



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*



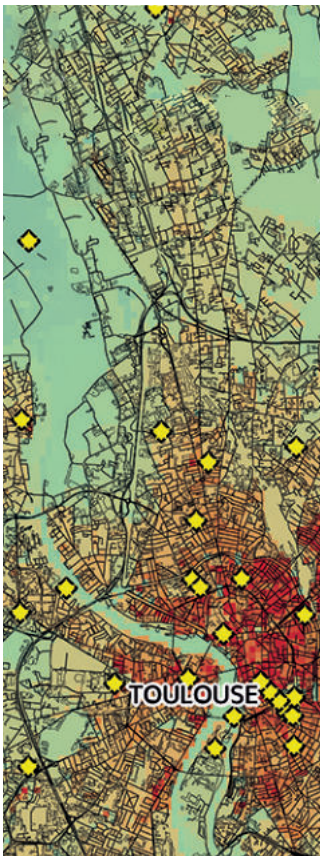
MÉTÉO  
FRANCE

# COMITÉ SCIENTIFIQUE CONSULTATIF DE MÉTÉO-FRANCE

## MÉTÉOROLOGIE ET CLIMAT DES MILIEUX URBAINS :

État de l'art des outils et connaissances, et perspectives de recherche et de développement de services

Valéry Masson, CNRM, Météo-France - CNRS, Toulouse, France



## Remerciements

Ce rapport a été réalisé à partir de travaux de nombreux collègues de Météo-France : Au CNRM dans les groupes de météorologie à moyenne échelle (GMME) et de Météorologie Expérimentale et Instrumentale (GMEI) : Aude Lemonsu, Cécile De Munck, Robert Schoetter et l'ensemble des étudiants et post-docs de l'équipe VILLE, Clotilde Augros, Cyrielle Denjean, et les équipes d'appui aux campagnes expérimentales ; de Marine Goret et Frédéric Long à la Direction des Services Météorologiques (DSM); et d'Olivier Mestre à la Direction de Opérations de Prévion (DIROP) ; ainsi que d'échanges avec Yann Guillou à la Direction des Services d'Observations (DSO) et Jean-Michel Soubeyroux à la Direction de la Climatologie et des Services Climatiques (DCSC).

Les travaux de recherche présentés sont aussi le fruit de collaborations interdisciplinaires avec de nombreux laboratoires universitaires, dont en particulier : le Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités Sociétés Territoires (LISST), l'Université Gustave Eiffel (UGE), le Laboratoire des Sciences et Technologies de l'Information, de la Communication et de la Connaissance (Lab-STICC), le Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (CIRED), l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), le Laboratoire de Recherche en Architecture de Toulouse (LRA), les laboratoires de géographie COSTEL, CRC et PRODIG, le Laboratoire Interdisciplinaire Environnement Urbanisme (LIEU); et à l'étranger, le Centre Européen de Prévion à Moyen Terme (CEPMMT), les universités de Reading, Braunschweig, Freiburg ou Helsinki, et des services météorologiques du consortium ACCORD (services belges et finlandais). Les recherches sur l'adaptation des villes au changement climatique ont pu être menées notamment grâce à des projets de recherche (cf projets en cours en section 7.2) avec les collectivités territoriales, en particulier Toulouse Métropole, et les agences d'urbanisme de Paris, d'Ile de France et Toulouse, et la Fédération Nationale des Agences d'Urbanisme.

L'état de l'art de la prise en compte de la ville par les services nationaux météorologiques et hydrologiques (SNMH) opérationnels a été réalisé grâce aux informations spécialement fournies pour ce rapport par Humphrey Lean (UK Met Office, Royaume-Uni), Sylvie Leroyer et Stéphane Bélair (ECCC, Canada), Stan Benjamin (NOAA, USA), Charmaine Franklin (BoM, Australie), Shiguang Miao (CMA, Chine), Saskia Buchholz (DWD, Allemagne), Naoko Seino (JMA, Japon), Gianpaolo Balsamo (CEPMMT, Europe) et les membres du consortium ACCORD contactés par Claude Fisher (Météo-France, coordinateur ACCORD).

Ce rapport a pu être amélioré grâce aux retours des rapportrices, Céline Mari (IRD) et Natacha Bernier (ECCC)

Relecteurs : Christine Lac, Samuel Morin, Marc Pontaud, CNRM et DESR

Remerciements .....	2
1) Introduction .....	4
1.1) Présentation des enjeux .....	4
1.2) Présentation des phénomènes .....	5
1.3) Vue générale des actions de Météo-France sur la ville dans les divers services.....	7
2) État de l'art science et services dans le domaine de la météorologie et du climat urbain	9
2.1) Les stations météorologiques synoptiques 'urbaines' .....	9
2.2) Systèmes d'observation pour le climat urbain.....	11
2.3) Mesures d'opportunité.....	11
2.4) Systèmes de prévision .....	12
2.5) Services météorologiques et climatiques urbains.....	14
3) Activités et perspectives de recherches à Météo-France .....	16
3.1) Systèmes d'observation pour le climat urbain.....	16
3.2) Campagne de mesures « Paris 2022 ».....	19
3.3) Modélisation.....	22
3.4) Étude des processus en météorologie urbaine.....	28
3.5) Effets radiatifs et interaction avec le climat urbain .....	30
4) Perspectives en Prévision Numérique du Temps à l'échelle infra-urbaine.....	31
4.1) RDP « Paris 2024 ».....	31
4.2) Études de la variabilité de la météorologie urbaine et sa prévisibilité .....	32
4.3) Adaptations statistiques développés pour et dans les services opérationnels.....	33
4.4) Confort thermique, Impacts sanitaires.....	34
5) Perspectives de services climatiques urbains.....	36
5.1) Méthodes, Descentes d'échelles, Types de temps .....	36
5.2) Études opérationnelles sur la quantification présente et future de l'ICU.....	37
5.3) Services pour la planification urbaine .....	38
5.4) Transfert vers les acteurs.....	40
6) Conclusions .....	43
7) Annexes.....	44
7.1) Contributions de Météo-France sur la « ville » aux instances internationales .....	44
7.2) Projets de recherche en cours ou acceptés .....	44
7.3) Références.....	45

## 1) Introduction

### 1.1) Présentation des enjeux

Les villes regroupent et concentrent la majorité de la population mondiale, mais aussi des biens et des infrastructures. La population urbaine continue de s'accroître et les villes se densifient ou s'étendent. Certaines mégapoles atteignent plus de 20 millions d'habitants, l'agglomération parisienne 10 millions. Ceci rend les villes particulièrement vulnérables aux aléas météorologiques et aux effets du changement climatique. Ces aléas météorologiques peuvent eux-mêmes être influencés ou même renforcés localement par l'urbanisation, aggravant d'autant leurs impacts. C'est pourquoi l'urbanisation est un des quatre challenges identifiés par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) notamment dans le cadre du World Weather Research Programme (WWRP).

Les villes, y compris les mégapoles, sont, du point de vue météorologique, des objets petits comparés à la fois aux systèmes de grande échelle qui influencent le temps et le climat (océans, continents, chaînes montagneuses, anticyclones et dépressions) et aux caractéristiques plus régionales (zones côtières avec brises de mer, forêts, vallées, etc...). Cependant, la modification importante de la surface en ville affecte localement quasiment toutes les variables météorologiques. Les villes influencent ainsi de manière significative le climat local, par exemple, le phénomène de l'îlot de chaleur urbain (Oke et al 2017). Ces échelles très fines du point de vue météorologique expliquent le fait que les modèles de prévision du temps opérationnels ne disposent toujours pas, dans l'immense majorité des services météorologiques, de description des processus liés à la présence des milieux urbains. Le modèle AROME (Seity et al 2011) principalement développé par Météo-France est une des rares exceptions, et a été le premier modèle opérationnel tenant compte explicitement des surfaces urbaines au travers du modèle TEB (Masson 2000), dès fin 2008. L'enjeu de l'amélioration des systèmes de prévisions à haute résolution (hectométrique) en ville est plus que jamais d'actualité. Il fait l'objet de nombreuses activités de recherche à la fois Météo-France mais aussi dans les autres services météorologiques. Ces activités de recherche concernent à la fois l'amélioration de la compréhension des processus météorologiques impliquant les milieux urbains, par des approches combinant observations et modélisation, et le développement de systèmes de modélisation utilisés pour la surveillance, la prévision météorologique et la projection climatique pour les milieux urbains, et le développement de services qui les exploitent.

Le CNRM (unité mixte de recherche associant Météo-France et le CNRS) joue un rôle de premier plan dans le domaine de l'étude de la météorologie et du climat urbain, de longue date et en collaboration avec des nombreux partenaires nationaux et internationaux. Il coordonne un projet de recherche international sur ce thème, le Research Demonstration Project (RDP) « 2024 Paris Olympics », endossé par l'Organisation Météorologique Mondiale. Une grande campagne expérimentale, que nous nommerons « Paris 2022 » dans ce document même si elle n'a pas encore de nom officiel, aura lieu sur la région parisienne à l'été 2022, porté conjointement par plusieurs projets ANR et européens, dont un piloté par le CNRM, à laquelle participeront des partenaires du RDP. Cette campagne permettra d'améliorer nos connaissances sur les interactions entre surfaces urbaines, dynamique de la couche limite et composition atmosphérique (notamment les aérosols). Via l'observation à plusieurs échelles, elle permettra d'améliorer les modèles atmosphériques à haute résolution au sein du RDP.

Répondre aux besoins des villes par des services météorologiques ou climatiques dédiés (et spécifiques) n'est pas aisé. Tout comme les impacts météorologiques, au sens large, couvrent

des échelles de temps qui vont de l'immédiat (quelque minutes) au siècle (climat), il en est de même dans la gestion urbaine et sa gouvernance (qui va de la gestion de crise à la planification urbaine). Comme souligné dans les guides produits par l'OMM ces dernières années (WMO 2019, 2021, Baklanov et al 2020, Grimmond et al 2021) sur les services climatiques urbains intégrés, développer des services qui répondent à un besoin nécessite un processus de co-construction interdisciplinaire. Un enjeu est ensuite de généraliser des services développés dans un cadre particulier en un service exportable, et utile, à plus grande échelle, c'est-à-dire pour différentes villes et territoires.

## 1.2) Présentation des phénomènes

Le début de l'observation scientifique du climat urbain est attribué à Luke Howard sur le climat de Londres dans les années 1820 (Howard 1818). Une très belle description du phénomène d'îlot de chaleur nocturne est donnée par Maupassant dans *Bel Ami*, en 1855 : « *Ils prirent un fiacre découvert, gagnèrent les Champs-Élysées, puis l'avenue du Bois-de-Boulogne. C'était une nuit sans vent, une de ces nuits d'étuve où l'air de Paris surchauffé entre dans la poitrine comme une vapeur de four* ». On peut noter au passage que la date de cette citation montre que la problématique du climat urbain ne s'appréhende donc pas uniquement dans le cadre des enjeux du réchauffement climatique.

### A) Ilot de chaleur

La caractéristique la plus connue en climat urbain est l'îlot de chaleur urbain. Ce nom sert à décrire le fait qu'il fait régulièrement plus chaud en ville que dans les campagnes alentours. Derrière cette terminologie se cachent en fait divers phénomènes. En particulier, il peut s'agir de température de l'air (celle mesurée par les stations météorologiques) ou de température de surface (celles mesurée par les satellites par des observations de l'émission infrarouge des surfaces). Souvent utilisé sans précision, ce terme conduit facilement à des contre-sens, parfois au sein même de la communauté scientifique, et très souvent – voire systématiquement – par les acteurs de la ville (urbanistes, architectes, élus, etc...).

L'îlot de chaleur urbain de Surface (ICU-S) est en général à la fois fort et très variable spatialement en journée. Les surfaces asphaltées ou goudronnées comme les parkings s'échauffent fortement, et contrastent avec les zones végétalisées. Les écarts de température peuvent atteindre plus de 20°C entre ces deux types de surface en été. Il est facilement observable les jours (et nuits) sans nuage par imagerie satellite infra-rouge, ce qui fait que de nombreux bureaux d'études ou institutions utilisent directement ces températures de surface, aux représentations graphiques spectaculaires, dans le cadre de services rendus aux collectivités.

L'îlot de chaleur urbain (ICU) de l'air est en général faible le jour (contrairement à celui de surface), avec un écart souvent proche de 1°C l'après-midi, et même une ville plus fraîche en début de matinée que les zones rurales, dont l'air se réchauffe plus vite. En revanche, l'accumulation de chaleur provenant du rayonnement solaire dans les matériaux (Figure 1) pendant la journée fait que l'air en ville se refroidit bien plus lentement en soirée, lorsque cette chaleur est restituée à l'air. Quelques heures après le coucher du soleil l'ICU est maximum, pouvant atteindre 10°C pour une agglomération comme Paris. Un écart de température important peut se maintenir tout au long de la nuit. Les relâchements de chaleur par les activités humaines jouent un moindre rôle : la climatisation réchauffe l'air de 1°C à 2°C maximum, la chaleur relâchée par les véhicules, que l'on sent lorsque l'on est tout proche, est négligeable à



l'échelle d'une ville par rapport aux autres sources. En hiver, le chauffage peut toutefois contribuer à l'ICU significativement, même si l'ICU hivernal a été peu étudié (e.g. Malevich et Klink 2011 sur Minneapolis). Les villes polaires d'à peine 30 000 habitants peuvent présenter des ICU de plus de 10°C pendant la nuit polaire, du fait des rejets anthropiques de chaleur mais aussi de relief (par exemple pour la situation d'une ville sur une colline, Konstantinov et al 2018).

Enfin, il faut noter que les ICU et ICU-S sont très variables dans le temps. Ils sont très sensibles au type de temps. Importants par vent faible et pour un jour ensoleillé, ils s'amenuisent voire disparaissent en présence de nuage et surtout de vent ou pluie. Typiquement, l'ICU moyen annuel sur Paris est de 2 à 3°C, avec des valeurs maximales pouvant atteindre 10°C.

L'ICU aggrave les conséquences des canicules, comme cela a été dramatiquement observé lors de la canicule de 2003, avec 15000 décès supplémentaires en région parisienne (Laaidi 2012). Il aggrave donc aussi les conséquences néfastes du réchauffement climatique en ville. L'adaptation au changement climatique en ville pour les problématiques de surchauffe en été concerne de plus en plus de villes en France.

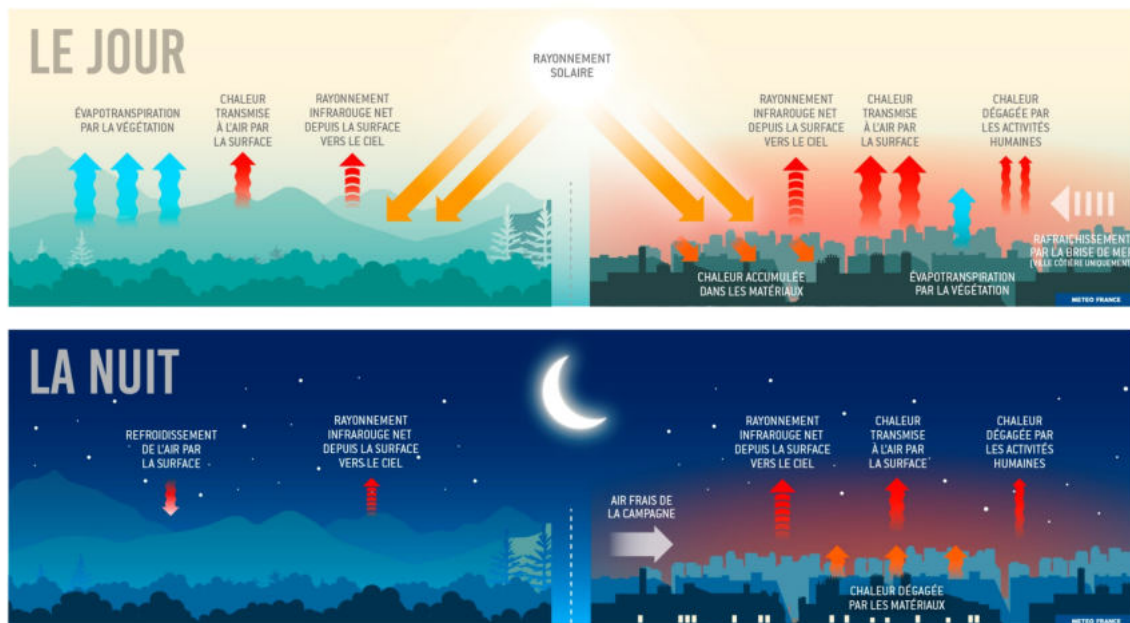


Figure 1 Les phénomènes clés du bilan d'énergie de surface en ville (source : Météo-France)

### B) Couche limite, vent, nuages de couche limite et orages

La ville influence fortement la couche limite atmosphérique. Par nuit de fort ICU, les flux de chaleur dégagés par les surfaces urbaines produisent une couche limite de nature convective de typiquement 150 à 200m d'épaisseur, alors qu'elle est très stable en campagne avec une forte inversion thermique. En journée, par beau temps, elle est souvent légèrement plus haute (typiquement 100m), mais ceci est peu étudié. Ceci peut conduire à plus de petits cumulus de beau temps en été au-dessus de grandes agglomérations (comme Londres, Paris, Theeuwes et al 2019 ; ou Moscou, Varentsov et al 2018), le point de condensation étant atteint au sommet des ascendances de couche limite.

La forte rugosité due aux obstacles conduit à un ralentissement important du vent de surface dans les milieux urbains. Le vent est naturellement très turbulent, et très variable à micro-

échelle. Cet effet global de ralentissement peut conduire à un contournement du flux synoptique. Lorsque le vent synoptique est négligeable ou faible des circulations locales peuvent se mettre en place, même si elles sont peu souvent observées.

Les villes peuvent avoir un effet sur les orages (Liu and Nigoyi 2019, Shepherd 2013). Ceci est en général observé pour des orages isolés, dans des configurations avec peu de perturbation autre que la ville (comme dans les Grandes plaines américaines ou à l'intérieur de la Chine). Un orage peut être dévié ou même séparé en deux parce que le flux synoptique contourne le centre dense (effet de rugosité), ce qui fait que les zones périurbaines de part et d'autre seront plus sujettes aux précipitations. Un orage peut aussi être intensifié, ou même créé, au-dessus du centre-ville du fait des effets thermiques (ascendances). Dans ce cas, ce sont plutôt les banlieues en aval qui sont touchées. Toutefois ceci est à relativiser. Dans la grande majorité des cas, les villes n'ont pas d'effet sur les précipitations, dès que les systèmes météorologiques concernés sont de grande taille (dépression, bande orageuse, supercellule, etc...).

### *C) Qualité de l'air*

La pollution de l'air est un phénomène urbain particulièrement important sur le plan sanitaire. La météorologie exerce une influence sur le niveau de pollution, par le transport ou la stagnation des polluants, et le rayonnement sur les transformations chimiques. L'intensité des phénomènes est toutefois gouvernée en premier lieu par l'intensité des émissions de polluants (voire l'apport de polluants d'une autre mégapole en amont de l'écoulement synoptique). Un point à souligner est que les situations favorables à la pollution sont aussi celles favorables à l'ICU.

Les interactions directes entre pollution et météorologie urbaine sont peu étudiées. Il peut s'agir de l'effet radiatif des aérosols urbains, qui limite le rayonnement solaire atteignant le sol et diffuse et absorbe celui-ci dans la couche limite. L'effet de la structure convective de la couche limite urbaine la nuit sur le mélange vertical des polluants n'est généralement pas pris en compte dans les modèles de qualité de l'air (c'est le cas de certains modèles de recherche, même si cela représente encore l'exception). Ce mélange accru influence pourtant radicalement les espèces réactives (par exemple entre oxydes d'azote et ozone), alors diluées sur la verticale.

Étonnamment, les communautés scientifiques de climatologie urbaine et de qualité de l'air sont très dissociées. Par exemple, le groupe GURME (GAW Urban Research Meteorology and Environment) de l'OMM dédié à l'environnement urbain était focalisé sur les aspects pollution, l'arrivée de membres issus de la communauté de climat urbain (Sue Grimmond, université de Reading) dans ce comité ne datant que d'un peu moins de 10 ans. Le pourquoi de cet état de fait reste à déterminer, mais pourrait être lié à des communautés scientifiques d'origine très différentes dans les années 1970-80 (sciences de l'atmosphère en qualité de l'air, géographie physique en climatologie urbaine).

#### 1.3) Vue générale des actions de Météo-France sur la ville dans les divers services

Ce document décrit les activités et perspectives de Météo-France et ses partenaires dans le domaine des milieux urbains. Météo-France se distingue par l'ambition de développer une approche partant de la recherche aux services météo-climatiques prenant en compte les territoires urbains, jusqu'aux services aux utilisateurs (et en particulier les collectivités territoriales) pour n'importe quelle ville.

Ces activités sont portées pour la recherche par le CNRM (unité mixte de recherche Météo-France – CNRS), au sein de collaborations le plus souvent interdisciplinaires, dans de nombreux domaines (étude de processus, observation du climat urbain, amélioration des modèles à haute résolution en ville, co-construction d'études avec les acteurs urbains). Le CNRM collabore étroitement avec les autres directions de Météo-France pour améliorer la prise en compte des problématiques urbaines dans le champ de leurs activités. On peut citer deux exemples phare : la mise en opérationnel du modèle de canopée urbaine TEB dans AROME dès 2008, et la mise en place d'un système de modélisation pour les études urbaines (outil CLUE).

La DirOP (Direction des Opérations pour la Prévision) produit ainsi tous les jours des prévisions prenant en compte les effets des villes sur les conditions météorologiques locales, et vise à poursuivre des actions en lien avec le CNRM pour améliorer les prévisions en utilisant des techniques d'Intelligence Artificielle (IA). La Direction des Services Météorologiques (DSM), en lien avec la Direction de la Climatologie et des Services Climatiques (DCSC), développe actuellement une offre de services de référence sur le domaine de la ville, permettant un déploiement le plus massif et générique possible en réponse à la forte demande sur ce sujet, tout en tenant compte des particularités locales là où elles sont pertinentes. Les collectivités sont en effet de plus en plus nombreuses à faire appel à des études et expertises sur l'ICU, des échelles météorologiques à climatiques.

