

PROGRAMME DE RECHERCHE « PARIS 2030 »  
APPEL A PROJETS 2007 DE LA VILLE DE PARIS



Projet **EPICEA**  
2008-2012

Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à  
l'Echelle de l'Agglomération parisienne



*Rapport final du projet*  
Octobre 2012

Rapports complets disponibles sur le site web du projet :  
<http://www.cnrm-game.fr/projet/epicea>

Acteurs du projet :



Partenaires :



## SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Impact du changement climatique sur l'agglomération parisienne</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>Méthodologie</b>	<b>3</b>
2.1.1	Le modèle ARPEGE-Climat	3
2.1.2	Les scénarios d'émission	3
2.1.3	Techniques de descente d'échelle	4
2.1.4	Le modèle TEB	4
<b>2.2</b>	<b>Evolution de la température sur la région parisienne</b>	<b>5</b>
2.2.1	Tendances générales	5
2.2.2	Températures hivernales	5
2.2.3	Températures estivales	6
<b>2.3</b>	<b>Îlots de chaleur urbain</b>	<b>7</b>
<b>2.4</b>	<b>Consommation énergétique</b>	<b>8</b>
<b>2.5</b>	<b>Conclusions</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Retour sur la canicule de l'été 2003 à Paris</b>	<b>9</b>
<b>3.1</b>	<b>Méthodologie</b>	<b>9</b>
3.1.1	Présentation des modèles utilisés	9
3.1.2	Base de données du couvert urbain parisien et caractéristiques thermiques des parois opaques du bâti parisien	10
<b>3.2</b>	<b>Résultats</b>	<b>10</b>
3.2.1	Bilan d'énergie	10
3.2.2	Analyse verticale de la température	11
3.2.3	Analyse de l'ICU	12
<b>3.3</b>	<b>Conclusions</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>Adaptation du territoire parisien au changement climatique</b>	<b>15</b>
<b>4.1</b>	<b>Présentation des scénarios</b>	<b>15</b>
4.1.1	Scénario réfléchissant (noté S1)	15
4.1.2	Scénarios de verdissement (notés S2 et S2bis)	15
4.1.3	Scénario d'humidification des chaussées (noté S3)	16
4.1.4	Scénario combinant les trois approches (noté Stot)	16
<b>4.2</b>	<b>Faisabilité des scénarios</b>	<b>17</b>
<b>4.3</b>	<b>Résultats</b>	<b>18</b>
4.3.1	Impacts sur la température à 2 m	18
4.3.2	Analyse verticale de la température	18
4.3.3	Analyse de l'ICU	19
4.3.4	Analyse spatiale de la température	21
<b>4.4</b>	<b>Conclusions</b>	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>Conclusions du projet</b>	<b>24</b>
<b>6</b>	<b>Références</b>	<b>27</b>

## 1 Introduction

---

La majeure partie de la population mondiale vit aujourd'hui en ville. Ces zones urbaines représentent une part économique fondamentale de nos sociétés en regroupant la grande majorité du capital (logements, distribution d'eau, infrastructures de transport, *etc.*), ce qui accroît les préoccupations sociétales, économiques et environnementales. Les projections climatiques issues des travaux du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) indiquent d'ici la fin du siècle à la fois un réchauffement climatique global et une probable augmentation de la fréquence et de l'intensité d'événements extrêmes.

Ces phénomènes affecteront le microclimat spécifique des villes : l'urbanisation influence la température, la circulation du vent, l'humidité proche de la surface, la fréquence d'apparition des phénomènes de brouillard et augmente la brise urbaine et la turbulence atmosphérique. Ainsi, l'îlot de chaleur urbain (ICU), caractéristique majeure du climat urbain (Oke 1987, Pigeon *et al.* 2008) qui désigne l'excès de la température de l'air que l'on observe régulièrement dans la canopée des zones urbaines par rapport aux zones rurales qui les entourent, pourrait s'ajouter à une augmentation de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur. En 2003, pendant l'épisode de canicule qui a touché l'Europe, la différence de température entre le centre de Paris et les zones rurales environnantes a atteint 8 °C (Météo-France). Ce signal se superpose à la tendance de grande échelle, renforçant ainsi localement l'effet du réchauffement global (Jones *et al.* 1990, Gaffin *et al.* 2008, Fujibe 2010). Les conséquences de l'amplification des événements extrêmes et de leur impact sur les villes peuvent être nombreuses et variées (Rosenzweig and Solecki 2001), en termes de gestion des infrastructures, ressources en eau, pollution, confort bioclimatique et santé publique, demande énergétique, *etc.* Les villes se retrouvent donc au cœur des problématiques liées au changement climatique, et, pour pouvoir les préparer à ce changement, il est nécessaire de s'interroger sur leur vulnérabilité et leur adaptation :

- Quels seront les effets locaux, sur une ville particulière, du changement climatique global ?
- Quel sera le microclimat dans une ville, éventuellement en expansion ?
- Quelle sera l'énergie nécessaire pour assurer le confort thermique des habitants ?
- Comment adapter la structure urbaine au changement climatique ?

Etant donné la durée nécessaire à l'évolution structurelle d'une ville, c'est dès à présent qu'il faut penser la ville de demain. Cette réflexion ne peut se faire que par une approche pluridisciplinaire associant urbanistes, architectes, climatologues, hydrologues, ingénieurs du bâtiment, économistes, sociologues, *etc.*, compte tenu des interactions complexes entre le changement climatique, l'évolution des villes et le mode de vie des habitants.

Le projet EPICEA (Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne) a été mené conjointement par Météo-France, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et la Ville de Paris pour apporter un éclairage scientifique et technique relativement aux décisions d'adaptation du territoire face au changement climatique. En réponse à l'appel à projets 2007 de la Ville de Paris, ce projet entre dans le cadre du Programme de Recherche « Paris 2030 », dont les résultats devraient apporter une contribution scientifique au processus de décision des élus et des directions de la Ville sur des questions à long terme. Au sein de ce programme, il s'intègre dans la thématique

de recherche Environnement/Cadre de vie, en grande partie dévolue aux questions d'aménagement urbain, de météorologie urbaine et des conséquences du réchauffement climatique.

L'objectif central du projet est de quantifier l'impact du changement climatique à l'échelle de l'agglomération parisienne et l'influence du bâti sur le climat urbain afin de proposer des stratégies d'adaptation.

Il est très difficile de prendre en compte les multiples processus qui entrent en jeu dans l'étude de l'impact du changement climatique à l'échelle de la ville. Actuellement, il n'existe pas d'étude portant sur l'évolution du climat local des villes françaises. On peut toutefois citer les travaux de Hallegatte *et al.* (2007) qui prévoient, à partir de l'analyse de projections climatiques régionales et par analogues climatiques, que Paris pourrait avoir à l'horizon 2100 un climat équivalent au climat actuel de Cordoue. Des projections du climat urbain futur ont été produites pour l'analyse de diverses problématiques, générales (sur Paris dans le cadre du premier volet du projet EPICEA : Lemonsu *et al.* 2012a, sur Delhi : Kikegawa *et al.* 2012, sur Nagoya : Iizuka *et al.* 2012, sur Cologne : Kossman *et al.* 2012 et Ptak et Halbig 2012) ou ciblées telles que l'occurrence d'événements chauds (Garcia Cueto *et al.* 2010, Früh *et al.* 2010) ou les ICU (Wilby 2003).

Une alternative aux projections du climat urbain futur est de s'intéresser à un événement exceptionnel survenu dans le passé sur la zone d'intérêt et dont la fréquence augmenterait sensiblement dans les décennies à venir. Les épisodes de vagues de chaleur en sont de très bons exemples. Les scientifiques s'accordent en effet sur le fait qu'un phénomène de type caniculaire comme lors de l'été 2003 pourrait concerner l'Europe de l'Ouest un été sur deux à la fin du siècle (IPCC 2007). La perspective d'un nouveau contexte climatique caractérisé par des canicules plus fréquentes et le souvenir récent de cet événement incitent donc à identifier quels paramètres pourraient avoir une influence sur les caractéristiques des ICU. De nombreuses études ont été menées sur différentes villes du monde, en analysant l'impact de la modification de l'albédo des surfaces, de la végétation (toitures végétalisées, murs végétaux, arbres dans la ville y compris les différentes essences possibles ou plus généralement végétation intégrée dans la ville), de la présence d'eau dans la ville, de la morphologie urbaine et des effets d'ombre dans la rue ou de la combinaison d'un ensemble de ces facteurs.

Le projet EPICEA aborde ces différents aspects en apportant également une aide à la prise de décision dans un contexte d'adaptation du territoire face au changement climatique. L'identification de paramètres urbains susceptibles d'agir sur le climat urbain (principalement l'ICU) puis leur modification dans le contexte météorologique de la canicule de l'été 2003 permet de donner des repères quant à leur impact sur le climat urbain et de déterminer ainsi des leviers d'action urbains.

Pour répondre à ces différentes problématiques, les travaux du projet EPICEA sont répartis en trois volets : (1) évolution du climat urbain parisien dans la perspective du changement climatique ; (2) étude particulière d'une situation extrême : la canicule de 2003, à l'échelle de l'agglomération parisienne ; (3) lien entre l'urbanisme et le climat urbain : stratégies d'adaptation du territoire parisien pour diminuer l'intensité de l'ICU et limiter les fortes températures.

## 2 Impact du changement climatique sur l'agglomération parisienne

Rapport complet du volet 1 : EPICEA-Rapport-Volet1\_def

Le volet 1 du projet EPICEA analyse l'effet du changement climatique sur la région parisienne en s'appuyant sur un modèle d'impact, le modèle de ville TEB, en mettant l'accent sur l'étude des interactions entre les effets locaux du changement global et les processus urbains tels que l'ICU.

### 2.1 Méthodologie

Des simulations numériques ont été réalisées sur la région parisienne. Elles utilisent un système de modélisation des surfaces continentales qui intègre un modèle urbain spécifique (Town Energy Budget, TEB, Masson 2000). Le système est forcé par des conditions météorologiques basées sur des réanalyses en climat présent (1971-2006) issues du système SAFRAN (Durand *et al.* 1993, 1999) (obtenues en combinant des archives de réanalyses globales issues du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT) et l'ensemble des observations des stations de surface disponibles dans la base de données climatologiques de Météo-France) et des projections climatiques (2072-2098) fournies par le modèle de climat ARPEGE-Climat suivant deux scénarios d'émission.

Dans cette première partie, la structure urbaine de Paris reste identique entre les périodes de référence 1971-2006 et future 2072-2098, dans le but de quantifier l'impact du changement climatique sans considérations d'adaptations ou d'évolutions. Le domaine de simulation couvre une région de 48 km par 48 km centrée sur Paris avec une résolution spatiale de 1 km.

#### 2.1.1 Le modèle ARPEGE-Climat

ARPEGE-Climat (Déqué *et al.* 1994) est le modèle global de climat de Météo-France, pris en compte dans les analyses du GIEC. Ce modèle permet de simuler les changements climatiques à partir des différents scénarios d'évolution des émissions anthropiques de gaz à effet de serre définis au plan international par le GIEC.

Il est utilisé ici dans sa version à résolution variable (Figure 1), ce qui permet d'avoir un maillage plus fin sur la région d'intérêt, ici l'Europe de l'ouest (typiquement 50 km contre 200 à 300 km aux antipodes) et donc de mieux représenter les événements climatiques dans cette région.

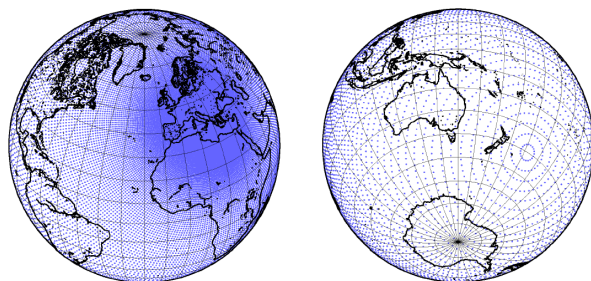


Figure 1 : Grille d'ARPEGE-Climat en version étirée sur l'Europe Occidentale et aux antipodes (d'après Déqué).

#### 2.1.2 Les scénarios d'émission

Les scénarios d'émission anthropique de gaz à effet de serre (GES) sont issus d'un rapport spécial du GIEC (IPCC 2000). Ils prennent en compte la démographie, les aspects socio-

économiques et les changements technologiques. Ils ont un impact direct sur l'évolution de la température en surface à l'échelle globale et les tendances de réchauffement global.

Le scénario A1B décrit une évolution du monde caractérisée par une croissance économique très rapide, une population mondiale en hausse jusqu'à la moitié du 21<sup>ème</sup> siècle et une introduction rapide de technologies nouvelles plus efficaces associées à un bon équilibre entre sources d'énergie fossiles et non fossiles. Ceci se traduit par une augmentation très rapide des températures dès le début du 21<sup>ème</sup> siècle (Figure 2), puis un fléchissement vers 2070. Le scénario A2, plus pessimiste, décrit une évolution vers un monde très hétérogène, associée à une augmentation continue de la population mondiale. Le réchauffement global est moins fort que pour A1B au cours de la première moitié du siècle, mais s'accélère pour atteindre des niveaux très élevés en 2100.

