

# 1 - MODÉLISER LA VILLE

## DE LA MÉTÉO AU CLIMAT



© Pascal Taburet/Météo-France

### ◆ ENJEUX

Mieux connaître le climat de la ville permet d'affiner des stratégies d'adaptation au changement climatique.

### ◆ FOCUS

Le microclimat urbain reproduit dans les laboratoires de Météo-France.

Tous les deux mois, ce cahier spécial vous permet de comprendre les enjeux de la recherche sur la prévision du temps et du climat. Il est réalisé avec le soutien des chercheurs de Météo-France.



**MÉTÉO FRANCE**  
Toujours un temps d'avance



## Et pour quelques degrés de moins...

En ville, il fait plus chaud qu'ailleurs, et la tendance va s'amplifier dans les prochaines décennies. Pour y faire face, l'expertise scientifique des météorologues est devenue indispensable.

### 80 %

de la population des pays développés vit en ville. Dans le monde, le taux d'urbanisation atteint près de 50 %.

Et si une forte montée de mercure avait servi de catalyseur ? En 2003, les températures estivales atteignent des records dans toute l'Europe, notamment pendant les deux premières semaines d'août. Rien de semblable n'a été enregistré depuis 1950. Dans les villes, on étouffe, aux sens propre et figuré : la chaleur excessive est à l'origine d'un pic de surmortalité inhabituel. 70 000 personnes décèdent entre juin et août, dont près de 15 000 personnes en France. « Cette canicule a été un événement déclencheur pour que les villes envisagent des stratégies d'adaptation aux problèmes liés au climat », commente Valéry Masson, chercheur au Centre national de recherches météorologiques (CNRM, Météo-France/CNRS). Elles ont aujourd'hui besoin d'outils pour évaluer les futures formes d'aménagement urbain. » Pour les aider, Météo-France élabore depuis quinze ans des modèles

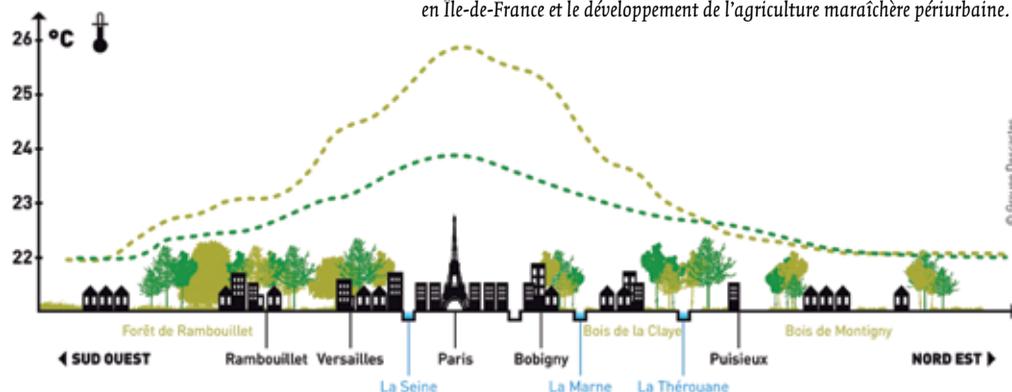
de prévision du temps uniquement consacrés au milieu urbain. Car, au-dessus des agglomérations, les processus météorologiques à l'œuvre sont particuliers et complexes. La géométrie tridimensionnelle de la ville, la superficie importante de matériaux artificiels et la raréfaction de la végétation ont un impact visible sur l'atmosphère environnante : dans une ville, il fait « naturellement » quelques degrés de plus que dans une zone moins densément peuplée – ce phénomène, qui persiste la nuit, a été baptisé « îlot de chaleur » (voir encadré page 57). Afin de quantifier ces degrés supplémentaires, il fallait prendre en compte les multiples éléments urbains interagissant avec l'atmosphère. C'est à ce travail de bénédictin que se sont attelés Valéry Masson et son équipe du CNRM, pour aboutir au modèle numérique Town Energy Balance (voir focus p. 59).

## L'îlot de chaleur urbain

Des toitures végétalisées, pour remplacer le zinc et l'ardoise, et des jardins à étages, pour accueillir de nouvelles activités urbaines : voilà l'une des propositions faites par le collectif « et alors », dans son projet « + 2°C... Paris s'invente ! » (dont cette image est extraite).