Enfin, une grande campagne expérimentale de mesures va se dérouler sur la région parisienne à l'été 2022. Elle vise à mieux comprendre de façon intégrée les processus influençant le climat urbain et la qualité de l'air, afin d'améliorer leur prise en compte dans les modèles. Elle regroupe le CNRM, de nombreux laboratoires franciliens, nationaux, ainsi que des partenaires internationaux. De nombreux services de Météo-France seront impliqués dans cette campagne et sa préparation (Figure 2). Le CNRM coordonne le Research Demonstration Project de l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) « Paris 2024 », point culminant de nombreuses actions en cours et facteur d'accélération de progrès scientifiques, techniques et des services qui en découlent.

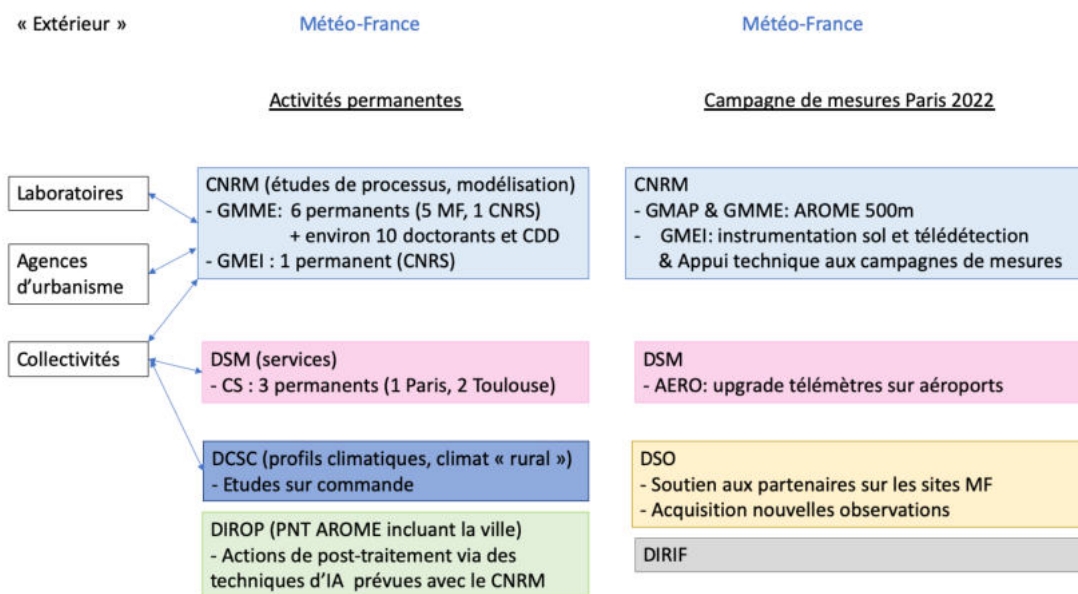


Figure 2 : Vue générale des activités de Météo-France par Direction (état fin 2021).



## 2) État de l'art science et services dans le domaine de la météorologie et du climat urbain

Le climat urbain est un champ de recherches en pleine expansion, dont un article de revue a récemment été produit (Masson et al 2020a). De plus en plus de villes ont été étudiées, en termes d'ICU en température de l'air ou température de surface (ICU-S). On ne comptait que très peu d'études avant 1990, puis 30 par an environ entre 1990 et 2000. Les premiers modèles sont apparus dans les années 2000. Depuis 2015, on comptabilise plus de 300 études par an (Huang and Lu, 2018). Initialement focalisés sur la climatologie urbaine (par les météorologues ou géographes en général), les champs disciplinaires se sont élargis depuis 2010 à d'autres secteurs (énergie, ingénierie, construction, planification, etc...). L'état de l'art ci-dessous se focalise principalement uniquement sur les aspects observations et modèles météorologiques et climatiques en ville, ainsi que sur leur mise en œuvre opérationnelle par les services météorologiques nationaux (dont les principaux éléments sont résumés en Tableau 1).

### 2.1) Les stations météorologiques synoptiques 'urbaines'

Les services météorologiques, dont Météo-France, n'ont généralement pas de stations météorologiques dans les villes. Celles-ci sont placées traditionnellement dans les aéroports, en lien avec leur mission de protection aéronautique, mais aussi pour des besoins d'observations à échelle synoptique et moyenne échelle. Ces stations sont en très grande majorité dans des sites périurbains ou ruraux, très ouverts, et avec un protocole de mesures suivant les normes de l'OMM (en particulier au-dessus d'une grande surface de gazon). De ce fait, une estimation de l'intensité de l'ICU requiert de disposer en plus d'une station plus représentative du centre-ville. Quelques stations existent historiquement, comme la station Montsouris à Paris et le parc Longchamp à Marseille.

Cependant, il faut noter que les températures dans les parcs de ces stations de mesure en milieu urbain ne reflètent pas forcément l'intégralité de l'ICU. L'université Paris Diderot a réalisé des mesures nocturnes lors de la canicule de juin 2019 pour évaluer la représentativité de la station du parc Montsouris (Dahech et al 2020). Il en ressort qu'à quelques centaines de mètres de la station météorologique, la température de l'air est plus élevée d'environ 3°C. L'écart de température observé entre le centre de Paris et le parc Montsouris a même atteint la nuit du 29 au 30 juin plus de 5°C (25°C mesuré en plusieurs points du parc et par la station, 30 à 31°C mesuré à Châtelet).

Le DWD a mis en place un réseau de mesure de l'ICU sur 9 villes allemandes<sup>1</sup> grâce à l'exploitation de stations « urbaines » (Munich, Freiburg, Dresden, Berlin, Hambourg, Hannovre, Francfort, Halle an der Saale Regensburg). Le BoM a équipé la plupart des villes australiennes de plusieurs stations météorologiques (5 pour Hobart ou Adelaide, une quinzaine pour Melbourne par exemple). Ces stations sont toutes situées dans des parcs, selon les normes OMM, ce qui de fait limite leur représentativité du milieu urbain.

---

<sup>1</sup> <https://www.dwd.de/DE/leistungen/waermeinsel/waermeinsel.html>

	DWD (Allemagne)	NOAA (USA)	CMA (Chine)	ECCC (Canada)	JMA (Japon)	MO (UK)	BoM (Australie)	CEPMMT	ACCORD	METEO-FRANCE
Observation Intensité UHI (2 stations)	9 villes avec paire de stations urbain/rural			Au moins une station proche centre grandes villes (souvent parc)	Pour la plupart des grandes villes	Uniquement Londres St James Park				
Réseau obs. urbain		Des réseaux avec quelques/plusieurs stations dans toutes les villes. Sites variés. Gestion locale.	La plupart des villes chinoises. Opéré par le service météo local. Exemple : 500 stations pour Pékin (100 dans le centre).			Réseau universitaire-Birmingham - Londres (qq stations et autres instruments)	La plupart des villes (5 à 15 stations), dans des parcs (normes OMM)			
Modèle PNT Global avec ville	Développement envisagé ICON							Développement en cours dans IFS (modèle urbain simple, collab. Reading univ. ; collab avec CNRM en cours)		Possible ARPEGE (TEB)
Modèle PNT avec ville	En test COSMO (TerraUrb)	Pas en oper dans le HRRR (High-Res. Rapid Refresh 3km). Quelques tests préliminaires à 750m.	En test. Prévu dans 1 an.	Tout le Canada (sauf extrême Nord) à 2.5km de résolution modèle GEM à 48h d'échéance, avec TEB.		UM (MORUSES). A part la fraction de ville, paramètres identiques uniformes sur UK.			13 membres sur 26 utilisent TEB dans AROME/HARMONIE	Opérationnel depuis 2008 AROME (TEB)
Modèle PNT zoomé sur une ville			Pékin et Nord Chine à 3km res. RMAPS-ST (SLUCM) Par Beijing Met Service (BMS)	Toronto et Montréal à 250m de résolution GEM (TEB) En attente de passage opérationnel.		UM à 300m sur Londres. Non opér.l mais en routine et disponible aux prévis. Utilisé surtout pour le brouillard			Budapest & Stockholm	
Service climatique urbain (offre disponible)	Prévisions saisonnières sur villes, en test (pilot 7.2 e-shape project)		Le BMS produit des services pour divers utilisateurs (trafic, eau, énergie, assainissement) et pour la planification.	Indices de confort thermique (prévu cet été)  En région, associé à la qualité de l'air, souvent utilise images sat.  Une section du service météo se spécialise en urbain (ICU et QA). Scénarios d'aménagement prévus dans quelques années.	Prototype testé l'an dernier d'un système d'alerte sur Tokyo pour les risques sanitaires liés à la chaleur	City Packs : Service « basique » à partir d'obs. et de projections climatiques. En cours : aide à la décision.				Service « basique » à partir d'obs. et de projections climatiques. (climat HD, profils climatiques)  Chaine de modélisation de climat urbain pour études (projet CLUE), mais pas d'offre de service standard.

Tableau 1 Vue générale des actions opérationnelles menées en climat urbain dans les services météorologiques.

## 2.2) Systèmes d'observation pour le climat urbain

Au regard des limites qui affectent la représentativité des quelques stations d'observation météorologiques « historiques » en milieu urbain, il est très pertinent de développer des réseaux de mesures du climat urbain. Ces réseaux peuvent être mis en place et maintenus par divers types d'institutions : 1) les laboratoires de recherche ; 2) les services météorologiques nationaux ; 3) les villes et collectivités elles-mêmes.

1) La majorité des réseaux en climatologie urbaine sont mis en œuvre dans des cadres de recherche. Un tel réseau avait été mis en place par l'université d'Oklahoma à Oklahoma City de 2008 à 2013 et a conduit à de nombreuses études et formations universitaires (e.g. Basara et al 2011). Les stations étaient installées en collaboration avec la municipalité sur les feux tricolores (au-dessus des voies de circulation), mais le réseau appartenait à l'université. Quand la ville a changé tout son système informatique de gestion de données, le réseau a définitivement cessé de fonctionner. En fonctionnement actuellement, l'on peut noter à l'étranger des réseaux sur Birmingham (R.-U., Chapman et al 2015), Szeged (Hongrie, Skarbit, 2017), et en France à Rennes (depuis près de 15 ans, Foissard et al 2019) et Dijon (Richard et al 2021). L'université de Paris maintient divers instruments pour des études pour la mairie de Paris sur le rafraîchissement urbain.

2) Certains services météorologiques nationaux maintiennent aussi des réseaux météorologiques en ville. C'est le cas en particulier en Chine. A Pékin, le réseau est composé de 500 stations météorologiques, dont 100 en centre-urbain dense pour divers environnements (trottoirs, proche des bâtiments, parcs, etc...) (Liang et al 2018). La plupart des villes chinoises sont équipées, et les réseaux sont opérés par les services météorologiques locaux. Contrairement aux autres pays, aucun de ces réseaux urbains n'est géré par un laboratoire de recherche. Les données sont assimilées dans le modèle opérationnel de prévision météorologique.

3) Enfin les villes et collectivités peuvent aussi s'équiper en propre d'un réseau météorologique urbain. C'est le cas de Grenoble, qui a contracté récemment avec un bureau d'études local (porté par Xavier Foissard, qui a été l'étudiant ayant consolidé le réseau de Rennes maintenu par le COSTEL), et Toulouse grâce à une collaboration avec le CNRM (cf infra).

Des instrumentations spécifiques peuvent aussi être maintenues dans le cadre d'observatoires. C'est le cas des sites à Helsinki (un site urbain dense et un site péri-urbain à Kumpula, sur le site du service météorologique finlandais, Järvi et al 2012), où sont installées des tours de mesures de flux turbulents depuis 10 ans.

## 2.3) Mesures d'opportunité

Les mesures d'opportunité rassemblent de manière générale toute mesure renseignant directement ou indirectement sur l'état de l'atmosphère, au-delà des méthodes mises en œuvre de façon opérationnelle par les services météorologiques nationaux. Ceci concerne l'utilisation de données acquises par des stations météorologiques connectées mises en œuvre par des particuliers. Par exemple, quelques études utilisant les données des stations connectées Netatmo ont été menées au niveau international, initiées par l'université de technique de Berlin (Meier et al 2017). L'utilisation de ces données lors du stage de fin d'études d'Adrien Napoly en 2016 dans cet institut a permis de traiter les villes de Berlin, Toulouse, Paris (Napoly et al 2018). Ces données sont de plus en plus utilisées au niveau international, encore principalement

en recherche. Une expérience d'assimilation de données Netatmo a été réalisée sur Amsterdam par l'université de Wageningen avec le modèle WRF, mais n'a pas été publiée. En revanche, De Vos et al. (2020) ont étudié l'utilité de nombreuses données d'opportunité en contexte urbain, aussi sur Amsterdam: 1) température de l'air à partir des températures des batteries des smartphones (via l'application OpenSignal); 2) pluie à partir des données micro-ondes entre antennes pour téléphonie mobile, 3) rayonnement solaire par les smartphones, 4) stations Netatmo (température, pression, humidité, pluie, vent). Déduire la température de l'air à partir de celle des batteries des smartphones nécessite une procédure d'apprentissage. Les résultats montrent qu'elles sont peu fiables par rapport aux autres données. De plus, les données issues des téléphones ne permettent pas d'accéder à la variabilité infra-urbaine des paramètres mesurés. Cette étude confirme aussi que les données Netatmo sont bruitées le jour (pas de méta-donnée, pas d'abri). Toutefois, elle conclut que l'utilisation conjointe de données opportunes est très intéressante pour la météorologie en ville. Le CNRM dispose d'une expertise sur les données Netatmo suite à la thèse de Marc Mandement (sur un thème différent toutefois : l'observation de la convection profonde) et les travaux au sujet de l'estimation du bénéfice de l'exploitation des données d'opportunité se poursuivent.

#### 2.4) Systèmes de prévision

Les premiers modèles visant à représenter les échanges d'énergie entre surface urbaine et atmosphère ont été développés au tout début des années 2000 (TEB, Masson et al 2000 ; SLUCM, Kusaka et al 2001 ; BEP Martilli et al 2002). Une revue récente de ces modèles est disponible (Garuma 2018). Ces modèles, dits « de canopée urbaine », sont basés sur des équations physiques et une géométrie simplifiée de la ville, typiquement en rue canyon (même si certains modèles récents peuvent avoir une autre géométrie, en blocs par exemple, Figure 3). Cette simplification de géométrie est nécessaire car il n'est pas possible de représenter chaque bâtiment individuellement dans les modèles atmosphériques, qui ont une maille kilométrique ou au mieux, en général, hectométrique. Le détail des processus physiques varie d'un modèle à l'autre, et d'une application à l'autre. La prise en compte de la végétation urbaine et de ses interactions (par exemple ombrages sur les bâtiments et les rues, freinage du vent) permet une meilleure évaluation des résultats de diverses stratégies de rafraîchissement urbain par exemple. Cependant, très peu de modèles de canopée urbaine prennent en compte la végétation urbaine (la partie correspondante de la maille étant traitée indépendamment, comme de la campagne, ce qui est fait par exemple dans la version opérationnelle d'AROME).

La plupart des modèles de canopée urbaine traitent la ville comme étant située sous le premier niveau du modèle atmosphérique (ce qui est le cas de la version opérationnelle de TEB dans AROME). Disposer d'un couplage multi-niveaux dans lequel les niveaux atmosphériques intersectent les bâtiments permet de mieux simuler les effets urbains. Les bâtiments de grande hauteur influencent ainsi directement l'écoulement jusque parfois le milieu de la couche limite, comme cela est vérifié par exemple sur Hong-Kong (Schoetter et al 2020). Cette approche représente aussi mieux les effets de la ville sur l'écoulement et la température de l'air en proche surface

### urban representation

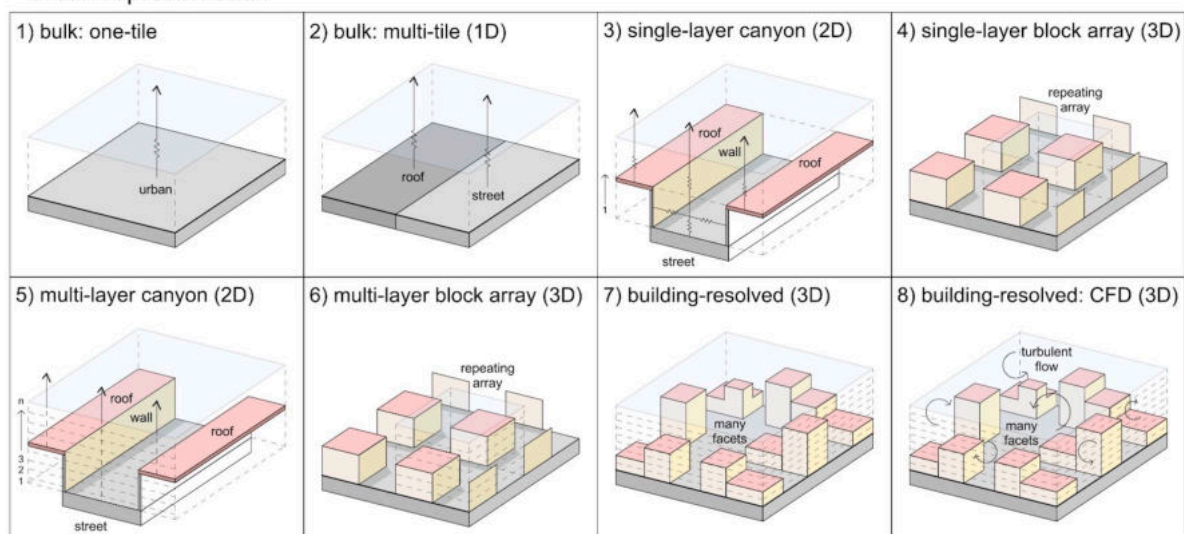


Figure 3 Différentes simplifications géométriques pour représenter la ville dans une maille de modèle météorologique.  
Source : exercice d'intercomparaison GLASS « urban plumber » auquel participe le CNRM.

Les modèles atmosphériques disposant d'un modèle de canopée urbaine sont couramment utilisés à la fois en recherche (depuis les années 2005), comme dans MesoNH (CNRM et Laboratoire d'Aérodynamique, Lac et al 2018), et dans les études spécifiques par des bureaux d'études ou laboratoires pour une ville ou un territoire donné, par exemple pour l'évaluation de stratégies d'adaptation au changement climatique. En revanche, les modèles de prévisions du temps n'ont pas, dans leur grande majorité, de prise en compte des effets urbains (Tableau 1). Seuls certains centres du consortium ACCORD<sup>2</sup>, dont Météo-France, et Environnement et Changement Climatique Canada utilisent un modèle de prévision opérationnel avec modèle de canopée urbaine sur l'ensemble de leur territoire. ECCO dispose d'une forte expertise sur ce sujet, ayant développé l'intégration de TEB dans GEM depuis 2003. Aucun modèle de prévision à échelle globale n'utilise à ce jour de modèle de canopée urbaine.

Cette absence de la prise en compte des villes peut s'expliquer par plusieurs aspects :

- Le manque d'expertise jusqu'à récemment des services météorologiques en climatologie urbaine (qui était plutôt portée par le secteur académique), ce qui peut s'expliquer par les échelles spatiales en jeu dans les modèles de prévision.
- La non-nécessité, réelle ou perçue, de prendre en compte les effets urbains pour la prévision météorologique de manière générale du fait des échelles spatiales tant que les résolutions horizontales ne sont pas proches du kilomètre.
- La difficulté à intégrer un composant entièrement nouveau dans un modèle de prévision existant, à la fois d'un point de vue algorithmique et d'un point de vue procédural (non-régression des scores de prévision). Ce deuxième point est à nuancer ici, du fait de la

<sup>2</sup> Nouveau consortium de prévision météorologique à aire limitée en Europe, regroupant les forces des consortia HIRLAM, ALADIN et LACE préexistants. Les modèles développés et utilisés au sein de ce consortium sont majoritairement communs avec ceux de Météo-France, dans diverses configurations. De ce fait, ils permettent l'utilisation du modèle TEB au sein du schéma de surface SURFEX.



faible extension spatiale des zones pour lesquelles des impacts sont attendus, et le faible nombre d'observations (pour la vérification) sur la zone concernée.

Tous les systèmes de prévision du temps visent maintenant à intégrer un modèle de canopée urbaine dans les prochaines années (la plupart indiquent des travaux en cours et des tests dès l'année prochaine). Le programme européen DestinE est un cadre dans lequel les aspects urbains sont amenés à être davantage pris en compte.

## 2.5) Services météorologiques et climatiques urbains

Les services météorologiques nationaux (SMN) n'ont en général pas déployé de services spécifiques à destination des villes, ou uniquement en adaptant des services déjà existants pour d'autres territoires (comme par exemple les profils climatiques). L'OMM a lancé depuis environ 3 ans la rédaction de guides sur les services urbains intégrés à destination des SMN, afin de favoriser leur développement. D'autres guides, l'un sur l'ICU et l'autre sur les services à destination des acteurs, sont en cours de rédaction. Le CNRM (V. Masson) participe à la rédaction de l'ensemble de ces guides.

