

MÉTHODOLOGIE POUR LA QUANTIFICATION DE L'IMPACT D'AMÉNAGEMENTS URBAINS SUR UN CLIMAT URBAIN MODIFIÉ

Raphaëlle KOUNKOU-ARNAUD¹, Julien DESPLAT¹, Aude LEMONSU²,
Jean-Luc SALAGNAC³ et Mireille LAUFFENBURGER⁴

¹ Etudes & Climatologie - Direction Ile-de-France/Centre – Météo-France

73 avenue de Paris
94165 Saint-Mandé Cedex – France
raphaëlle.koukou@meteo.fr et julien.desplat@meteo.fr

² CNRM – CNRS/Météo-France

42, avenue Gaspard Coriolis
31057 Toulouse Cedex 1 – France

³ CSTB

10, Cours Louis Lumière
94300 Vincennes – France

⁴ Université de Lorraine (Nancy II)

3 place Godefroy de Bouillon
BP 3397 – 54015 Nancy cedex – France

Résumé

Dans le cadre du projet EPICEA (Ville de Paris, Météo-France et Centre Scientifique et Technique du Bâtiment), cette étude s'intéresse à un épisode climatique extrême – la canicule d'août 2003 – en tant qu'extrapolation dans le futur, puisque, si l'on considère le scénario le plus pessimiste (A2), un tel phénomène concernerait l'Europe de l'Ouest en moyenne un été sur deux d'ici 2070. Une simulation à 250 m de résolution de la période allant du 08 au 13 août 2003 est effectuée en utilisant le modèle de recherche numérique MésosNH, modèle non-hydrostatique à échelle très fine préfigurant la future génération de modèles numériques de prévision du temps, et le schéma de ville Town Energy Budget (TEB). TEB représente la ville de manière théorique sous la forme d'un canyon urbain dans lequel est modélisé le bilan d'énergie des surfaces élémentaires urbaines (route, toit mur). Il est ici employé en mode « couplage » avec le modèle MésosNH pour caractériser au mieux les conditions atmosphériques urbaines. Son homologue pour la végétation, Interactions Sol-Biosphère-Atmosphère (ISBA), est également utilisé. La ville de Paris est représentée en mode « réaliste » par le biais d'une base de données du couvert urbain parisien élaborée conjointement avec l'Atelier Parisien d'Urbanisme, intégrant l'altitude, les surfaces de végétation, de voirie, d'eau, les hauteurs des bâtiments, les différents types de toits et de murs et leur surface, etc. Les données de surface issues de cette base sont retravaillées et intégrées au modèle de ville TEB via un logiciel SIG. Les résultats sont très satisfaisants : le modèle reproduit bien les observations de température et de vent, ainsi que le cycle diurne d'humidité relative et les caractéristiques du climat urbain sont clairement identifiées. Les résultats permettent de discerner des micro-ICU au sein de Paris avec des différences de température de 2 à 4°C et mettent en évidence la vulnérabilité des arrondissements périphériques et de certaines communes limitrophes en liaison avec le panache urbain engendrant des différences de température de l'ordre de 2°C. Par ailleurs, différents leviers d'action sur le climat urbain ont été préalablement identifiés. Les plus pertinents sont l'albédo des surfaces (toits, murs et voirie) et la végétalisation des surfaces urbaines. Différents tests de sensibilité sont donc envisagés en modifiant ces paramètres, dans un contexte de canicule (août 2003) : éclaircissement des façades et des toitures, verdissement et humidification de la ville. Cette étude confirme l'intérêt d'utiliser ce type de schéma urbain en intégrant les spécificités complexes de l'occupation des sols en milieu urbain dans l'optique d'études sur l'adaptation d'un territoire au changement climatique, en comparant une situation de référence – présentée ici – à différents scénarios réalisables dans le futur.

Mots-clés : Climat urbain, changement climatique, canicule, îlot de chaleur urbain, été 2003.

A methodology for quantifying impacts of urban planning on a changing urban climate

Abstract

This study is part of the EPICEA project (joint collaboration between the City of Paris, Météo-France and the Scientific and Technical Centre for Building). It is focused on an extreme meteorological episode such as the 2003 heat wave that is considered as representative of future summers: regarding the pessimistic scenario A2, this may concern Western Europe on alternate summers as from 2070. A simulation of the period from 08/08/2003 to 13/08/2003 (corresponding to the highest mortality) with a 250 m high resolution is conducted, using the atmospheric model Méso-NH, the model Interaction between Soil, Biosphere, and Atmosphere (ISBA) for the natural covers and the specific urban canopy model Town Energy Budget (TEB) for built-up covers. TEB is aimed to simulate the turbulent fluxes into the atmosphere at the surface of a mesoscale atmospheric model covered by buildings, roads, or any artificial material, and calculates the urban energy budget of three urban surfaces (one for the roofs, roads, and walls). The city of Paris is represented as a realistic one, using datas from a specific database of the Parisian urban canopy that has been elaborate with the Parisian Urban Planning Agency (APUR). These datas include altitude, surface vegetation, roads, water, heights of buildings, different types of roofs and walls and their surface, etc.). They have been re-analysed and incorporated into the TEB urban model via a GIS software. One can then be confident in the results: The model compares correctly against observation for temperature and wind and reproduces correctly the diurnal humidity cycle, and the different processes involved in the urban climate are highlighted. The results shows micro-UHI inside of Paris from 2 to 4°C and the vulnerability of the peripheral districts of Paris and some surrounding cities due to urban plume (up to 2°C warmer). Various actions on the built environment are identified besides, which have a potential impact on urban climate. The most relevant are the modification of the surfaces albedo (roofs, walls and roads) and the greening of urban surfaces. Several sensitivity tests are therefore planned with different settings of Paris in the context of the 2003 heat wave: walls and roofs whitening, greening, and wetting of the city. This study confirms the usefulness of such urban schemes and informations about the complex specificities of land use in urban locations for adaptation to climate change studies by comparing a reference situation, such as the one described here, to different future scenarios.

Keywords: Urban climate, climate change, heat wave, Urban Heat Island, summer 2003.

Introduction

Les projections climatiques d'ici la fin du siècle indiquent à la fois un réchauffement climatique global et une probable augmentation de la fréquence et de l'intensité d'événements extrêmes dans différentes régions du globe. Pour les extrêmes chauds, ces phénomènes viendront s'ajouter au microclimat spécifique des villes lié à la forme urbaine. Ainsi, l'îlot de chaleur urbain (ICU), processus majeur du climat urbain (Oke, 1987), s'ajoutera 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 entre les températures minimales observées sur Paris et sur les zones rurales environnantes a atteint 8°C (Météo-France) et l'analyse de longues séries d'observation pour des stations situées dans des environnements urbanisés a déjà mis en évidence la présence d'un signal sur les températures lié à l'ICU. Ce signal se superpose à la tendance de macro-échelle, renforçant ainsi localement l'effet du réchauffement global (Jones *et al.*, 1990 ; Wilby, 2003 ; 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 et Solecki, 2001), en termes de gestion des infrastructures, ressources en eau, pollution, confort bioclimatique et santé publique, demande énergétique, etc. Pour pouvoir préparer les villes à ce changement, il est donc nécessaire d'évaluer leur vulnérabilité afin d'élaborer 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. Récemment, des projections du climat urbain futur ont été produites pour l'analyse de certaines problématiques telles que l'occurrence d'événements chauds (Garcia Cueto *et al.*, 2010 ; Früh *et al.*, 2010) ou les ICUs (Wilby, 2003). Une alternative 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 l'été 2003 pourrait concerner l'Europe de l'Ouest un été sur deux à partir de 2070 (IPCC, 2007).

Ces travaux s'insèrent dans le cadre du projet EPICEA (Desplat *et al.*, 2009) mené conjointement par Météo-France, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et la Ville de Paris pour apporter une aide à la décision dans un contexte d'adaptation du territoire parisien face au changement climatique. L'objectif central du projet est de quantifier l'impact du changement climatique à l'échelle de la ville et l'influence du bâti sur le climat urbain afin de proposer des stratégies d'adaptation. Les travaux sont répartis en trois volets : (1) évolution du climat urbain dans la perspective du changement climatique ; (2) étude particulière d'une situation extrême, la canicule de 2003 ; (3) lien entre l'urbanisme et le climat urbain. Le présent article rassemble les volets 2 et 3 du projet et se consacre à une analyse fine de la canicule de 2003. Elle consiste en une simulation de la canicule à Paris durant la période du 8 au 13 août 2003, pendant laquelle a été observé un pic de surmortalité sur le territoire français, et plus particulièrement à Paris (INVS, 2006), puis en la présentation de différents leviers urbains ayant potentiellement un impact sur la météorologie urbaine.