© Yannick Gourville, Cécile Leroux, et alors/www.etalors.eu

Résultats du Grand Paris (groupe Descartes). La courbe vert clair représente la température pour l'agglomération parisienne actuelle. La courbe vert foncé représente la température atteinte après la reforestation (+30 % de forêts) en Île-de-France et le développement de l'agriculture maraîchère périurbaine.



### ◆ Quelle est l'origine de ce phénomène microclimatique ?

Dès 1820, le pharmacien et météorologiste britannique Luke Howard avait remarqué que les températures à Londres étaient bien plus élevées que dans les banlieues, où il faisait aussi plus chaud que dans les campagnes avoisinantes. Aujourd'hui, les météorologues ont caractérisé ce phénomène, baptisé « îlot de chaleur urbain ». Cet écart de température entre la ville et la campagne dans une même région est le plus marqué la nuit. Contrairement à une idée répandue, il n'est dû ni à la pollution ni au  $\text{CO}_2$  ! En journée, alors qu'à la campagne l'énergie du soleil est utilisée pour l'évaporation de l'eau du sous-sol par les plantes, les surfaces urbaines, elles (toits, murs, bitume, etc.) reçoivent le rayonnement solaire et l'emmagasinent. En fin de journée, elles commencent à restituer l'énergie stockée, ce qui limite le rafraîchissement de l'air en ville pendant la nuit. Le chauffage en hiver participe aussi en partie à l'îlot de chaleur. Pour quantifier les divers processus en jeu, Météo-France a récolté des données pendant un an à Toulouse (projet Capitoul). Au plus fort, l'écart de température entre une grande agglomération et la campagne, pendant la nuit, peut aller jusqu'à 10 °C !

# 5 °C

C'est la différence de température observée dans l'agglomération parisienne pendant l'été 2003, entre les zones les plus denses (2<sup>e</sup>, 3<sup>e</sup>, 9<sup>e</sup> et 10<sup>e</sup> arrondissements) et les zones plus vertes, comme le bois de Boulogne et le bois de Vincennes.

**Des canicules plus fréquentes.** Mais au microclimat s'ajoute désormais le grand scénario du changement climatique. Et là, avec une hausse globale des températures d'au moins 2 °C, les villes vont avoir encore plus chaud. « Les températures maximales vont augmenter plus que les températures minimales, estime Julien Desplat, ingénieur Études et Climatologie à Météo-France. À Paris, les jours de canicule seront plus fréquents d'ici à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle ; il y en aura en moyenne 15 en ville, contre 6 en dehors. » Dans d'autres villes, ce ne seront pas la chaleur et la sécheresse qui vont poser problème, mais la hausse du niveau des mers, des ouragans à répétition ou des crues éclair à la suite de fortes précipitations. Pendant ce temps-là, l'urbanisation va se poursuivre.

Dans les villes en expansion, comment optimiser les aménagements pour limiter les effets du réchauffement ? À Paris, la priorité est au rafraîchissement pendant l'été, afin que ses habitants, qui ne sont pas habitués aux grandes chaleurs, ne soient pas soumis à un fort stress thermique. Première solution, déjà largement appliquée à travers le monde : la climatisation. Mais elle a un second effet, bien moins rafraîchissant, comme l'explique Valéry Masson : « Avec le projet Clim2, nous avons étudié l'impact des différentes solutions de climatisation sur l'agglomération parisienne lors d'un épisode de canicule similaire à celui

de 2003 : les climatiseurs individuels qui rejettent leur chaleur directement dans l'air extérieur et les tours aéroréfrigérantes qui, elles, réchauffent peu l'atmosphère. Résultat : l'utilisation combinée de ces deux systèmes dans les grands immeubles augmente la température de l'air dans les rues de 0,5 °C. Si par contre d'ici à dix ans on n'installait que des climatiseurs individuels, l'augmentation de température monterait à 2 °C. » Et l'on tomberait alors dans un cercle vicieux : l'air chaud extérieur incite à climatiser, les climatiseurs rejettent la chaleur, ce qui réchauffe encore plus l'air au dehors.