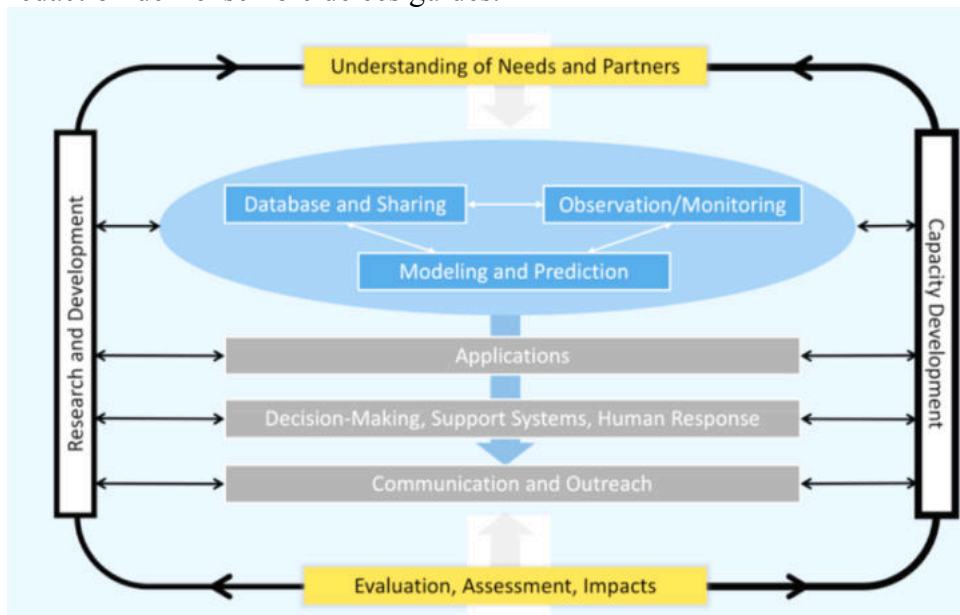


Figure 4 Schéma des composants d'un service urbain intégré (source : OMM)

L'accent est mis sur la nécessité de co-construire de tels services avec les acteurs et utilisateurs futurs, au sein d'un processus itératif (Figure 4). Scientifiquement, ils peuvent être basés sur plusieurs types de données (observations, sorties de modèles etc.). Le Tableau 1 montre quelques exemples de services développés par les SMN. Ces services concernent la plupart du temps des alertes ou prévisions pour des domaines particuliers (crues en villes, assainissement, énergie, bâtiment). Les études sur la planification urbaine, aux échelles multi-décennales, se généralisent. Les pionniers étaient la ville de Stuttgart (Allemagne) qui depuis les années 1940 a pris en compte les effets de ventilation (Figure 5). Des limitations de constructions (et de hauteurs) étaient décidées pour favoriser la pénétration des vents catabatiques depuis les collines alentours pour réduire le niveau de pollution. La ville est en effet placée dans une cuvette et le siège des usines Mercedes. Cette approche est maintenant utilisée aussi pour réduire l'ICU en été (Ketterer and Matzarakis 2014). Les villes chinoises, toutes en fortes croissance, abordent la même problématique de ventilation pour leurs évolutions futures. Ces études sont réalisées en utilisant des expertises croisées d'urbanistes et de météorologues, via

des « cartes climatiques urbaines » (Ng and Ren, 2015). Celles-ci mettent en avant les effets micro-climatiques locaux, les zones à enjeux et les recommandations associées.

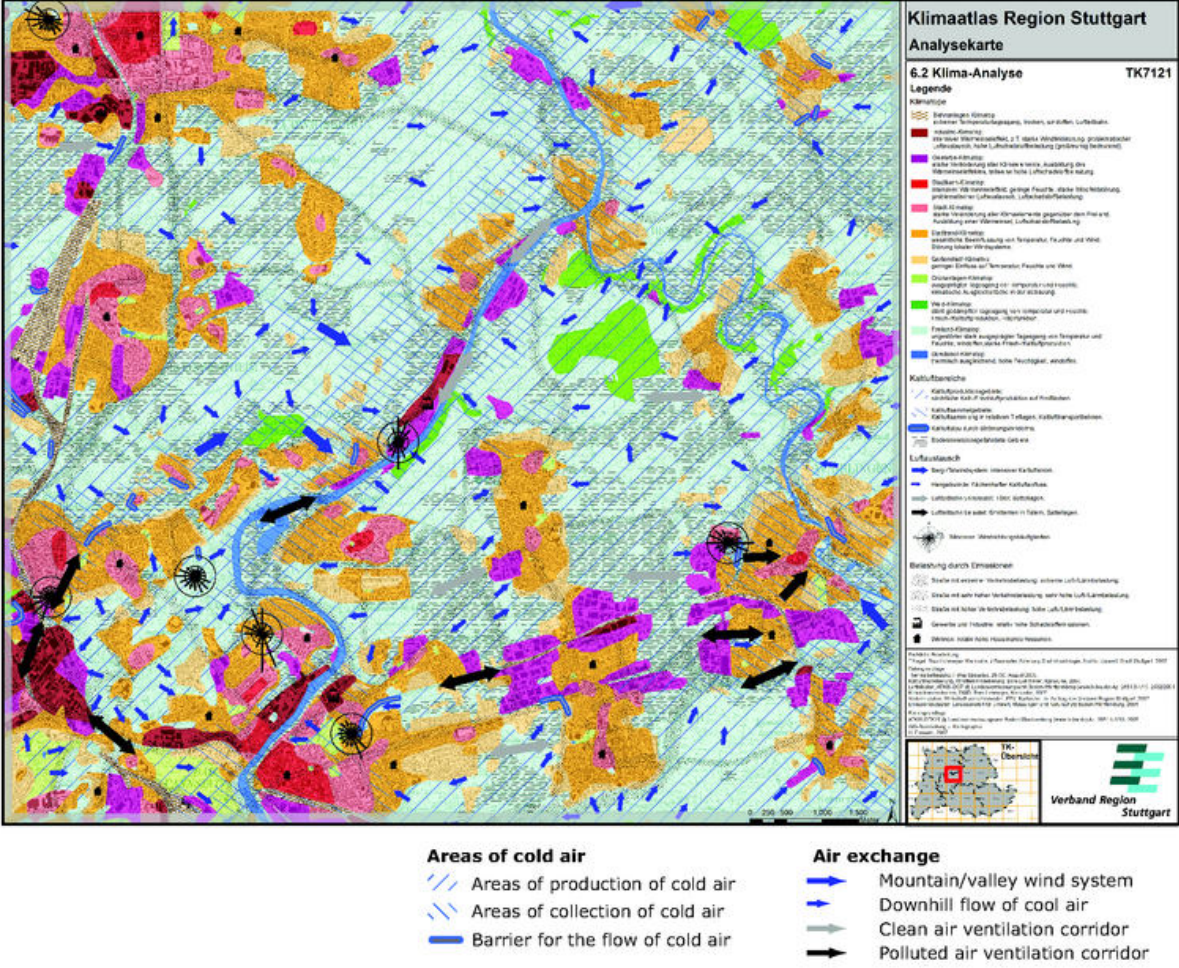


Figure 5 carte climatique urbaine pour la ville de Stuttgart (version de mai 2012, Baumüller, J. and Verband Region Stuttgart, 2008, KlimaAtlas Region Stuttgart, Verband Region Stuttgart, Stuttgart)

### 3) Activités et perspectives de recherches à Météo-France

#### 3.1) Systèmes d'observation pour le climat urbain

##### *3.1.1) Les réseaux « institutionnels » de stations météorologique en ville*

Une collaboration a débuté en 2015 dans le cadre d'une collaboration entre le CNRM, l'ENM, et l'université Jean-Jaurès (Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités Sociétés Territoires, LISST, sociologues, géographes et urbanistes) dans le but de co-construire un réseau d'observation de 70 stations météorologiques connectées en temps réel sur l'agglomération de Toulouse (Figure 6). Cette action a été menée en étroite collaboration avec Toulouse Métropole, via le co-financement par la collectivité de la thèse de Guillaume Dumas. L'analyse scientifique aboutissant au choix des emplacements des stations a été menée via une classification de l'occupation du sol en « Local Climate Zones » (LCZ, Stewart and Oke 2012). Celles-ci représentent des zones regroupant typiquement quelques quartiers homogènes du point de vue de l'urbanisation et, a priori, du point de vue micro-climatique. L'utilisation des LCZ se généralise au niveau mondial dans la communauté en climatologie urbaine, ce qui permet maintenant une meilleure comparaison et appropriation des études en climatologie urbaine. L'étude menée au CNRM est une des premières à notre connaissance à avoir utilisé ce concept pour optimiser les emplacements d'un réseau de mesures.

Une originalité à ce déploiement de réseau est que celui-ci appartient à la collectivité, qui se l'est approprié, à la fois en tant que réseau d'objets connectés (transmission des données par réseau Sigfox), entrant dans le cadre de la « smart city » de Toulouse Métropole, et en tant qu'objet urbanistique, permettant de produire des services climatiques (cf 5.3).

Ce réseau permet d'analyser finement les variabilités temporelles (en fonction de l'heure, de la saison et du type de temps) et spatiale infra-urbaine de l'ICU. Il a ainsi par exemple été montré au cours de la thèse de Guillaume Dumas, soutenue en mars 2021, que les parcs sont particulièrement frais la nuit, mais pas le jour aux intersaisons, et que le jour en été, les faubourgs sont plus chauds que le centre dense. De plus, contrairement aux idées reçues véhiculées par les images de thermographies infra-rouges, les zones industrielles ne semblent pas être des zones de surchauffe, même le jour en été, par rapport au reste des quartiers. Ce résultat, suite à l'analyse de tout l'été 2020, est particulièrement original et est à notre connaissance la première étude sur la variabilité de la température de l'air dans des (huit) zones industrielles ou commerciales disséminées dans l'agglomération.



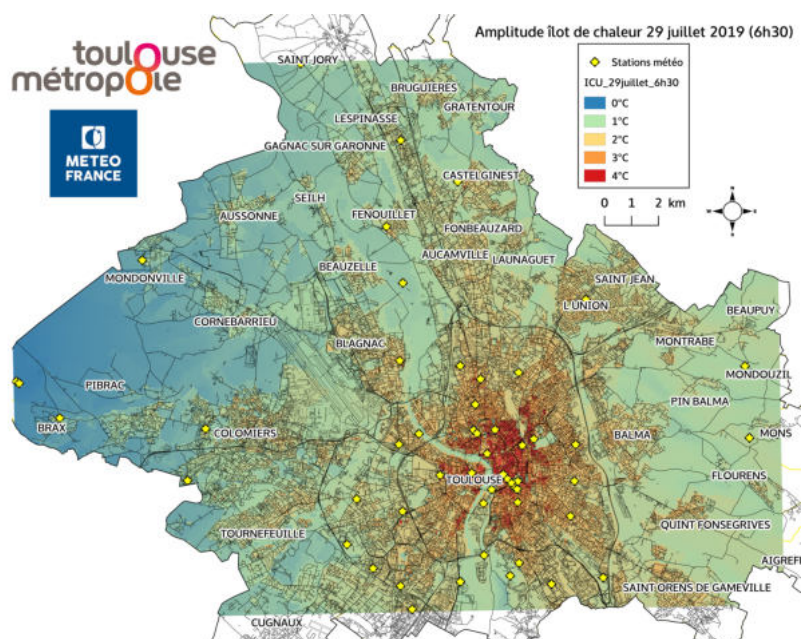


Figure 6 Îlot de chaleur mesuré par le réseau de stations co-construit avec Toulouse Métropole (le 29 juillet 2019, à 6h30).  
Source : thèse de G. Dumas (2021).

### 3.1.2) Bilan d'énergie des surfaces urbaines et échanges avec l'atmosphère

Les spécificités du bilan d'énergie en ville pilotent le micro-climat urbain, et en particulier l'ICU. Il est toutefois difficile de l'observer, car les mesures par corrélations turbulentes nécessitent des mâts de mesures dépassant de deux fois la hauteur des bâtiments. Le CNRM a été parmi les premiers laboratoires en France à installer un tel système de mesures, à Marseille (en 2001) et Toulouse (en 2004/2005) lors de la campagne CAPITOUL (Masson et al 2008), en lien avec les spécialistes mondiaux de l'observation urbaine de ou formés à l'université de British Columbia (Vancouver) : Tim Oke, Sue Grimmond, James Voogt. Ceci correspond au moment du début de la météorologie urbaine au laboratoire et répondait à un besoin d'évaluation du modèle de canopée urbaine TEB. Ces mesures sont encore exploitées aujourd'hui. Par exemple, les flux de CO<sub>2</sub> mesurés pendant CAPITOUL ont permis d'évaluer les rejets en CO<sub>2</sub> liés à la thermique du bâtiment dans TEB (Goret et al 2019).

Une caractéristique des milieux urbains est qu'ils sont très hétérogènes. Une maille « urbaine » d'un modèle de prévision du temps comme AROME, de près de 2km<sup>2</sup> peut ainsi être en réalité très hétérogène. La paramétrisation TEB sur la maille est donc susceptible de ne pas rendre compte de la variabilité sous-maille des flux. Afin d'avancer sur cette question, le CNRM participe au projet ANR MOSAI coordonné par Fabienne Lohou du Laboratoire d'Aérodynamique de 2021 à 2025, dont le but est d'explorer la variabilité du bilan d'énergie avec plusieurs mâts de mesures au maximum à quelques kilomètres de distance. En 2021, la variabilité entre plusieurs quartiers périurbains et le centre historique de Toulouse est explorée. Puis, en 2022, ce seront plusieurs sites dans l'agglomération parisienne qui seront observés.

### 3.1.3) Données d'opportunité

Les villes disposent de peu de stations météorologiques professionnelles, mais foisonnent en revanche de multiples sources de données d'opportunité. Le potentiel des données Netatmo continuera à être exploré par Eva Marquès, en thèse au CNRM sur les données d'opportunité.

La région parisienne dispose, par exemple, de plus de 10000 stations de ce type. Il est prévu d'améliorer le traitement de ces données, en collaboration avec Malika Madelin et Vincent Dupuis (géographes au PRODIG, Université de Paris), afin de moins rejeter de données des stations d'observation. Ce peut être pertinent quand les données de la station ne sont erronées qu'une partie de la journée (par exemple le matin si elle y est alors exposée plein soleil), mais adéquates le reste du temps. Ceci nécessite de prendre en compte à la fois les aspects spatiaux (plusieurs stations) et temporels, qui seront explorés avec des algorithmes d'intelligence artificielle (IA).

Dans une approche originale, qui fait suite à une collaboration entre Continental et la Direction des Systèmes d'Observations de Météo-France, le CNRM explore le potentiel des données des véhicules connectés. Il convient de noter que l'utilisation de telles données est très peu répandue dans les laboratoires de recherche en météorologie, et vise à analyser la météorologie routière. C'est par exemple le cas pour les risques de pluie ou verglas le long d'un trajet avec un véhicule connecté. De telles études exploratoires ont aussi été menées au NCAR (projet Pikalert, Siems-Anderson et al 2019) et au DWD (projet FloWKar, Riede et al. (2019)).

En revanche, c'est la première fois, lors de la thèse de Eva Marquès qui a débuté en 2019, que ces données sont utilisées pour étudier le micro-climat urbain. Une autre originalité du travail est d'utiliser les méthodes issues de la science des données (Intelligence Artificielle, IA) pour extraire de l'information à partir d'un grand nombre de ces données de véhicules. Un jeu de données du constructeur Peugeot-Citroën a été acquis par Météo-France sur l'ensemble de l'Europe de l'Ouest pour les années 2018 et 2019. Les observations de température de l'air sont en général effectuées au niveau des rétroviseurs droits des véhicules (peints en général en noir ou à la couleur du véhicule). Cependant, dès que les voitures roulent à plus de 10km/h, nous avons montré que ces données sont généralement fiables : elles sont très bonnes la nuit (mais moins nombreuses), peuvent présenter un biais moyen jusqu'à 3°C en journée, mais très corrélé, et donc corrigé, au rayonnement solaire. Ces données ont été évaluées sur Rennes et Dijon, qui disposent de réseaux de mesure de l'ICU. Des ICU sur d'autres villes ont pu être analysés, comme par exemple à Paris (Figure 7) ou Barcelone, où l'on quantifie l'effet conjoint de l'urbanisation et de la brise de mer sur le champ de température de l'air à différentes heures.



Figure 7 Îlot de chaleur observé par véhicules personnels connectés sur l'agglomération parisienne le 03 août 2018 à 21 UTC. Source : thèse (en cours) de E. Marquès (CNRM).



#### 3.1.4) Observations par satellites

En météorologie urbaine, les satellites sont principalement utilisés pour observer l'occupation du sol et la température de surface. Le CNRM utilise de telles données pour, respectivement, améliorer la représentation de la surface urbaine (en particulier de la végétation), et pour évaluer les résultats de simulations. Le CNRM ne développe pas des recherches spécifiques sur le traitement des données satellites elles-mêmes en ville (à l'exception de TRISHNA, cf infra). L'approche est de favoriser les collaborations avec d'autres laboratoires (LISST, ONERA) sur ces aspects. Toutefois, l'on peut noter que les recherches menées dans l'équipe GMME/VEGEO sur les aérosols sont exploitées pour étudier l'impact des aérosols sur le climat urbain (cf section 3.5).

Le CNRM participe au groupe de préfiguration du futur satellite franco-indien TRISHNA (CNES - ISRO) et la préparation des produits qui seront fournis. Prévu pour 2025, il permettra d'observer la température de surface, de jour et de nuit, à une résolution d'environ 50m, avec une période de revisite de près de trois jours environ. Ceci ouvre des perspectives pour les études de processus et les validations à haute résolution des modèles. Une campagne aéroportée aura lieu en juin 2021 sur Toulouse pilotée par l'ONERA, afin de disposer de mesures de température de surface acquises sur une zone de 30km de long par 2km de largeur de jour et de nuit, pour valider les algorithmes d'estimation par télédétection, en particulier pour préparer l'exploitation du satellite TRISHNA. Afin d'étudier le lien entre températures de l'air et de surface pour les divers LCZ survolées, des mesures de températures de l'air seront réalisées conjointement aux vols, par deux voitures, et celles du réseau de mesure sur Toulouse Métropole seront exploitées.

#### 3.2) Campagne de mesures « Paris 2022 »

Une grande campagne de mesures aura lieu sur la région parisienne en 2022 et 2023, avec une période intensive de mesures à l'été 2022 (juin –juillet). Cette campagne de mesure permettra de répondre à nombre d'objectifs scientifiques de la communauté, française et internationale. Une vaste collaboration inter-organismes va permettre de mobiliser la communauté autour de l'objet « ville », via l'implication de divers projets indépendants, ayant tous prévus une campagne sur Paris en 2022, afin de mettre en commun un grand nombre d'instruments de mesures et de chercheurs.

De nombreux laboratoires participeront à cette campagne, notamment : le CNRM, les laboratoires de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), Agro-ParisTech, l'institut d'écologie et des sciences de l'environnement de Paris, l'Ecole Centrale de Nantes. Les universités de Freiburg et de Reading participent dans le cadre de l'ERC URBISPHERE. Des partenaires du RDP, comme le UK Met Office et l'université de Moscou, ont proposé ou envisagent également de participer.

La campagne contribuera aux objectifs scientifiques de quatre projets impliquant le CNRM (RDP, H2C, ACROSS, MOSAI) :

- Le projet ANR « Heat and Health in Cities » (H2C, piloté par Aude Lemonsu du CNRM) vise à étudier les liens entre chaleur et santé en ville. La campagne permettra de mieux connaître la dynamique de la couche limite en période chaude d'été, son impact sur les températures de l'air à 2m et les indices de stress thermique, ainsi que

son impact sur la formation potentielle de petits nuages en journée au-dessus de l'agglomération. L'effet radiatif des aérosols urbains sera aussi quantifié.

- Le projet ACROSS (Chriss Cantrell, IPSL/LISA ; financé par MOPGA, ANR et LEFE) vise à étudier l'évolution du panache de pollution de l'agglomération et sa transformation au contact des émissions des forêts en aval de la ville (avec un site instrumenté à Rambouillet).
- Le projet ANR MOSAI (Fabienne Lohou, LA), comme indiqué plus haut, étudiera la variabilité des flux de surface.
- La campagne permettra d'évaluer les modèles à résolution hectométrique déployés pendant le RDP.

Enfin, cette campagne de mesures pourra permettre d'identifier des instruments supplémentaires qu'il serait pertinent de déployer pendant les Jeux Olympiques de 2024.

D'un point de vue instrumental, le mât de 50m du CNRM sera déployé sur un site urbain dense, ainsi que le ballon captif, équipé de mesures turbulentes (pour les profils des flux) et de propriétés physico-chimiques et radiatives des aérosols (Figure 8). On envisage aussi de compléter les mesures avec des instruments de télédétection du CNRM : le radar nuage BASTA à 95GHz (mesurant les propriétés des gouttelettes nuageuses) et un profileur de température et d'humidité. Grâce aux collaborations déjà en cours dans l'action COST-PROBE (Profiling the atmospheric boundary layer at European scale<sup>3</sup>), l'idée est de réunir au moins 4 tels profileurs. Un tel réseau serait en effet précieux pour l'ensemble des partenaires pour décrire l'évolution de la couche limite et les contrastes de température, humidité et stabilité atmosphérique. Enfin, des stations météorologiques de qualité professionnelle et connectées par LoraWan pourraient être acquises pour décrire en temps réel la variabilité à l'échelle des quartiers dans une zone ciblée, afin d'apporter des éléments de validation à la fois pour les approches d'IA utilisant les données d'opportunité et pour celle des modèles hectométriques. Le CNRM et la DSO instruisent conjointement le sujet.

Le CNRM déploie de l'instrumentation dans l'ATR42 de SAFIRE. Une quinzaine de vols de 3 à 3h30 est prévue entre mi-juin et mi-juillet 2022, afin de documenter l'évolution physico-chimique du panache. Des situations 'idéales' seront observées (par exemple si le panache se dirige vers la forêt de Rambouillet), mais aussi d'autres, pour disposer de références (panache urbain pur, forêts non impactées par le panache urbain).

Les stations opérationnelles de mesure de Météo-France contribueront fortement (Figure 9). Les radars pluviométriques de Trappes (bande C) et Charles de Gaulles (bande X) couvrent le territoire concerné à deux résolutions différentes. Les stations météorologiques apportent des données en surface, mais leurs sites accueilleront aussi des instruments supplémentaires apportés par les partenaires. Les télémètres à nuage, installés sur les aéroports, permettent de mesurer la hauteur de la base des nuages, mais aussi, lorsque les données idoines sont enregistrées et transmises (ce qui reste à faire pour Melun, Pontoise et l'héliport d'Issy), les profils d'aérosols et la hauteur et structure de la couche limite même en ciel clair. Le radiosondage de Trappes permettra de disposer d'un profil vertical de référence.