1. Méthodologie

La méthodologie retenue s'appuie sur plusieurs simulations menées avec un modèle de recherche en prévision numérique du temps.

1.1. Présentation des modèles utilisés

Les simulations sont réalisées avec le modèle météorologique MESO-NH (Lafore *et al.*, 1998), développé conjointement par le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM : Météo-France/CNRS) et le Laboratoire d'Aérodynamique de l'Observatoire Midi-Pyrénées (CNRS), et le système de modélisation des surfaces continentales SURFEX (Salgado et Le Moigne, 2010), développé à Météo-France. MESO-NH est un modèle de recherche pour la prévision numérique du temps à résolution fine (de l'échelle sous-synoptique, ~10 km, à la micro-échelle, ~10 m, en passant par la méso-échelle, ~1 km), constitué d'une partie dynamique et d'une partie physique couplées entre elles. Les simulations sont possibles en 3D, 2D ou 1D et permettent l'étude de cas réels ou de cas idéalisés. Le forçage atmosphérique est fourni à MESO-NH par le modèle du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT). SURFEX décrit la surface comme une mosaïque composée de 4 principaux types de couverts : 1) les mers et océans, 2) les lacs et rivières, 3) les sols naturels et la végétation, 4) 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 Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère (ISBA ; Noilhan et Planton, 1989 ; Noilhan et Mahfouf, 1996) est appliqué aux couverts naturels, et le schéma de canopée urbaine Town Energy Balance (TEB ; Masson, 2000) est appliqué aux surfaces minéralisées. Une fois les échanges calculés indépendamment pour chaque type de surface, ils sont agrégés à l'échelle de la maille du domaine en fonction des fractions de couverture associées.

Le modèle ISBA est un schéma qui décrit les échanges en eau et en énergie entre les couverts naturels (sol et végétation) et la basse atmosphère. Il inclut le traitement du contenu en chaleur du sol, du contenu en eau du sol, de l'interception de l'eau par la végétation et des processus de transfert aérodynamiques dans la couche de surface atmosphérique. Le sol est divisé en trois couches : couche de surface, couche racinaire et couche profonde. A partir de données de types de sol et de végétation et de texture du sol (fraction d'argile et de sable), il calcule le bilan d'énergie des surfaces (figure 1).

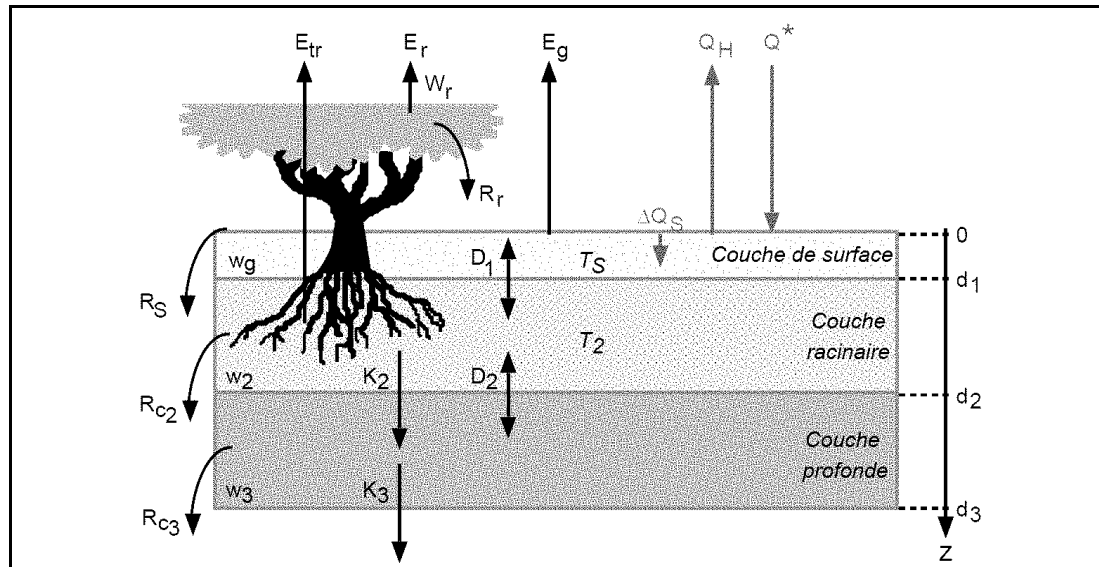


Figure 1 : Représentation des échanges dans le modèle ISBA : Q^* est le rayonnement net, ΔQ_s le flux de stockage, Q_H le flux de chaleur latente, d_1 , d_2 et d_3 représentent l'épaisseur des couches de sol, T_s la température de surface, T_2 la température de la couche racinaire, w_g , w_2 et w_3 les contenus en eau du sol pour chaque couche, E_g l'évaporation du sol nu, E_{tr} la transpiration des plantes, E_r l'eau interceptée par le feuillage, W_r le réservoir d'interception de l'eau par la végétation, R_s , R_{c2} et R_{c3} le ruissellement (depuis la couche de surface, racinaire ou profonde), D_1 et D_2 la diffusion de l'eau entre les couches et K_2 et K_3 le drainage gravitationnel (d'après Lemonsu, 2005). *Presentation of the different fluxes in ISBA scheme: net radiation Q^* , storage heat flux ΔQ_s , latent heat flux Q_H , soil layers depths d_1 , d_2 , and d_3 , surface soil temperature T_s , root layer temperature T_2 , soil water content for each soil layer w_g , w_2 and w_3 , bare soil evaporation E_g , plant transpiration E_{tr} , water intercepted by leaves E_r , vegetation water reservoir W_r , runoff (surface layer R_s ; root layer R_{c2} , deep layer R_{c3}), water diffusion between soil layers D_1 and D_2 , drainage K_2 and K_3 .*

Le modèle TEB simule les échanges entre les surfaces bâties et l'atmosphère. Le principe repose sur une géométrie urbaine simplifiée, avec un canyon urbain moyen et des surfaces urbaines élémentaires (toit, mur et route) constituées de plusieurs couches successives de matériaux. Le modèle réalise les bilans radiatifs de chaque surface. Les échanges turbulents sont représentés par un réseau de résistances aérodynamiques (figure 2). La conduction de chaleur dans les murs, le toit et la route est calculée et les échanges de chaleur entre la couche interne du mur et du toit et la température intérieure du bâtiment sont déterminés par l'intermédiaire d'une résistance thermique qui simule l'ensemble des échanges radiatifs et convectifs. Les termes anthropiques pris en compte sont les flux de chaleur sensible et latente – prescrits pour les émissions liées au trafic et aux activités industrielles – et le chauffage domestique (calculé par rapport à une température de rappel).

Le module CANOPY (Hamdi et Masson, 2008 ; Masson et Seity, 2009) permet de détailler la couche limite de surface à l'intérieur et au-dessus de la canopée urbaine et ainsi d'améliorer les prévisions des champs météorologiques à l'intérieur du canyon urbain. L'approche retenue introduit la notion de force de traînée pour prendre en compte les effets verticaux des bâtiments (effets thermiques et dynamiques). On dispose ainsi de profils (température,

humidité, vent) au sein du canyon urbain et par conséquent d'une véritable modélisation 3D des processus urbains.

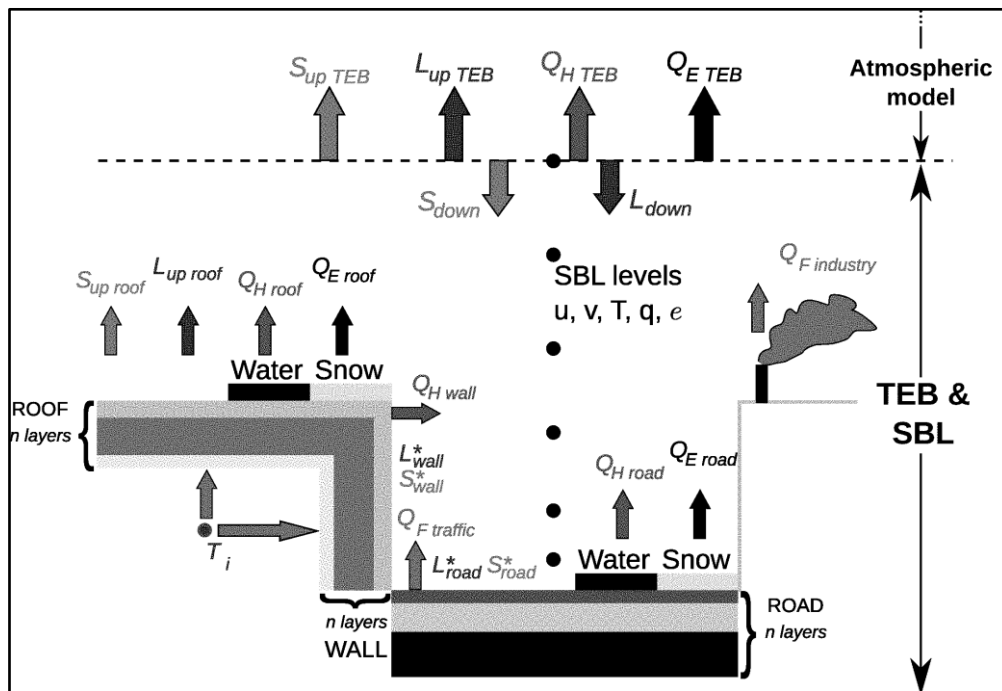


Figure 2 : Représentation schématique du fonctionnement du modèle de canopée urbaine Town Energy Budget, TEB (d'après Masson, 2000). *Town Energy Budget (TEB) urban canyon scheme.*