**Transformer la ville.** Cependant, la solution à long terme consiste à voir les choses en grand, à l'échelle de toute une ville, qu'il faut aménager, transformer pour qu'elle produise et retienne moins de chaleur dans ses rues. Le projet devient plus complexe qu'une installation de climatiseurs. « Une ville est un ensemble qui réagit en cascade, souligne Valéry Masson. Dès que l'on touche à quelque chose, il y a des conséquences ailleurs. Par exemple, planter des arbres en ville est assez compliqué. Les riverains souhaitent qu'il y ait plus de végétation. Mais les endroits pour mettre les arbres sont limités car dans le sous-sol se trouvent les réseaux. Autre exemple : si les feuillus apportent de l'ombre en été, le ramassage des feuilles en automne est une contrainte pour la ville. » Chaquer inter- >>>



© Météo-France/Richard Patrick

### Valéry Masson

- 1992. Diplômé de l'École Polytechnique
- 1994. Diplômé de l'École nationale de météorologie
- Depuis 1997. Chercheur au Centre national de recherches météorologiques
- 2002. Validation de TEB
- Depuis 2007. Recherche sur l'adaptation des villes au changement climatique

## « Ce modèle était un travail pionnier dans le monde »

### Trois questions à Valéry Masson

#### ◆ Quand avez-vous commencé à étudier le climat urbain ?

À la fin des années 1990, le service régional de Météo-France à Paris s'intéressait à la question. Il existait des outils pour modéliser l'atmosphère, mais rien pour les surfaces. Nous avons imaginé cet outil, qui était un travail pionnier dans le monde et a été publié en 2000. Beaucoup d'autres ont suivi.

#### ◆ Comment avez-vous vu évoluer vos recherches ?

Il y a dix ans, on étudiait l'impact des villes sur la météo seulement pour les prévisions. Maintenant, notre modèle de ville est opérationnel et nous étudions les impacts urbains du réchauffement climatique. L'enjeu est devenu pluridisciplinaire: nous avons contacté des économistes, puis des spécialistes du bâtiment, des urbanistes, des chercheurs en sciences sociales, etc.

#### ◆ Quels sont les futurs paramètres que vous prendrez en compte dans votre modèle ?

Nous voulons quantifier divers impacts du réchauffement climatique: améliorer la prise en compte de la végétation urbaine, qui se limite aujourd'hui aux jardins; inclure les processus liés à l'hydrologie, notamment la perméabilité des réseaux dans le sous-sol; évaluer les usages des habitants, par exemple entre ceux qui utilisent des climatiseurs et ceux qui aèrent la nuit et ferment leurs volets le jour pour couper le soleil.

>>> action implique des domaines de compétences divers. Pour aménager la ville de demain, les projets d'aujourd'hui doivent être pluridisciplinaires. Des synergies se créent donc entre sociologues, géographes, urbanistes, économistes, professionnels du bâtiment et bien sûr climatologues. « Nous travaillons à l'échelle du siècle pour simuler les interactions entre trois éléments-clés: le climat de demain; l'évolution de la ville, qui se construit sur des décennies; et les modes de vie, qui évoluent sur plusieurs générations », précise Valéry Masson. Faut-il laisser les villes se construire

comme par le passé? Les densifier? Les verdier? Et dans ce cas, quelles approches choisir: les traditionnelles créations de parcs et de jardins, ou la multiplication de bâtiments végétalisés? Quid alors de la demande en eau? À Météo-France, plusieurs projets interdisciplinaires (*Muscade, Vurca, Acclimat*: plus d'informations sur [www.cnrmm.meteo.fr](http://www.cnrmm.meteo.fr)) visent ainsi à quantifier le confort et la consommation d'énergie de la ville, qui découleraient de diverses stratégies d'urbanisation. Une aide précieuse pour les aménageurs urbains.