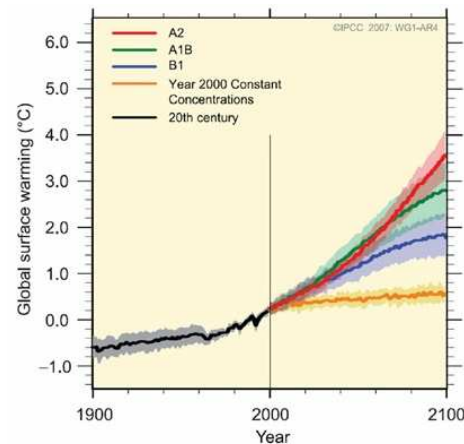


Figure 2 : Projection des tendances de réchauffement global sous différents scénarios d'émission de GES.

### 2.1.3 Techniques de descente d'échelle

Le climat peut varier à des échelles spatiales très locales. Le modèle de ville TEB simule des processus de fine échelle qui peuvent être particulièrement sensibles à cette variabilité locale du climat. Or les modèles globaux ou régionaux de climat ont des résolutions spatiales beaucoup trop basses pour représenter cette variabilité et ne peuvent donc pas être appliqués directement. Pour obtenir les conditions météorologiques aux échelles spatiales et temporelles adéquates, on passe par une étape intermédiaire dite de *descente d'échelle*. Elle permet de générer des forçages météorologiques à partir des sorties de modèles de climat à des résolutions spatiales et temporelles appropriées qui peuvent ensuite être appliqués au modèle de ville TEB.

Les scénarios climatiques issus du projet de recherche RexHySS (Ducharne *et al.* 2009) sont utilisés ici, dans lequel deux techniques de descente d'échelle ont été appliquées :

- Une méthode de descente d'échelle statistique multivariée basée sur les types de temps (Boé *et al.* 2006) ;
- Une descente d'échelle dynamique associée à une méthode de correction dite quantile-quantile (Déqué 2007) afin de réduire les erreurs systématiques du modèle de climat.

Une dernière étape permet d'appliquer les forçages atmosphériques à l'étude du climat urbain de la région parisienne et d'augmenter la résolution horizontale à 1 km.

### 2.1.4 Le modèle TEB

Le modèle TEB a été développé au Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM-GAME) de Météo-France/CNRS pour calculer les bilans énergétiques (rayonnement, convection, chaleur latente, *etc.*) et hydriques (précipitations, évaporation, *etc.*) entre les villes et l'atmosphère. Il permet de simuler le climat urbain à l'échelle de la ville et des quartiers. Ce modèle de canopée urbaine représente la ville de manière théorique sous la forme d'un

canyon urbain dans lequel est modélisée l'évolution temporelle de la température de la rue, des murs et des toits. Il simule finement le fonctionnement du système (Figure 3) en réponse à un forçage météorologique (rayonnement, précipitation, température, humidité, vent, *etc.*) par l'intermédiaire du système SAFRAN. Son homologue pour la végétation, Interactions Sol-Biosphère-Atmosphère (ISBA, Noilhan and Planton 1989, Noilhan and Mahfouf 1996), est également utilisé.

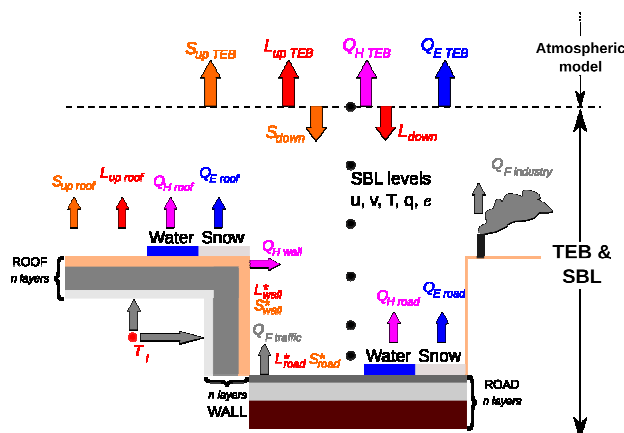


Figure 3 : Représentation des échanges d'énergie entre les différentes surfaces (mur, rue, toit) du modèle TEB et le modèle atmosphérique :  $S$  est le rayonnement courtes longueurs d'onde,  $L$  le rayonnement grandes longueurs d'onde (montant ou descendant),  $Q_H$  le flux de chaleur sensible,  $Q_E$  le flux de chaleur latente,  $Q_F$  le flux de chaleur anthropique et  $T_i$  la température interne des bâtiments.

## 2.2 Evolution de la température sur la région parisienne

Pour évaluer l'impact de l'urbanisation sur les tendances de température, les valeurs journalières minimales ( $T_{2m_{MIN}}$ ) et maximales ( $T_{2m_{MAX}}$ ) des températures de l'air à 2 m sont moyennées spatialement selon trois classes de couverts correspondant à différents degrés d'urbanisation : classe urbaine URB (surfaces minéralisées), classe périurbaine SUB (zones résidentielles qui incluent surfaces minéralisées et couverts naturels) et classe rurale RUR (couverts naturels).

### 2.2.1 Tendances générales

Conformément à la tendance de réchauffement global, les températures simulées dans le climat futur sont significativement plus élevées que dans le climat actuel, plus particulièrement pour le scénario plus pessimiste A2, associé à des émissions de gaz à effet de serre plus fortes. L'augmentation des températures maximales (3 à 4 °C selon le scénario) est sensiblement plus forte que pour les minimales (2 à 3 °C selon le scénario) et plus importante dans les zones rurales que dans les zones périurbaines et urbaines.

### 2.2.2 Températures hivernales

Une augmentation systématique de la température de l'air en hiver est simulée, plus importante pour les maximales que les minimales. La comparaison des températures pour les trois classes de couverts indique que les tendances augmentent légèrement lorsque le degré d'urbanisation diminue, plus particulièrement pour les maximales.

L'impact du changement climatique peut aussi être évalué par des indicateurs normalisés (Klein Tank et Zwiers 2009, Van den Besselaar *et al.* 2009) comme le nombre de jours froids ( $T_{2m_{MIN}} \leq -5^\circ\text{C}$ ).

Les valeurs des indices de froid diminuent de manière significative dans le futur (Figure 4), conformément à la tendance générale présentée par Déqué (2007) qui constate que le nombre de jours de froid en France devient négligeable à la fin de ce siècle.

### 2.2.3 Températures estivales

L'augmentation de la température de l'air est plus importante pendant l'été que pendant l'hiver. En moyenne, les températures minimales et maximales en été augmentent de 3 à 5°C dans les zones rurales. La tendance est moins marquée dans les zones urbanisées (hausse de 3 à 4,5 °C).

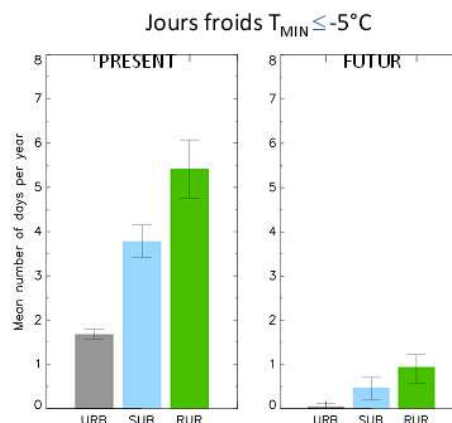


Figure 4 : Nombre de jours froids, en moyenne annuelle, par classes de couvert (urbain : gris, périurbain : bleu et rural : vert) en climats présent (gauche) et futur (droite). L'incertitude liée à la méthode de descente d'échelle et au scénario est indiquée par la barre d'erreur.

Les indices climatiques de température pour les situations estivales peuvent être les jours chauds ( $T_{2m_{MAX}} \geq 25^{\circ}C$ ) ou très chauds ( $T_{2m_{MAX}} \geq 30^{\circ}C$ ) ou les jours avec mise en alerte orange pour la canicule (basée sur le franchissement simultané d'indices biométéorologiques calculés sur 3 jours consécutifs, durée minimale d'une vague de chaleur).

Les journées chaudes sont plus fréquentes en climat futur compte tenu de l'augmentation des températures en été. Les cas de jours très chauds deviennent relativement habituels en climat futur alors qu'ils sont plutôt rares en climat présent (Figure 5).

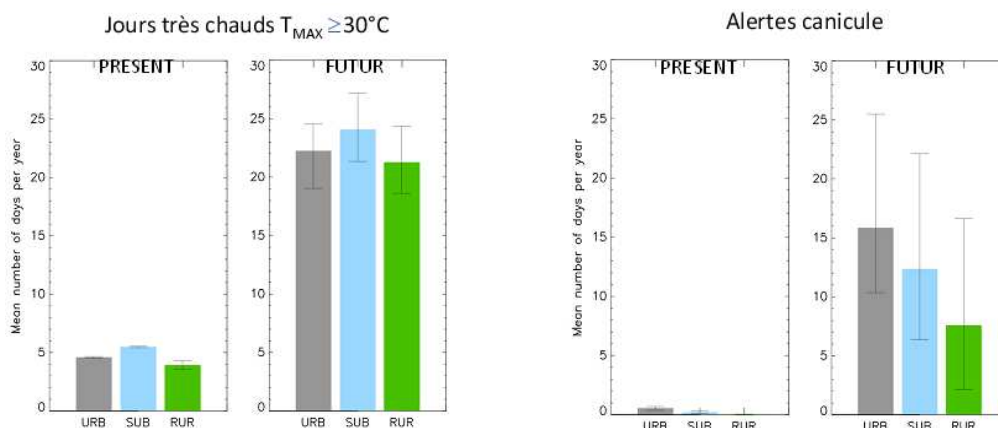


Figure 5 : Nombres de jours chauds, en moyenne annuelle, par classes de couvert (urbain : gris, périurbain : bleu et rural : vert) en climats présent et futur (gauche) et nombres de jours de mise en alerte orange pour la canicule, en moyenne annuelle, par classes de couvert en climats présent et futur (droite). L'incertitude liée à la méthode de descente d'échelle et au scénario est indiquée par la barre d'erreur.

Il est intéressant de souligner que les indices d'été augmentent de façon beaucoup plus importante dans les zones rurales que dans les zones urbanisées en raison de l'assèchement des sols naturels. Ils atteignent des valeurs maximales dans les zones périurbaines. Dans ces



quartiers composés de surfaces minéralisées et de couverts naturels, le réchauffement semble accentué par un effet cumulé de l'urbanisation et de l'assèchement des sols.

Enfin, le nombre de jours de mise en alerte orange pour la canicule est en très nette augmentation (Figure 5) : il passe de 1 jour d'alerte par an en climat présent à 12 à 20 j dans les zones urbaines, 9 à 16 j dans les zones périurbaines et 5 à 11 j dans les zones rurales en climat futur, selon le scénario. Les avertissements de vague de chaleur sont plus nombreux dans les zones urbaines que dans les zones périurbaines et rurales, ce qui montre que le seuil en vigueur sur les températures minimales est le critère prépondérant dans leur déclenchement.

### 2.3 Îlots de chaleur urbain

La comparaison des températures par classe de couverts indique que la température de l'air dans les zones urbaines est systématiquement plus chaude que dans les zones périurbaines et rurales en raison de l'effet d'ICU. Cette différence est plus importante pour les températures minimales, *i.e.* en période nocturne lorsque l'ICU est le plus intense. En moyenne en climat présent, l'ICU atteint 2,5 °C pendant la nuit contre 1,2 °C seulement en journée. Les projections climatiques indiquent une légère diminution d'environ 0,25 °C des intensités des ICU diurnes dans le futur, alors que les ICU nocturnes n'évoluent pas en moyenne annuelle.

Les ICU durant l'hiver, de l'ordre de quelques degrés Celsius et toujours positifs, n'évoluent que peu en climat futur. Leur structure est concentrique, les maxima étant observés dans Paris *intra muros*. En été (Figure 6), on note une diminution substantielle des forts ICU, avec l'apparition d'ICU négatifs en journée et une évolution de la forme de l'ICU (les plus fortes anomalies de température sont localisées sur une grande partie de la banlieue et non plus dans Paris *intra muros*). Ces résultats sont directement liés aux fortes températures simulées dans les zones rurales en corrélation avec l'assèchement des sols naturels.

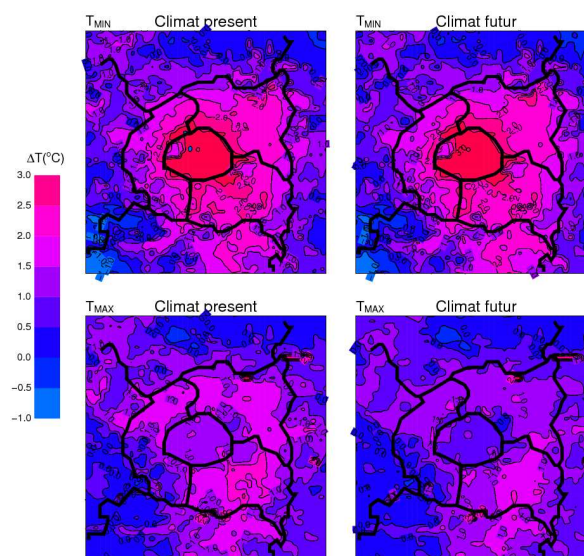


Figure 6 : Mise en évidence de l'ICU sur les minima et maxima journaliers de température de l'air à 2 m simulés par le modèle en climats actuel et futur en été.