L'étude à la résolution de 250 m est menée avec une nouvelle version de TEB, TEB-Veg (Lemonsu, 2010) qui intègre les espaces verts urbains (parcs et squares mais aussi jardins et cours privés ainsi qu'arbres d'alignement) à l'intérieur du canyon urbain. Ceci permet de distinguer la végétation dite « pure » (forêts, champs, grands parcs), non influencée par la présence de surfaces bâties de la végétation dite urbaine. Le 4^{ème} type de couvert de SURFEX, le couvert urbain (partie « ville ») décrit par TEB, se décompose dorénavant en une partie bâtie et une partie végétation urbaine, totalement déconnectée de la végétation « pure », et appelée partie « jardin ». Le fonctionnement de TEB-Veg s'articule ainsi :

- 1) Calculs préliminaires ;
- 2) Calcul de l'émissivité et de l'albédo de la végétation urbaine ;
- 3) Calcul du rayonnement solaire reçu et absorbé par les différentes surfaces (toits, routes, murs, végétation urbaine) en prenant en compte les effets d'ombre et de piégeage radiatif ;
- 4) Calcul des coefficients associés aux contributions des différentes surfaces à l'émission dans les grandes longueurs d'onde ;
- 5) Calcul du rayonnement de grande longueur d'onde reçu par la végétation urbaine ;
- 6) Appel d'ISBA via l'interface GARDEN qui paramètre les échanges surface – atmosphère pour la végétation urbaine ;
- 7) Appel de TEB qui paramètre les échanges surface – atmosphère pour les couverts minéralisés (toits, routes, murs) mais en incluant les contributions de la végétation urbaine ;
- 8) Calcul des flux agrégés sur la partie « ville » de la maille ainsi que de la température et de l'humidité à l'intérieur du canyon, en incluant les contributions de la partie minéralisée et de la végétation urbaine.

1.2. Présentation de la base de données du couvert urbain parisien

Une forte 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 de 29,25 km x 22,5 km centré sur Paris, on dispose pour chaque maille du domaine (250 m x 250 m, soit une surface de 62 500 m²) des données de surface de végétation, surface bâtie (figure 3), surface d'eau (figure 4), surface et type de toit (figure 5), altitude et hauteur moyenne des bâtiments. Sur Paris intra-muros, on dispose de données plus détaillées, dont la surface de mur et la classe d'âge du bâtiment (figure 6), la surface de terre (sol nu) et la surface de bitume. Ces données ont été obtenues par l'analyse de photos aériennes ou par traitement de données urbanistiques de la ville.

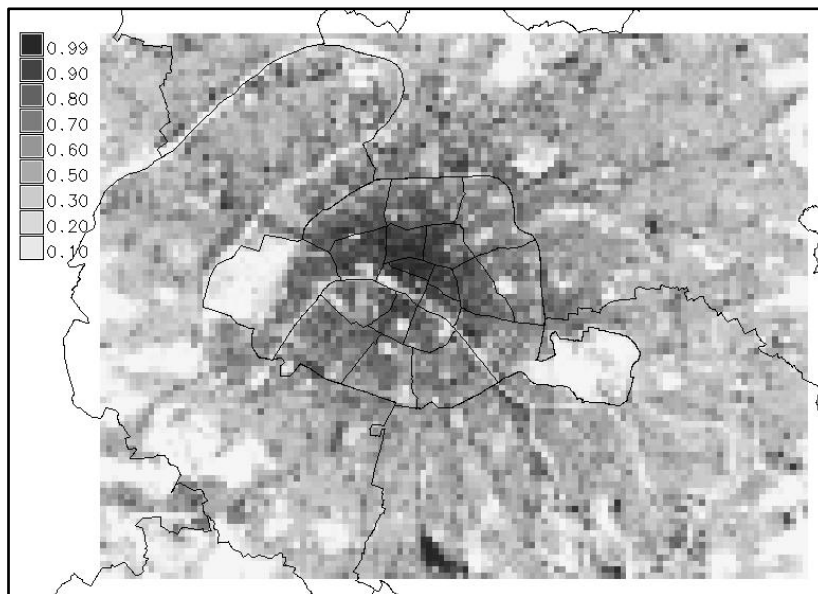


Figure 3 : Base de données du couvert urbain parisien : fraction de partie « bâtie » de la ville dans la maille (fraction de ville à laquelle on a soustrait la partie « jardin », i.e. la végétation). *Parisian urban cover database: building fraction inside the town tile (fraction of town tile minus fraction of gardens in the town tile, i.e. urban natural soils and vegetation).*

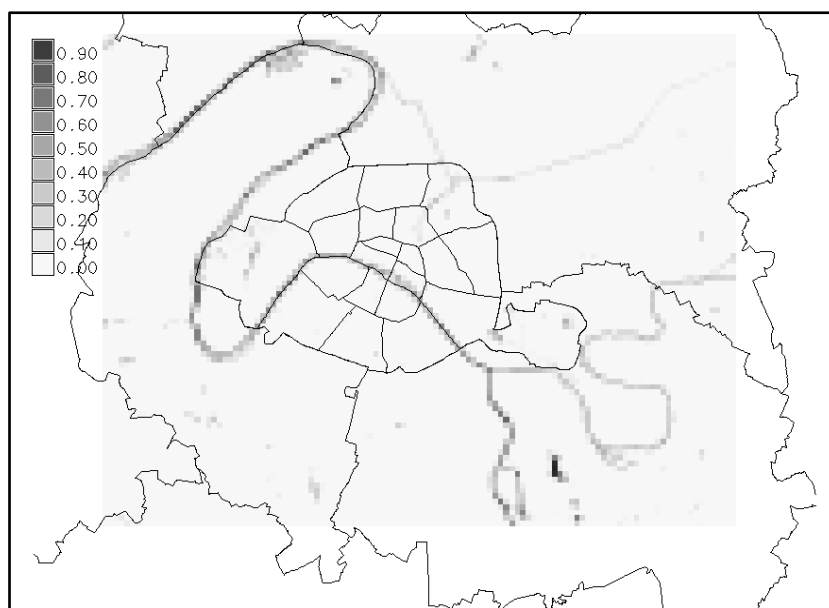


Figure 4 : Base de données du couvert urbain parisien : fraction de surfaces aquatiques dans la maille. *Parisian urban cover database: fraction of water.*

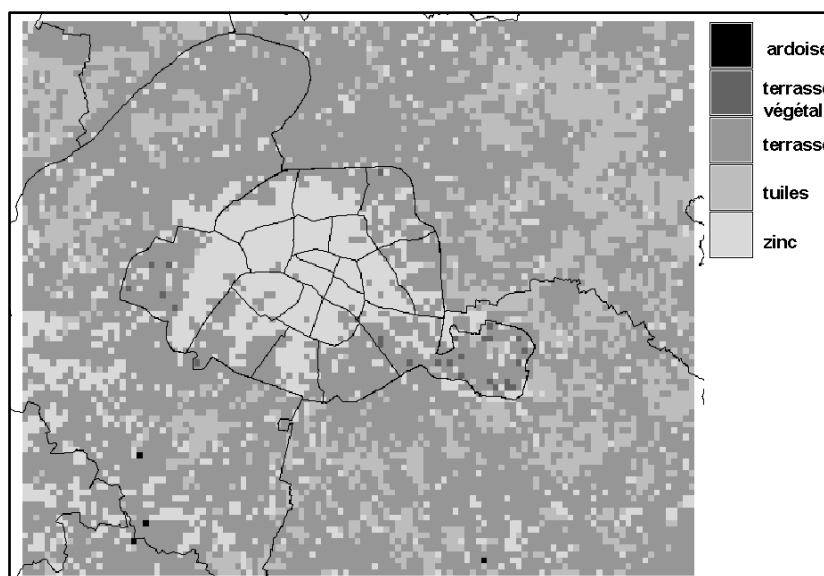


Figure 5 : Base de données du couvert urbain parisien : répartition par maille des types de toits majoritaires, classés par matériau. *Parisian urban cover database: types of roofs (slate, green flat roof, flat roof, tiles, and zinc).*