La campagne s'appuie aussi sur des sites opérés par les autres partenaires des projets, comme les sites pérennes de télédétection de l'IPSL du SIRTa et de QUALAIR (Jussieu), les sites de mesures de qualité de l'air universitaires (Créteil, Paris-Diderot) ou institutionnels (Airparif). Agro-Paristech vise à installer trois tours de mesures de flux (dont une pérenne en site dense)

---

<sup>3</sup> <http://www.probe-cost.eu/>

sur des dépôts de la RATP. L'École Centrale de Nantes et l'université de Reading placeront des scintillomètres pour mesurer les flux intégrés sur plusieurs kilomètres de distance. De nombreux télémètres et 12 radiomètres seront installés par l'université de Freiburg, pour étudier les effets radiatifs. Des groupes de travail sont en cours de formation pour l'organisation et la coordination de ces sites et instruments, pour chaque type de mesure. De plus, un groupe de travail doit définir la stratégie de modélisation en temps réel à haute résolution pendant la campagne (en lien avec les partenaires du RDP) et de prévision météorologique de campagne (pour la planification des opérations).

Cette campagne est aussi vue par plusieurs laboratoires parisiens comme l'occasion de construire un « observatoire atmosphérique de la Région parisienne » pérenne s'appuyant sur les sites instrumentés de l'IPSL, d'AgroParisTech, et les sites ICOS (prairie, forêt et futur site urbain éventuellement), auquel les mesures de Météo-France devraient être intégrées. La formalisation puis la gouvernance d'un tel observatoire restent à construire.



Figure 8 Ballons captif qui sera déployé par le CNRM sur un site en zone urbaine dense (à déterminer). Des mesures radiatives et granulométriques des aérosols seront réalisées. De gauche à droite : ballon, instrumentation de mesures de flux turbulents, compteur de particules.

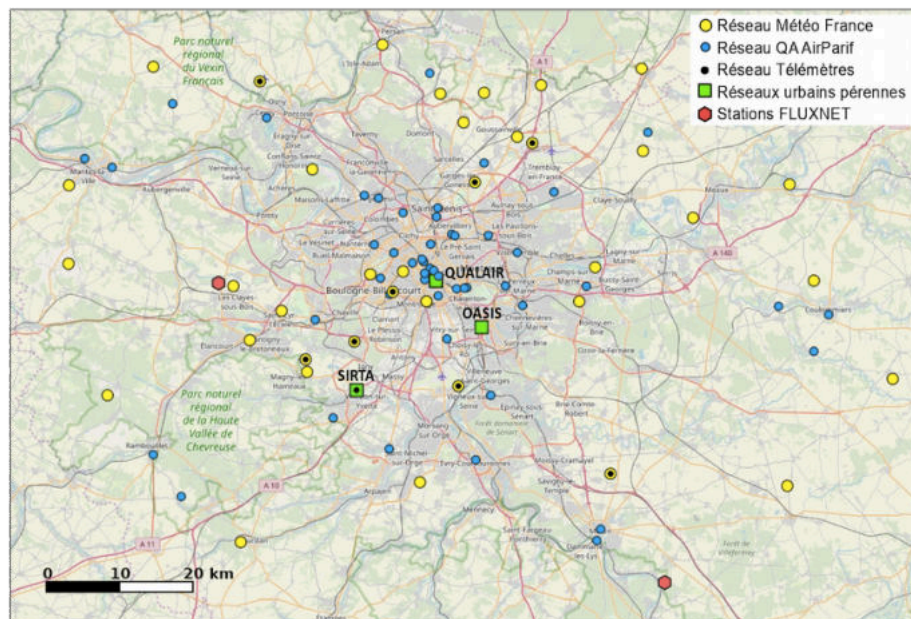


Figure 9 Réseaux pérennes actuels sur la région parisienne. Le site OASIS est situé à Créteil (opéré par le LISA), le SIRTA à Palaiseau (opéré par le LMD) et QUALAIR sur Jussieu (opéré par le LATMOS). Les stations fluxnet/ICOS documentent une prairie et la forêt de Fontainebleau. Un site ICOS permanent supplémentaire est envisagé en zone urbaine dense, ainsi qu'un mât de mesures de flux par AgroParisTech. Non indiqué sur la carte : le radio-sondage de Trappes et les radars pluviométriques de Trappes, Charles de Gaulle et de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

### 3.3) Modélisation

#### *3.3.1) Modélisation des échanges ville-atmosphère : le modèle de canopée urbaine TEB*

Le modèle TEB peut être utilisé forcé par des observations ou couplé à des modèles atmosphériques. Il est couplé dans les modèles opérationnels GEM (Lemonsu et al 2009), AROME et HARMONIE (via SURFEX, Masson et al 2013) et ALARO (Hamdi et al 2012). En recherche, il est utilisé dans AROME-Climat et MesoNH, et a été récemment couplé dans le modèle WRF en collaboration avec des équipes étrangères (Trimmel et al 2019, Meyer et al 2020).

Le CNRM a participé et participe aux quelques exercices d'intercomparaison de modèles de canopée urbaine. Ces modèles sont évalués sur leur capacité à simuler les échanges d'énergie vers l'atmosphère. Une première étude vers 2010 a permis de conclure que TEB se comportait bien (Grimmond et al 2010, 2011), et qu'il fallait pour des sites périurbains bien prendre en compte la végétation (le site de comparaison était à Melbourne). Un nouvel exercice d'intercomparaison est en cours : URBAN-Plumber, dans le cadre de GLASS à l'initiative du UK MO, et des universités de Reading et UNSW (Australie). Il se base toujours sur l'évaluation du bilan d'énergie de surface, mais une vingtaine de sites urbains seront proposés dans cet exercice. Ceci permettra d'évaluer TEB, et de l'améliorer, pour de nombreuses configurations urbaines et climatiques. Les données de Toulouse de l'expérience CAPITOU de 2004/2005 font partie de ce benchmark.

Toutefois, dans le cadre des services météorologiques ou climatiques, un modèle de canopée urbaine ne doit plus se limiter simplement à simuler les bons échanges d'énergie avec l'atmosphère (et donc donner les bonnes prévisions ou projections). Il est nécessaire de prendre en compte les processus pilotant les phénomènes d'intérêts, et leurs impacts, pour les utilisateurs finaux. Il peut s'agir de pouvoir prévoir des consommations d'énergie des bâtiments, des conditions micro-climatiques au niveau des piétons, les écoulements dans le sous-sol et l'infiltration dans les réseaux, etc...

La version historique de TEB, qui est opérationnelle dans AROME, représente uniquement les effets des surfaces imperméables et des bâtiments (sans le module de thermique interne des bâtiments). Les processus clefs tels que le piégeage radiatif et l'augmentation des surfaces d'échange par la géométrie paramétrisée en rue canyon sont pris en compte. Un effet intéressant est la prise en compte de la neige (par un schéma simple à une couche), ce qui permet son utilisation dans les pays nordiques et au Canada. Au début des années 2010, ont été ajoutés la prise en compte de la végétation basse (jardins), en interaction avec les bâtiments et indirectement les routes (Lemonsu et al 2012), et les toitures végétalisées (De Munck et al 2013a), et le module de thermique des bâtiments qui prenait en compte le rayonnement à travers les fenêtres et les échanges radiatifs et convectifs à l'intérieur (Bueno et al 2012, Pigeon et al 2014). Une paramétrisation simple des panneaux solaires a été incorporée, afin d'évaluer leurs impacts sur le micro-climat urbain (plutôt que finement leur production). Les premiers résultats montrent que la généralisation du déploiement de panneaux solaires en ville semble très peu modifier l'ICU.

Le modèle TEB a ainsi été amélioré ces dernières années pour prendre en compte plus finement nombre de processus urbains :

- Les échanges radiatifs ont été améliorés par l'utilisation du schéma SPARTACUS (Hogan 2019) grâce à une collaboration de Robert Schoetter (CNRM) avec le CEPMMT (Robin Hogan), afin de lever l'hypothèse en rue canyon et mieux représenter à la fois la statistique de la géométrie 3D des villes (Figure 10), et les effets radiatifs (y compris de l'air entre les bâtiments).
- Un modèle multi-niveaux de TEB a été développé (Schoetter et al 2020, Figure 11). Cette approche validée sur Hong-Kong va être testée sur Paris. Cette version multi-niveaux conserve toutefois la (relative) simplicité de TEB quant à la représentation des parois bâties (pas de discrétisation verticale des murs eux-mêmes). Ceci permet de ne pas augmenter le temps de calcul contrairement à l'autre modèle multi-niveaux dans la communauté, BEP (Martilli et al 2002), qui rend les simulations WRF-BEP extrêmement coûteuses. Ainsi, le couplage à plusieurs niveaux pourrait être intégré pour la mise en œuvre opérationnelle du modèle AROME à 500 m de résolution prévue en 2023 sur la région parisienne, et exploiter tout le potentiel de la haute résolution verticale prévue.
- Des développements ont été menés pour évaluer les effets des et sur les habitants : énergétique des bâtiments, émissions de CO<sub>2</sub> interactives avec les conditions atmosphériques (Goret et al 2019), indice de confort thermique « Universal Thermal Climate Index » (UTCI). Par exemple, il est possible grâce à une recherche menée avec Jean-Pierre Lévy du LATTS, de simuler les effets des comportements énergétiques des habitants (Schoetter et al 2017). Cette méthodologie est évaluée pour des villes françaises, mais aussi à l'étranger, comme pour la consommation d'énergie des bâtiments sur Hong-Kong (Figure 12).
- Toujours concernant les bâtiments, Margot Ruiz, en thèse au CNRM en collaboration avec le Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (LMDC), commence à intégrer les transferts hygro-thermiques au sein des murs dans TEB. Cette approche va être testée sur le centre médiéval de Cahors et permettra de modéliser le confort thermique intérieur en été dans l'habitat traditionnel (en France et à l'étranger) et les stratégies d'adaptation basées sur des matériaux biosourcés.
- La végétation haute peut maintenant être positionnée en hauteur dans le canyon (Redon et al 2017, 2020), et interagir avec les bâtiments, surfaces imperméables et perméables urbaine (interception du rayonnement, ombrages, traînée). Des travaux menés par C. De Munck (CNRM) en collaboration avec l'Université Gustave Eiffel (K. Chancibault) ont introduit la simulation des échanges d'eau sous les routes et bâtiments, et divers processus hydrologiques et d'infiltration ou transfert dans les réseaux (Stavropoulos-Laffaille et al 2021). Ceci se poursuit par une étude hydrologique à l'échelle de Paris et sa petite couronne dans le cadre de la thèse en cours d'Emilie Bernard (CNRM, UGE).
- Enfin, une première étude pour améliorer les prévisions de conditions hivernales, verglas et neige sur chaussée, a été menée au cours du stage de Laura Pavan en 2020, en collaboration avec les services opérationnels de Météo-France (DSM). Le schéma de neige se base sur le modèle Crocus et la possibilité de geler le réservoir d'eau intercepté sur la route a été ajoutée. Une première évaluation d'indices de conditions de chaussées a été faite en collaboration avec le service météorologique finlandais. Il est proposé de poursuivre cette action via une formation complémentaire par la recherche pour améliorer le système de prévision des conditions routières hivernales (effets anthropiques tels que roulage, salage, déneigement, prévision d'ensemble), ce qui présente un fort intérêt non seulement pour l'environnement urbain mais aussi la météorologie routière et l'état de surface des pistes aéroportuaires.



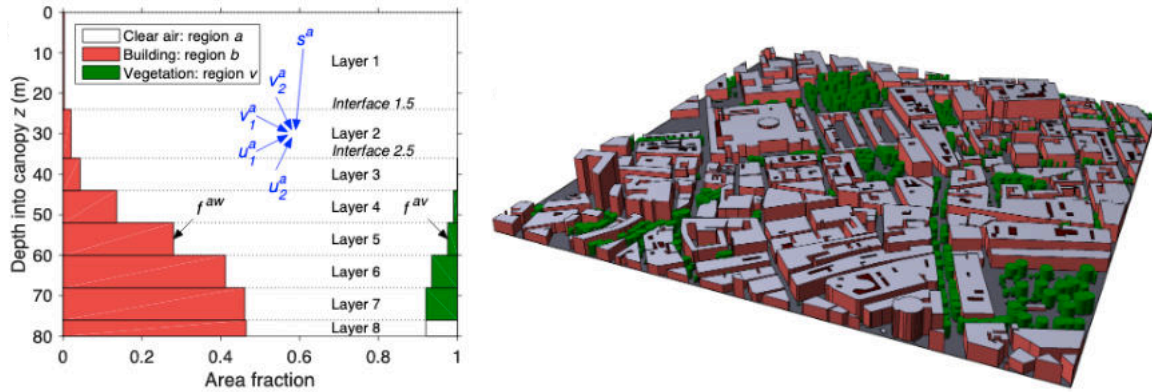


Figure 10 à gauche : discrétisation verticale des échanges radiatifs avec SPARTACUS développé au CEPMMT (Hogan 2019) (maintenant couplé dans TEB); à droite : quartier représenté statistiquement par SPARTACUS.

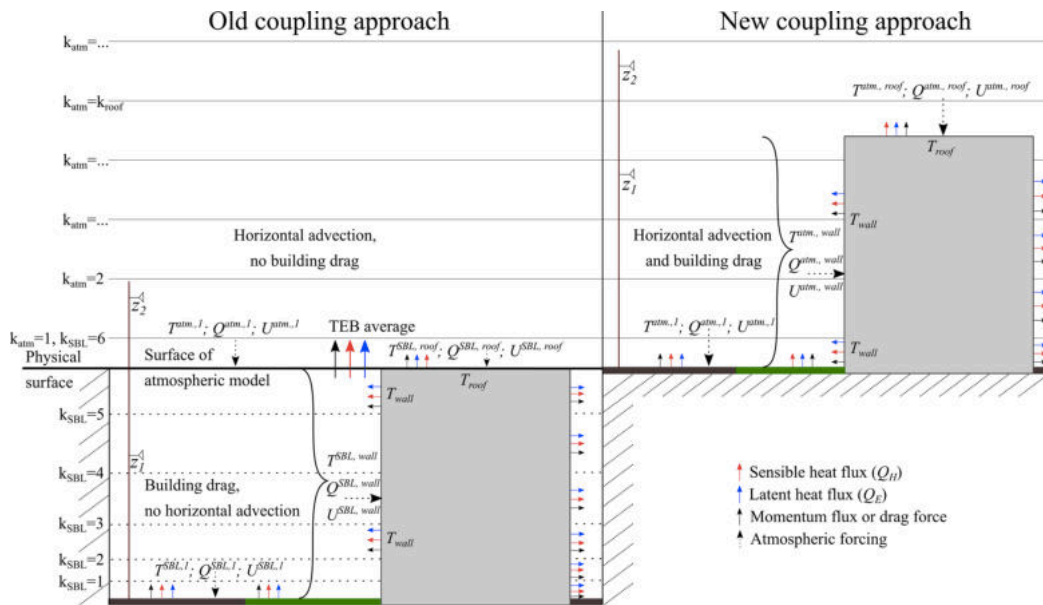


Figure 11 Comparaison entre la méthodologie de couplage classique (à gauche) et le nouveau couplage à plusieurs niveaux (à droite). Source : Schoetter et al 2020.

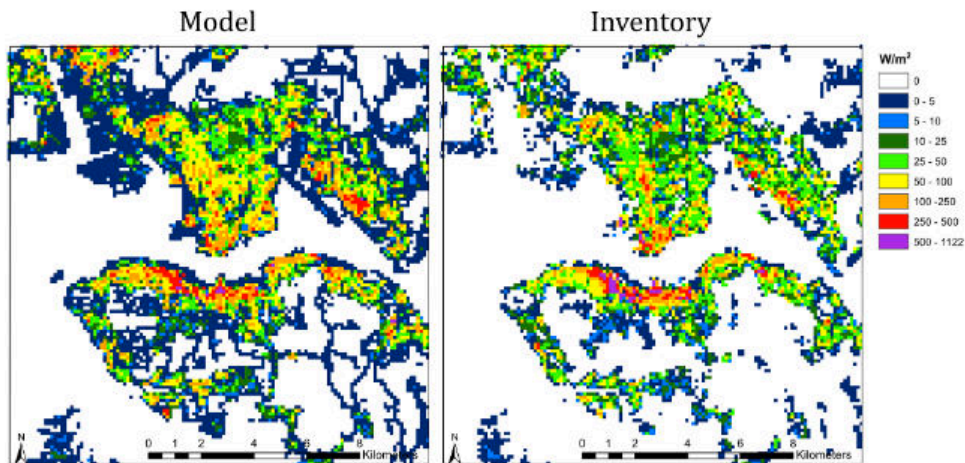


Figure 12 Consommation d'énergie dû à la climatisation sur Hong-Kong lors de la canicule de mai 2018, avec MesoNH couplé à SURFEX-TEB à plusieurs niveaux (Schoetter et al 2020)

### 3.3.2) Micro-échelle

Afin d'évaluer la représentation de l'ensemble des processus, il est intéressant de disposer d'un outil de modélisation à micro-échelle, c'est-à-dire à résolution métrique. Au niveau mondial, il existe plusieurs modèles, dont deux reconnus, tous deux développés en Allemagne. Le premier est EnviMet (Bruse and Fleer, 1998). Il est très fortement utilisé par les bureaux d'études et les architectes, mais n'apporte pas satisfaction lorsque l'on regarde un tant soit peu en détail les écoulements dès que les effets thermiques sont pris en compte. Le deuxième, nommé PALM-4U (Maronga et al 2019) est dérivé du modèle de simulation aux grandes échelles PALM, qui permet de simuler l'effet individuel de chaque bâtiment, à l'échelle d'un quartier, ou de réaliser des simulations à 10m de résolution sur une agglomération comme Berlin. Les échelles explorées sont novatrices, mais les méthodes employées assez classiques (comme la méthode des radiosités pour les échanges radiatifs entre facettes en facteurs de vue).

Le CNRM, initialement via une collaboration avec le CERFACS, a commencé depuis plusieurs années à développer une version micro-échelle du modèle MesoNH, qui permet d'intégrer des frontières immergées au sein de l'écoulement et dans le maillage (Auguste et al 2019). Ceci permet de conserver le maillage régulier et évite les problématiques connues des codes de dynamique des fluides (CFD), tout en autorisant maintenant des écoulements sur très fortes pentes comme le long de bâtiments. MesoNH a été interfacé avec la BDtopo de l'IGN afin de récupérer directement les formes individuelles des bâtiments et les intégrer dans le modèle. Une étude est en cours sur le centre-ville de Toulouse dans le cadre d'un projet Européen de type LIFE piloté par Toulouse Métropole, pour l'évaluation de l'impact d'un verdissement massif de l'Île du Ramier (Figure 13).

Une approche novatrice, que l'on peut même considérer comme un changement de paradigme, est en cours concernant les échanges radiatifs 3D. Il s'agit d'utiliser une approche Monte-Carlo, optimisée, pour représenter les effets radiatifs (thermiques et solaires) (Penazzi 2020). Cette approche est menée sur des quartiers idéalisés. Ces travaux contribuent aussi aux collaborations avec le CEPMMT (Robin Hogan). L'extension dans MesoNH de cette approche Monte-Carlo aux couplages radiatif / conductif (dans les bâtiments) / convectif (selon Fournier et al. 2016) a donné lieu à la soumission d'un projet ANR cette année, coordonnée par Cyril Caliot (université de Pau), actuellement en 2<sup>ème</sup> phase. Ce paradigme par Monte-Carlo ouvre la voie à une approche nouvelle pour fournir des simulations de référence.

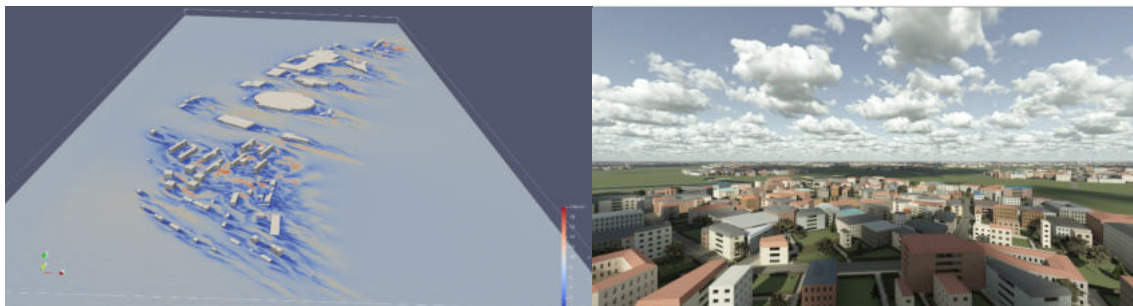


Figure 13 à gauche : Écoulement à micro-échelle sur l'Île du Ramier (développement des frontières immergées dans MesoNH à 2m de résolution). A droite : simulation radiative avec Monte-Carlo sur un quartier idéalisé.

### 3.3.3) Bases de données

Modéliser les villes, que ce soit dans les modèles atmosphériques ou autres, pose la question des données, en particulier de la description des villes à haute résolution. Typiquement, sauf pour les modélisations micro-climatiques, on souhaite disposer à terme de données à l'échelle de l'îlot, ou plus prosaïquement le « pâté de maisons ». Une autre problématique liée à la philosophie des études en météorologie, est qu'il n'existe pas de frontières, et qu'il faut donc idéalement couvrir l'ensemble du globe. On note une absence ou difficulté d'avoir accès à des données urbaines à l'échelle planétaire. Masson et al (2020b) présente une revue sur les besoins pour les modèles de canopée urbaine et sur les données disponibles et le moyen de les acquérir. Les cartes globales disponibles, comme GLOB-Cover, MODIS Land Cover ou ESA-CCI contiennent une seule classe d'occupation du sol dite « urban ». La carte Ecoclimap Seconde Génération du CNRM utilise actuellement des données urbaines issues du JRC produites expérimentalement en 2012, mais non maintenues (Pesaresi et al 2016). De plus, il existe un manque de généralité des données, mais comme indiqué plus haut, il y a une convergence dans la communauté vers une même classification en 10 classes urbaines (LCZ) pour ce qui concerne l'occupation du sol, qui a d'ailleurs été retenue pour décrire les classes urbaines de ecoclimap-SG (développé au CNRM par l'équipe GMME/SURFACE). Outre l'occupation du sol, il convient aussi de disposer d'informations sur la morphologie (par exemple la hauteur moyenne des bâtiments), l'architecture, la végétation urbaine ou les usages des bâtiments.