## 2.4 Consommation énergétique

Le changement climatique pourrait avoir un fort impact sur la consommation d'énergie des villes dans le futur. L'analyse des degrés-jours (DJ) de chauffage et de refroidissement permet d'avoir une toute première approche de cette question. Les DJ donnent en effet une valeur représentative de l'écart entre la température d'une journée donnée et des seuils de température, fixés par les normes françaises (Porcher 1993) à 18°C (température de confort minimum en hiver) et 24°C (température maximale de confort en été).

		Urbain		Périurbain	
		DJc	DJr	DJc	DJr
Présent	(1971-2006)	2216	19	2480	13
Futur	A1B (2072-2098)	1586	122	1808	104
	A2 (2072-2098)	1468	178	1681	154
Futur - Présent	A1B	-630	+105	-672	+91
	A2	-748	+161	-799	+141

*Tableau 1 : Moyennes annuelles des DJ de chauffage (DJc) et de refroidissement (DJr) simulés pour les zones urbaines et périurbaines en climats présent et futur.*

En raison de l'augmentation de la température en hiver en climat futur, on prévoit une diminution des DJ de chauffage d'environ 30%. Inversement, les DJ de refroidissement augmentent considérablement, bien que l'ordre de grandeur reste beaucoup plus faible que celui des DJ de chauffage (Tableau 1).

## 2.5 Conclusions

Cette première partie s'est attachée à évaluer l'impact du changement climatique sur la température de l'air à Paris et aux alentours. Les résultats mettent en évidence une hausse systématique de la température de l'air à 2 m (minimale et maximale) de plus de 2 °C, modulée selon le scénario et la classe d'urbanisation, et nettement plus marquée en été qu'en hiver. Les indices de froid sont en forte régression, tandis que les indices de chaleur sont en forte expansion, et des phénomènes tels que les journées très chaudes ( $T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C}$ ) et les canicules, rares en climat présent, feraient partie du climat courant à la fin du 21<sup>ème</sup> siècle. Les hausses de température les plus fortes s'opèrent en milieu rural, ce qui conduit à une diminution des forts îlots de chaleur urbains en période nocturne et une apparition de cas d'îlots de chaleur urbains négatifs en journée. Par ailleurs, l'analyse des degrés-jours de chauffage et de refroidissement montre une diminution des besoins en chauffage et une demande accrue des besoins en climatisation.

Ce travail propose une méthodologie originale pour analyser l'impact du changement climatique global sur le climat de Paris et de sa région. Plus particulièrement, l'intégration d'un modèle de canopée urbaine spécifique (TEB) permet d'étudier le micro-climat qui est perçu par les habitants au niveau des rues. Les résultats des projections climatiques locales affichent des tendances cohérentes quels que soient les scénarios d'émission (A1B ou A2).

### 3 Retour sur la canicule de l'été 2003 à Paris

Rapport complet du volet 2 : EPICEA-Rapport-Volet2\_def

Le volet 2 du projet EPICEA analyse finement l'épisode caniculaire d'août 2003 en se concentrant sur la période du 8 au 13 août pendant laquelle les températures les plus chaudes ont été relevées et où a été observé un pic de surmortalité sur le territoire français et plus particulièrement à Paris.

#### 3.1 Méthodologie

##### 3.1.1 Présentation des modèles utilisés

La méthodologie retenue s'appuie sur plusieurs simulations menées avec le modèle de recherche de prévision numérique du temps Méso-NH (Lafore *et al.* 1998) et le système de modélisation des surfaces continentales SURFEX (Salgado and Le Moigne 2010). Méso-NH est un modèle météorologique à résolution fine (de l'échelle sous-synoptique, ~10 km, à la micro-échelle, ~10 m), constitué d'une partie dynamique et d'une partie physique couplées entre elles. Les conditions aux limites lui sont fournies par le modèle du CEPMMT. Des domaines père et fils (Figure 7) de résolutions spatiale et temporelle différentes sont emboîtés (technique de « grid-nesting »), ce qui permet de descendre en échelle spatiale sur le domaine d'étude final à 250 m de résolution (Stein *et al.*, 2000).

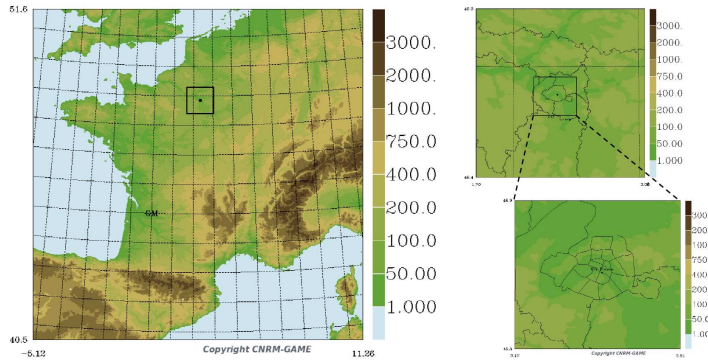


Figure 7 : Technique de grid-nesting : altitude en m pour les 3 domaines emboîtés utilisés dans la simulation : domaine 1 « France étendue » (résolution 2,5 km), domaine 2 « Île-de-France » (résolution 1,25 km) et domaine 3 « Paris – petite couronne » (résolution 250 m).

SURFEX décrit la surface comme une mosaïque composée de quatre principaux types de couverts : les mers et océans, les lacs et rivières, les sols naturels et la végétation et les villes (surfaces minéralisées). A chaque point de grille du domaine de simulation sont associées des fractions de couverture spatiale pour chacun de ces types. Comme les mécanismes physiques qui régissent le fonctionnement de ces types de couverts sont différents, chaque type possède sa propre paramétrisation de surface pour calculer les échanges hydriques, énergétiques et turbulents entre le couvert considéré et l'atmosphère. En particulier, le schéma ISBA est appliqué aux couverts naturels et le schéma TEB est appliqué aux surfaces minéralisées. TEB est utilisé dans sa version « végétalisée » (Lemonsu *et al.* 2012b), *i.e.* intégrant les espaces

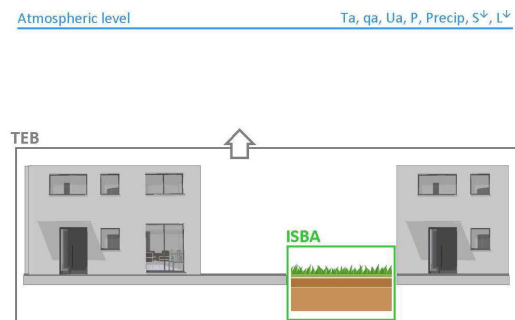


Figure 8 : Représentation schématique de la version végétalisée de TEB, TEB-Veg, qui interagit directement avec ISBA pour prendre en compte la végétation urbaine (d'après Lemonsu 2010).

verts urbains (parcs et squares mais aussi jardins et cours privés ainsi qu'arbres d'alignement) à l'intérieur du canyon urbain (Figure 8).

### 3.1.2 Base de données du couvert urbain parisien et caractéristiques thermiques des parois opaques du bâti parisien

Une étroite collaboration avec l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR) a permis d'établir une base de données du couvert urbain parisien à la résolution de 250 m. Sur un domaine centré sur Paris, on dispose pour chaque maille de la surface de végétation et de la surface d'eau. La surface de ville dans chaque maille est déduite de ces deux informations. La surface et le type de toit, l'altitude et la hauteur moyenne des bâtiments, la surface de mur et la classe d'âge du bâtiment, la surface de sol nu et la surface de bitume sont calculés à partir des données issues de l'analyse de photos aériennes ou obtenues par traitement de données urbanistiques de la ville. Le traitement de ces données au moyen d'un Système d'Information Géographique (SIG) permet d'établir une cartographie précise de l'agglomération parisienne et d'intégrer ensuite ces informations au schéma de surface. Afin de pouvoir calculer les bilans énergétiques nécessaires à la simulation, le CSTB a en outre analysé les caractéristiques thermiques des parois opaques (toitures et murs) des bâtiments composant le patrimoine bâti parisien. Ces bilans intègrent ainsi les échanges radiatifs diurnes et nocturnes à la surface des parois opaques ainsi que leur inertie thermique. Les rejets de chaleur répartis dans le domaine sont également pris en compte.

## 3.2 Résultats

Une première simulation a été menée à la résolution de 2 km sur une vaste zone qui inclut toute la région Île-de-France où Paris est représenté de manière uniforme selon les recommandations de Colombert 2008. Elle a servi de calibrage et de contrôle du modèle par comparaison aux observations issues des stations du réseau Météo-France et a permis de montrer que le modèle Méso-NH couplé au modèle TEB donne des résultats très satisfaisants sur l'ensemble des processus de météorologie urbaine classiques et accentués par cette période de canicule : mise en place de l'ICU, formation d'un panache urbain, bilan d'énergie, couche limite urbaine, *etc.*

La deuxième phase de l'étude se focalise sur Paris *intra muros* au moyen d'une simulation à très fine échelle (résolution : 250 m) qui s'appuie sur la base de données du couvert urbain et des caractéristiques du bâti parisien, afin de déterminer les zones géographiques de la capitale les plus vulnérables à ces phénomènes urbains.

### 3.2.1 Bilan d'énergie

La géométrie urbaine et l'imperméabilisation des surfaces par des matériaux rapportés (bitume, béton, *etc.*), aux propriétés physiques différentes des sols naturels, entraînent d'importantes modifications des flux énergétiques et hydriques de surface par comparaison avec ce qui se produit en milieu rural (Figure 9).

En milieu totalement urbanisé, l'élément majoritaire du bilan d'énergie est le flux de chaleur sensible, correspondant à la conduction dans l'air de la chaleur transmise par les surfaces, plus fort en milieu urbain. Ceci s'explique par le fait que les surfaces artificielles atteignent des

températures de surface plus élevées que les surfaces végétales. Cependant, le phénomène de conduction se produit également en journée au niveau de la végétation. Le flux de stockage de chaleur (très important en milieu urbain du fait de la masse considérable constituée par les constructions) est largement plus important en milieu urbanisé qu'en milieu rural, tant le jour que la nuit. Le stockage en journée puis la libération de chaleur la nuit sont donc beaucoup plus importants sur la partie urbanisée. Le flux de chaleur latente, correspondant à l'évapotranspiration des végétaux, peu important en milieu urbain avec la raréfaction de la végétation, est quasi nul sur la partie urbanisée puisqu'en l'absence de végétation, le processus d'évapotranspiration ne peut avoir lieu. Sur la partie rurale au contraire, il atteint des valeurs importantes avec un cycle diurne marqué : la transpiration des végétaux utilise une part importante de l'énergie solaire incidente et produit un flux de chaleur latente significatif pendant la journée (Figure 10).

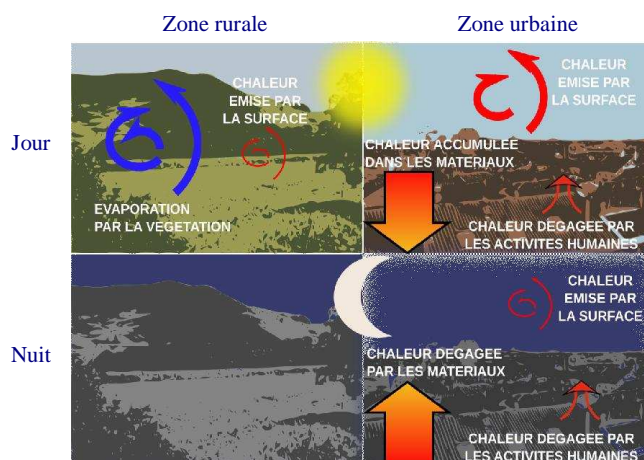


Figure 9 : Différence de bilan d'énergie entre zone rurale et zone urbaine le jour et la nuit (d'après Masson).