**Trois couleurs.** Pour l'instant, c'est à Paris que ce genre d'étude a trouvé une application concrète. Valéry Masson et son équipe ont présenté leurs travaux à Yves Lion, l'un des architectes impliqués dans la consultation sur le Grand Paris. Une solution s'est imposée: il faut du vert, bien plus de vert, des couloirs forestiers entiers autour de la capitale pour que l'évaporation de l'eau des arbres puisse faire baisser les températures, aussi bien intra-muros qu'en banlieue. L'autre piste consiste à modifier les matériaux et revêtements en ville, afin qu'ils stockent moins de chaleur pendant la journée et, par conséquent, en émettent moins pendant la nuit. Pour cela, les surfaces claires, dont l'albédo\* est plus élevé que les surfaces sombres, sont à privilégier. Les pistes proposées par le projet EPICEA\*, lancé par Météo-France en 2008 après un appel à projet de la Ville de Paris et du Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), vont dans le même sens. Car l'agglomération, selon une prévision pessimiste, pourrait se retrouver sous le climat de Cordoue, au sud de l'Espagne. Julien Desplat, en charge du projet, donne les conclusions: « A la suite de notre étude, nous avons imaginé trois scénarios pour faire face au réchauffement: modifier les propriétés des surfaces réfléchissantes, qu'il faudrait éclaircir; introduire plus de végétation, sur les toits et les murs notamment; augmenter les surfaces aquatiques et humidifier les chaussées à différents moments de la journée, en chiffrant bien la consommation d'eau. Le meilleur scénario serait sans doute une combinaison des trois: un Paris blanc, vert et bleu. » •



### ALBÉDO

du latin *albedo*, « blancheur ». Pouvoir réfléchissant d'une surface. Plus il est élevé, plus la surface réfléchit le rayonnement qu'elle reçoit et moins elle s'échauffe au soleil. Plus une surface sera claire, plus son albédo sera élevé.

