24710].
- Mills, G., Cleugh, H., Emmanuel, R., Endlicher, W., Erell, E., McGranahan, G., Ng, E., Nickson, A., Rosenthal, J. & Steemer, K. (2010). Climate information for improved planning and management of

- megacities (needs perspective). *Procedia Environmental Sciences*, 1, 228-246.
- Monfray, P. & Bley, D. (2016). JPI Climate: A key player in advancing Climate Services in Europe. *Climate Services*, 4, 61-64.
- Muller, C.L. (2013). Mapping snow depth across the West Midlands using social media generated data. *Weather*, 68, 82-82.
- Muller, C.L., Chapman, L., Johnston, S., Kidd, C., Illingworth, S., Foody, G., Overeem, A. & Leigh, R.R. (2015). Crowdsourcing for climate and atmospheric sciences: current status and future potential. *International Journal of Climatology*, 35(11), 3185-3203.
- Ouzeau, G., Soubeyroux, J.-M., Schneider, M., Vautard, R. & Planton, S. (2016). Heat waves analysis over France in present and future climate: Application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. *Climate Services*, 4, 1-12.
- Overeem, A., Robinson, R.J.C., Leijnse, H., Steeneveld, G.J., Horn, P.B.K. & Uijlenhoet, R. (2013). Crowdsourcing urban air temperatures from smartphone battery temperatures: air temperatures from smartphones. *Geophysical Research Letters*, 40(15), 4081-4085.
- PFVT (2015). *Orientations de l'aide française en matière de villes et de changement climatique*. Partenariat Français pour la Ville et les Territoires, document interne non publié, 41 p.
- Quay, R. (2010). Anticipatory governance: A tool for climate change adaptation. *Journal of the American Planning Association*, 4, 496-511.
- Rankovic, A., Pacteau, C. & Abbadie, L. (2012). Services écosystémiques et adaptation urbaine interscalaire au changement climatique : un essai d'articulation. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], hors-série 12, DOI : 10.4000/vertigo.11851.
- Rosenzweig, C., Solecki, W., Blake, R., Bowman, M., Faris, C., Gornitz, V. (2011). Developing coastal adaptation to climate change in the New York City infrastructure-shed: Process, approach, tools, and strategies. *Climatic Change*, 106, 93-127.
- Rosenzweig, C., Solecki, W., Romero-Lankao, P., Mehrotra, S., Dhakal, S., Bowman, D. & Ali Ibrahim, S. (2015). *ARC3.2 Summary for City Leaders*. Urban Climate Change Research Network, Columbia University, New York, 28 p.
- Scherer, D., Fehrenbach, U., Beha, H.-D. & Parlow, E. (1999). Improved concepts and methods in analysis and evaluation of the urban climate for optimizing urban climate processes. *Atmospheric Environment*, 33, 4185-4193.
- Silvertown, J. (2009). A new dawn for citizen science. *Trends in Ecology and Evolution*, 24, 467-471.
- Simonet, G. & Blanc, N. (2012). L'adaptation de la gestion des espaces naturels urbains aux changements de la variabilité climatique régionale : exemple de Paris et Montréal. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], hors-série 12, DOI : 10.4000/vertigo.11861.
- Soto, D., Renard, F. & Thimonier-Rouzet, E. (2015). Premières réflexions sur la préfiguration d'un observatoire lyonnais du climat. *EchoGéo* [En ligne], 34, echogeo.revues.org/14377.
- Soubeyroux, J.-M., Ouzeau, G., Schneider, M., Cabanes, O. & Kounkou-Arnaud, R. (2016). Les vagues de chaleur en France : analyse de l'été 2015 et évolutions attendues en climat futur. *La Météorologie*, 94, 45-51.
- Stewart, I.D. & Oke, T.R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of American Meteorological Society*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>, 1879-1900.
- Tang, X. (2008). Pour des services météorologiques adaptés aux nouveaux milieux urbains. *Bulletin de l'OMM*, 57(4), 244-248.
- Tang, X. & Terblanche, D. (2015). *Strategy for urban service delivery adapting to changing climate and environment - Building resilient and climate smart cities*. WMO documentation, Weather and DRR Service Department (WDS), the United Nations Knowledge Platform: sustainabledevelopment.un.org, 77 pages.
- Unger, J., Savić, S., Gál, T. & Milošević, D. (2014). *Urban climate and monitoring network system in central european cities*. Edité par E. Kosztolányi et V. Marković, Novi Sad: Faculty of Sciences, Szeged University, 103 p.
- Vaughan, C., Buja, L., Kruczkiewicz, A. & Goddard, L. (2016). Identifying research priorities to advance climate services. *Climate Services*, 4, 65-74.

Coordonnées des auteurs :

Pr Sylvain BIGOT
Univ. Grenoble Alpes
CNRS-IRD, UMR IGE
F-38000 Grenoble, France
sylvain.bigot@univ-grenoble-alpes.fr

Dr Sarah DUCHE
Univ. Grenoble Alpes
CNRS, UMR PACTE
F-38000 Grenoble, France

Dr Malika MADELIN
Univ. Paris Diderot
CNRS, UMR PRODIG
F-75000 Paris, France

Dr Sandra ROME
Univ. Grenoble Alpes
CNRS-IRD, UMR IGE
F-38000 Grenoble, France