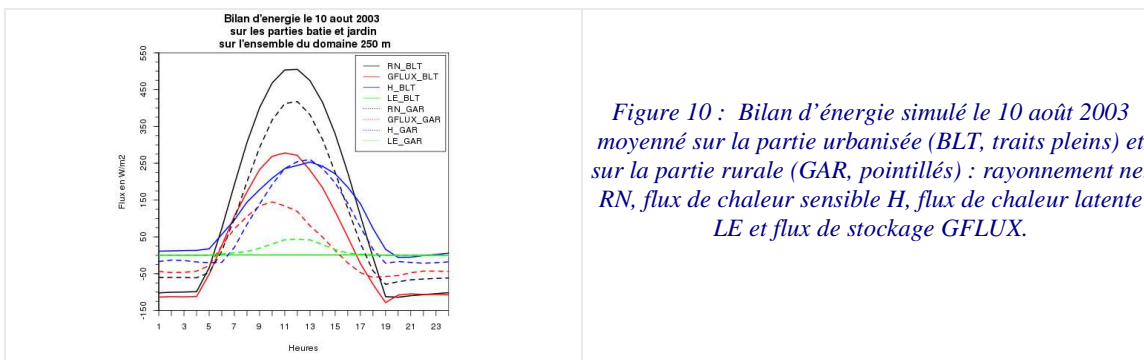
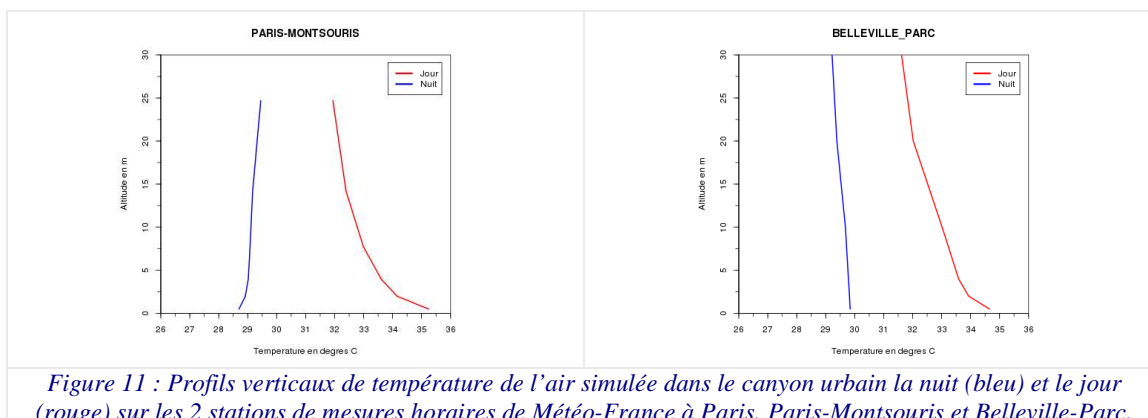


Figure 10 : Bilan d'énergie simulé le 10 août 2003 moyenné sur la partie urbanisée (BLT, traits pleins) et sur la partie rurale (GAR, traits pointillés) : rayonnement net RN, flux de chaleur sensible H, flux de chaleur latente LE et flux de stockage GFLUX.

### 3.2.2 Analyse verticale de la température

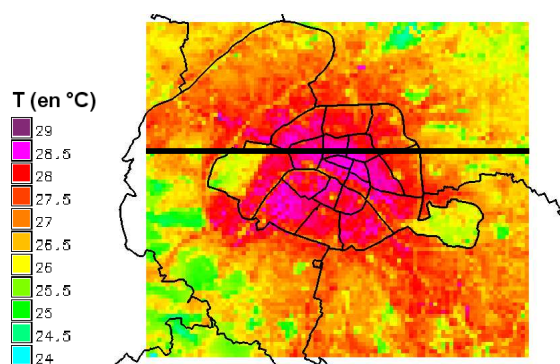
Le modèle TEB permet d'obtenir des profils verticaux de paramètres au sein du canyon urbain (Figure 11). Pendant la journée, un gradient vertical de température est bien visible. Les températures sont maximales près de la surface en liaison avec le fort rayonnement incident et le stockage de chaleur induit, puis décroissent lorsqu'on s'élève le long de la verticale. La nuit, la station de Paris-Montsouris présente une inversion thermique avec des températures plus faibles en très basses couches et qui augmentent avec l'altitude. Ce phénomène est classique en situation anticyclonique. Il est lié au refroidissement radiatif (le refroidissement nocturne des couches atmosphériques proches du sol génère des inversions de rayonnement) et dans une moindre mesure à la présence de végétation en surface qui limite la restitution de l'énergie emmagasinée. La couche limite est alors très stable. Au contraire, la station de Belleville\_Parc présente une valeur quasiment constante la nuit le long de la

verticale. Le fort rayonnement infrarouge au-dessus des surfaces urbaines entraîne la présence d'un petit flux de chaleur turbulent qui provoque un brassage et la couche limite reste neutre et ne se stabilise pas. La différence de comportement de ces deux stations s'explique par leur situation différente en terme d'urbanisation dans le modèle (milieu périurbain pour Paris-Montsouris vs. milieu urbain pour Belleville\_Parc).



### 3.2.3 Analyse de l'ICU

Pour analyser l'ICU moyen, on moyenne les températures à 2 m nocturnes horaires à 02, 03 et 04 UTC (4 h, 5 h et 6 h locales en heure d'été) des 5 nuits de simulation (9, 10, 11, 12 et 13 août) (Figure 12).



Les températures les plus élevées se situent au centre de Paris dans les 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup>, 8<sup>ème</sup>, 9<sup>ème</sup>, 10<sup>ème</sup> et 11<sup>ème</sup> arrondissements (28 à près de 30 °C), tandis que les températures les plus basses se situent dans les zones plus aérées (nombreux parcs et forêts) au niveau du sud-ouest de Paris, des bois de Vincennes et de Boulogne ou du nord de Paris (23 à 26 °C). L'ICU simulé présente ainsi une amplitude maximale de 4 à 7 °C. Cet ICU est piloté par le phénomène de refroidissement, qui se fait plus rapidement et de manière plus importante sur les zones végétalisées. Selon la force du vent, la hausse de températures peut se propager sous le vent en aval de la zone la plus chaude, formant un panache urbain au sein duquel les températures augmentent de 2 °C pendant cette période (arrondissements périphériques et communes proches). C'est un paramètre à prendre en compte pour les zones moins sujettes à un ICU élevé mais proches de la zone de températures nocturnes maximales. Enfin, des micro ICU se forment au sein même de Paris, d'une intensité de 2 à 4 °C.

La coupe transversale (Figure 13) indiquée en noir sur la Figure 12 montre une structure classique d'ICU, qui permet de voir l'influence du couvert sur la température (notamment les influences des zones densément urbanisées au centre, du bois de Boulogne et de la Seine). On met ainsi en évidence une amplitude d'ICU dans cette direction d'environ 3,5 °C, amplitude que l'on tentera de diminuer par différents types d'interventions étudiées au cours du dernier volet du projet.

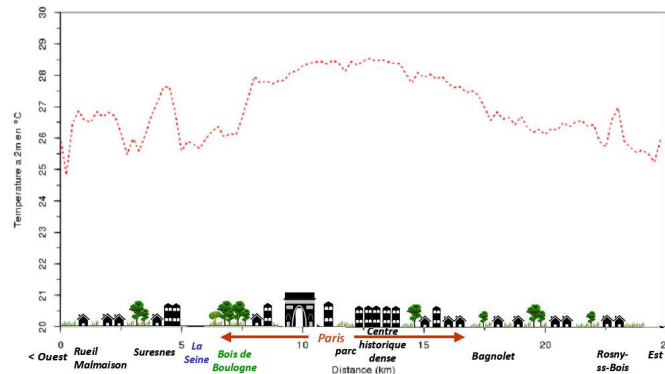


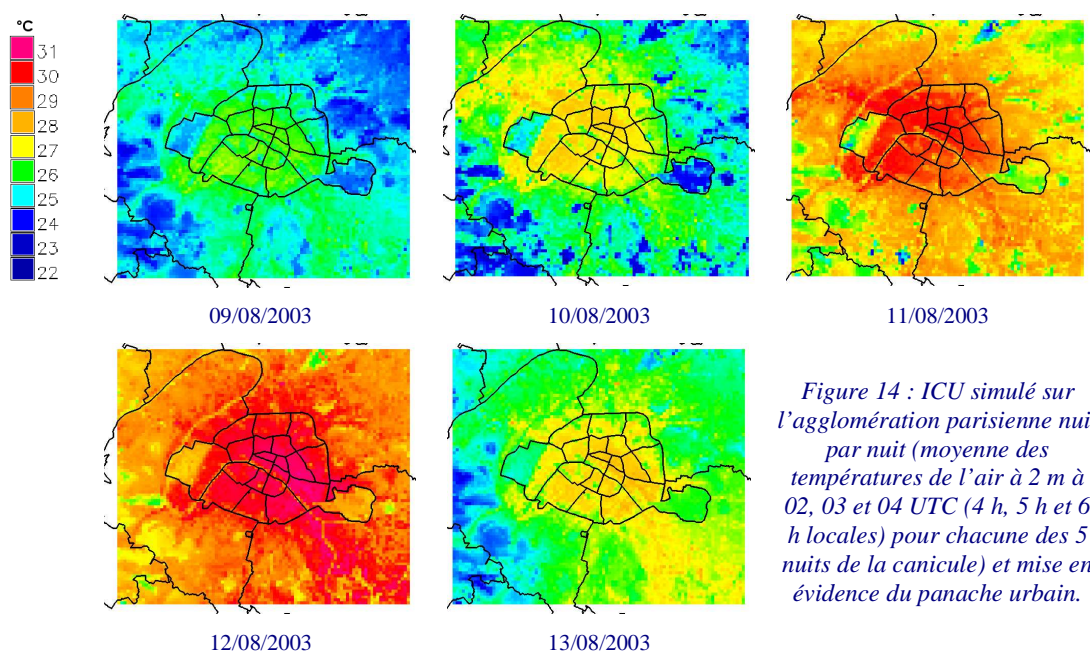
Figure 13 : Coupe transversale de l'ICU (traversant les 16<sup>ème</sup>, 8<sup>ème</sup>, 9<sup>ème</sup>, 10<sup>ème</sup> et 20<sup>ème</sup> arrondissements d'ouest en est) selon l'axe indiqué en noir sur la Figure 12.

L'analyse nuit par nuit de l'ICU montre sa variabilité quotidienne (Figure 14) :

- La première nuit, l'ICU est assez peu visible. Seuls les sols naturels se détachent avec des températures plus faibles (23 à 25 °C).
- La deuxième nuit, l'ICU se renforce avec des valeurs de 27 à 28 °C sur les arrondissements de Paris les plus chauds et 22 à 24 °C ailleurs. Un panache urbain se forme sous le vent : la chaleur du centre de Paris est transportée par le vent, orienté de sud-est, et on relève des températures plus élevées sur le nord-ouest de Paris.
- La troisième nuit, les températures sont très élevées sur toute la zone densément urbanisée (29 à 30 °C) avec un ICU de 3 à 7 °C ; un panache urbain est encore présent (vent d'est à sud-est) sur l'ouest (relativement limité par la présence du Bois de Boulogne qui limite ces hautes températures) et le nord-ouest de Paris.
- La quatrième nuit, les températures sont encore plus élevées et dépassent les 31 °C par endroit. Une rotation des vents (désormais de secteur nord-ouest) entraîne un déplacement du panache urbain, qui se matérialise au sud-est de Paris. L'ICU est compris entre 3 et 5 °C.
- La dernière nuit voit s'opérer un refroidissement généralisé. Néanmoins, un ICU de 3 à 5 °C est toujours visible entre le centre de Paris et les zones alentour.

L'ICU a donc une variabilité journalière récurrente et son intensité est plus forte la nuit que le jour. Pendant la journée, il a souvent un caractère résiduel et il se forme ou s'amplifie lors de la période de refroidissement nocturne puis diminue rapidement après le lever du soleil. L'effet additionnel de l'ICU accentue le stress thermique déjà ressenti par les habitants lors d'épisodes de vagues de chaleur, ce qui peut être particulièrement néfaste la nuit lorsque l'organisme est en période de récupération. C'est typiquement ce qui s'est produit durant cette

période avec notamment le 12 août 2003 un excès de décès de près 2200 cas sur la France entière et un ratio de surmortalité (rapport entre le nombre de décès observés et le nombre de décès attendus) de l'ordre de 6,5 sur l'Île-de-France (Hémon et Jouglu 2003).



### 3.3 Conclusions

Cette deuxième partie de l'étude a permis de modéliser la canicule de l'été 2003 à échelle fine grâce à une description précise de Paris en termes d'occupation des sols et de morphologie du bâti élaborée avec l'APUR. L'augmentation de la résolution permet d'améliorer la qualité de la simulation et la finesse des résultats. Elle permet également d'analyser la variabilité inter-quartiers du climat urbain.

L'urbanisation modifie le bilan d'énergie et par conséquent le climat urbain. Ainsi, un flot de chaleur urbain apparaît en fin de nuit entre le centre de Paris (arrondissements les plus chauds : 2, 3, 8, 9, 10 et 11) et les zones rurales alentour de l'ordre de 4 à 7 °C, particulièrement marqué avec les zones boisées au sud-ouest et au nord de Paris. Une analyse temporelle de l'ICU a montré sa variabilité quotidienne ainsi que sa mise en place. Le phénomène qui le pilote est le refroidissement, qui se fait plus rapidement et de manière plus importante sur les zones végétalisées. Des micro ICU apparaissent au sein même de Paris *intra muros*, de l'ordre de 2 à 4 °C. Par ailleurs, selon la force du vent, un panache urbain peut se former sous le vent en aval de la zone la plus chaude. C'est un paramètre à prendre en compte pour les zones moins sujettes à un ICU élevé mais proches de la zone de températures nocturnes maximales.

Ce second volet a permis d'identifier les zones urbaines de Paris les plus vulnérables aux processus urbains comme les arrondissements fortement urbanisés du centre de Paris et les arrondissements périphériques suivant la direction du panache urbain. Cette partie va servir de référence pour les tests de sensibilité sur différents facteurs présentés ci-après.