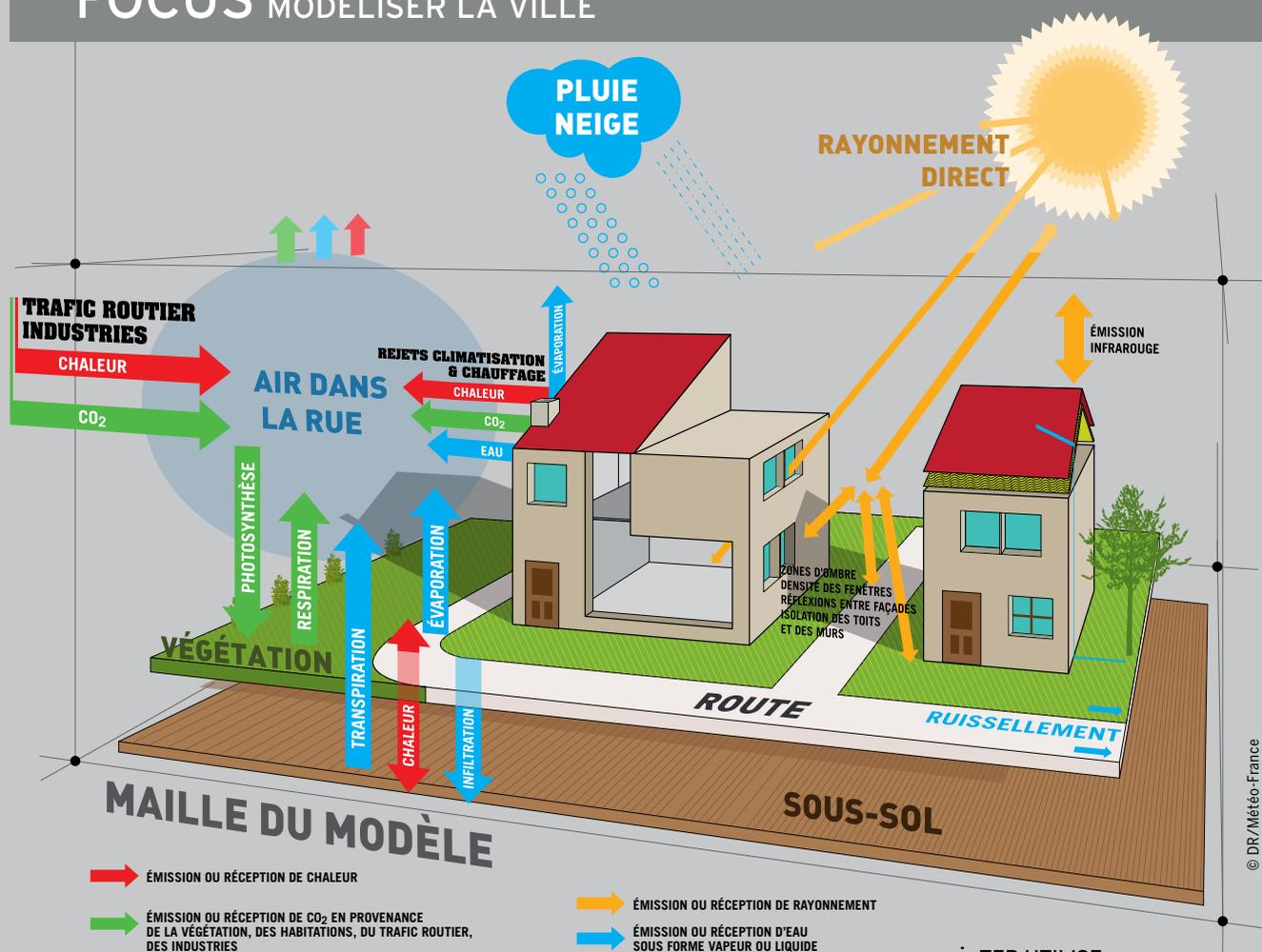


### EPICEA

Étude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'échelle de l'Agglomération parisienne, avec un objectif triple: quantifier l'évolution du climat parisien à l'horizon 2100, identifier les arrondissements les plus vulnérables dans le contexte de la canicule 2003 et évaluer l'impact sur la météo urbaine de scénarios d'adaptation de la Ville de Paris. Ce projet est mené avec la collaboration de l'Agence Parisienne du Climat, association multipartenariale créée à l'initiative de la Ville de Paris, qui met à disposition des Parisiens des outils opérationnels et gratuits pour limiter leur empreinte carbone ([www.apc-paris.com](http://www.apc-paris.com)).

### À RETENIR

- Si les scénarios pessimistes d'émissions de gaz à effet de serre se vérifient, un été sur deux serait similaire à celui de 2003 à l'horizon 2070.
- Météo-France a mis au point des outils de prévision du temps à l'échelle des villes vulnérables face au réchauffement climatique.
- Des solutions se dessinent grâce à des projets pluridisciplinaires.



## Le modèle Town Energy Balance

Pour un météorologue, une ville est un système complexe dans lequel chaque élément joue sur le climat local. Des arbres aux bâtiments, en passant par les chaussées ou le sous-sol, tout participe aux échanges d'eau et d'énergie entre la surface et l'atmosphère. Afin de reproduire ce microclimat, les chercheurs de Météo-France ont mis au point un modèle qui prend en compte les paramètres de surface ayant une influence significative sur l'atmosphère. Validé dans les années 2000, il porte le nom de TEB (Town Energy Balance) et,

selon les outils utilisés, peut atteindre une résolution de 250 mètres. À cette échelle-là, les échanges surface-atmosphère au niveau d'une rue peuvent être reproduits. «TEB est basé sur des lois physiques», explique Valéry Masson. Pour chaque maille du modèle, la ville est représentée par une rue-typique du quartier définie par sa largeur, la hauteur de ses immeubles, les matériaux utilisés pour le bâti, la couleur et l'isolation des toits et des façades, la proportion de fenêtres, etc. » La rue agit ainsi comme un canyon qui piège plus ou moins le rayonnement provenant

de l'atmosphère. TEB a déjà été testé dans une dizaine de villes du monde entier, Mexico, Ouagadougou, Vancouver, Paris, Nantes, ou encore Melbourne. Toutes ces agglomérations se situent sous des latitudes différentes, dans des milieux naturels variés, dont les échanges avec l'atmosphère sont eux aussi modélisés. Le couplage des données a abouti à une prévision du temps plus précise localement. Aujourd'hui, il est également devenu un excellent outil pour étudier les impacts du changement climatique dans les agglomérations. •

### TEB UTILISE

- le rayonnement venant du Soleil, qui dépend de la saison et de la couverture nuageuse;
- les précipitations (pluie, neige), la température, l'humidité, le vent à l'extérieur de la ville;
- la chaleur et le CO<sub>2</sub> issus du trafic routier, des industries, du chauffage.

### TEB CALCULE

- les températures des surfaces au fil des saisons (toits, routes, façades, etc.), la climatisation des immeubles;
- la quantité d'eau qui ruisselle, de la rue aux toits, l'épaisseur de la neige;
- la quantité de CO<sub>2</sub> qui retourne vers l'atmosphère;
- le microclimat dans les rues, le confort climatique des habitants.

• Comité éditorial :  
Directions de la Recherche et de la Communication de Météo-France  
• Rédaction : Myriam Détruy  
• Conception graphique et réalisation : A noir.