Le CNRM a piloté des recherches pour améliorer ou produire des données d'occupation du sol en contexte urbain, dans le cadre de projets interdisciplinaires. L'objectif est d'avoir des méthodologies répliquables n'importe où (et donc à partir de données disponibles) avec comme objectif final d'avoir des informations à haute résolution sur l'ensemble de la planète. On peut noter que cette vision des choses est en général très différente de l'approche classique en SHS et des géographes en climatologie urbaine, qui travaillent préférentiellement sur un territoire donné (typiquement « leur » ville).

Il faut noter que le détail nécessaire des données vise à n'utiliser pas seulement les images satellites de paramètres du sol, comme ce qui se fait habituellement en météorologie, mais aussi d'explorer l'utilisation de données urbaine ayant une grande couverture spatiale : la BDtopo pour la France et Open Street Map pour le monde. Ceci a été mené principalement avec un laboratoire de géomatique, le Lab-STICC, à Vannes. Des projets ANR (MAPUCE), européen (ERA4CS URCLIM, Masson et al 2020c) et ADEME (PAENDORA) ont permis de développer la chaîne de traitement « geoclimate » (Bocher et al 2018), qui produit les données de LCZ et de paramètres de morphologie urbaine et de densités de bâtiments ou surfaces imperméables à l'échelle des pâtés de maison. Cette chaîne a été utilisée dans le contrat Copernicus C3S SLIM aussi piloté au CNRM, qui a permis de produire ces données à l'échelle de toute l'Europe (à la fois à haute résolution et à 1km de résolution, Figure 14), avec l'ambition ultérieure de calculer ces données à l'échelle de l'ensemble de la Terre. La chaîne geoclimate est aussi utilisée opérationnellement à Météo-France (DSM) pour une étude sur Strasbourg en cours.

En ce qui concerne les données architecturales, le manque de base de données homogène a nécessité une autre approche, toujours en cours. Il s'agit de déterminer les modes constructifs et matériaux typiques utilisés dans chaque région ou pays pour divers types de bâtiments (maisons, immeubles bas, immeuble de grande hauteur, bâtiment industriel ou commercial), et ceci pour diverses époques (Tornay et al 2017). Ceci est fait avec les architectes du Laboratoire de Recherches en Architecture de Toulouse, via la conception d'un outil en ligne pour récupérer



des informations architecturales typiques pays par pays. Ceci ouvre vers des applications dans d'autres communautés, comme vers le réseau PLEA (Passive Low Energy Architecture).

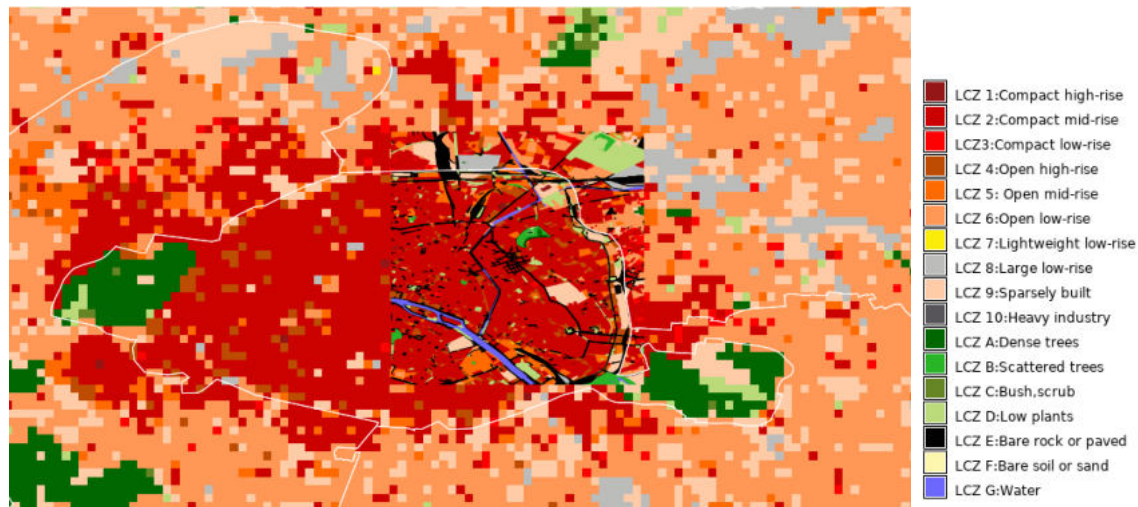


Figure 14 Résultat obtenu dans le cadre du contrat Copernicus C3S SLIM (CNRM et Lab-STICC) : calcul de paramètres urbains (ici l'occupation du sol en classification Local Climate Zone) à l'échelle des pâtés de maisons (encart partie Est de Paris intra-muros), pour améliorer les classes urbaines de Ecoclimap à 300m de résolution (reste de la carte).

### 3.3.4) Modélisation climatique

La modélisation dynamique du climat à résolution kilométrique avec un modèle de canopée urbaine est un sujet émergent dans la communauté scientifique mondiale. Les études à échelle kilométrique sur plusieurs décennies se sont jusqu'ici principalement limitées à des saisons pour étudier des phénomènes particuliers (typiquement les mois d'été). Une première étude de ce type a été publiée en 2012 sur 3 mégapoles japonaises (Kusaka et al 2012).

Le CNRM a montré au cours de la thèse de Maxime Daniel avec ALADIN-Climat à 12km de résolution, couplé avec TEB, qu'aux échelles climatiques, la prise en compte de l'urbanisation pouvait réchauffer légèrement en moyenne même les zones rurales bien au-delà des limites de la ville (Daniel et al 2019). Si en hiver les augmentations sont limitées aux zones urbaines, en été, elles couvrent un grand quart nord-est de la France pour les températures nocturnes (+0.2°C environ), et toute la France métropolitaine pour les températures de jour (entre 0.2 et 0.6°C). Les études sont maintenant menées avec le modèle AROME pour l'étude du climat, à 2.5km de résolution, toujours couplé à TEB, en collaboration étroite entre les groupes GMME et GMGEC du CNRM. Une évaluation sur la période 2000-2017 a été réalisée sur l'agglomération parisienne (thèse de B. Le Roy, Le Roy et al 2020), à partir d'observations de long-terme (température de l'air, de la surface, et précipitations).

Au sein du projet EUCP d'intercomparaison de modèles de climat kilométriques, seul AROME avait activé une paramétrisation urbaine (le focus étant plus sur la convection explicitement résolue, sur les Alpes). Toutefois, cette simulation couvre aussi toute la France métropolitaine. Au cours de la thèse de Yohanna Michau, cette simulation sera évaluée sur 14 agglomérations françaises, afin d'analyser la capacité d'AROME à représenter l'ICU et sa variabilité spatio-temporelle pour différentes villes françaises dans le cadre d'études aux échelles climatiques (avec des environnements géographiques et climatologiques variés). L'objectif final de cette thèse sera d'évaluer avec AROME l'impact croisé du changement climatique et de l'expansion

urbaine (celle-ci étant simulée par le Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement, CIRED).

Aude Lemonsu (CNRM) participe au projet émergent de Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment « urbain » (Flagship CORDEX URBAN du WCRP), qui vient de débiter. La première action est de définir le cadre de coordination et d'intercomparaison des modèles de climat à haute résolution en ville et d'évaluer le potentiel.

### 3.4) Étude des processus en météorologie urbaine

Beaucoup d'études existent sur l'ICU, qui est le phénomène d'intérêt principal concernant le climat urbain (hors qualité de l'air) pour les villes. Il est prévu que les études sur l'ICU se poursuivent au CNRM : étude de la variabilité de l'ICU à partir de diverses sources d'observation, descente d'échelles pour les études d'impact climatiques, etc. Mais d'autres phénomènes et couplages dans la couche limite urbaine méritent aussi d'être explorés.

#### *3.4.1) Ventilation, villes en zone complexe*

Il est difficile d'explorer la dynamique de la couche limite urbaine, du fait de la nécessité d'avoir accès à des observations des phénomènes. Ces études sont souvent basées uniquement sur de la modélisation (on peut citer des études pionnières de A. Lemonsu lors de la campagne ESCOMPTE sur Marseille en 2001, où l'on disposait aussi de mesures d'un lidar scannant, Lemonsu et al 2006).

Le CNRM va approfondir les études sur les interactions entre les échanges d'énergie en surface et la structure de la couche limite atmosphérique, de la zone rurale aux zones urbaines denses. L'influence exacte de la ville sur la couche limite atmosphérique en journée est ainsi moins connue que la nuit. Les effets de ventilation de nuit sont aussi peu quantifiés dans la littérature. Au cours du projet H2C, par modélisation avec le modèle MesoNH à 100m de résolution sur des épisodes passés de canicules et grâce à la campagne de mesures sur Paris à l'été 2022, il est prévu d'étudier la variabilité de la hauteur de couche limite pour caractériser les processus pilotes de la dynamique de la couche limite. Cette analyse sera ensuite étendue sous différentes conditions météorologiques.

Les phénomènes de brise (notamment pour les villes côtières) seront aussi explorés, avec comme terrain d'étude prioritaire, après ce que l'on a appris sur Hong-Kong, la ville de Marseille, à nouveau avec le modèle MesoNH et les instruments qui seront déployés lors du projet ANR COOL-AMmetropolis (voir infra).

#### *3.4.2) Influence des villes sur les nuages de couche limite en été*

Une étude numérique sera menée pour comprendre et quantifier les processus menant à une couverture nuageuse sur les grandes agglomérations. Elle se fera sur Paris, en lien avec une analyse expérimentale à l'IPSL (S. Kotthaus) à partir des mesures de la campagne de Paris 2022 et des observations long-termes (profileurs de couche limite, sites instrumentés). Une collaboration avec N. Theeuwes, qui a mis en évidence ce phénomène et qui est maintenant chercheur au KNMI (membre de ACCORD), est envisagée.



### *3.4.3) Influence des villes sur les orages*

L'influence des villes sur les cellules orageuses est en général observée d'abord à partir des données de radars pluviométriques ou satellite (par exemple TRIMM, Shepherd et al 2002, 2013) mais aussi résulte d'une expérience acquise par les services opérationnels. Des prévisionnistes de Météo-France-Sport ont par exemple indiqué avoir vu des séparations en deux de cellules orageuses sur Sao-Paulo à partir de leur radar, ainsi qu'une formation d'orage sur le circuit des 24h du Mans. Le CNRM a entamé des études sur l'influence des villes sur les orages par modélisation, afin de pouvoir analyser les processus en jeu. Ces études se placent dans le contexte du RDP et de la recherche sur l'amélioration de la modélisation à échelle hectométrique. Un enjeu scientifique est de déterminer aussi la représentativité des orages et de leurs impacts, et des effets urbains, via une approche d'ensemble.

### *3.4.4) Influence de la végétation en ville et couplages hydrologiques*

Une grande attente des collectivités est d'avoir plus d'information sur l'efficacité des solutions Fondées sur la Nature (SFN, terme consacré), c'est-à-dire les différents moyens, traditionnels ou novateurs, d'implémentation de végétation en ville pour répondre à leurs problématiques. Celles-ci peuvent être liées au climat urbain et à la chaleur en ville, mais aussi à d'autres domaines, la végétation apportant de nombreux services écosystémiques. C'est pourquoi nous poursuivons au CNRM les études sur ces SFN d'une part, et leur modélisation d'autre part.

Une collaboration avec l'université technologique de Braunschweig, débutée il y a deux ans, va permettre de mieux comprendre le bilan d'énergie des toitures et murs végétalisés. Un très grand toit végétalisé (sur un parking d'aéroport) dispose depuis plusieurs années d'une instrumentation du bilan d'énergie de surface et du suivi de la végétation et des échanges en eau. Des murs végétalisés existants (à Berlin ou Braunschweig) vont aussi être instrumentés à partir de l'année prochaine, possiblement dans le cadre d'un projet ANR. Une thèse, encadrée par Cécile De Munck, débutera cet automne au CNRM pour analyser les processus en jeu et pour modéliser ces différents types de surfaces végétalisées dans TEB. De surcroît, un stage est en cours pour paramétriser les noues<sup>4</sup> végétalisées et la mise en place de réservoirs récupérant l'eau de pluie en hiver pour la réutiliser en été pour l'arrosage.

Une évaluation hydro-climatologique sur Paris et petite-couronne, est en cours grâce au couplage avec un modèle hydrologique distribué urbain de l'université Gustave Eiffel. Ceci est possible du fait de l'inclusion des phénomènes hydriques souterrains dans TEB, dont les ruissellements et flux dans les réseaux (tuyaux) alimentent le modèle distribué. A terme, ceci permettra aux partenaires d'étudier les phénomènes de crues et de pollution de l'eau. Au CNRM, ceci permet de mieux évaluer l'influence des SFN, en prenant en compte des indicateurs et impacts supplémentaires.

Enfin, en lien avec les problématiques d'atténuation du changement climatique, les effets de captation du CO<sub>2</sub> par la végétation urbaine seront approfondis, en particulier via la modélisation de celle-ci par le modèle ISBA-Ags (Calvet et al 2004) qui représente la photosynthèse, la respiration des plantes et du sol, et le cycle végétatif.

---

<sup>4</sup> Une noue est une sorte de fossé végétalisé servant à absorber les pics de ruissellement en milieu urbain.

### 3.5) Effets radiatifs et interaction avec le climat urbain

La propension des villes à émettre de nombreux polluants et menant à des épisodes récurrents de pollution de l'air a conduit depuis longtemps à des recherches, études et réglementations à tous niveaux sur ces aspects de qualité de l'air. Toutefois, les interactions avec les spécificités du climat urbain restent peu explorées, comme les impacts radiatifs des aérosols sur la couche limite urbaine et les ICU. C'est un processus non pris en compte dans la communauté scientifique en climat urbain pour le moment. Le CNRM commence des recherches sur ce sujet.

Pour ce faire, il convient en premier lieu de caractériser l'aérosol urbain et ses propriétés radiatives. Un stage au CNRM étudie actuellement comment restituer les épaisseurs optiques du panache parisien d'aérosols à partir d'images satellites, issues des mesures de SEVIRI (satellite géostationnaire MSG, produit AERUS-GEO) et de MODIS (satellites Aqua et Terra). Leurs résolutions horizontales respectives de 5 km et 1 km sont assez fines pour fournir un aperçu de la pollution urbaine et repérer un potentiel effet de la ville. La fréquence journalière et la régularité des données AERUS-GEO en font un produit robuste, qui permettra de renforcer l'utilisation des données MODIS de plus haute résolution. Ces données permettent d'analyser les tendances d'évolution des aérosols urbains à l'échelle climatologique, saisonnière, et par type de temps.

Cette approche est complémentaire des observations prévues en 2022 lors de la campagne expérimentale, et des profils d'aérosols provenant des télémètres. Des observations des flux radiatifs reçus en surface sur 12 sites au sein de l'agglomération (et autour) seront mises en œuvre par l'équipe de l'ERC URBISPHERE, et mises à disposition de la communauté scientifique. De plus, les mesures effectuées par le ballon captif du CNRM sur les caractéristiques microphysiques et radiatives des aérosols urbains (section 3.2), fourniront une description in-situ des aérosols qui vont permettre d'affiner l'évaluation de leur impact sur la couche limite urbaine et sur la formation nuageuse.

En perspective, nous comptons modéliser l'effet radiatif des aérosols urbains sur la couche limite urbaine, analyser les processus en jeu, et leurs impacts sur l'ICU et la couverture nuageuse.

## 4) Perspectives en Prévision Numérique du Temps à l'échelle infra-urbaine

### 4.1) RDP « Paris 2024 »

Le Research Demonstration Project « Paris 2024 Olympics » est endossé par l'OMM, dans le cadre de l'axe stratégique « urbanization » du WWRP, et de GURME. Il est coordonné par Météo-France, au CNRM. Les JO d'hiver ont donné lieu à des RDP depuis les jeux de Vancouver en 2010, et se focalisaient naturellement sur la prévision en zone montagneuse. Pour mémoire, les JO de 1992 à Albertville ont été l'occasion d'une accélération considérable des progrès en prévision météorologique et du risque d'avalanche dans les massifs montagneux français. Les seuls RDP pour les JO d'été ont été organisés pour Sydney en 2000 et Pékin en 2008, sur la thématique de la convection à moyenne-échelle (avec des modèles à maille de l'ordre de 10km). Toutefois d'autres RDP, non liés à des Jeux Olympiques, ont récemment étudié les impacts des orages notamment sur Tokyo et Pékin (RDP TOMACS, Misumi et al 2021 et SURF, Liang et al 2018) ou la qualité de l'air en hiver (RDP SURF).

Ce nouveau RDP est le premier visant à étudier l'ensemble des aspects de météorologie urbaine (estivale). Un projet analogue avait été mené sur Toronto par Environnement Canada pour les Jeux Pan-américains de 2015. Au cours de ces Jeux, avaient été mis en place un réseau de mesures urbain (qui a été en partie pérennisé) et une modélisation opérationnelle à 250m de résolution, avec GEM, couplé à TEB (pour la ville) et NEMO (pour le lac Ontario).

Le RDP « Paris 2024 » vise à améliorer les systèmes de prévision du temps en ville à échelle hectométrique (100m). De tels systèmes préfigurent ce que pourraient être des systèmes opérationnels en 2030.

Cet objectif général est d'intérêt pour l'ensemble des services météorologiques, qui ont répondu présent pour participer à ce RDP. Les services météorologiques impliqués sont le Met Office (UK), la NOAA et le NCAR (USA), ECCC (Canada), le JMA (Japon), le SMHI (Suède), le CMA et l'observatoire de Hong-Kong (Chine), le Bureau of Meteorology (Australie). Le DWD (Allemagne) a aussi montré son intérêt, et des laboratoires et universités s'impliquent aussi dans ce projet (comme l'Arizona State University, l'université de Freiburg et celle de Reading).

Pour atteindre l'objectif général du RDP, 5 grandes questions scientifiques vont être étudiées :

- 1) L'amélioration des modèles atmosphériques et de prévision immédiate à maille de 100m en ville.
- 2) L'amélioration de la connaissance des processus dans la couche limite urbaine et les phénomènes météorologiques d'été en ville (ICU et zones de fraîcheur, orages, ainsi que la qualité de l'air), sur l'agglomération parisienne.
- 3) Idem 2) mais pour une ville côtière (Marseille).
- 4) Les données d'opportunité en ville (météorologiques ou urbaines), leurs utilisations, en lien avec l'intelligence artificielle.
- 5) Comment concevoir des services météorologiques adaptés aux divers acteurs et utilisateurs potentiels.

Diverses actions ont débuté pour explorer ces questions scientifiques. Une intercomparaison de modèles atmosphériques a débuté, en se focalisant sur deux cas d'études : un cas de canicule (juillet 2019) et un cas d'orage fort sur Paris, avec un potentiel effet urbain sur l'intensification du phénomène (9-10 juillet 2017). Afin de commencer cette intercomparaison et les premières

simulations des cas d'étude, une méthodologie a été mise en place collégialement en 2020 et 2021 : 1) chaque partenaire porte son modèle sur Paris en configuration habituelle 2) Convergence sur le protocole de résolution à échelle hectométrique (nous visons dans un premier temps 250m en 2021) et 3) intégration de données fines décrivant la ville à l'échelle des îlots urbains. Une modélisation en temps réel à échelle hectométrique est prévue à partir de l'été 2022 (avec visualisation sur site web), abondée par les partenaires du RDP intéressés. Pour Météo-France, ces prévisions seront faites avec MesoNH à 100m (sur l'agglomération) et AROME à 500m (pré-opérationnel en 2022, il est prévu une version opérationnelle sur l'Île de France à partir de 2023). Toutes ces prévisions (a priori en descente d'échelle dynamique) seront utilisées pour le pilotage de la campagne expérimentale, et serviront de première répétition pour des prévisions temps réel (mais non opérationnelles) pendant les Jeux Olympiques, qui seraient mises à disposition des prévisionnistes.

Une coordination étroite entre les partenaires du RDP et les acteurs de la campagne expérimentale Paris 2022 est d'ores et déjà engagée. Une question importante est de déterminer s'il est pertinent et possible de rajouter de l'instrumentation supplémentaire permettant de compléter le système expérimental pour mieux répondre aux objectifs d'évaluation des modèles à échelle hectométrique.

Les actions en rapport avec les enjeux de qualité de l'air et interactions avec le climat urbain dans le cadre du RDP en sont à leurs débuts. Deux échelles d'intérêt sont concernées, les systèmes de modélisation de qualité de l'air à résolution kilométrique, et les systèmes de dispersion de panache (par exemple gaussiens) à l'échelle des rues. Le SMHI voudrait évaluer sur Paris son système de prévision de qualité de l'air à une résolution de 5m. Airparif est impliqué, et intéressé à collaborer avec les partenaires du RDP.

D'un point de vue gouvernance, un comité scientifique a été constitué, composé de membres représentant les groupes d'experts du WWRP et de GURME et de quelques autres experts. Un comité consultatif d'utilisateurs a aussi été formé, où siègent la direction stratégique de Météo-France, Météo-France Sport (mobilisation de prévisionnistes), la SOLIDEO (en charge de la construction des sites olympiques), les représentants du WWRP et de la Commission sur les Services de l'OMM. Ce comité n'est pas encore complet, et comprendra aussi si possible un représentant du comité olympique et de Airparif.