## 4 Adaptation du territoire parisien au changement climatique

Rapport complet du volet 3 : EPICEA-Rapport-Volet3\_def

La perspective d'un nouveau contexte climatique caractérisé par des canicules de type 2003 plus fréquentes et le souvenir récent de cet événement incitent à identifier quels paramètres peuvent avoir une influence sur les caractéristiques des îlots de chaleur urbains. L'étude de Colombert (2008) a permis d'identifier ces paramètres (propriétés radiatives des surfaces, zones vertes, *i.e.* végétales, ou bleues, *i.e.* aquatiques), appelés « leviers urbains ». Différents tests de sensibilité ont été menés en modifiant ces paramètres pour Paris *intra muros* afin de quantifier leur impact sur le climat urbain, dans le contexte de la canicule d'août 2003.

Une remarque générale s'impose. Ces scénarios à moyen et long termes explorent des possibles dont la faisabilité technique semble avérée au vu des développements en cours. Autant que de besoin, nous indiquons cependant les réserves qui nous paraissent utiles afin de ne pas tirer trop rapidement des conclusions sur la base de résultats de simulations qui sembleraient prometteurs. Agir sur les « leviers urbains » modifie l'aspect de la ville : plus « blanche », plus « verte », plus haute, *etc.* L'adoption des mesures les plus prometteuses vis-à-vis de la réduction de l'ampleur de l'îlot de chaleur urbain nécessitera la maturation de décisions prenant en compte les performances escomptées mais également leurs coûts (investissement et entretien), la faisabilité de la maintenance, l'acceptabilité par les autorités et les usagers de la ville ainsi que les incidences de ces mesures d'adaptation sur d'autres performances attendues (circulation, consommation d'énergie de chauffage en hiver, *etc.*).

### 4.1 Présentation des scénarios

Quatre scénarios sont envisagés pour ces tests de sensibilité: (1) un scénario réfléchissant où les propriétés physiques des surfaces des parois opaques sont modifiées, (2) un scénario de verdissement où les surfaces végétalisées sont augmentées mais non arrosées, (2bis) un scénario de verdissement où les surfaces végétalisées sont augmentées et arrosées, (3) un scénario d'humidification des chaussées et (4) un scénario qui combine les précédents.

#### 4.1.1 Scénario réfléchissant (noté S1)

Ce premier scénario envisage une modification des propriétés radiatives des matériaux de façade (toits et murs). A l'image d'un marbre très « blanc », ces matériaux réfléchiraient fortement le rayonnement solaire (leur albédo serait proche de 1) et leur émissivité serait également élevée. Les valeurs élevées d'albédo et d'émissivité modifient le bilan énergétique entre les surfaces modifiées et l'atmosphère par rapport à la situation actuelle. Par conséquent, les surfaces se réchauffent moins et le flux de chaleur par conduction de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment est fortement réduit, ce qui limite l'apport d'énergie aux espaces intérieurs.

#### 4.1.2 Scénarios de verdissement (notés S2 et S2bis)

Il s'agit de recouvrir les surfaces concernées de végétation adaptée, ici de la végétation basse de type herbe. Les surfaces candidates à un verdissement sont les surfaces de terre, les chaussées et les toitures. Nous n'avons cependant pas retenu ces dernières du fait des limites actuelles du modèle TEB qui ne permet pas la modélisation de toitures végétalisées. On se

propose donc ici de verdir les surfaces dites de sol nu disponibles, malgré la difficulté de la tâche liée à la dispersion de ces surfaces et à leurs usages variés (zones de sol « nu » type terre, roche, surfaces sableuses, *etc.* ; allées, généralement sablées, des parcs, jardins, cimetières ; voies de chemin de fer et leurs abords : ballast, accotements, talus de remblai ou déblai) ainsi que la moitié des rues dites « larges ». Deux cas seront testés : l'un où la végétation évolue librement dans les conditions hydrologiques de la canicule 2003 (situation de stress hydrique lié à la sécheresse présente) : scénario S2 ; l'autre où la végétation est maintenue dans un état hydrique permettant un échange de chaleur latente par arrosage : scénario S2bis. L'arrosage est simulé de façon très simple : le contenu en eau des réservoirs des sols naturels est forcé à 50 %. La végétation n'est jamais en situation de stress hydrique et elle peut ainsi évapotranspirer et échanger de la chaleur latente avec l'atmosphère.

Le verdissement total des surfaces de terre nue conduit à une hausse de 66 % de la végétation basse. Le verdissement de 50 % des rues de largeur supérieure à 15 m (12 % en surface des routes de la ville) conduit à une hausse de 23 % de la végétation basse. Au total, nos hypothèses entraînent une hausse de 89 % de la surface de végétation basse sur Paris *intra muros* par rapport à la situation actuelle (Figure 15).

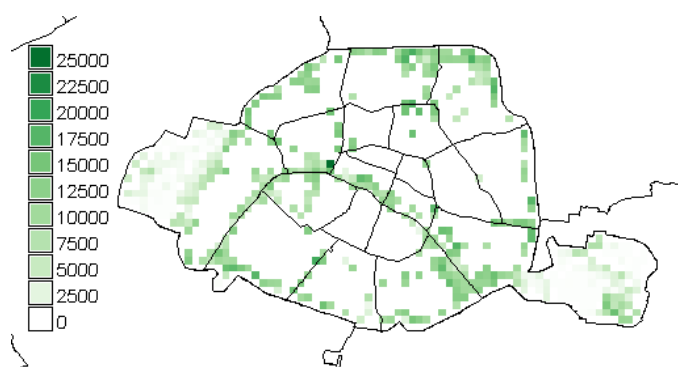


Figure 15 : Différence de surface de végétation (en m<sup>2</sup>) sur Paris *intra muros* entre le cas du scénario 2 (verdissement) et le cas de référence.

#### 4.1.3 Scénario d'humidification des chaussées (noté S3)

L'arrosage des rues est une pratique traditionnelle dans de nombreux pays chauds (Espagne ou Japon par exemple). Cet arrosage, souvent matinal, produit un rafraîchissement temporaire lié à l'évaporation de l'eau. Des expériences d'arrosage prolongé des chaussées par ruissellement d'eau ont été menées en 2009 au Japon (Takahashi *et al.* 2010) et sont en cours de réflexion au sein de Paris. Il est ainsi envisageable de faire ruisseler de l'eau à la demande sur tout ou partie des surfaces des chaussées de la capitale. L'impact sur la température se fait par l'évaporation de cette eau au contact de la surface chaude des chaussées. La vapeur d'eau ainsi produite est évacuée dans l'atmosphère.

#### 4.1.4 Scénario combinant les trois approches (noté Stot)

Le dernier scénario est un scénario complet qui combine les trois premiers scénarios (réfléchissant, verdissement avec arrosage, humidification), l'humidification des chaussées se faisant sur la part de chaussées non verdies.

## 4.2 Faisabilité des scénarios

Avant de présenter les effets des scénarios exposés, examinons quelques aspects liés à la faisabilité de leur mise en œuvre en omettant le dernier scénario qui hérite des considérations sur chacun des trois autres.

L'apparition de produits de construction présentant les propriétés radiatives recherchées laisse augurer de la faisabilité technique du scénario réfléchissant : des membranes d'étanchéité de couverture, des bardages, des peintures mises en œuvre sur des couvertures ou des murs sont d'ores et déjà disponibles. Les couvertures rafraîchissantes (*cool roofs*) commencent à apparaître notamment pour des bâtiments commerciaux ou de bureaux. Le surcoût lié à ces produits nouveaux devrait diminuer avec leur diffusion.

Cependant, de nombreuses questions nécessitent des investigations complémentaires. Entre autres, le maintien dans le temps des propriétés recherchées mérite examen car les matériaux et produits concernés subiront les agressions de l'environnement urbain et notamment la pollution. Des essais montrent qu'un encrassement rapide en milieu urbain diminue par exemple l'albédo de certains de ces matériaux (Akbari and Levinson 2008). Afin de limiter la dégradation des caractéristiques recherchées (fort albédo, forte émissivité), un entretien adapté devra être organisé dont le coût est à évaluer.

En outre, même si réduire l'albédo des murs contribue à la diminution de la température de l'air, cela peut générer en journée de l'inconfort thermique supplémentaire pour les piétons. En plus du rayonnement solaire direct, ils recevraient en effet le supplément de rayonnement réfléchi par les murs (Erell *et al.* 2012). Générer de l'ombre artificielle par la plantation d'arbres ou l'installation de pare-soleil s'avérerait alors nécessaire.

Des techniques de verdissement disponibles laissent également augurer de la faisabilité technique du verdissement des surfaces concernées, qu'il s'agisse des surfaces de terre ou même des chaussées, à l'image de l'engazonnement des voies du tramway parisien. Le service en charge des parcs et jardins dispose d'éléments économiques permettant d'estimer le coût de réalisation et d'entretien de ces espaces verts. La capacité de rafraîchissement attribuée à ces surfaces repose cependant sur la disponibilité en eau, disponibilité qui peut être problématique notamment en période de canicule, et également sur leurs performances en matière d'évapotranspiration, dépendant de la nature du sol et des végétaux.

L'existence du réseau d'eau non potable suivant les rues de Paris est un élément favorable à la faisabilité du scénario prônant l'humidification des chaussées. Une éventuelle utilisation de ce réseau pour arroser les parties verdies des chaussées pourrait être également examinée. Ceci étant, la consommation d'eau, le coût de mise en œuvre et de maintenance de l'arrosage (manuel, automatique) doivent être évalués. L'arrosage de surfaces par ailleurs exposées à la pollution urbaine peut soulever des questions relatives à la santé des passants et des riverains qui devront aussi être examinées. Il en est de même des aspects environnementaux.

Sur un autre plan, l'augmentation massive de surfaces végétalisées et plus encore la modification de la couleur dominante des façades et des couvertures induira nécessairement une évolution de la perception visuelle de la ville. Un Paris plus « blanc », serait-il plus attractif, moins attractif ? Un examen approfondi de ces questions peut ouvrir la voie à la recherche des effets de surface escomptés sans modification brutale de la couleur apparente (Akbari *et al.* 2006).

Le temps d'évolution de la ville est un temps long. Ses transformations nécessitent souvent des décennies entre l'intention et la réalisation. La complexité intrinsèque d'une zone urbaine explique cette situation, complexité qui reflète l'histoire, la stratification des décisions passées, les marques imprimées par des évolutions techniques majeures comme l'automobile, l'assainissement ou la distribution d'énergie pour ne citer que quelques exemples.

Aussi impérieuse que soit la nécessité d'adapter une grande ville comme Paris aux conséquences d'une nouvelle donne climatique, les décisions seront longues à prendre et mobiliseront de nombreuses ressources pour comparer et évaluer différentes options suivant l'ensemble des dimensions qui concernent au quotidien tous les usagers de la ville.

Les quelques questions évoquées sont autant de sujets à aborder en complément des résultats du projet EPICEA.

### 4.3 Résultats

#### 4.3.1 Impacts sur la température à 2 m

Le cycle quotidien de température (Figure 16) sur un point situé dans le 13<sup>ème</sup> arrondissement dans un quartier intermédiaire en terme de densité urbaine (28 % de végétation, 40 % de bâti et 32 % de rues) montre que, sur ce point particulier :

- l'impact des scénarios S1 et S3 est légèrement inférieur au degré en journée ;
- l'impact du scénario S3 est nul la nuit alors que celui du scénario S1 ne l'est pas, grâce à la modification de l'émissivité ;
- l'impact du scénario S2bis est maximal en journée (de 2 à 2,5 °C) à cause du rôle évaporatif de la végétation, tandis que le scénario S2 n'a pas d'impact ;
- pour le scénario Stot, les impacts sont maximaux la journée (de l'ordre de 3,5 °C) mais non négligeables la nuit (de l'ordre de 1,5 °C).