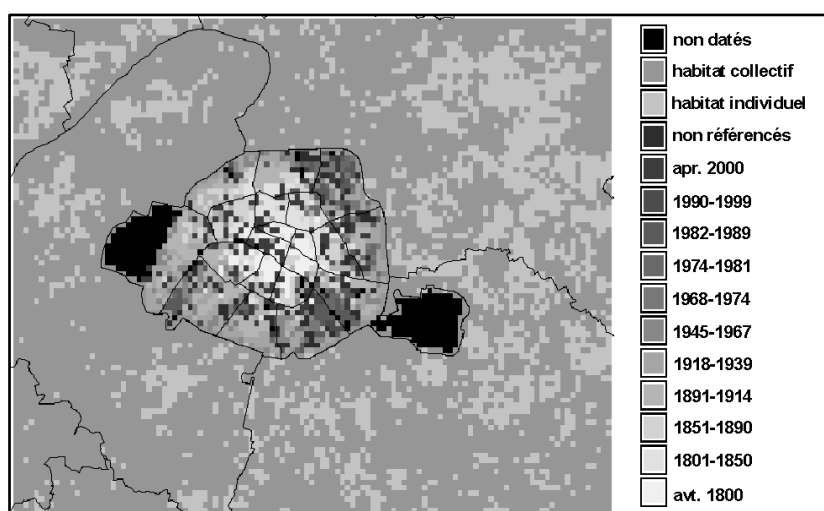


Figure 6 : Base de données du couvert urbain parisien : répartition des types de murs des bâtiments par maille, triés par classe d'âge. *Parisian urban cover database: types of walls ordered by period of construction.*

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. Les grilles spatiales de types de toits majoritaires et de classe d'âge du bâtiment dominant sont ainsi corrélées avec les caractéristiques radiatives et thermiques des parois opaques pour générer des grilles spatiales de caractéristiques radiatives et thermiques pour les murs et toits du domaine d'étude.

1.3. Caractéristiques thermiques des parois opaques du bâti parisien

La réponse thermique de toute zone urbaine à l'ensoleillement dépend notamment des caractéristiques thermiques des surfaces (bâtiments, voiries, zones vertes, zones bleues), des échanges de chaleur latente pour les surfaces concernées, de l'inertie thermique associée à ces différentes zones ainsi que des rejets de chaleur répartis dans la zone (pertes thermiques à travers les parois des bâtiments, trafic, condenseurs d'installations de climatisation, etc.). Le CSTB a analysé les caractéristiques thermiques des parois opaques des bâtiments composant

le patrimoine bâti parisien – toitures et murs – sachant que TEB utilise une représentation multi-couche de ces parois.

1.3.1. Les toits

Les données fournies par l'APUR révèlent l'importance relative des quatre principaux types de couverture dans cette zone (zinc, tuile, ardoise, toiture terrasse : figure 5). Les propriétés radiatives des couvertures parisiennes dominantes (zinc et toiture terrasse) sont relativement tranchées : le métal (zinc) présente une faible émissivité (propriété mise en jeu dans les vitrages peu émissifs recouverts de fines couches métalliques) et un albédo relativement élevé (qui a cependant tendance à baisser avec l'oxydation du métal) ; les produits d'étanchéité des toitures terrasse (élastomères, produits bitumineux) sont de couleur sombre mais cette couche n'est généralement pas exposée directement au soleil.

En fonction de l'usage des terrasses, plusieurs solutions courantes sont mises en œuvre ; elles ont en commun le fait que le matériau de surface est un minéral (gravillon, dalle de béton lavé). Pour les autres couvertures (tuiles, ardoise), les propriétés radiatives sont celles des minéraux. L'inertie thermique de la toiture provient de celle des matériaux de couverture et de la masse du support (bois de la charpente, béton de la toiture terrasse). Vu l'âge du bâti parisien, l'hypothèse d'une charpente traditionnelle pour les couvertures majoritaires en zinc est raisonnable. Le volume de bois a été estimé à $0,10 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2}$ soit une masse de $60 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. Cette masse varie en fonction des essences de bois et intègre les éléments de faible masse nécessaire à la réalisation du support des couvertures. En ce qui concerne le support des toitures terrasse, il s'agit d'une dalle de béton armé de 15 à 20 cm d'épaisseur. L'épaisseur des feuilles de zinc est fixée à 0,70 mm (DTU 40-41, 2004).

1.3.2. Les murs

Le patrimoine bâti résidentiel de Paris intra-muros est décrit finement dans un document publié par l'APUR, relatif aux consommations et émissions de CO_2 du bâti résidentiel parisien (APUR, 2007), sur lequel nous nous basons. Il propose une typologie du patrimoine bâti par tranche d'âge (figure 6), mettant en lumière le cœur historique du centre de Paris et les bâtiments plus récents des arrondissements périphériques, notamment sur l'est, plus récemment construit. Pour chaque période (jusqu'en 1974), les paramètres suivants sont mentionnés : coefficient de transmission surfacique du mur U_{mur} , épaisseur d'enduit, conductivité de l'enduit, nature et épaisseur des matériaux des murs, conductivité des matériaux des murs. Pour les périodes postérieures à la première réglementation thermique, la valeur réglementaire U_{mur} est retenue sans indication de composition des murs. Pour les constructions antérieures à 1974 (91 % des bâtiments), les couches sont constituées de façon à obtenir un coefficient U_{mur} compris entre $1,99$ et $3,10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ et une épaisseur totale du mur entre 0,23 et 0,43 m :

- **couche extérieure** : enduit d'épaisseur conforme à celle indiquée par l'APUR, mais avec une différence de nature de l'enduit selon l'âge du bâtiment compte tenu de l'évolution des techniques (enduit chaux-plâtre ou plâtre et sable : capacité calorifique entre $1,6 \text{ E6}$ et $1,8 \text{ E6 J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$, conductivité thermique de $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, épaisseur entre 0,03 et 0,06 m) ;
- **couche intermédiaire et couches intérieures de constitution identique pour ce qui est de la nature des matériaux** (calcaire, pierre, brique ou béton banché : capacité calorifique entre $1,48 \text{ E6}$ et $2,3 \text{ E6 J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$, conductivité thermique entre $1,15$ et $1,7 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, épaisseur de 0,15 m pour la couche centrale et entre 0,07 et 0,25 m pour les couches intérieures), en respectant la contrainte que l'épaisseur totale de ces deux couches soit conforme à celle du mur consignée par l'APUR.

Pour les constructions postérieures à 1974, les couches sont constituées de la manière suivante, de façon à obtenir un coefficient U_{mur} compris entre 0,81 et 2,20 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et une épaisseur totale du mur entre 0,23 et 0,25 m :

- **couche extérieure** : enduit d'épaisseur conforme à celle indiquée par l'APUR en faisant l'hypothèse qu'il s'agit d'enduit à base de ciment (enduit ciment et sable : capacité calorifique entre 1,6 E6 et 1,8 E6 $\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$, conductivité thermique entre 0,8 et 1 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, épaisseur entre 0,02 et 0,03 m) ;
- **couche intermédiaire** : structure du mur en béton armé (béton banché : capacité calorifique de 2,3 E6 $\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$, conductivité thermique de 1,65 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, épaisseur de 0,20 m) ;
- **couches intérieures nommées « isolant »**, correspondant à la technique dominante d'isolation par l'intérieur. La conductivité des isolants s'est améliorée depuis la première réglementation thermique mais nous avons retenu une valeur unique (isolant : capacité calorifique de 0,0575 E6 $\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$, conductivité thermique de 0,035 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, épaisseur entre 0,01 et 0,07 m).

L'albédo (fixé à 0,4) et l'émissivité (fixée à 0,9) des murs sont considérés semblables pour tous les types de murs.

Les résultats obtenus sur la base de ces hypothèses ne prétendent pas être complètement conformes à la réalité ; ils entendent néanmoins respecter la valeur globale U_{mur} proposée par l'APUR (valeur pour la façade côté rue) et l'ordre de grandeur de l'inertie thermique des murs, ainsi que la disposition relative de couches (isolation par l'intérieur).