#### 4.2) Études de la variabilité de la météorologie urbaine et sa prévisibilité

Mieux prévoir les phénomènes météorologiques à échelle hectométrique pose intrinsèquement la question de la variabilité et prévisibilité de ces phénomènes. Ainsi, à quelle échelle peut-on prévoir un ICU ? Dans quelle mesure sa prévisibilité est influencée plus ou moins fortement par les caractéristiques de surface, de jour ou de nuit ? Ces questions vont être abordées dans le RDP. La connaissance de la variabilité, à partir de données d'opportunité et de la campagne servira à valider les modèles. Puis l'analyse de la prévisibilité nécessite un protocole d'étude de la question qui devra être défini, par exemple vis-à-vis de la définition des membres (variabilité de la finesse de la description des surfaces, variabilité des forçages atmosphériques, variabilité inter-modèles, complexité de la physique du modèle de canopée urbaine, ...).

Pour les orages, la question de la prévisibilité est clairement plus fortement liée à l'atmosphère. Il est apparu dès les premières comparaisons des simulations faites pour le cas d'étude de juillet 2017 que l'occurrence même de l'orage en région parisienne dépendait du modèle (avec son coupleur) et des moments de début de simulation. Une approche ensembliste s'impose, et

permettra de répondre à deux interrogations : la prévisibilité en elle-même, et le choix d'une situation de référence (pour chaque modèle) où l'on pourra étudier plus finement les processus d'interaction entre ville et atmosphère dans ces conditions.

Au CNRM, nous participons aux deux cas d'étude (canicule et orage). De plus, la thèse de formation complémentaire par la recherche de Arnaud Forster vient de débiter et visera à avancer sur ces diverses questions avec d'abord MesoNH, puis à partir de mi-2022 une approche multi-modèle en interaction avec les partenaires du RDP sera poursuivie, suite à la campagne de mesures. La finalité sera de concevoir des indicateurs pertinents à l'échelle des quartiers issues de prévisions.

La question d'assimilation de données urbaines ou en ville dans les modèles de prévision se pose naturellement. Elle est abordée régulièrement au sein des discussions, mais il semble prioritaire de mieux connaître au préalable la qualité des données qui pourraient être assimilées et ce qu'elles représentent. Des défis spécifiques se posent par exemple pour l'assimilation de données proches de la surface (comme des températures de l'air) : quelle variable historique du modèle pourrait être modifiée par un incrément d'analyse, car ce qui est fait habituellement pour l'eau dans le sol n'a plus lieu d'être dans un milieu imperméabilisé. L'assimilation de données atmosphériques pourrait être prometteuse, par exemple des données sur la hauteur de la couche limite ou des profils de variables thermodynamiques ou d'aérosols.

#### 4.3) Adaptations statistiques développés pour et dans les services opérationnels

Les prévisions météorologiques opérationnelles sont actuellement produites en France par AROME à 1.3km de résolution. Même si AROME est couplé à TEB et simule un ICU, celui-ci ne peut être reproduit correctement que pour les grandes agglomérations. Ceci est lié à la fois à la résolution du modèle et aux bases de données utilisées (Ecoclimap), qui ne dispose que de 3 types principaux d'occupation du sol (dense, périurbain, industriel et commercial), dont les caractéristiques sont uniformes sur la France.

Afin d'améliorer les prévisions fournies par AROME, deux pistes, toutes deux via des post-traitements des prévisions, sont explorées. Menées indépendamment, elles sont complémentaires. Les méthodologies pourront s'enrichir mutuellement, avant à terme une fusion possible.

La première action prévue est de réaliser une simulation à haute résolution (typiquement 200m) avec MesoNH sur la France pendant une assez longue période pour échantillonner de nombreuses situations météorologiques (typiquement 1 an). Cette simulation utiliserait les données urbaines à l'échelle de l'îlot produites avec geoclimate suite aux projets PAENDORA et Copernicus C3S SLIM. Elle sera forcée par AROME. Cette simulation fournira des champs météorologiques sur les villes, même petites, à bien plus haute résolution qu'AROME. Une adaptation statistique, à l'instar de ce qui est déjà fait entre ARPEGE et AROME (pour améliorer la résolution spatiale des prévisions ARPEGE lorsque AROME n'est pas disponible) sera alors produite par les services opérationnels en charge des scores et adaptations statistiques (DirOP/COMPAS, O. Mestre), via l'utilisation de techniques d'IA. Cette action est prévue pour 2022.

La deuxième approche envisagée se basera sur les données d'opportunité (cf 3.1) et les informations sur l'ICU qu'elles fournissent à haute résolution. L'idée est ainsi de prendre en compte ces informations météorologiques fines mais aussi les données de description du tissu



urbain, afin de les fusionner avec les sorties AROME. La méthodologie pour ce faire est à construire, et se basera sur des approches d'IA (à la fois pour le traitement des données d'observations et les processus de fusion). Un exemple actuellement disponible d'une telle adaptation statistique à partir de données est montré en Figure 15 (où les observations sont celles du réseau synoptique de Météo-France).

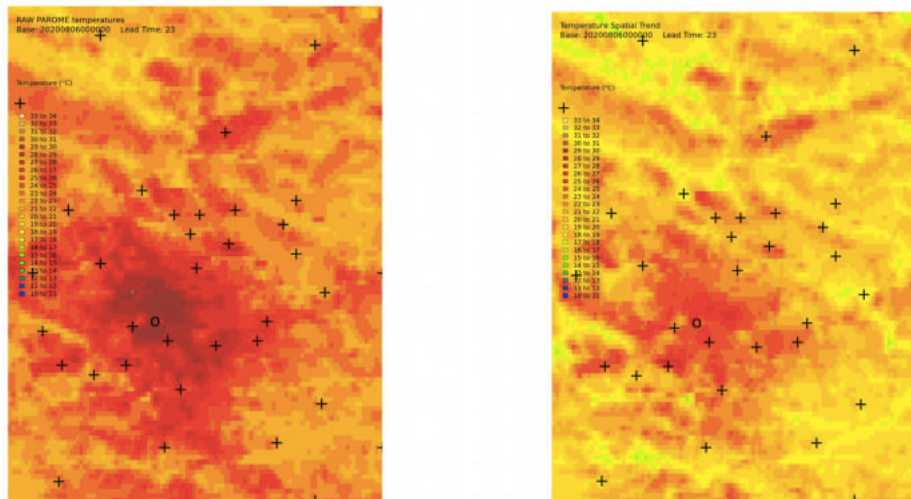


Figure 15 Post-traitement des modèles : adaptation statistique des sorties de température de l'air à 2m d'AROME en utilisant les observations des stations synoptiques Météo-France sur la région parisienne (le 6 août 2020 à 23UTC).

#### 4.4) Confort thermique, Impacts sanitaires

Améliorer les prévisions signifie aussi améliorer les services produits vers les utilisateurs. Les effets du stress thermique en situation caniculaire deviennent un enjeu de santé publique, autant que la qualité de l'air. Santé Publique France et Météo-France ont mis au point après la canicule de 2003 le système de vigilance pour canicule (Figure 16). Santé Publique France constate une influence nette de la chaleur sur le recours aux soins et la mortalité, et des impacts malgré la mise en place du plan national canicule. Les cas de Vigilance Canicule sont en forte hausse depuis 2015. La vigilance est actuellement fournie à l'échelon départemental, en se basant sur des températures de référence de stations météorologiques synoptiques, donc en milieu rural. Les spécificités du contexte urbain sont encore peu étudiées. Une étude préalable de Santé Publique France indique que le risque de surmortalité dans les communes de région parisienne les plus imperméabilisées en fonction de la température de référence (synoptique) est plus fort que dans les communes avec plus de végétation.

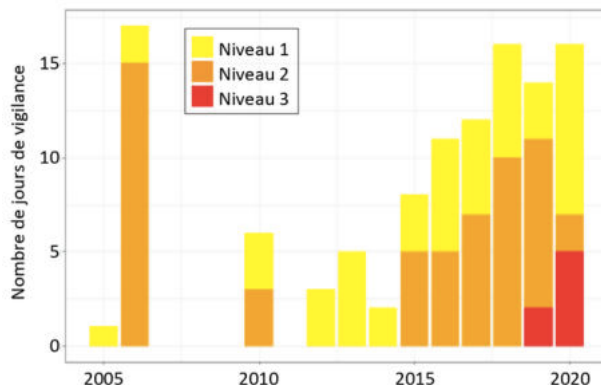


Figure 16 Nombre de jours de vigilance canicule sur Paris depuis 2004 (source : Santé Publique France).

Il existe donc encore d'importants verrous scientifiques :

- Prévoir finement les conditions environnementales (météo et qualité de l'air) en ville
- Comprendre l'exposition infra-urbaine à la chaleur et aux polluants atmosphériques pour adapter les mesures de prévention

Pour avancer sur ces questions, le CNRM (Aude Lemonsu) pilote le projet ANR « Heat and Health in Cities » (H2C), qui comporte 8 partenaires, dont Santé Publique France et l'Office Régional de Santé. Dans ce projet interdisciplinaire et en collaboration avec les acteurs locaux, l'objectif est d'« Améliorer les services climatiques urbains pour aider l'action publique sur la prévention de la chaleur dans la ville, avec Paris comme cas d'étude ».

Les principaux objectifs scientifiques de H2C sont de : (1) Mieux comprendre l'impact des zones urbaines et du micro-climat associé sur les confort thermique intérieur et extérieur, la morbidité et la mortalité (2) Renforcer la synergie entre modélisation et observations multi-sources pour suivre et prévoir les conditions environnementales en ville et estimer l'exposition et les risques sanitaires associés (3) Produire des informations utiles aux décideurs pour l'aide à la décision.

Ce dernier point requiert d'identifier les acteurs et utilisateurs, ainsi que leurs besoins, de produire les bons indicateurs environnementaux, d'exposition, de risques et de définir des outils de transfert. Ce projet vient de commencer en 2021 pour une durée de 4 ans. La collaboration avec Santé Publique France sur les études épidémiologiques va permettre d'analyser les relations entre micro-climat et impacts sanitaires (morbidité, mortalité) à l'échelle des communes et arrondissements. Une fois cette recherche effectuée, il sera pertinent de réfléchir comment cela peut contribuer à la vigilance infra-départementale pour les aspects canicule.

Le projet mettra à profit les développements passés sur les indices de confort thermique, comme l'UTCI, qui a l'avantage d'être basé sur un modèle de thermique du corps humain, et d'être valable quelles que soient les conditions météorologiques. Toutefois, les seuils de stress (froid ou chaud) semblent dépendre des climats du fait de l'adaptation naturelle des habitants. Ces seuils sont différents par exemple en Outre-Mer, comme l'a montré récemment une enquête faite lors d'une thèse de l'université de la Réunion (Grosdemouge 2020). Une adaptation aux diverses régions, même à l'échelle de la France métropolitaine, pourrait donc être nécessaire.

De plus, les différents acteurs des Jeux Olympiques de Paris 2024 sont aussi en demande d'indicateurs de confort ou inconfort thermique. Des demandes sont liées aux règlements des fédérations sportives (par exemple fourniture de l'indice Wet Bulb Globe Temperature, WBGT). D'autres peuvent être plus spécifiques, pour l'organisation d'épreuves comme le long du parcours du marathon.

## 5) Perspectives de services climatiques urbains

Les études et recherches sur les impacts du changement climatique sur la ville et le climat urbain, et sur l'évaluation de stratégies d'adaptation nécessitent une approche de transdisciplinarité radicale. La complexité du système « ville » met de fait en œuvre nombre d'aspects différents en interactions, relevant de différentes disciplines (météorologie, hydrologie, géographie, sociologie, thermique, socio-économie, architecture, droit de l'environnement, etc...).

De plus, transférer, ou plutôt partager la connaissance avec les acteurs de la fabrique urbaine (urbanistes, aménageurs, élus parfois), jusqu'à concevoir des services climatiques urbains nécessite de mettre en œuvre des processus de co-construction. Ceci est parfois complexe, du fait de la variété des compétences et organisations dans la gouvernance urbaine. Les compétences pertinentes sont même parfois réparties entre différents niveaux de gouvernance (commune, agglomération, région). Dans certains cas, il n'existe pas d'interlocuteur défini ou impliqué, par exemple dans les villes à fort développement informel dans des pays en développement par exemple. Tout ceci augmente au final la vulnérabilité des villes aux aléas climatiques, et rend difficile l'anticipation et les réponses à des risques globaux.

Enfin, il convient de souligner la (relative) correspondance entre les échelles du changement climatique (plusieurs décennies) et celles de la planification urbaine : la définition et mise en œuvre de la planification urbaine prend plusieurs années (typiquement 3 à 5 ans pour la mise à jour de documents réglementaires en comptant toutes les études et étapes administratives nécessaires), mais, surtout, la planification vise à définir des quartiers et infrastructures qui vont durer plusieurs décennies au minimum, voire organiser la ville pour un siècle. Les questions se posent donc sur le temps long, et avec des interactions possibles entre expansion ou transformation de l'urbanisation et climat local et régional.

### 5.1) Méthodes, Descentes d'échelles, Types de temps

Une première question est de déterminer comment évaluer les impacts du changement climatique en ville. Comme vu plus haut, la modélisation dynamique directe à partir de modèles de climat urbanisés à résolution kilométrique en est encore à ses débuts. Il convient donc de projeter les futurs climats possibles en suivant d'autres approches. Typiquement, elles sont de deux types :

- Étude de cas passés que l'on peut considérer comme représentatifs du climat futur. Typiquement, en climatologie urbaine pour les études sur les impacts de la chaleur en été, la canicule de 2003 a donné lieu à de très nombreuses études.
- La mise en œuvre de descentes d'échelles statistiques ou statistico-dynamiques, liant des projections futures à des impacts locaux.

Le CNRM a construit, avec le LISST, une méthodologie basée sur des types de temps locaux, c'est-à-dire typiques de la ville étudiée (Hidalgo et al 2014, Hidalgo and Jouglu 2018). Par exemple, pour Toulouse, une dizaine de types de temps est définie d'un point de vue météorologique, dont la situation de vent d'Autan (fort vent de Sud-Est) ou celle de temps chaud et ensoleillé. Cette approche a été menée sur plus de 50 villes en France métropolitaine par le LISST, qui a fourni des fiches décrivant ces conditions météo typiques pour chaque ville. La fréquence d'apparition de ces types de temps varie au selon les saisons. De plus, même si une dizaine de types de temps sont définis pour une ville donnée, les discussions avec les

urbanistes et collectivités nous conduisent souvent, dans les services rendus, à en réduire le nombre à ceux les plus significatifs pour les besoins des collectivités.

En ce qui concerne les questions d'adaptation à la chaleur en été et aux ICU, la première question des collectivités est souvent de quantifier le phénomène pour leur ville. Une approche statistique a été construite au sein des projets MAPUCE et URCLIM (Gardes et al 2020), en se basant sur la modélisation à 250m de résolution de l'ICU pour deux types de temps chaud pour 42 villes françaises (6 jours pour chaque type de temps, les jours sélectionnés variant pour chaque ville en fonction des occurrences locales, puisqu'il ne fait pas beau partout au même moment). Puis une relation statistique utilisant des caractéristiques globales des villes (population, distance à la côte, climat) et spatiales (carte de LCZ, distance au centre de la ville) permet de produire des cartes « d'ICU typique d'été » pour n'importe quelle ville en France métropolitaine.

Une autre utilisation des types de temps a été la conception d'une méthode de descente d'échelle statistico-dynamique afin de prendre en compte le signal urbain d'ICU dans les simulations EURO-CORDEX. Cette méthode mise au point lors de la thèse de Benjamin Le Roy a été évaluée de manière extensive sur la période historique, et appliquée à des scénarios futurs. Elle a ainsi permis d'évaluer des impacts météo-dépendants à partir de ces projections EURO-CORDEX (sans ville) prenant en compte l'ICU, comme l'évolution des consommations d'énergie des bâtiments ou la quantification de l'augmentation du temps passé en condition de stress thermique dangereux pour la santé (Le Roy et al 2021).

## 5.2) Études opérationnelles sur la quantification présente et future de l'ICU

Un service classiquement produit pour les collectivités est le profil climatique, c'est-à-dire une analyse sur le passé (en général à partir de la station d'observations synoptiques non urbaine) et le futur de la climatologie moyenne, en fonction du mois de l'année. Les informations sont disponibles sur DRIAS et Climat HD, et une analyse plus fine, sous forme de rapport, est fournie aux collectivités, dans un cadre commercial. Les études aux échelles plus fines, notamment sur l'ICU, sont encore peu nombreuses.

L'approche en type de temps a été utilisée par Météo-France (DSM), afin de répondre à un besoin de la SOLIDEO (l'établissement public en charge de la construction des sites et villages olympiques). Le besoin consistait en la fourniture de projections pour les climats de 2025 (pour les JO) et 2050 (pour la phase héritage) de conditions climatiques normales et extrêmes (en chaleur) pour tous les sites olympiques. Une projection en climat constant 2050 d'ARPEGE (modèle global, sans ville) sur 400 ans a été utilisée pour définir les conditions météorologiques d'une année typique et d'une année caniculaire. Puis, à chaque jour a été ajouté l'ICU du type de temps correspondant, qui avait été extrait de simulations d'un an avec MesoNH à 250m de résolution sur la région parisienne. Ceci a permis de fournir une estimation des conditions météorologiques futures sur tous les points correspondants aux sites olympiques. Ces données ont ensuite été fournies par la SOLIDEO aux aménageurs pour qu'ils puissent évaluer les impacts en termes de consommation d'énergie (par la climatisation) ou le confort intérieur, de leurs propositions d'aménagement.

D'autres actions ont été menées avec les collectivités sur l'évaluation du micro-climat urbain. Une collaboration de Météo-France a été menée avec la mairie de Paris et des laboratoires universitaires (LIEPP : Laboratoire Interdisciplinaire d'Evaluation des Politiques Publiques à Sciences Po; et LIED : Laboratoire Interdisciplinaire des Energies de Demain de l'Université

Paris-Diderot) pour évaluer l'effet de revégétaliser des cours d'écoles sur le rafraîchissement local. L'idée est que ces cours soient des « oasis » (d'où le nom du projet « Cours OASIS ») pouvant à la fois être plus confortables pour les enfants et devenir des îlots de fraîcheur pour le quartier qui seront accessibles par les habitants en dehors des horaires scolaires (Figure 17). Il est explicitement indiqué qu'un des buts est que ces cours deviennent notamment des « refuges » pour les personnes vulnérables durant les vagues de chaleur. Dix cours d'écoles ont été rénovées. Les sols ont été remaniés, de façon à mieux gérer l'eau, en privilégiant les matériaux naturels, et les surfaces végétales ont été augmentées (arbres, murs et toits végétalisés, etc). Des stations météorologiques ont été placées pour suivre l'impact avant et après transformation.

Une autre étude est menée en partenariat avec l'EuroMétropole de Strasbourg sur l'évaluation de l'ICU sur l'agglomération pour identifier les zones vulnérables. Cette étude est menée avec l'outil CLUE (Climat Urbain Études), outil d'évaluation dynamique du climat urbain, basé sur MesoNH à résolution kilométrique sur une agglomération, couplé dynamiquement à SURFEX (avec TEB) à 100m. Ce couplage à différentes échelles entre l'atmosphère et la surface permet de prendre en compte les impacts à échelle fine dans la canopée urbaine (micro-climat à 2m et confort thermique par exemple) en tenant compte de la variabilité du tissu urbain. Il est aussi possible dans CLUE de réaliser des scénarios d'évolution urbaine (avec le modèle géographique SLEUTH), mais cette option n'a pas encore été utilisée dans les études.

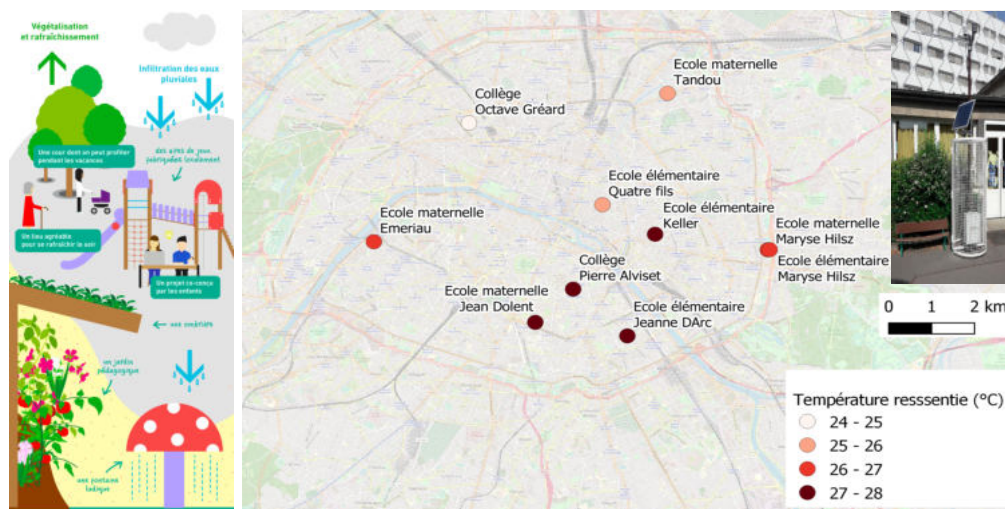


Figure 17 projet « cours OASIS » avec la mairie de Paris. Température ressentie simulée dans les écoles du projet (outil Météo-France CLUE, source : Marine Goret) le 21 juin 2019, 16h. en médaillon : Station météo de la cour d'école Maternelle Maryse Hilsz (Paris).

### 5.3) Services pour la planification urbaine

La catastrophe sanitaire de la canicule de 2003 a éveillé les villes sur les impacts et la dangerosité des situations caniculaires et de la chaleur sur leurs territoires. Ceci a conduit d'une part à un besoin de connaissances sur l'adaptation des villes au changement climatique en termes de confort d'été, et d'autre part à une nécessité de transfert de ces connaissances vers les acteurs urbains, nécessitant des processus de traduction et co-construction avec les urbanistes (agences et collectivités).