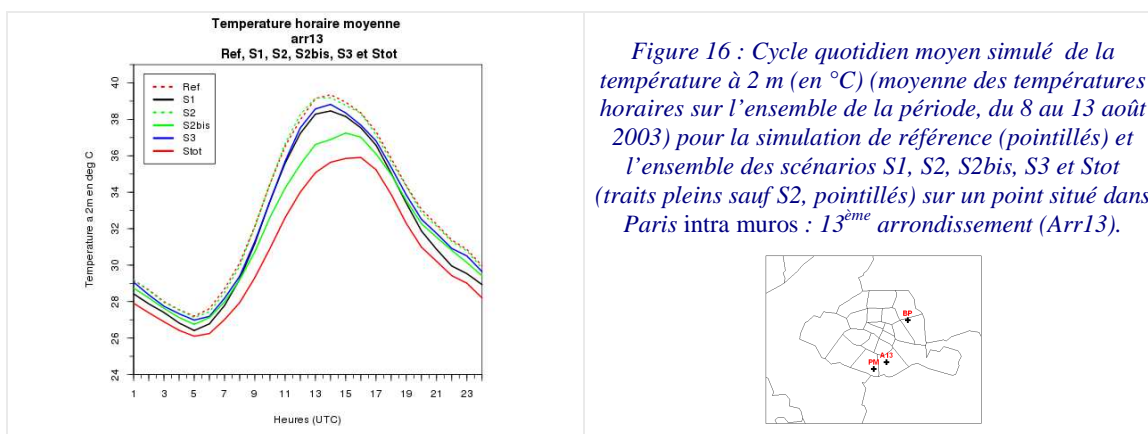
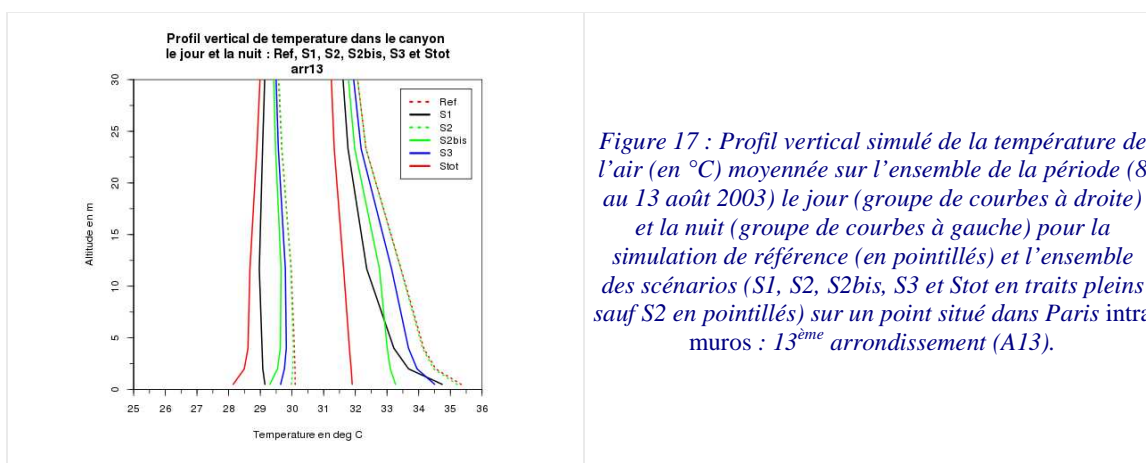


Figure 16 : Cycle quotidien moyen simulé de la température à 2 m (en °C) (moyenne des températures horaires sur l'ensemble de la période, du 8 au 13 août 2003) pour la simulation de référence (pointillés) et l'ensemble des scénarios S1, S2, S2bis, S3 et Stot (traits pleins sauf S2, pointillés) sur un point situé dans Paris intra muros : 13<sup>ème</sup> arrondissement (Arr13).

#### 4.3.2 Analyse verticale de la température

Une moyenne temporelle des données de températures sur la verticale est réalisée à l'intérieur de la canopée urbaine. Sur le point choisi dans le 13<sup>ème</sup> arrondissement (Figure 17), les scénarios S1 et S3 entraînent en journée une baisse similaire en surface (1 °C), mais l'impact du scénario S3 diminue beaucoup plus rapidement avec l'altitude que le scénario S1 qui

présente toujours une baisse de 1 °C aux alentours de 10 m d'altitude. Le scénario S2bis conduit à une baisse plus forte en surface (plus de 2 °C) mais qui s'estompe également rapidement en altitude (0,7 °C vers 10 m d'altitude). A nouveau, le scénario Stot présente une couche bien homogène sur la verticale en terme de température avec une baisse de 3,5 °C en surface à 1 °C vers 25 m d'altitude. La nuit, les scénarios S3 et S2bis ont un comportement similaire avec une diminution qui reste faible malgré une baisse en très basses couches pour S2bis, tandis que le scénario S1 conduit à une baisse plus forte de l'ordre de 1 °C sur quasiment toute la hauteur de la canopée urbaine. Avec le scénario Stot, la baisse est maximale en surface (2 °C) puis diminue progressivement avec l'altitude.



L'impact des différents scénarios n'est pas le même selon l'environnement immédiat du point où est effectué le profil, mais aussi selon les caractéristiques de chaque scénario :

- le scénario S1 a un impact jour et nuit puisqu'on joue sur le rayonnement, à la fois dans le domaine visible et dans le domaine infrarouge ; l'impact est sensible le long de la verticale car les modifications se font au niveau des murs et des toits donc sur toute la hauteur de la canopée urbaine ;
- le scénario S2 n'a pas ou très peu d'impact visible car la végétation non arrosée est en situation de stress hydrique et ne joue pas son rôle de régulateur thermique ;
- le scénario S2bis a un impact principalement le jour avec l'activité de la végétation arrosée, mais qui diminue avec l'altitude (puisque la végétation est principalement basse ou de moyenne hauteur) ;
- le scénario S3 a un impact principalement le jour puisque l'arrosage des chaussées ne se fait qu'en journée ; l'impact est très limité sur la verticale ;
- le scénario complet Stot a un impact maximal et sur toute la hauteur de la canopée urbaine, avec le cumul des impacts sur tous les paramètres.

#### 4.3.3 Analyse de l'ICU

La Figure 18 illustre les différences spatiales et d'intensité des ICU nocturnes moyens calculés pour les différents scénarios ainsi que leurs anomalies de températures à 2 m calculées par rapport à l'ICU simulé dans la référence. Dans le cas du scénario S1, la structure spatiale de l'ICU dans Paris *intra muros* reste similaire à la simulation de référence, mais en terme d'intensité, une diminution globale allant jusqu'à 1 °C est visible sur l'ensemble de

Paris *intra muros*. Pour le scénario S2, on n'obtient quasiment aucune modification de l'ICU, ni en terme de structure, ni en terme d'intensité, excepté très localement au niveau des deux bois. Dans le cas du scénario S2bis, l'organisation spatiale est modifiée. Les températures les plus élevées sont toujours situées dans les arrondissements centraux, sans grande modification sur ces valeurs de températures à 2 m (arrondissements densément construits sans grande possibilité de verdissement par manque de surface disponible et présence de rues relativement étroites). En revanche, sur toutes les zones végétalisées et plus encore là où l'on ajoute de la végétation (Figure 15), on observe une diminution de l'ICU de l'ordre de 0,5 à 1 °C mais qui atteint localement les 2 °C voire même 3 °C sur les deux bois. En ce qui concerne le scénario S3, l'impact en terme d'ICU est limité (baisse entre 0,25 et 0,5 °C) et restreint surtout aux arrondissements centraux (proportion importante de rues). Par contre, avec le scénario complet Stot qui synthétise toutes les modifications testées, les températures à 2 m dans Paris *intra muros* connaissent une forte diminution (entre 1 et 2 °C, localement jusqu'à 3 °C sur les bois) et la structure de l'ICU s'en trouve modifiée puisque les températures les plus élevées sont à présent situées sur les communes proches de Paris et non plus dans Paris *intra muros*.

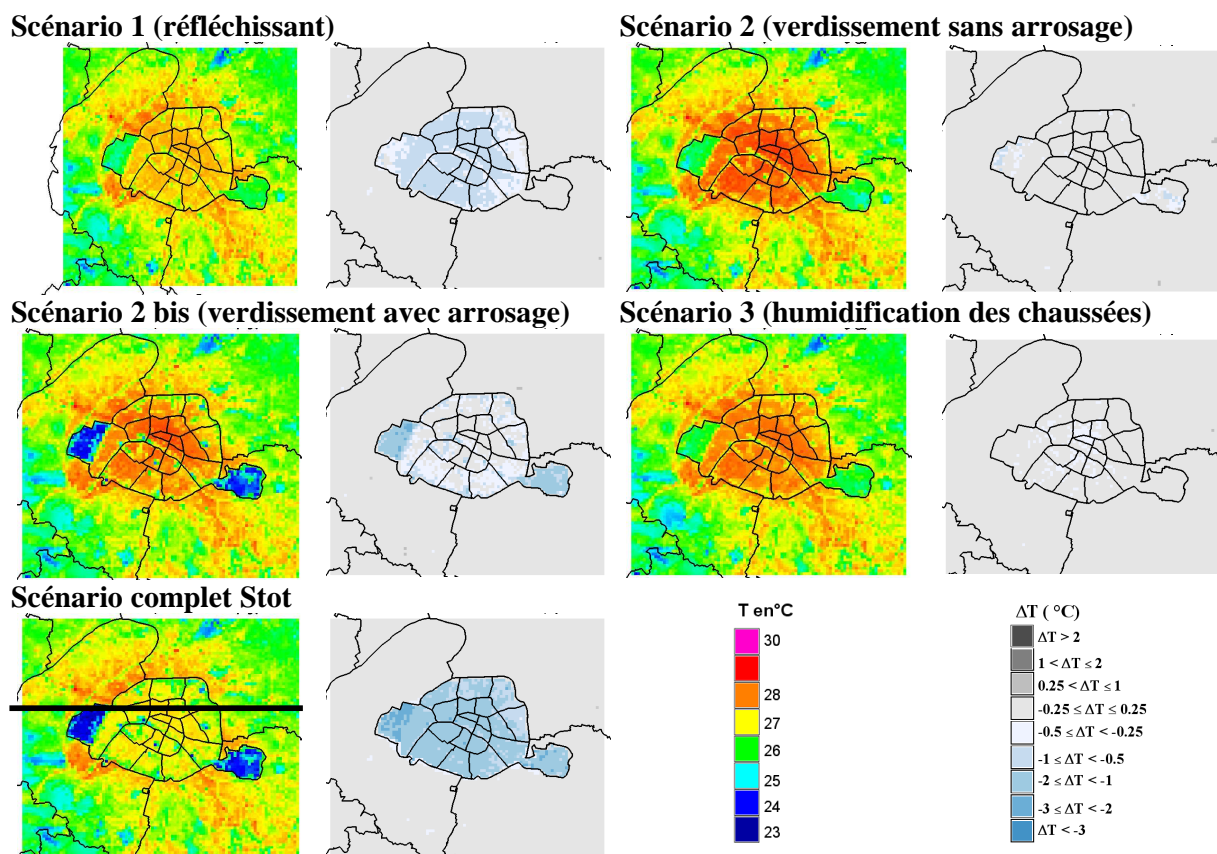


Figure 18 : Comparaison des ICU simulés pour les différents scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot) par rapport à la situation de référence (intensité de l'ICU calculé sur les températures à 2 m simulées dans les différents scénarios (colonnes de gauche) et anomalies de températures à 2 m calculées sur l'ICU entre chacun des scénarios et la référence (colonnes de droite)). L'ICU est calculé comme la moyenne des températures de l'air à 2 m à 02, 03 et 04 UTC (4 h, 5 h et 6 h locales) les 5 nuits de la simulation.

La coupe transversale présentée Figure 19 montre dans la direction considérée une diminution de l'intensité de l'ICU moyen dans les quatre scénarios (S1, S2bis, S3 et Stot) par rapport à la

valeur de 3,5 °C simulée dans la référence. Dans le scénario S1, l'amplitude de l'ICU est abaissée à 2,75 °C entre Paris et la banlieue suite à la diminution de la température au niveau du centre de Paris. Dans le scénario S2bis, l'ICU n'est quasiment pas modifié puisque la température au niveau du centre de Paris diminue peu (0,25 °C) voire pas du tout au niveau du centre densément construit où il n'y a pas de place pour intégrer de la végétation. On remarque cependant l'importante chute de température au niveau du Bois de Boulogne (2 °C) suite à la prise en compte de l'arrosage des zones végétalisées. Dans le scénario S3, l'ICU est faiblement modifié (amplitude de l'ordre de 3,25 °C). Au contraire, dans le scénario Stot, les différents effets s'ajoutent et la baisse de température au niveau de Paris est maximale (de l'ordre de 1,25 °C), d'où un ICU d'amplitude réduite à 2,25 °C. Là aussi, la température au niveau du Bois de Boulogne se réduit fortement suite à la prise en compte de l'arrosage des zones végétalisées ; elle devient plus basse que la température au niveau de la banlieue alentour.

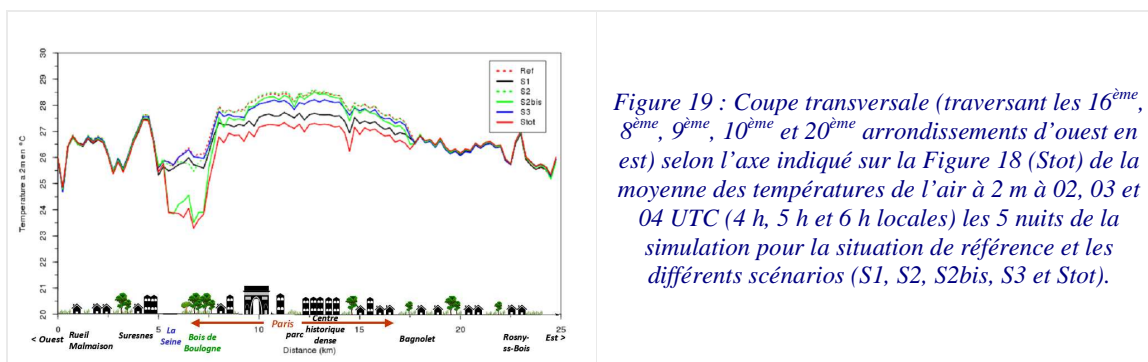


Figure 19 : Coupe transversale (traversant les 16<sup>ème</sup>, 8<sup>ème</sup>, 9<sup>ème</sup>, 10<sup>ème</sup> et 20<sup>ème</sup> arrondissements d'ouest en est) selon l'axe indiqué sur la Figure 18 (Stot) de la moyenne des températures de l'air à 2 m à 02, 03 et 04 UTC (4 h, 5 h et 6 h locales) les 5 nuits de la simulation pour la situation de référence et les différents scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot).