Pour la zone située hors Paris intra-muros, la figure 5 révèle deux types majoritaires de couverture dans cette zone : tuile et toiture terrasse. L'information a été élaborée à partir d'une analyse de photographies aériennes par l'APUR et nous ne disposons pas de données aussi détaillées que pour Paris intra-muros. Nous faisons donc les hypothèses suivantes : les couvertures de tuile correspondent au tissu pavillonnaire dont la période de construction couvre le siècle précédent jusqu'à nos jours, caractérisé par une maçonnerie de matériaux minéraux (multitudes de techniques) et une isolation par l'intérieur quand elle existe ; les couvertures terrasses correspondent essentiellement à des bâtiments collectifs construits pendant la période 1950-1980, caractérisés par une structure en béton armé et une isolation par l'intérieur quand elle existe. Tant pour les maisons individuelles que pour les bâtiments collectifs, nous retiendrons un seul jeu de paramètres descriptifs des caractéristiques des parois et nous faisons les hypothèses suivantes :

- **pour les maisons individuelles** (bâtiments couverts de tuile) : couche extérieure constituée par un enduit d'épaisseur 0,02 m, couche intermédiaire constituée par des matériaux maçonnés de 0,18 m d'épaisseur, couche intérieure nommée « isolant » de conductivité 0,035 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et d'épaisseur calculée de manière à obtenir un coefficient U_{mur} de 2 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$;
- **pour les bâtiments collectifs** (bâtiments à toiture terrasse) : couche extérieure constituée par un enduit d'épaisseur 0,03 m, couche intermédiaire constituée par une structure en béton armé d'épaisseur 0,18 m, couche intérieure nommée « isolant » de conductivité 0,035 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et d'épaisseur calculée de manière à obtenir un coefficient U_{mur} de 2 $\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

2. Résultats

Les simulations sont élaborées avec le modèle MESO-NH par un système de domaines imbriqués (« domaine père » à échelle supérieure et résolution plus lâche, « domaine fils » à échelle inférieure et résolution plus fine).

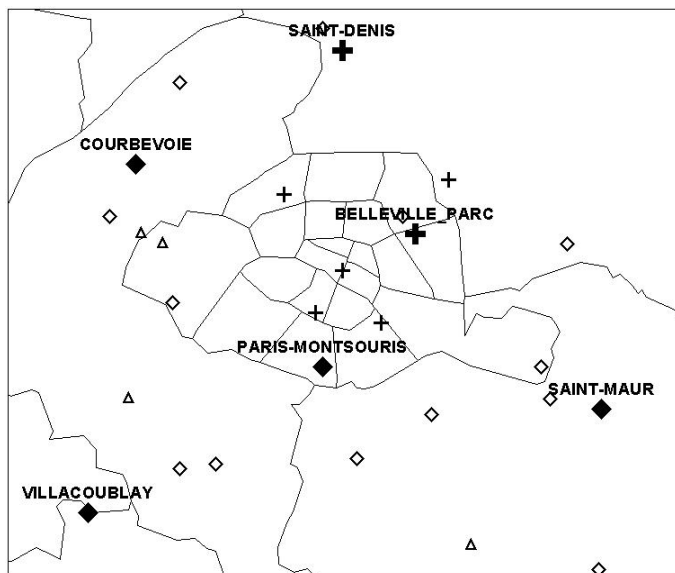
Une première simulation a été menée à la résolution de 2 km sur une vaste zone qui inclut toute la région Ile-de-France (domaine fils) et où Paris est représentée de manière uniforme (Colombert, 2008) sur la période du 08 août à 01 UTC au 14 août à 00 UTC (avec un modèle père qui englobe la majeure partie de la France à 6 km de résolution). Les forçages météorologiques sont établis au domaine « père » à travers le modèle de macro-échelle du CEPMMT. Cette simulation a servi de calibrage et de contrôle du modèle par comparaison aux observations issues de 123 stations du réseau Météo-France et a permis de montrer que le modèle MESO-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 (importance du terme de stockage devant le flux de chaleur latente), hauteur de la couche limite urbaine (CLU), etc.

La deuxième phase de l'étude se focalise sur Paris intra-muros au moyen d'une simulation à très fine échelle (250 m), afin de déterminer les zones géographiques de la capitale les plus vulnérables à ces phénomènes urbains. Cette simulation est effectuée sur une zone beaucoup plus restreinte qui englobe l'agglomération parisienne (domaine fils), sur la période du 08 août à 13 UTC au 14 août à 00 UTC (avec un domaine père sur l'Île-de-France à la résolution de 1,25 km, démarrant le 08 août à 01 UTC). Elle s'appuie sur une base de données précise du couvert parisien élaborée en collaboration avec l'APUR (cf. § 1.2) et sert de référence aux tests de sensibilité qui sont menés par la suite en fonction des différents leviers urbains.

2.1. Validation de la simulation

Nous disposons d'un réseau de 6 stations effectuant des mesures au pas de temps horaire et quotidien et d'un réseau de 22 stations effectuant uniquement des mesures au pas de temps quotidien sur le domaine (figure 7). Ces stations sont situées en milieu urbain (fraction de ville de la maille associée à la station supérieure à 50 %), milieu péri-urbain (fraction de ville comprise entre 10 et 50 %) et milieu rural (fraction de ville inférieure à 10 %).

Figure 7 : Stations de mesure disponibles pour la période du 08 au 13 août 2003 sur la zone d'intérêt (agglomération parisienne). Les croix représentent les stations en milieu urbain (fraction de ville supérieure à 50 %), les losanges les stations en milieu péri-urbain (fraction de ville comprise entre 10 et 50 %) et les triangles les stations en milieu rural (fraction de ville inférieure à 10 %) ; en gras sont représentées les stations à données horaires et en trait fin les stations à données quotidiennes. *Measurement points during the 08 to 13 Aug. 2003 period on the Parisian domain. Crosses represent urban stations (town fraction > 50 %), diamonds are suburban stations (town fraction betw. 10 and 50 %), and triangles are rural stations (town fraction <10 %). Bold points are hourly measurements and thin points are daily measurements.*

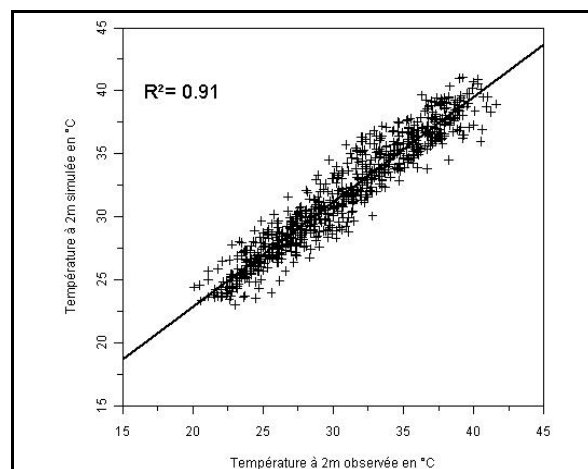


2.1.1. Températures

Le diagramme de dispersion des températures horaires à 2 m (valeurs observées vs valeurs simulées) sur l'ensemble des stations (figure 8) montre que le modèle reproduit bien les observations avec une tendance à surestimer les températures, notamment les plus basses. La corrélation entre températures simulées et observées à 2 m est bonne, avec une erreur

quadratique moyenne (EQM) de 2,01°C sur toute la période. L'EQM est comprise entre 1,46 et 1,95°C entre le 08 et le 12 août et se dégrade le 13 août en atteignant 3,04°C (Tableau 1).

Figure 8 : Diagramme de dispersion de la température de l'air à 2 m observée et simulée par le modèle pour l'ensemble des stations horaires du domaine d'étude et droite d'ajustement linéaire entre les données observées et simulées. *Observed and simulated 2 m air temperature dispersion diagram for all hourly measurements stations of the domain with best linear fit curve.*



Station	EQM Episode entier	EQM du 09/08	EQM du 10/08	EQM du 11/08	EQM du 12/08	EQM du 13/08
Paris-Montsouris	1,824	1,115	0,820	1,780	1,802	3,092
Belleville Parc	2,018	1,420	1,165	2,156	1,944	3,171
Courbevoie	1,735	1,154	1,014	1,676	1,575	2,849
Saint-Denis	2,245	2,075	1,639	2,091	1,804	3,349
Saint-Maur	2,453	1,903	2,641	2,725	2,886	2,513
Villacoublay	1,796	1,121	0,786	1,280	1,638	3,292
Moyenne	2,01	1,46	1,34	1,95	1,94	3,04

Tableau 1 : Erreurs quadratiques moyennes sur la température de l'air à 2 m au pas de temps horaire et pour les six stations du domaine d'étude, sur l'ensemble de la période de simulation et jour par jour. *Root Mean Squared Errors (RMSE) for the hourly 2 m air temperature at the six measurements stations of the domain over the whole simulation period and for each simulated day.*

La figure 9 montre l'évolution de ces températures au pas de temps horaire sur toute la période et pour les deux stations à mesures horaires situées dans Paris intra-muros (Paris-Montsouris et Belleville Parc). Nous constatons que le cycle diurne est correctement simulé sur l'ensemble de la période pour ces deux stations. Néanmoins, des différences existent, notamment sur les minima de température qui ne sont pas toujours bien décrits. Cela s'explique par la situation des stations : Paris-Montsouris est située dans un vaste parc (Parc Montsouris) et considérée comme située en milieu périurbain. Pendant la canicule 2003, les sols très secs du parc ont vraisemblablement été arrosés afin d'alimenter la végétation. Le modèle ne prend pas en compte cet arrosage et la végétation complètement desséchée ne joue plus son rôle de régulateur thermique via le phénomène d'évapotranspiration qui utilise de l'énergie rendue à l'atmosphère sous forme de chaleur latente. La température minimale simulée est donc plus élevée que celle observée. Belleville Parc est également située dans un parc (Parc de Belleville) mais plus petit que le précédent et cette station est considérée par le modèle comme placée en milieu urbain. Ainsi, la végétation, relativement absente du modèle en ce point par rapport à la réalité, n'est pas prise en compte dans le bilan énergétique et conduit à une surestimation plus forte des températures minimales. Le refroidissement en fin de période est par ailleurs moins bien simulé, en raison du décalage temporel présent dans les forçages atmosphériques donnés par le modèle du CEPMMT.