En ville, il existe de très nombreux leviers d'adaptation, à des échelles allant de l'individu ou logement à l'agglomération entière, et dépendant de nombreux acteurs. On peut mentionner à l'échelle du logement la climatisation ou les pratiques individuelles (comme la fermeture de



volets ou l'aération du logement). A l'échelle du bâtiment, la construction ou rénovation considère toujours les problématiques hivernales (l'isolation, suite aux réglementations thermiques), mais peu encore celles d'été. Les SFN se déclinent de l'échelle du bâtiment à celle du quartier (parc), de la ville (trames vertes et bleues) et même au-delà (planification urbaine, restauration ou maintien des forêts et zones naturelles afin de favoriser le rafraîchissement des villes par l'apport d'air frais). Apprendre des villes dites « du Sud » déjà soumises à un climat plus chaud, est aussi un moyen d'imaginer des stratégies adaptées au climat futur (villes blanches, matériaux de construction).

Le CNRM a depuis plus d'une dizaine d'années mené de nombreux projets de recherche interdisciplinaires visant à analyser le potentiel de différentes stratégies d'adaptation et de leur combinaison. Le premier projet, EPICEA, à l'initiative de la mairie de Paris, a été mené en étroite collaboration avec le bureau d'études de Météo-France à Paris et le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment. Des modélisations MesoNH sur le cas de la canicule 2003 ont permis d'évaluer l'effet de végétalisation, de changement d'albedo (peinture blanches) et d'arrosage des chaussées (intra-muros). Ceci a ensuite donné lieu à des actions d'expérimentation d'arrosage par les laveuses en été par la mairie de Paris, qui s'était approprié la question, avec le LIED (Hendel et al 2016). Lors d'une étude en collaboration avec la société Climespace (qui gère des réseaux de froid dans Paris), De Munck et al (2013b) ont montré que l'utilisation de la climatisation, même modérée, lors d'un épisode de canicule renforçait l'ICU de plus de 1°C. Le CNRM a poursuivi ces recherches en élargissant le panel interdisciplinaire (en entamant en particulier une collaboration avec les sociologues et urbanistes du LISST à l'université de Toulouse). Les acteurs urbains, agences d'urbanisme de Toulouse ou d'Ile de France, l'agence Nationale des Agences d'Urbanisme, ou les collectivités urbaines (Toulouse Métropole), étaient systématiquement partenaires de ces projets de recherche.

Ainsi, nous avons pu préciser le besoin, en termes de processus à étudier et évaluer, et en termes d'échelles. Un enjeu en termes de météorologique ou climatologie est que l'échelle spatiale souhaitable pour les questions d'adaptation au changement climatique est celle de l'îlot urbain ou le quartier. Un point intéressant est que les urbanistes partenaires de ces travaux se sont approprié la notion de LCZ pour la description de l'occupation du sol lorsqu'il est question de climat urbain, ce qui facilite maintenant grandement les échanges.

Les projets d'études sur l'adaptation ont donc cherché à répondre à des questions diverses et croisées. Pour y répondre l'approche a été soit expérimentale, avec le projet EUREQUA (Haouès-Jouve et al 2021), soit, le plus souvent, basée sur des approches de modélisation<sup>5</sup> (VURCA, ACCLIMAT, MUSCADE, MAPUCE, URCLIM).

Le projet ANR EUREQUA a visé à analyser ce que pouvait recouper le terme « qualité environnementale » à l'échelle des quartiers, et comment celle-ci pouvait être améliorée. Des quartiers à enjeux avaient été choisis à Marseille, Paris et Toulouse, et des mesures météorologiques (station portative, mat fixe) et acoustiques, avaient été faites sur une semaine, de jour et de nuit, conjointement avec des enquêtes auprès des habitants et usagers des quartiers. Puis les données ont été comparées aux perceptions recueillies (Lemonsu et al 2020). Un travail avec un bureau d'étude en urbanisme a permis ensuite de proposer une méthodologie pour améliorer les quartiers.

---

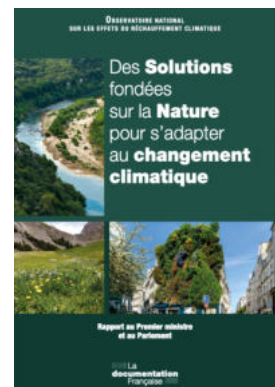
<sup>5</sup> <http://www.umr-cnrm.fr/ville.climat/>

L'évaluation interdisciplinaire et multi-critères de stratégies d'adaptations à partir de simulations faites avec TEB a pu être menée dans divers projets (Masson et al 2014, Viguié et al 2020) grâce à la prise en compte de nombreux processus et de leurs interactions (cf 3.3) et au développement d'indicateurs spécifiques, comme la consommation d'énergie ou la demande de ressource en eau pour les SFN. Un travail a été mené en parallèle sur les bases de données urbaines (cf 3.4), afin de pouvoir atteindre la finesse demandée par les collectivités. C. De Munck va poursuivre les analyses de la sensibilité des impacts simulés et la qualité des évaluations en fonction de la qualité des données disponibles.

Il est désormais prévu d'évaluer conjointement des aspects liés à l'atténuation (consommations d'énergie, flux de CO<sub>2</sub> émis par les bâtiments et la végétalisation urbaine) et l'adaptation (ICU) de divers scénarios sur l'agglomération d'Aix-Marseille (projet COOL-AMmetropolis), en partenariat avec l'Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie Marine et Continentale (IMBE) un laboratoire d'écologie de l'OHP et des juristes du Laboratoire Interdisciplinaire Environnement Urbanisme (LIEU, université Aix-Marseille). L'évaluation sera réalisée à 100m de résolution avec MesoNH, en hiver et été (simulations qui pourront aussi servir pour les recherches du RDP), et les scénarios urbains produits par les chercheurs en lien avec les collectivités.

L'ensemble de ces recherches, a permis d'évaluer le potentiel de nombreux aspects de différentes stratégies, en particulier celles basées sur la végétalisation. Ceci conduit à des résultats souvent en contradiction avec la vision ancrée chez les urbanistes. Par exemple, les toitures végétalisées extensives (végétation basse comme des graminées ou du sedum), ne sont pas intéressantes du point de vue de l'amélioration du confort thermique au niveau des piétons (car outre qu'elles sont sur le toit, l'épaisseur du substrat fait que toute l'eau a été évaporée en quelques jours en conditions estivales chaudes). Elles restent pertinentes pour d'autres aspects : elles procurent une isolation supplémentaire (lorsque placée sur un bâtiment ancien, améliorant le confort intérieur), et un moyen de réguler le ruissellement, sans compter les aspects esthétiques ou sociaux potentiels (par exemple jardins partagés sur les toits).

Ces recherches ont permis au CNRM de contribuer au chapitre « urbanisme » du rapport de l'ONERC au Premier ministre et au Parlement sur les solutions basées sur la nature (De Munck et al 2019).



#### 5.4) Transfert vers les acteurs

Une fois les stratégies d'adaptation évaluées, et recueillis les enseignements sur celles-ci, il reste à s'assurer que l'information est utile, pertinente et utilisée par les acteurs. Comme cela est souligné dans le guide sur les services climatiques urbains produit par l'OMM, il est nécessaire de co-construire ces services et outils de transfert avec les urbanistes. Ceci s'est fait en collaboration étroite avec les sciences sociales et économiques, les juristes en droit de l'environnement, et les agences d'urbanisme.

La première approche est de compiler les résultats et recommandations dans des guides méthodologiques ou de bonnes pratiques. Ainsi, les juristes du LIEU ont analysé au cours du projet MAPUCE divers documents d'urbanisme, comme le Plan local d'urbanisme intercommunal (Figure 18), pour identifier d'une part des bonnes pratiques dans certaines villes, et d'autre part dans quels articles du règlement peuvent être introduites des spécifications

liées à la prise en compte du climat urbain. Des guides méthodologiques ont été produits suite aux projets EUREQUA, MAPUCE. Dans le projet PAENDORA (financé par l'ADEME), qui consistait à la mise en œuvre en pratique de MAPUCE, le LISST et l'agence d'urbanisme de Toulouse ont produit un guide publié officiellement par l'ADEME<sup>6</sup> (ADEME 2020).

Transmettre des informations spatialisées sur le climat urbain en général, et sur l'ICU en particulier, vers les collectivités n'est pas aisé et demande un processus itératif de co-construction. L'information doit être synthétisée de façon à répondre à leurs attentes, tout en restant adéquate du point de vue scientifique et technique. Julie André, IPEF actuellement un stage de Master 2 (encadrée par A. Lemonsu), effectue des entretiens avec les acteurs de l'urbanisme en Ile de France afin de sensibiliser les acteurs aux indicateurs pouvant être produits par la modélisation vis-à-vis des problématiques d'adaptation, et comment améliorer ces indicateurs pour augmenter leur pertinence.

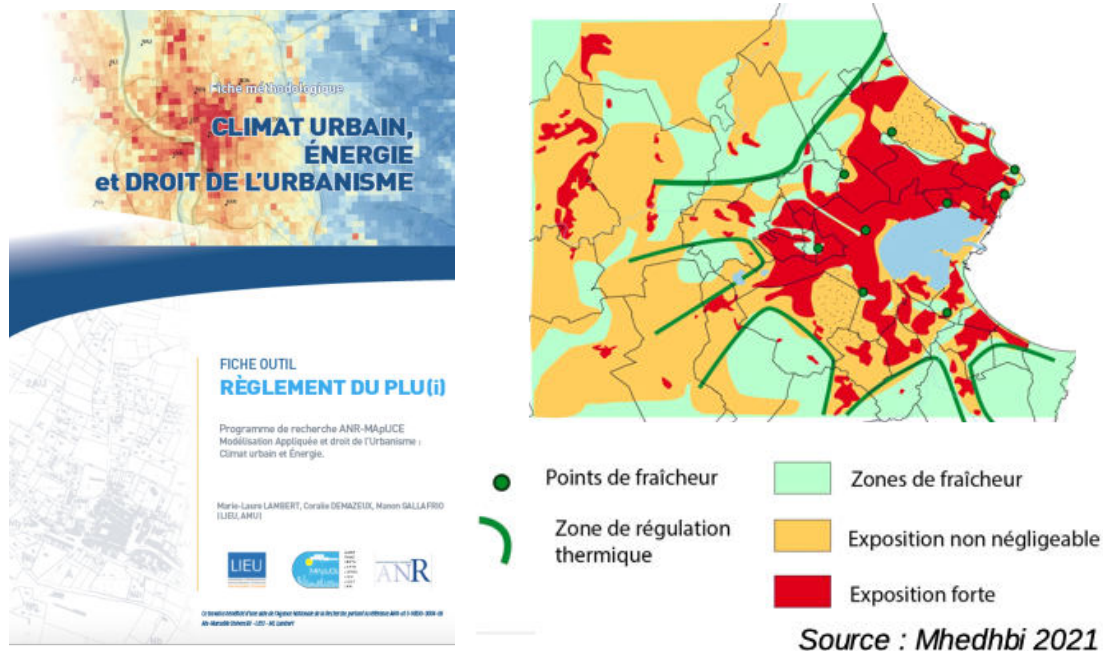
Le CNRM collabore étroitement avec le LISST pour produire ce que l'on appelle des « cartes climatiques urbaines », qui comportent des informations à la fois météorologiques mais qui servent aussi à mettre en avant des points de vulnérabilité des territoires et des recommandations (construites avec les urbanistes). Ces études sont menées sur des villes françaises (Toulouse, Paris) mais leur transférabilité dans d'autres conditions a été testée sur Tunis, au cours de la thèse de Zohra Mhedhbi en sociologie et urbanisme co-encadrée avec le LISST. Des cartes climatiques sur Tunis ont été produites à partir de simulations avec MesoNH (Figure 18), mais ces cartes à elles seules ne se sont pas montrées suffisantes pour mettre à l'agenda les problématiques d'ICU à Tunis, qui n'était pas perçue comme un enjeu sur ce territoire. Leur inclusion dans la co-construction d'une base de données plus large, incluant d'autres aspects environnementaux déjà portés par l'agence d'urbanisme sur place, a permis l'appropriation de ces questions climatiques par une institution à l'échelle locale.

La mise en place du réseau de mesures du climat urbain sur Toulouse Métropole (cf 2.1) a nécessité une interaction très proche entre le CNRM et Toulouse Métropole, afin d'identifier les besoins mais aussi les directions administratives ayant les compétences pour porter le projet et créer ainsi la gouvernance du réseau au sein de la collectivité (ce réseau étant propriété de celle-ci). D'un point de vue scientifique, ceci a permis l'analyse en pratique de la méthodologie de co-construction avec un acteur territorial du développement d'un service climatique urbain (Dumas et al 2021), et d'interpréter ce que sous-entendent ou requièrent les étapes du schéma produit dans le guide de l'OMM. Cette expérience pourrait aider à concevoir une nouvelle offre de service climatique basée sur un réseau de mesures de stations météorologiques en ville, avec d'autres acteurs éventuellement (tels que le CEREMA). Des villes telles que Grenoble ou La Rochelle viennent de lancer des appels d'offres pour la réalisation de tels réseaux d'une part et de l'analyse de l'ICU sur leur territoire d'autre part.

Enfin, il est concevable d'aller jusqu'à des outils d'aide à la décision pour les acteurs urbains. Ces travaux ne sont pas portés directement par le CNRM, mais l'on peut noter que dans le projet H2C, l'Office Régional de la Santé et l'Institut Paris Région (agence d'urbanisme d'Ile de France) visent in fine à produire un tel outil pour prendre en compte les questions d'impacts sanitaires dans les aspects long-terme d'aménagement et de planification urbaine.

---

<sup>6</sup> <https://librairie.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/3889-kit-des-donnees-cles-de-l-adaptation.html>



Source : Mhedhbi 2021

Figure 18 exemple de transferts vers les acteurs urbains : à gauche : fiche outil sur où prendre en compte les problématiques de climat urbain dans les documents réglementaires, ici le Plan Local d'Urbanisme (intercommunal) (projet MAPUCE); à droite : analyse cartographique du climat urbain de Tunis, à partir de simulations MesoNH à 250m (source : thèse de Z. Mhedhbi, simulations de C. de Munck, CNRM).

## 6) Conclusions

Malgré leurs forts enjeux, les villes sont encore très peu prises en compte par les SMN. Météo-France dispose d'une forte expertise sur le sujet, depuis les années 2000 qui lui a permis d'être le premier SMN à utiliser opérationnellement un modèle de prévision urbanisé sur l'ensemble de son territoire. La plupart des SMN ont commencé à développer des modèles de canopée urbaine pour leurs systèmes, susceptibles d'être déployés dans les prochaines années.

Le CNRM, un des laboratoires leader sur la thématique en climat urbain, continue à avancer sur les études de processus liant ville, météorologie locale, aérosols, et ses impacts. In fine, ceci permet d'améliorer leur modélisation, TEB et la représentation du climat urbain dans les modèles atmosphériques, pour ses usages en prévision numérique du temps pour l'étude du changement climatique et de ses impacts. Cette démarche permet aussi de concevoir des services météorologiques et climatiques urbains, répondant aux besoins des acteurs urbains. Ces travaux contribuent à développer des services que Météo-France peut proposer en réponse aux multiples besoins sur ce sujet.

Les trois actions phares d'études et de recherche en climat urbain des prochaines années sont :

- le RDP « Paris 2024 Olympics », qui permettra à la communauté internationale d'avancer collectivement sur la résolution hectométrique en ville
- la campagne de mesures « Paris 2022 », mutualisant les efforts d'observation et d'analyse de processus sur le climat urbain et la qualité de l'air, à différentes échelles,
- le projet « Heat and Health in Cities », qui permettra de mieux comprendre les interactions au sein de la couche limite urbaine, y compris les effets radiatifs des aérosols, et les impacts sanitaires à échelle communale en période de canicule

L'intérêt des données d'opportunité pour la caractérisation de l'ICU semble se confirmer, et leur potentiel va être exploré via l'IA pour améliorer les prévisions AROME, par fusion de données, avec à terme l'objectif d'assimilation de données. Il convient donc d'étudier la possibilité d'acquérir de telles données de façon régulière, en particulier les données de véhicules connectés et celles de capteurs personnels pour des exploitations opérationnelles. De plus, l'opportunité du déploiement par Météo-France de stations « urbaines » dans plusieurs villes est à explorer, afin de quantifier l'ICU sur plusieurs villes, à l'instar de l'initiative récente du DWD. Ces données serviraient de référence pour les données opportunes, et constitueraient une vitrine des services climatiques urbaines que pourrait proposer l'établissement.

Les interactions entre les services de Météo-France doivent être renforcées afin de développer et renforcer les services météorologiques ou climatiques pouvant être fournis aux collectivités et aux villes, que ce soit pour des produits d'alerte ou pour la planification urbaine.

Au niveau national, Météo-France dans sa Stratégie Scientifique 2020-2030, l'INSU dans son document de prospective, et d'autres organismes mettent la ville parmi leurs objectifs principaux. Lors du Comité Inter-Organisme organisé par l'INSU le 2 avril 2021, il a été convenu de mettre en place une réflexion pour structurer un chantier sur la ville, dans lequel l'ensemble des acteurs, dont ceux du CNRM auront leur place.

Enfin, Météo-France, et le CNRM en particulier, a vocation à continuer sa collaboration avec le CEPMMT et les partenaires ACCORD sur la météorologie urbaine, et contribuer à DestinE sur les aspects urbains avec TEB. TEB est le modèle de canopée urbaine qui présente actuellement le plus de paramétrisations de processus. Toutes ces paramétrisations sont



essentielles à terme dans un Système-Terre qui envisage de représenter les zones urbaines sous forme d'un « système ville » complexe, et les impacts et vulnérabilités associés.

## 7) Annexes

### 7.1) Contributions de Météo-France sur la « ville » aux instances internationales

OMM :

- WWRP/Nowcasting and Mesoscale Research WG : Valéry Masson
- SERCOM/WG on Integrated Urban Services : Valéry Masson
- GEWEX/GLASS (jusque début 2021) : Aude Lemonsu

AMS :

- AMS, Board on the Urban Environment: Valéry Masson

Société savante:

- International Association on Urban Climate (2012-2018) ; membres du bureau : Valéry Masson ; Aude Lemonsu

### 7.2) Projets de recherche en cours ou acceptés

Acronyme	Type	Porteur	Thème (pour équipe VILLE)	Dates
H2C	ANR	CNRM	Heat & Health in Cities	2021-2025
COOL-AMMetropolis	ANR	IMBE	Simuls MesoNH couche limite Marseille	2019-2024
URCLIM	EU-Era4cs	CNRM	Services climatiques, données urbaines et descente d'échelle	2017-2021
GreenHeart	EU-LIFE	Toulouse Métropole	MesoNH-IBM et Influence de la création d'un parc urbain	2019-2024
MODRADURB	Ademe	CNRM	Amélioration rayonnement TEB	2020-2022
IDEFESE	Ademe	CIREN	Services écosystémiques	
PAENDORA	Ademe	CNRM	Données urbaines & urbanisme	2017-2020
RESILIANCE	Ademe	Mines-Paritech	Changement climatique et conso	2021-2023
Convention Services Climatiques	MTES	IPSL	Impact de scénarios urbain sur Paris lors de canicules	2018-2021
PROCORE	M aff. étr.	CNRM	Simulations sur HK et impact de scénarios d'aménagement	2019-2021
MORPHEE	EC2CO	CNRM	Hydrologie urbaine	2019-2021
RDP Paris 2024	OMM	CNRM	Prévision du temps en ville à 100m	2020-2024

### 7.3) Références

- ADEME, 2020: Kit des données clés de l'adaptation. <https://bibliothèque.ademe.fr/changement-climatique-et-energie/3889-kit-des-donnees-cles-de-l-adaptation.html>
- Auguste F., G. Réa, R. Paoli, C. Lac, V. Masson and D. Cariolle, 2019: Implementation of an Immersed Boundary Method in the Meso-NH model: Applications to an idealized urban-like environment, *Geoscientific Model Development*, 12, 2607–2633, doi:10.5194/gmd-12-2607-2019
- Basara J. B. and coauthors, 2011: The Oklahoma City Micronet, *Meteorological Applications*, 18, 252:261.
- Bocher, E., Petit, G., Bernard, J., Palominos, S., 2018. A geoprocessing framework to compute urban indicators: the MApUCE toolschain. *Urban Clim.* 24, 153–174. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2018.01>.
- Bueno, B., Pigeon, G., Norford, L. K., Zibouche, K., & Marchadier, C. (2012). Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme. *Geoscientific Model Development*, 5(2), 433–448. doi:10.5194/gmd-5-433-2012
- Bruse M, Fleer H (1998) Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three-dimensional numerical model. *Environ Model Softw* 13:373–384
- Calvet, J.-C., Rivalland, V., Picon-Cochard, C., Guehl, J.-M., r2994 : Modelling Forest transpiration and CO2 fluxes – response to soil moisture stress. *Agric. For. Meteorol.* 124 (3–4), 143–1
- Chapman L, Muller CL, Young DT, Warren EL, Grimmond CSB, et al. 2015. The Birmingham UrbanClimate Laboratory: an open meteorological test bed and challenges of the smart city. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 96(9):1545–60
- Dahech Salem, Sami Charfi et Malika Madelin, 2020, Représentativité des températures mesurées dans la station météorologique Paris-Montsouris, *Climatologie*, 17 (5) DOI: <https://doi.org/10.1051/climat/202017005>
- Daniel M., A. Lemonsu, M. Déqué, S. Somot, A. Alias, V. Masson (2019) : Benefits of explicit urban parameterization in regional climate modeling to study climate and city interactions, *Climate dynamics*, 52 (5-6), 2745-2764, 52:2745–2764 doi: 10.1007/s00382-018-4289-x
- De Munck C. A. Lemonsu, R. Bouzouidja, V. Masson, R. Claverie, 2013a: "The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB", *Geoscientific Model Development*, 6, 1941-1960, doi:10.5194/gmd-6-1941-2013
- De Munck C., Pigeon G., Masson V., Meunier F., Bousquet P., Tréméac B., Merchat M., Poeuf P., Marchadier C., 2013b: "How much air conditioning can increase air temperatures for a city like Paris (France) ?", *International Journal of Climatology*, 33, 210–227, DOI: 10.1002/joc.3415
- De Munck, C., A. Lemonsu et V. Masson 2019: Urbanisme : connaissances, dans « Des solutions Fondées sur la Nature pour s'adapter au changement climatique », rapport au premier ministre et au parlement, édition La documentation française, 133-143
- De Vos, L., A. Droste, M. Zander, A. Overeem, H. Leijnse, B. Heusinkveld, G. Steeneveld, and R. Uijlenhoet, 2020: Hydrometeorological monitoring using opportunistic sensing networks in the Amsterdam metropolitan area. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101 (2), E167–E185.
- Dumas G., J. Hidalgo, V. Masson, G. Louit, V. Edouart, A. Hanna, G. Poujol, J. Barrié (2021): A real-time atmospheric measurement network: The first phase of urban climate services in Toulouse, *Climate Services*, en revision.
- Foissard, X., Dubreuil, V., et Quénel, Hervé. Defining scales of the land use effect to map the urban heat island in a mid-size European city: Rennes (France). *Urban Climate*, 2019, vol. 29, p. 100490.
- Fournier, R. et al. (2016), *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01706727>
- Gardes T., R. Schoetter, J. Hidalgo, N. Long, V. Masson 2020: Statistical prediction of the nocturnal urban heat island intensity based on urban morphology and geographical factors - An investigation based on numerical model results for a large ensemble of French cities, *Science of the total environment*, 737, 139253, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139253
- Garuma GF. 2018. Review of urban surface parameterizations for numerical climate models. *Urban Clim.* 24:830–51
- Goret M., V. Masson, R. Schoetter and M.-P. Moine, 2019: Inclusion of a CO2 flux modeling in an urban canopy layer model and evaluation over an old European city center, *Atmospheric environment*, X, 3, 100042, doi: 10.1016/j.aeoa.2019.100042