La diminution de l'intensité de l'îlot de chaleur urbain calculé sur les températures à 2 m est variable d'une nuit à l'autre et maximale les nuits des 11/08 et 12/08, et ce dans tous les scénarios (jusqu'à 3 °C localement avec le scénario complet Stot). On retrouve également pour les scénarios S1 et Stot une diminution des températures à 2 m dans le panache urbain pour les deux nuits où la baisse est la plus forte (qui correspondent par ailleurs aux maxima de températures), à l'ouest la nuit du 11/08 et au sud-est de Paris la nuit du 12/08. Par ailleurs, les résultats moyennés en journée (entre 05 et 19 UTC, soit entre 7 h et 21 h locales) et la nuit (entre 20 et 04 UTC, soit entre 22 h et 6 h locales) sur la température à 2 m montrent une diminution systématiquement plus forte en journée de la température à 2 m, et ce pour tous les scénarios, alors que la nuit, la diminution est de moindre ampleur.

#### 4.3.4 Analyse spatiale de la température

La Figure 20 montre les valeurs les plus importantes des anomalies horaires de température à 2 m toutes journées confondues entre les différents scénarios et la référence. Dans le scénario S1, les anomalies horaires maximales se produisent dans Paris *intra muros*, plus précisément au niveau du centre densément construit et de la moitié ouest de Paris (baisse de 2 à 3 °C), plutôt en début de nuit excepté sur le quart nord-ouest de la ville. Dans le scénario S2, elles restent assez faibles (baisse autour de 1 °C) et sont maximales dans les deux bois. Dans le scénario S2bis, ces anomalies sont maximales dans les deux bois de Paris ainsi que les espaces verts parisiens (baisse de 3 à 5 °C). Elles se produisent plutôt en milieu de journée – après-midi. Dans le scénario S3, ces anomalies horaires sont moins importantes que pour les autres scénarios. Elles sont maximales dans Paris *intra muros* (baisse de 1 à 2 °C) et se

produisent plutôt en milieu de journée. Enfin, c'est comme attendu dans le scénario complet Stot que l'on trouve les anomalies horaires de température à 2 m les plus importantes. Elles sont localisées dans Paris *intra muros* (baisse de 5 à 6 °C) et se produisent en fin de matinée et fin d'après-midi.

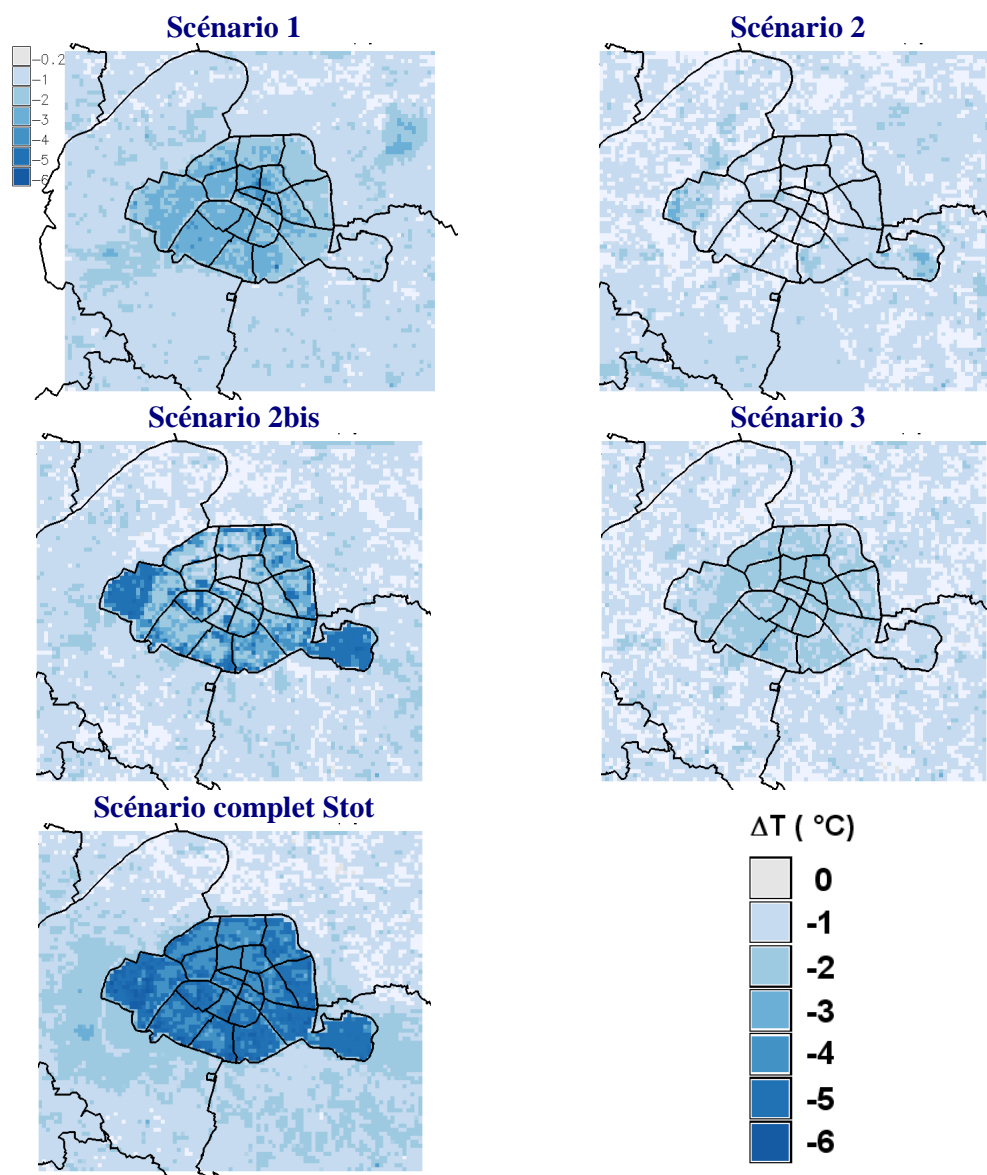


Figure 20 : Anomalies horaires de température à 2 m (en °C) les plus importantes (différence maximale sur tout l'épisode caniculaire de température à 2 m : scénario – référence) pour chaque point de grille du domaine pour les différents scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot).

#### 4.4 Conclusions

L'impact de différents leviers urbains sur le climat de Paris dans le contexte de la canicule de l'été 2003 a été analysé via des simulations numériques à haute résolution menées selon



différents scénarios. Les scénarios retenus s'appliquent à trois modalités d'intervention : la modification des paramètres radiatifs des parois (toits et murs), l'ajout d'eau et l'ajout de végétation, dans l'optique de diminuer l'îlot de chaleur urbain détecté au-dessus de Paris.

La variation des propriétés radiatives des parois opaques du bâti parisien (murs et toitures) dans le sens d'un Paris plus « réfléchissant » a un impact relativement important sur les températures dans Paris *intra muros*. L'impact se fait également sentir dans le panache urbain. L'effet de ces modifications se fait sentir en surface mais également en altitude, avec un effet maximal aux alentours de 10 à 15 m d'altitude, là où les répercussions liées aux modifications des propriétés radiatives des murs et des toits se font sentir simultanément et s'additionnent. Le verdissement de la ville (végétalisation des espaces de sol nu disponibles et de la moitié de la surface des rues dites larges) n'a un impact que si la végétation est maintenue dans un état lui permettant ses activités d'évapotranspiration, c'est-à-dire en l'absence de stress hydrique par arrosage éventuel. En imposant un arrosage suffisant, on obtient un impact très important. Cet impact est d'autant plus important que le taux de végétation est élevé et est plus fort en journée (évapotranspiration de la végétation). Par contre, il ne se transmet que très peu le long de la verticale et reste cantonné aux basses couches de l'atmosphère. L'humidification de la ville par aspersion d'eau dans les rues conduit à une diminution des températures moins élevée. L'impact de cet arrosage est beaucoup plus sensible en journée et cet effet ne se fait sentir qu'en basses couches. Cependant, cette stratégie peut être mise en œuvre très ponctuellement et adaptée en fonction des situations. Elle peut donc être moins coûteuse que d'autres stratégies de plus grande ampleur, présentant ainsi un intérêt certain. La réalisation simultanée de toutes ces modifications a un effet cumulatif. L'intensité de l'ICU est diminuée de 1 à 2 °C et la température à 2 m peut s'abaisser de 6 °C à un instant donné en un point donné. Les effets se font sentir sur toute la hauteur de la canopée urbaine.

Le projet EPICEA contribue à donner des repères sur la modification de l'intensité de l'ICU induite par des actions sur les leviers urbains. En poussant assez loin ces leviers, les résultats permettent d'apprécier l'ampleur de ces modifications sur un plan théorique. L'analyse de ces résultats éclaire les perspectives ouvertes par EPICEA mais reste à l'heure actuelle limitée par des considérations sur la faisabilité technique et les conditions de mise en œuvre et d'exploitation attachées aux scénarios. Cela permet néanmoins d'apporter des éléments à un processus de décision éminemment complexe et long de ce fait.

## 5 Conclusions du projet

---

L'objectif central du projet EPICEA était d'évaluer l'impact du changement climatique à l'échelle de la ville et l'influence du bâti sur le climat urbain en étudiant l'épisode climatique extrême qu'a été la canicule du mois d'août 2003, afin de proposer des stratégies d'adaptation. Les activités ont été organisées en 3 volets : (1) évolution du climat urbain parisien dans la perspective du changement climatique ; (2) étude particulière d'une situation extrême : la canicule de 2003, à l'échelle de l'agglomération parisienne ; (3) lien entre l'urbanisme et le climat urbain : stratégies d'adaptation du territoire parisien pour diminuer l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU).

Dans un premier temps, pour évaluer la vulnérabilité d'une grande agglomération comme Paris à une évolution du climat urbain dans la perspective du changement climatique, des intégrations numériques réalisées sur de longues périodes de temps issues des simulations atmosphériques réalisées à l'aide du modèle ARPEGE-Climat sont menées. Grâce à l'utilisation d'un système de modélisation de surface à 1 km de résolution intégrant une paramétrisation urbaine spécifique, l'accent est mis sur l'étude des interactions entre les effets locaux du changement global et les processus urbains tels que l'ICU. On montre ainsi une hausse significative de la température de l'air à 2 m de plus de 2°C. Particulièrement marquée dans les zones les plus urbanisées en hiver, la tendance au réchauffement est cependant plus marquée en été dans les zones rurales en raison du fort assèchement des sols naturels, ce qui conduit à une diminution substantielle des forts ICU en période estivale. L'étude de la demande énergétique, abordée à travers l'analyse des degrés-jours de chauffage et de refroidissement, indique une diminution de 30 % des besoins en chauffage durant l'hiver, et inversement une augmentation très conséquente des besoins en climatisation pour maintenir le confort thermique en été. Cette première approche permet de situer les ordres de grandeur mais ne prétend pas donner des conclusions définitives relativement à ces dernières questions.

Dans un deuxième temps, une analyse fine de la canicule du mois d'août 2003 est effectuée. Elle consiste, à l'aide des outils Mésos-NH et TEB, en une simulation de la période du 8 au 13 août 2003 à Paris, durant laquelle il a été observé la surmortalité la plus élevée. Une première modélisation a été menée à la résolution de 2 km sur une vaste zone qui inclut toute la région Île-de-France où Paris est configuré avec des paramètres urbains uniformes. Elle sert de calibrage et de contrôle du modèle par comparaison aux observations issues du réseau de Météo-France et montre que le modèle Mésos-NH couplé au modèle TEB donne des résultats très satisfaisants sur l'ensemble des processus de météorologie urbaine classiques et accentués par cette période de canicule : mise en place de l'ICU, formation d'un panache urbain, bilan d'énergie, *etc.* Une étroite collaboration avec l'APUR permet ensuite de réaliser une seconde simulation à la résolution de 250 m grâce à une description précise de Paris en termes d'occupation des sols et de morphologie du bâti à cette échelle. Cette description est complétée par la définition par le CSTB des caractéristiques thermiques et des propriétés radiatives des matériaux de construction parisiens nécessaires aux simulations numériques. L'urbanisation altère le bilan d'énergie par modification de l'occupation des sols, ce qui modifie le climat urbain. Caractéristique majeure, l'ICU apparaît en fin de nuit entre le centre de Paris (arrondissements les plus chauds : 2<sup>ème</sup>, 3<sup>ème</sup>, 8<sup>ème</sup>, 9<sup>ème</sup>, 10<sup>ème</sup> et 11<sup>ème</sup>) et les zones rurales alentour de l'ordre de 4 à 7 °C sur les températures à 2 m, particulièrement marqué avec les zones boisées au sud-ouest et au nord de Paris. Une analyse temporelle de l'ICU a montré sa variabilité quotidienne ainsi que sa mise en place. Le phénomène qui le pilote est le

refroidissement, qui se fait plus rapidement et de manière plus importante sur les zones végétalisées. Des micro ICU d'amplitude 2 à 4 °C se forment également au sein même de Paris *intra muros*. Par ailleurs, selon la force du vent, un panache urbain peut se former sous le vent en aval de la zone la plus chaude. Cette simulation, dite de référence, identifie ainsi les zones urbaines de Paris les plus vulnérables aux processus urbains, à savoir les arrondissements fortement urbanisés du centre de Paris, les arrondissements périphériques, ainsi que les zones situées dans le panache urbain.