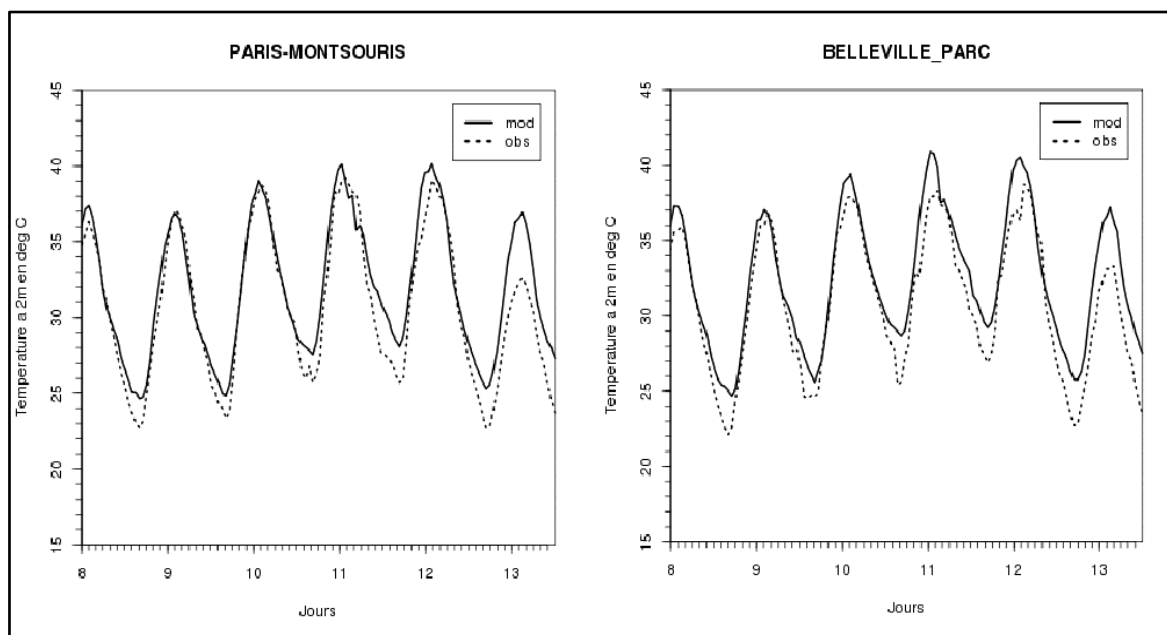
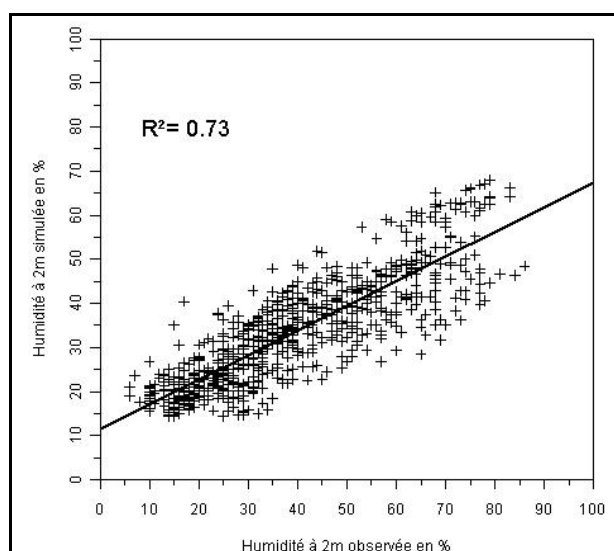


Figure 9 : Température de l'air à 2 m simulée par le modèle et observée pour les stations horaires situées dans Paris intra-muros, Paris-Montsouris et Belleville Parc pour la période simulée (08 au 13 août 2003). *Simulated and observed 2 m air temperature during the simulated period (08 to 13 Aug. 2003) for both hourly measurements stations inside Paris, Paris-Montsouris and Belleville Parc.*

2.1.2. Humidité relative

Le diagramme de dispersion des humidités relatives horaires à 2 m (valeurs observées vs valeurs simulées) sur l'ensemble des stations (figure 10) montre que le modèle reproduit correctement les observations avec une tendance à surestimer les humidités très faibles et sous-estimer les fortes humidités. L'erreur quadratique moyenne est de 11,7 % sur toute la période, et comprise entre 7,8 et 9,1 % entre le 08 et le 12 août, avec une valeur qui se dégrade (19,5 %) le 13 août.

Figure 10 : Diagrammes de dispersion de l'humidité relative à 2 m observée et simulée par le modèle pour l'ensemble des stations de mesures horaires du domaine d'étude. *Observed and simulated 2 m air relative humidity dispersion diagram for all hourly measurements stations of the domain.*



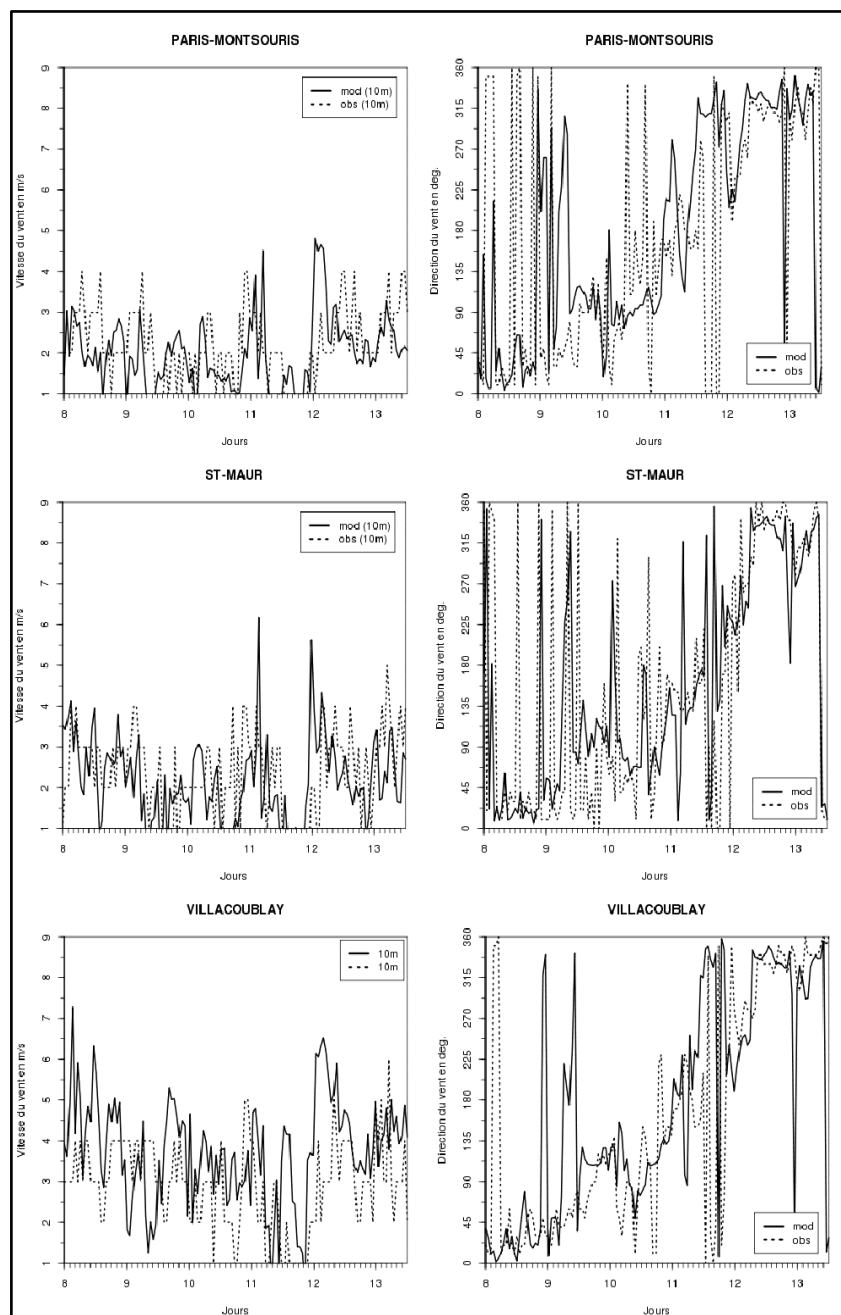
L'évolution de ces humidités relatives au pas de temps horaire sur toute la période pour les stations de Paris-Montsouris et Belleville Parc (non présenté) montre que le cycle diurne est, là encore, bien représenté mais que les maxima d'humidité relative sont mal simulés. Ceci s'explique à nouveau essentiellement par l'arrosage des parcs non pris en compte par le