- Grimmond C.S.B., M. Blackett, M. Best, J. Barlow, J.-J. Baik, S. Belcher, S.I. Bohnenstengel, I. Calmet, F. Chen, A. Dandou, K. Fortuniak, M.L. Gouvea, R. Hamdi, M. Hendry, H. Kondo, S. Krayenhoff, S.-H. Lee, T. Loridan, A. Martilli, V. Masson, S. Miao, K. Oleson, G. Pigeon, A. Porson, F. Salamanca, L. Shashua-Bar, G.-J. Steeneveld, M. Tombrou, J. Voogt, and N. Zhang 2011 : The international urban energy balance models comparison project : Initial results from Phase 2. *International Journal of Climatology*. 31(2), 244-272. doi: 10.1002/joc.2227
- Grimmond C.S.B. , M. Blackett, M. Best, J. Barlow, J.-J. Baik, S. Belcher, S.I. Bohnenstengel, I. Calmet, F. Chen, A. Dandou, K. Fortuniak, M.L. Gouvea, R. Hamdi, M. Hendry, H. Kondo, S. Krayenhoff, S.-H. Lee, T. Loridan, A. Martilli, V. Masson, S. Miao, K. Oleson, G. Pigeon, A. Porson, F. Salamanca, L. Shashua-Bar, G.-J. Steeneveld, M. Tombrou, J. Voogt, and N. Zhang 2010 : The international urban energy balance models comparison project : First results from Phase 1. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 49, 1268-1292
- Grimmond S., V. Bouchet, L. Molina, A. Baklanov, J. Tan, K. H. Schlunzen, G. Mills, B. Golding, V. Masson, C. Ren, J. Voogt, S. Miao, H. Lean, B. Heusinkveld, A. Hovespyan, G. Terrugi, P. Parrish, P. Joe (2020): Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environmental Services: Concept, Methodology and Key Messages, *Urban Climate*, 33, 100623, doi:10.1016/j.uclim.2020.100623
- Grosdemouge Virginie 2020: Proposition d'indicateurs de confort thermique et estimation de la température radiante moyenne en milieu urbain tropical, thèse de l'université de la Réunion.
- Hamdi, R., Degrauwe, D., & Termonia, P. (2012). Coupling the Town Energy Balance (TEB) Scheme to an Operational Limited-Area NWP Model: Evaluation for a Highly Urbanized Area in Belgium. *Weather and Forecasting*, 27(2), 323–344. doi:10.1175/WAF-D-11-00064.1
- Haouès-Jouve S, Lemonsu A, Gauvreau B, Amossé A, Can A, Carissimo B, Gaudio N, Hidalgo J, Lopez-Rieux CX, Chouillou D, Richard E, Adolphe L, Berry-Chikhaoui I, Bouyer J, Challéat S, de Munck C, Dorier E, Guillaume G, Hoonaeert S, Le Bras J, Legain D, Levy J-P, Masson V, Marry S, Nguyen-Luong D, Rojas Arias J-C, Gao Z (2020) EUREQUA project: an interdisciplinary and participative approach to assess urban environmental quality. *Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science*, en révision.
- Hendel, M., Gutierrez, P., Colombert, M., Diab, Y., Royon, L., 2016. Measuring the effects of urban heat island mitigation techniques in the field: application to the case of pavement-watering in Paris. *Urban Clim*. 16, 43-58
- Hidalgo J, Jougla R (2018) On the use of local weather types classification to improve climate understanding: an application on the urban climate of Toulouse. *PLoS One* 13(12):e0208138. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208138>
- Hidalgo J, Masson V, Baehr C (2014) From daily climatic scenarios to hourly atmospheric forcing fields to force soil–vegetation–atmosphere transfer models. *Front Environ Sci* 2:40. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00040>
- Hogan, R. J. (2019) An exponential model of urban geometry for use in radiative transfer applications. *Boundary-Layer Meteorology*, 170 (3). pp. 357-372. ISSN 0006-8314
- Howard L. 1818. *The Climate of London*. London: W. Phillip
- Huang Q, Lu Y. 2018. Urban heat island research from 1991 to 2015: a bibliometric analysis. *Theor. Appl. Climatol*. 131:1055–6
- Järvi, L., Nordbo, A., Junninen, H., Riikonen, A., Moilanen, J., Nikinmaa, E., Vesala, T., 2012. Seasonal and annual variation of carbon dioxide surface fluxes in Helsinki, Finland, in 2006–2010. *Atmos. Chem. Phys.* 12
- Ketterer C, Matzarakis A. 2014. Human-biometeorological assessment of the urban heat island in a city with complex topography—the case of Stuttgart, Germany. *Urban Clim*. 10(3):573–8
- Konstantinov P, Varentsov M, Esau I. 2018. A high density urban temperature network deployed in several cities of Eurasian Arctic. *Environ. Res. Lett.* 13:075007
- Kusaka H, Kondo H, Kikegawa Y, Kimura F (2001) A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: comparison with multi-layer and slab models. *Bound-Layer Meteorol* 101: 329–358
- Kusaka H, Hara M, Takane Y. 2012. Urban climate projection by the WRF Model at 3-km horizontal grid increment: dynamical downscaling and predicting heat stress in the 2070's August for Tokyo, Osaka, and Nagoya metropolises. *J. Meteorol. Soc. Jpn. Ser. II* 90B:47–63
- Laaidi K., Zeghnoun A., Dousset B., Bretin P., Vandentorren S., Giraudet E., Beaudou P. (2012) The impact of heat islands on mortality in Paris during the August 2003 heat wave. *Environ. health perspectives*, 120(2):254-9.

- Lac C., J.-P. Chaboureau, V. Masson, J.-P. Pinty, P. Tulet, J. Escobar, M. Leriche, C. Barthe, B. Aouizerats, C. Augros, P. Aumond, F. Auguste, P. Bechtold, S. Berthet, S. Bielli, F. Bosseur, O. Caumont, J.-M. Cohard, J. Colin, F. Couvreux, J. Cuxart, T. Dauhut, G. Delautier, V. Ducrocq, J.-B. Filippi, D. Gazen, O. Geoffroy, F. Gheusi, R. Honnert, J.-P. Lafore, C. Lebeaupin Brossier, Q. Libois, T. Lunet, C. Mari, T. Maric, P. Mascart, M. Mogé, G. Molinié, O. Nuissier, F. Pantillon, P. Peyrillé, J. Pergaud, E. Perraud, J. Pianezze, J.-L. Redelsperger, D. Ricard, E. Richard, S. Riette, Q. Rodier, R. Schoetter, L. Seyfried, J. Stein, K. Suhre, O. Thouron, S. Turner, A. Verrelle, B. Vié, F. Visentin, V. Vionnet, P. Wautel (2018): Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications, *Geoscientific Model Development*, 11, 1929-1969, doi: 10.5194/gmd-11-1929-2018
- Lemonsu, A., Belair, S., & Mailhot, J. (2009). The New Canadian Urban Modelling System: Evaluation for Two Cases from the Joint Urban 2003 Oklahoma City Experiment. *Boundary-Layer Meteorology*, 133(1), 47–70. doi:10.1007/s10546-009-9414-2
- Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., & Pearlmutter, D. (2012). Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geoscientific Model Development*, 5(6), 1377–1393. doi:10.5194/gmd-5-1377-2012
- Lemonsu, A., S. Bastin, V. Masson, and P. Drobinski, 2006 : Vertical Structure of the Urban boundary layer over Marseille under sea breeze condition. *Boundary-Layer Meteorol.*, 118, 477-501
- Lemonsu, A., Amossé, A., Chouillou, D. et al. Comparison of microclimate measurements and perceptions as part of a global evaluation of environmental quality at neighbourhood scale. *Int J Biometeorol* 64, 265–276 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01686-1>
- Le Roy B., A. Lemonsu, R. Jounkou-Arnaud, D. Brion, V. Masson (2020): Long time series spatialized data for urban climatological studies: case study of Paris' city, France, *International Journal of Climatology*, 40(7), 3567-3584, doi:10.1002/joc.6414
- Le Roy, B., Lemonsu, A., & Schoetter, R. (2021). A statistical–dynamical downscaling methodology for the urban heat island applied to the EURO-CORDEX ensemble. *Climate Dynamics*, 1-22.
- Liang, X., Miao, S., Li, J., Bornstein, R., Zhang, X., Gao, Y., et al. (2018). SURF: Understanding and predicting urban convection and haze. *Bulletin Of The American Meteorological Society*, 99, 1391-1413. doi:10.1175/BAMS-D-16-0178.1
- Liu J, Niyogi D. 2019. Meta-analysis of urbanization impact on rainfall modification. *Sci. Rep.* 9:7301
- Malevich SB, Klink K. 2011. Relationships between snow and the wintertime Minneapolis Urban Heat Island. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 50:1884–9436.
- Maronga, B.; Gross, G.; Raasch, S.; Banzhaf, S.; Forkel, R.; Heldens, W.; Kanani-Sühring, F.; Matzarakis, A.; Mauder, M.; Pavlik, D.; Pfafterott, J.; Schubert, S.; Seckmeyer, G.; Sieker, H.; Winderlich, K. (2019): Development of a new urban climate model based on the model PALM – Project overview, planned work, and first achievements. *Meteorologische Zeitschrift* Vol. 28 No. 2. DOI: 10.1127/metz/2019/0909
- Martilli A, Clappier A, Rotach MW. 2002. An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models. *Bound.-Layer Meteorol.* 104(2):261–30
- Masson V., 2000 : A Physically-based scheme for the Urban Energy Budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorol.*, 94, 357-397
- Masson V., P. Le Moigne, E. Martin, S. Faroux, A. Alias, R. Alkama, S. Belamari, A. Barbu, A. Boone, F. Bouyssel, P. Brousseau, E. Brun, J.-C. Calvet, D. Carrer, B. Decharme, C. Delire, S. Donier, K. Essaouini, A.-L. Gibelin, H. Giordani, F. Habets, M. Jidane, G. Kerdraon, E. Kourzeneva, M. Lafaysse, S. Lafont, C. Lebeaupin Brossier, A. Lemonsu, J.-F. Mahfouf, P. Marguinaud, M. Mokhtari, S. Morin, G. Pigeon, R. Salgado, Y. Seity, F. Taillefer, G. Tanguy, P. Tulet, B. Vincendon, V. Vionnet, and A. Voldoire, 2013: The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of Earth surface variables and fluxes, *Geoscientific Model Development*, 6, 929-960, doi:10.5194/gmd-6-929-2013
- Masson V., A. Lemonsu, J. Hidalgo, J. Voogt (2020a): Urban Climates and Climate Change, *Annual Review of Environment and Resources*, 45, 411-444, doi:10.1146/annurev-environ-012320-083623
- Masson V., W. Heldens, E. Bocher, M. Bonhomme, B. Bucher, C. Burmeister, C. de Munck, T. Esch, J. Hidalgo, F. Kanani-Sühring, Y-T Kwok, A. Lemonsu, J.-P. Lévy, B. Maronga, D. Pavlik, G. Petit, L. See, R. Schoetter, N. Tornay, A. Votsis, J. Zeidler (2020b): City-descriptive input data for urban climate models: Model requirements, data sources and challenges, *Urban Climate*, 31, doi:10.1016/j.uclim.2019.100536
- Masson V., E. Bocher, B. Bucher, Z. Chitu, S. Christophe, C. Fortelius, R. Hamdi, A. Lemonsu, A. Perrels, B. Van Schaeybroeck, B. Wichers Schreur, L. Velea, Y. Beddar, J.-C. Calvet, A. Delcloo, A. Druel, F. Duchêne, G. Dumas, J.

- Gautier, M. Goret, M. Horttanainen, R. Kouznetsov, A. Le Bris, S. Lecorre, B. Le Roy, Y. Palamarchuk, G. Petit, R. Ruuhela, O. Saranko, M. Sofiev, P. Siljamo, H. Van de Vyver, P. van Velthoven, A. Votsis (2020c): The Urban Climate Services URCLIM project, Climate Services, 20, 10.1016/j.cliser.2020.100194
- Masson V, Marchadier C, Adolphe L, Aguejdad R, Avner P, Bonhomme M, Bretagne G, Briottet X, Bueno B, de Munck C, Doukari O, Hallegatte S, Hidalgo J, Houet T, Le Bras J, Lemonsu A, Long N, Moine M-P, Morel T, Nologues L, Pigeon G, Salagnac J-L, Vigié V, Zibouche K (2014) Adapting cities to climate change : A systemic modelling approach. *Urban climate*, 10:407-429.
- Masson V., L. Gomes, G. Pigeon, C. Liousse, V. Pont, J.-P. Lagouarde, J. Voogt, J. Salmond, T. R. Oke, J. Hidalgo, D. Legain, O. Garrouste, C. Lac, O. Connan, X. Briottet, S. Lachérade, P. Tulet, 2008 : The canopy and aerosol particles interactions in toulouse urban layer (CAPITOU) experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3-4), 135-157
- Meier F, Fenner D, Grassmann T, Otto M, Scherer D. 2017. Crowdsourcing air temperature from citizen weather stations for urban climate research. *Urban Clim.* 19:170–9
- Meyer, D., R. Schoetter, S. Grimmond, A. Verrelle, M. Riechert, M. Tewari, M. Barlage, J. Dudhia, V. Masson et M. van Reeuwijk: WRF-TEB: implementation and evaluation of the coupled Weather Research and Forecasting (WRF) and Town Energy Balance (TEB) model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2019MS001961, doi:10.1029/2019MS001961
- Misumi, R., Shoji, Y., Saito, K., Seko, H., Seino, N., Suzuki, S., Shusse, Y., Hirano, K., Bélair, S., Chandrasekar, V., Lee, D., Pereira Filho, A. J., Nakatani, T., & Maki, M. (2019). Results of the Tokyo Metropolitan Area Convection Study for Extreme Weather Resilient Cities (TOMACS), *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(10), 2027-2041
- Napoly A, Grassmann T, Meier F, Fenner D. 2018. Development and application of a statistically-based quality control for crowdsourced air temperature data. *Front. Earth Sci.* 6:118
- Ng E, Ren C. 2015. *The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning*. Abingdon, UK: Routledge
- Oke TR, Mills G, Christen A, Voogt J. 2017. *Urban Climate*. Cambridge, UK: Cambridge Univ. Press
- Penazzi, L (2020). Construction d'une fonction de transfert par la méthode Monte Carlo Symbolique. Thesis. Univ. Toulouse III
- Pesaresi, M., Ehrlich, D., Ferri, S., Florczyk, A., Carneiro Freire Sergio, M., Halkia, S., Julea Andreea, M., Kemper, T., Soille, P., Syrris, V., 2016. Operating Procedure for the Production of the Global Human Settlement Layer from Landsat Data of the Epochs 1975, 1990, 2000, and 2014 (EUR-Scientific and Technical Research Reports). Publications Office of the European Union <https://doi.org/10.2788/2535>
- Pigeon G., K. Zibouche, B. Bueno, J. Le Bras, V. Masson, 2014 : Evaluation of building energy simulations with the TEB model against EnergyPlus for a set of representative buildings in Paris. *Energy and Buildings*, 76, 1–14, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.10.038
- Redon E., A. Lemonsu and V. Masson (2020): An urban trees parameterization for modelling microclimatic variables and thermal comfort conditions at street level with the Town Energy Balance model (TEB-SURFEX v8.0), *Geosci. Model Dev.*, 13, 385–399, doi: 10.5194/gmd-13-385-2020
- Redon E., A. Lemonsu, V. Masson, B. Morille and M. Musy (2017): Implementation of street trees in solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8.0, *Geoscientific Model Development*, 10, 385–411, doi:10.5194/gmd-10-385-2017
- Richard, Yves, Pohl, Benjamin, Rega, Mario, et al. Is Urban Heat Island intensity higher during hot spells and heat waves (Dijon, France, 2014–2019)? *Urban Climate*, 2021, vol. 35, p. 100747.
- Rodier Q., V. Masson, F. Couvreur and A. Paci (2017) : Evaluation of a Buoyancy and Shear based Mixing Length for a Turbulence Scheme, *Frontiers in Earth Science*, 5, 65, doi:10.3389/feart.2017.00065
- Riede, H., and Coauthors, 2019: Passenger car data—a new source of real-time weather information for nowcasting, forecasting, and road safety. *European Nowcastin Conference*, 24-26 April 2019, Madrid, Spain.
- Schoetter R., V. Masson, A. Bourgeois, M. Pellegrino, and J.-P. Lévy (2017): Parametrisation of the variety of human behaviour related to building energy consumption in TEB (SURFEX v. 8.2), *Geoscientific Model Development*, 10, 2801–2831, doi: 10.5194/gmd-10-2801-2017



- Schoetter, Y.-T. Kwok, C. de Munck, K. K. L. Lau, W. K. Wong, and V. Masson, 2020: Multi-layer coupling between SURFEX-TEB-V9.0 and Meso-NH-V5.3 for modelling the urban climate of high-rise cities, *Geoscientific Model Development*, 13, 5609–5643, doi: 10.5194/gmd-2020-190
- Shepherd JM. 2013. Impacts of urbanization on precipitation and storms: physical insights and vulnerabilities. In *Climate Vulnerability*, ed. R Pielke Sr., pp. 109–25. Oxford, UK: Academ
- Seity Y., P. Brousseau, S. Malardel, G. Hello, P. Bénard, F. Bouttier, C. Lac, V. Masson, 2011, The AROME-France convective scale operational model, *Monthly Weather Review*, 139(3), 976-991, doi: 10.1175/2010MWR3425.1
- Shepherd, J. M., H. Pierce, and A. J. Negri, 2002: Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite. *J. Appl. Meteorol.*, 41(7), 689–701
- Siems-Anderson, A., C. Walker, G. Wiener, W. Mahoney, and S. Haupt, 2019: An adaptive big data weather system for surface transportation. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 3, 100 071, doi:10.1016/j.trip.2019.100071.
- Skarbit, Nóra, Stewart, Iain D., Unger, János, et al. Employing an urban meteorological network to monitor air temperature conditions in the ‘local climate zones’ of Szeged, Hungary. *International Journal of Climatology*, 2017, vol. 37, p. 582-596.
- Stavropoulos-Laffaille X., K. Chancibault, A. Lemonsu, H. Andrieu, I. Calmet, V. Masson (2021): Coupling detailed urban energy and water budgets: Simulation of an urban catchment with TEB-Hydro model, *Urban Climate*, minor revisions
- Stewart, I. D., Oke, T. R., 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93, 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Theeuwes NE, Barlow JF, Teuling A, Grimmond CSB, Kotthaus S, et al. 2019. Persistent cloud cover over mega-cities linked to surface heat release. *NPJ Clim. Atmos. Sci.* 2:15
- Tornay N., R. Schoetter, M. Bonhomme, S. Faraut, A. Lemonsu and V. Masson (2017): GENIUS: A methodology to define a detailed description of buildings for urban climate and building energy consumption simulations, *Urban Climate*, 10, 75-93, doi:10.1016/j.uclim.2017.03.002
- Trimmel H., P. Weihs S. Faroux, H. Formayer P. Hamer Paul, K. Hasel J. Laiminghofer, D. Leidingger David Leidingger David Leidingger David Leidingger D, V. Masson, I. Nadeem I, S. Oswald, M. Revesz, R. Schoetter, 2020: Thermal comfort during heat waves in future Vienna, *Meteorologische Zeitschrift*, doi:10.1127/metz/2019/0966
- Varentsov M, Wouters H, Platanov V, Konstantinov P. 2018. Megacity-induced mesoclimatic effects in the lower atmosphere: a modelling study for multiple summers over Moscow, Russia. *Atmosphere* 9:50
- Viguié V, Lemonsu A, Hallegatte S, Beaulant A-L, Marchadier C, Masson V, Piegon G, Salagnac J-L (2020) Early adaptation to heat waves and future reduction of air-conditioning energy use in Paris. *Environmental Research Letters*, 15 075006.
- World Meteorol. Organ. (WMO). 2019. *Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environmental Services, Vol.1: Concept and Methodology*. Geneva: WMO. [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=9903](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=9903)
- World Meteorol. Organ. (WMO). 2021. *Guidance on Integrated Urban Hydrometeorological, Climate and Environmental Services, Vol.2: Demonstration Cities*. Geneva: WMO. [https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice\\_display&id=21855#.YHlgYx3grUI](https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21855#.YHlgYx3grUI)