Enfin, dans un troisième temps, les modélisations effectuées concernent les modifications du climat urbain liées à quelques situations possibles d'évolution de Paris élaborées en concertation avec la Ville de Paris. Ces évolutions s'appuient sur différents leviers urbains préalablement identifiés et s'intéressent particulièrement aux matériaux de construction (modification des paramètres radiatifs des toits et murs) et aux trames vertes (végétalisation de l'espace urbain) et bleues (présence d'eau dans l'espace urbain). Ces tests de sensibilités ont été menés dans les mêmes conditions météorologiques (canicule de l'été 2003) que la simulation de référence. La variation des propriétés radiatives des parois opaques du bâti parisien (murs et toitures) dans le sens d'un Paris plus « réfléchissant » a un impact relativement important sur les températures dans Paris *intra muros* (diminution de l'intensité de l'ICU de 1 °C et diminution maximale instantanée des températures à 2 m de 2 à 3 °C), mais également dans le panache urbain. L'effet de ces modifications se fait sentir à la fois en surface et en altitude, avec un effet maximal aux alentours de 10 à 15 m d'altitude, là où les répercussions liées aux modifications des propriétés radiatives des murs et des toits se font sentir simultanément et donc s'additionnent. Le verdissement de la ville retenu dans cette étude (végétalisation des espaces de sol nu « disponibles » et de la moitié de la surface des rues dont la largeur est supérieure à 15 m) n'a un impact que si la végétation est maintenue dans un état lui permettant ses activités d'évapotranspiration. Ainsi, si la végétation est en situation de stress hydrique, elle se comporte quasiment comme du sol nu, n'occasionnant pas de transfert d'énergie par le biais du flux de chaleur latente. En imposant un arrosage suffisant dans nos simulations numériques, on obtient un impact très important (diminution de l'intensité de l'ICU de 1 à 3 °C et diminution maximale instantanée des températures à 2 m de 3 à 5 °C) notamment en journée (évapotranspiration de la végétation), et d'autant plus important que le taux de végétation est élevé. L'humidification de la ville par aspersion d'eau dans les rues conduit à une diminution de l'intensité de l'ICU inférieure à 0,5 °C et à une diminution maximale instantanée des températures à 2 m de l'ordre de 1 à 2 °C et cet effet ne se fait sentir qu'en basses couches. En additionnant toutes ces modifications, les effets sur le climat urbain se cumulent, avec une intensité de l'ICU diminuée de 1 à 2 °C et une baisse maximale instantanée des températures à 2 m de 5 à 6 °C. Les effets se font sentir sur toute la hauteur de la canopée urbaine.

L'emploi d'une méthodologie novatrice qui intègre le modèle de canopée urbaine TEB a permis d'axer plus spécifiquement notre analyse de l'impact du changement climatique global à l'échelle de Paris et de sa région sur le micro-climat qui est perçu par les habitants au niveau des rues. En affinant ainsi les projections climatiques au niveau d'un territoire et sur une problématique précise, des tendances en matière d'exposition, de vulnérabilité et d'extrêmes climatiques sont identifiées et peuvent ainsi éclairer les stratégies, les politiques et les mesures de gestion des risques et d'adaptation. L'intérêt qu'elles présentent pour la prise de décision dépend de leur ampleur et de leur degré de certitude aux échelles spatiales et temporelles de l'aléa considéré et de la possibilité de mettre en oeuvre des mesures de gestion du risque.

Le projet EPICEA dépasse cette notion de mesure de gestion des risques et s'intéresse à l'adaptation. En effet, il contribue à donner des repères, sur un plan théorique, sur l'ampleur des modifications de l'intensité de l'ICU et des autres spécificités du climat urbain induites par des actions sur les leviers urbains. Des considérations sur la faisabilité technique et les conditions de mise en œuvre et d'exploitation attachées aux scénarios étudiés dans le projet en limitent cependant à l'heure actuelle la portée. Cela permet néanmoins d'apporter des éléments à un processus de décision éminemment complexe et long de ce fait. Les simulations atmosphériques à très haute résolution réalisées dans le cadre d'EPICEA ont par ailleurs permis de considérer des spécificités complexes de l'occupation des sols comme les surfaces urbaines et ouvrent de grandes perspectives de travaux de météorologie urbaine. L'exploration d'autres tests de sensibilité modifiant la morphologie de la ville dans une optique de long terme est à l'étude. D'autres projets (ANR-VURCA, ANR-MUSCADE, ANR-RESILIS, ANR-VegDUD), à la croisée de diverses disciplines, participent également à la compréhension du climat urbain et constituent des connaissances et des savoir-faire sur l'adaptation des villes en vue d'anticiper l'impact du changement climatique lors de projets d'aménagement.

## 6 Références

---

- Akbari H., P. Berdahl, R. Levinson, S. Wiel, W. Miller, and A. Desjarlais, 2006. *Cool-Color Roofing Material*. California Energy Commission, PIER Building End-Use Energy Efficiency Program, EC-500-2006-067.
- Akbari H. and R. Levinson, 2008. Evolution of Cool-Roof Standards in the US, *Advances in building energy research*, **2**, 1-32.
- Boé, J., L. Terray, F. Habets, and E. Martin, 2006. A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling, *J. Geophys. Res.*, **111**, D23106.
- Colombert M., 2008. *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est, 539 p.
- Déqué M., C. Drevet, A. Braun, and D. Cariolle, 1994. The ARPEGE-IFS atmosphere model : a contribution to the French community climate modelling, *Climate Dynamics*, **10**, 249-266
- Déqué, M., 2007. Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values, *Global and Planetary Change*, **57**(1-2), 16-26.
- Ducharne, A., F. Habets, M. Déqué, L. Evaux, A. Hachour, A. Lepaillier, T. Lepelletier, E. Martin, L. Oudin, C. Pagé, P. Ribstein, E. Sauquet, D. Thiéry, L. Terray, P. Viennot, J. Boé, M. Bourqui, O. Crespi, S. Gascoin, and J. Rieu, 2009. *Impact du changement climatique sur les Ressources en eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme*, Rapport final du projet RExHySS, Programme GICC, 62 p.
- Durand, Y., E. Brun, L. Merindol, G. Guyomarc'h, B. Lesaffre, and E. Martin, E., 1993. A meteorological estimation of relevant parameters for snow models, *Annals of Glaciology*, **18**, 65-71.
- Durand, Y., G. Giraud, E. Brun, L. Merindol, and E. Martin, 1999. A computer-based system simulating snowpack structure as a tool for regional avalanche forecasting, *Journal of Glaciology*, **45**, 469-484.
- Erell E. et D. Pearlmutter, 2012. *Effect of high-albedo materials on pedestrian thermal comfort in urban canyons*. 8<sup>th</sup> International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Fujibe F., 2011. Urban warming in Japanese cities and its relation to climate change monitoring. *Int. J. of Climate*, **31**, 162-173, doi: 10.1002/joc.2142.
- Früh B., P. Becker, T. Deuschlinder, J.-D. Hessel, M. Kossmann, I. Mieskes, J. Namyslo, M. Roos, U. Sievers, T. Steigerwald, H. Turau, and U. Wienert, 2011. Estimation of climate change impacts on the urban heat load using an urban climate model and regional climate projections. *J. of Appl. Meteorol. and Climatol.*, **50**, 167-184.
- Gaffin S. R., C. Rosenzweig, R. Khanbilvardi, L. Parshall, S. Mahani, H. Glickman, R. Goldberg, R. Blake, R. B. Slosberg, and D. Hillel, 2008. Variations in New York City's urban heat island strength over time and space. *Theor. Appl. Climatol.*, **94**, 1-11.
- García Cueto R. O., A. Tejada Martínez, and E. Jáuregui Ostos, 2010. Heat waves and heat days in an arid city in the northwest of Mexico: current trends and in climate change scenarios. *Int. J. Biometeorol.*, **54**(4), 335-345.
- Hallegatte, S., J.-C. Hourcade, and P. Ambrosi, 2007. Using climate analogues for assessing climate change economic impacts in urban areas, *Clim. Change*, **82**(1), 47-60.
- Hemon D. et E. Jouglu, 2003. *Estimation de la surmortalité et principales caractéristiques épidémiologiques*. Rapport remis au Ministre de la Santé et des Affaires Sociales et de Personnes Handicapées le 25 septembre 2003, 59 p.

- IPCC, 2000. *Special report on emissions scenarios*, Cambridge University Press, UK., 570 p.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change : GIEC), 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and A. Reisinger, (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p.
- Iizuka S., Y. Kondo, S. Ito, H. Kusaka, and M. Hara, 2012. Impacts of future urban planning/structure on thermal environment. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Jones, P.D., P.Y.A. Groisman, M. Coughlan, N. Plummer, W.-C. Wang,, and T.R. Karl, 1990. Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land, *Nature*, **347**, 169-172.
- Kikegawa Y., M. Mohan, B.R. Gurjar, and K Hokari, 2012. *Structure of air temperature distribution and urban warming alleviation potential over Delhi*. 8<sup>th</sup> International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Klein Tank, A.M.G. and F.W. Zwiers, *Guidelines on analysis of extremes in a changing climate in support of informed decisions for adaptation*, WMO/TD-No. 1500, 56 pp (2009).
- Kossman M., B. Früh, and G. Halbig, 2012. *Estimation of regional climate change impacts on summertime thermal conditions in Cologne – a dynamical-statistical downscaling approach*. 8<sup>th</sup> International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Lafore, J. P. et al., 1998. The Meso-NH atmospheric simulation system. Part I: adiabatic formulation and control simulations, *Annales Geophysicae*, **16**, 90-109.
- Lawrence Berkeley National Laboratory and Oak Ridge National Laboratory 2006. *Cool-color roofing material*. Pier final project report.
- Lemonsu A., 2010. *Inclusion of vegetation in the TEB urban canopy model for improving urban microclimate modelling in residential areas*, VURCA project, Technical report, 20 p.
- Lemonsu A., R. Kounkou-Arnaud, J. Desplat, J.-L. Salagnac, and V. Masson, 2012a. Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate, *Climatic change*, in press, doi: 10.1007/s10584-012-0521-6.
- Lemonsu A., V. Masson, L. Shashua-Bar, E. Erell,, and D. Pearlmutter, 2012b. Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modeling urban green areas, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, **5**, 1295–1340, doi:10.5194/gmdd-5-1295-2012.
- Masson V., 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Bound.-Layer Meteorol.*, **94**, 357-397.
- Noilhan J. and S. Planton, 1989. A simple parameterisation of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536-549.
- Noilhan J. and J.-F. Mahfouf, 1996. The ISBA land surface parameterisation scheme. *Glob. Plan. Ch.*, **13**, 145-159.
- Oke T. R., 1987. *Boundary Layer Climates*, Methuen, London and New York, 435 p.
- Pigeon G., A. Lemonsu, V. Masson, and J. Hidalgo, 2008. De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville, *La Météorologie*, **62**, 39-47.
- Porcher G., 1993. *Cours de climatisation: bases du calcul des installations de climatisation*, Les Editions parisiennes, 317 p.
- Ptak B. and Halbig G., 2012. *Climate-adapted metropolitan city of Cologne, Germany*. 8<sup>th</sup> International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.

- Rosenzweig C. and W. D. Solecki, 2001. Climate change and a global city - Learning from New York. *Environment*, **43**(3), 2-12.
- Salgado, R., and Le Moigne, P., 2010, Coupling of the FLake model to the Surfex externalized surface model, *Boreal Env. Res.*, **15**, 231-244.
- Stein J., E. Richard, J.P. Lafore, J.P. Pinty, N. Asencio, and S. Cosma, 2000. High -resolution non-hydrostatic simulations of flash-flood episodes with grid-nesting and ice-phase parametrization. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **72**, 101-110
- Takahashi, R., A. Asakura, K. Koike, S. Himeno, and S. Fujita, 2010. *Using snow melting pipes to verify water sprinkling's effect over a wide area. In Sustainable techniques and strategies in urban water management*, 7th International Conference, Lyon, France: Novatech. .
- Van den Besselaar, E.J.M., A.M.G.Klein Tank, and G. Van der Schrier, 2009. Influence of circulation types on temperature extremes in Europe, *Theor. Appl. Climatol.*, **99**, 431-439, DOI:10.1007/s00704-009-0153-6.
- Wilby R. L., 2003. Past and projected trends in London's urban heat island. *Weather*, **58**(7), 251-260.