modèle et le comportement différent de la végétation entre modèle et réalité qui en découle. L'humidité relative est fonction de la température et les erreurs de simulation sur la température viennent par ailleurs s'ajouter à celles sur l'humidité.

2.1.3. Vent

Le vent en surface est mesuré par trois stations sur notre domaine, dont une seule dans Paris intra-muros (mesures à 25,5 m de hauteur pour Paris-Montsouris, à 30,4 m pour Saint-Maur et à 10 m pour Villacoublay). La figure 11 montre l'évolution des vitesses et directions du vent en surface pour ces trois stations. La mesure du vent étant plus fluctuante de par la variabilité importante de ce paramètre sur des échelles de temps très courtes, les ordres de grandeur de la vitesse, quoique faible sur la période simulée, et de la direction du vent sont bien représentés par le modèle. Les changements de direction du vent sont bien décrits, à la fois temporellement et en valeur angulaire.

Figure 11 : Vitesse (gauche) et direction (droite) du vent en basses couches simulée par le modèle et observée pour les stations du domaine mesurant le vent : Paris-Montsouris, Saint-Maur et Villacoublay pour la période simulée (08 au 13 août 2003). *Simulated and observed wind speed (left) and wind direction (right) during the simulated period (08 to 13 Aug. 2003) for wind measurements stations of the domain, Paris-Montsouris, Saint-Maur, and Villacoublay.*



2.2. Bilan d'énergie

La géométrie urbaine et l'imperméabilisation des surfaces par des matériaux artificiels, aux propriétés physiques différentes des sols naturels, entraînent d'importantes modifications des flux de surface par comparaison à ce qui se produit en milieu rural. Le flux de stockage de chaleur devient le facteur majeur du bilan d'énergie en surface : le flux de chaleur sensible reste élevé du fait de l'importance des surfaces de conduction des matériaux urbains et le flux de chaleur latente est quasi nul en raison de la couverture végétale très faible. Le bilan d'énergie d'un paysage urbain s'exprime ainsi :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \quad (1)$$

avec :

Q^* : rayonnement net, résultant du bilan radiatif (piégeage de rayonnement dans les rues et refroidissement radiatif nocturne ralenti) ;

Q_F : flux anthropique, lié aux activités humaines (trafic, industries, chauffage) ;

Q_H : flux de chaleur sensible, plus fort en milieu urbain ;

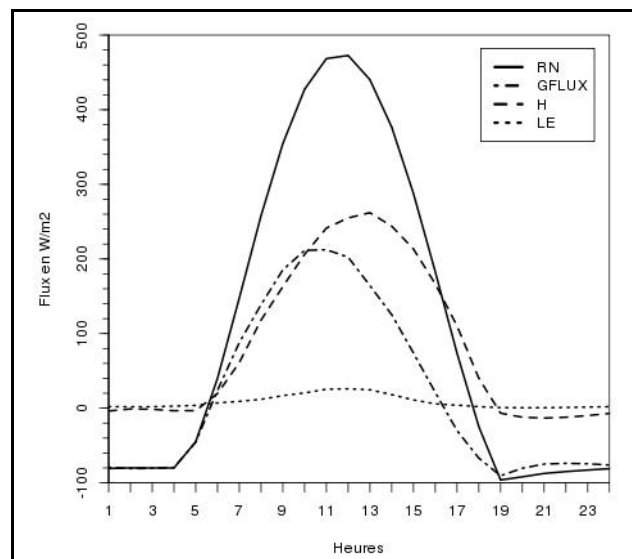
Q_E : flux de chaleur latente, réduit avec la raréfaction de la végétation ;

ΔQ_S : flux de stockage de chaleur, très important en milieu urbain car les matériaux étant imperméables mais de surface de conduction accrue, ils ont une très grande capacité de stockage ;

ΔQ_A : flux d'advection.

Le modèle TEB reproduit bien les flux d'énergie de surface (Lemonsu *et al.*, 2004), avec un flux de chaleur sensible positif la nuit et un cycle de stockage de chaleur par les surfaces urbaines qui alterne entre absorption de chaleur le jour et libération de chaleur la nuit. On présente ici le bilan d'énergie simulé la journée du 10 août 2003 puis la comparaison des bilans d'énergie simulés pour cette même journée pour les parties « bâtie » et « jardin » sur l'ensemble du domaine, sachant que nous ne disposons pas d'observation de flux pour Paris et sa région à confronter à nos résultats (figure 12).

Figure 12 : Bilan d'énergie le 10 août 2003 simulé par le modèle et moyenné sur l'ensemble du domaine : rayonnement net RN, flux de chaleur sensible H, flux de chaleur latente LE et flux de stockage GFLUX. *Simulated radiative budget on 10 Aug. 2003 (mean on all points of the domain): net radiation RN, sensible heat flux H, latent heat flux LE, and storage heat flux GFLUX.*

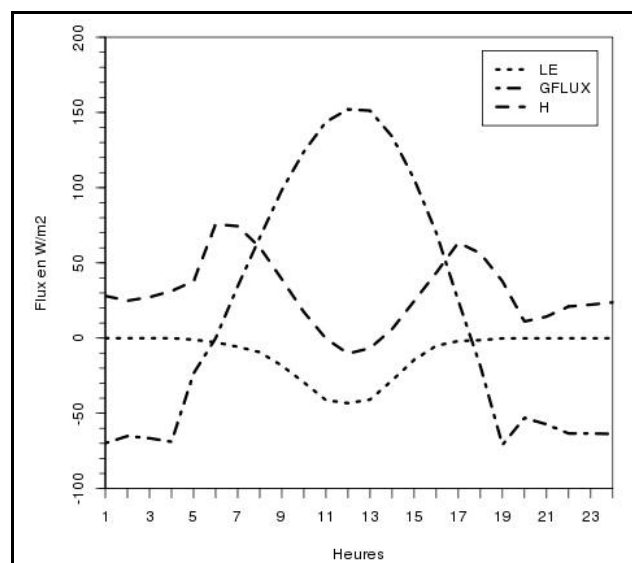


Le rayonnement net est déduit des flux radiatifs entrants et sortants dans les grandes et petites longueurs d'onde. Selon l'équation (1), il se décompose ensuite principalement en flux de chaleur sensible, flux de chaleur latente et flux de stockage de chaleur. Le flux de chaleur

sensible est prépondérant le jour, avec un maximum de 260 Wm^{-2} en début d'après-midi (13 UTC), et s'annule la nuit. Le flux de chaleur latente est le plus faible le jour en raison de la raréfaction de la végétation, ce qui limite l'évapotranspiration, et des faibles stocks d'eau disponibles sur les surfaces urbaines (ruissellement important et évaporation faible) ; il est nul la nuit. Le flux de stockage de chaleur présente un cycle diurne marqué, avec une valeur maximale de 210 Wm^{-2} en milieu de journée (10-11 UTC), lorsque le stockage est maximum, et une valeur négative la nuit, lorsqu'il y a libération de la chaleur emmagasinée par les bâtiments et par le sol (matériaux artificiels) durant la journée.

La figure 13 présente la différence entre les bilans d'énergie en surface pour les parties « bâties » (traitées comme de la ville par TEB) et « jardin » (traitées par ISBA au sein de TEB) : différence des flux de chaleur latente, des flux de chaleur sensible et des flux de stockage. La prépondérance des divers flux en zone totalement urbanisée et en zone totalement végétalisée est ainsi mise en évidence.

Figure 13 : Différence entre les flux de chaleur sensible H, flux de chaleur latente LE et flux de stockage GFLUX moyennés sur la partie bâtie et sur la partie jardin le 10 août 2003. *Difference between sensible heat flux H, latent heat flux LE, and storage heat flux GFLUX for the building part and for the garden part on 10 Aug. 2003.*



En milieu totalement urbanisé (partie bâtie) comme en milieu végétal (partie jardin), l'élément majoritaire du bilan radiatif est le flux de chaleur sensible. Celui-ci est plus élevé sur la partie bâtie, avec une différence tout le temps positive et maximale de 80 Wm^{-2} dans la matinée. 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. Ceci est bien visible sur la figure 13, avec une différence entre les flux de chaleur sensible en milieu urbanisé et en milieu végétalisé : la différence diminue en cours de matinée et atteint un minimum relatif en milieu de journée puis augmente en cours d'après-midi, suivant inversement le cycle d'activité diurne de la végétation.

Le flux de stockage est largement plus important en milieu urbanisé qu'en milieu végétalisé, tant le jour (valeurs positives correspondant à l'absorption de chaleur et différence maximale de l'ordre de 150 Wm^{-2} entre les deux milieux en début d'après-midi) que la nuit (valeurs négatives correspondant à la libération de chaleur et différence maximale de l'ordre de -70 Wm^{-2} entre les deux milieux en début de nuit). Ceci est lié aux propriétés de stockage des matériaux artificiels importantes par rapport à la végétation : les surfaces artificielles ayant une capacité de conduction élevée ($0,8$ à $1,65 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ pour les couches extérieure et centrale des murs, $0,13$ à $110 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ pour les couches extérieure et centrale des toits et $1,5$ à $2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ pour les couches extérieure et centrale des routes) et la hauteur des bâtiments

conduisant à une surface totale de conduction beaucoup plus importante, la capacité de stockage y est beaucoup plus élevée. Le stockage en journée puis la libération de chaleur la nuit sont donc beaucoup plus importants sur la partie bâtie.

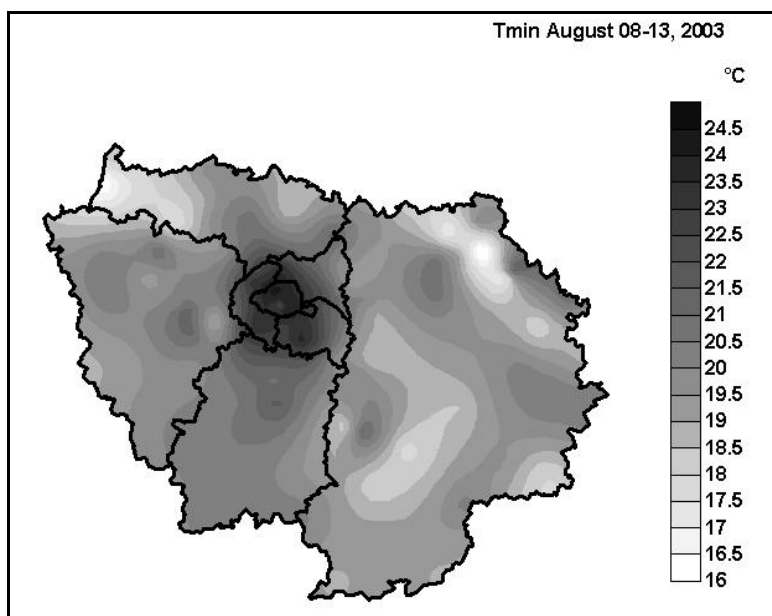
La différence de flux de chaleur latente présente des valeurs tout le temps négatives. En effet, il est quasi nul sur la partie bâtie puisqu'en l'absence de végétation, le processus d'évapotranspiration ne peut avoir lieu. Sur la partie jardin au contraire, le flux de chaleur latente atteint des valeurs plus importantes avec un cycle diurne marqué : la transpiration des végétaux utilise une part importante de l'énergie incidente et produit un flux de chaleur latente significatif pendant la journée, de l'ordre de -40 Wm^{-2} en milieu de journée (différence maximale). Si on ne s'intéresse qu'aux mailles complètement végétalisées (fraction de végétation dans la maille supérieure à 99 %), on obtient un flux de chaleur latente plus important, lié à l'augmentation de la végétation et de son activité (jusqu'à 75 Wm^{-2} à 12 UTC ; non présenté).

La somme de ces trois flux correspond au rayonnement net (cf. équation 1). En sommant ces différences de flux, on obtient donc la différence de rayonnement net entre les parties « bâties » et « jardin », positive le jour et légèrement négative la nuit. Sachant que TEB fonctionne sur le principe d'un canyon urbain en prenant en compte différents processus : piégeage de rayonnement (rayonnement solaire incident et émission infrarouge des surfaces) et effet d'ombre directement proportionnel au rapport d'aspect des rues (rapport entre la hauteur des bâtiments et des rues), la valeur plus élevée de Q^* sur la partie construite montre que l'effet majoritaire est l'effet de piégeage du rayonnement (Lemonsu et Masson, 2002).

2.3. Analyse de l'îlot de chaleur urbain

Nous avons vu que l'urbanisation et le caractère artificiel des sols en ville induisait une modification des flux de surface. Ces différences sont responsables de modifications du climat urbain, dont l'effet prépondérant est la formation d'un ICU. Celui-ci 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 l'entourent. Il est connu que la région parisienne peut être le siège de forts ICU jusqu'à 8 à 10°C en période nocturne (Lemonsu et Masson, 2002). De telles différences de températures ont notamment été observées lors de la canicule 2003 (figure 14).

Figure 14 : Températures minimales moyennes à 2 m observées sur l'Ile-de-France du 08 au 13 août 2003 (données issues de la base de données climatologiques de Météo-France). *Mean minimal 2m-temperatures observed over Ile-de-France region from 08 to 13 Aug. 2003 (datas issued from the climatological database of Météo-France).*



Pour analyser l'ICU moyen, présenté sur la figure 15, on retient et on moyenne les températures à 2 m des échéances nocturnes horaires de 03, 04 et 05 UTC des 5 nuits de simulation (09, 10, 11, 12 et 13 août). Les températures les plus élevées se situent sur le centre de Paris au niveau des arrondissements 2, 3, 9 et 10 (28 à 30°C), tandis que les températures les plus basses se situent sur 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 25°C). L'ICU simulé présente ainsi une amplitude maximale de 4 à 7°C.

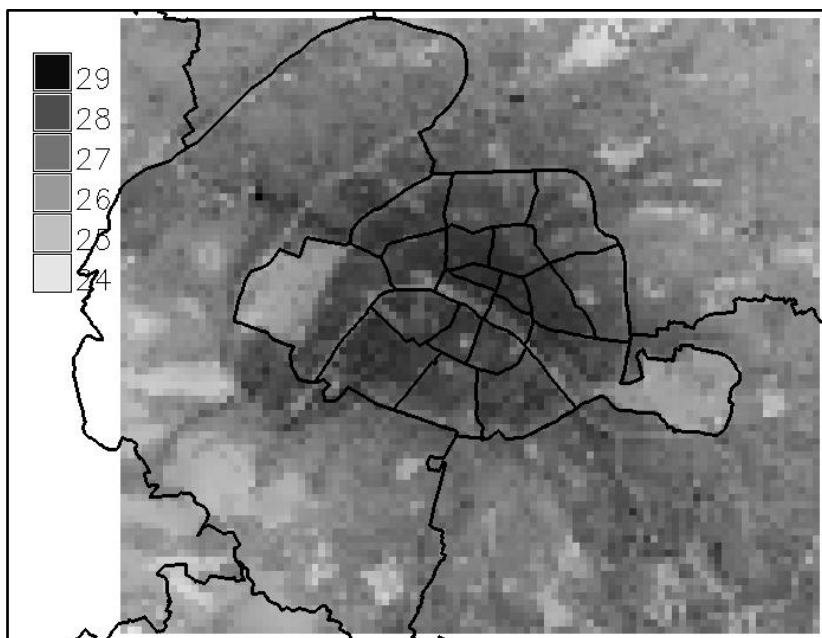


Figure 15 : Îlot de chaleur urbain simulé par le modèle (moyenne des températures de l'air à 2 m en °C à 03, 04 et 05 UTC les cinq nuits de la simulation). *Simulated Urban Heat Island (mean of simulated 2 m air temperature - °C - at 03, 04, and 05 UTC during the five nights of simulation).*

L'analyse nuit par nuit de l'ICU montre sa variabilité quotidienne (figure 16). La première nuit, l'ICU est assez peu visible. Seuls les sols naturels se détachent avec des températures plus faibles (22 à 24°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 de 20 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 8°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 tempère ces hautes températures) et le nord-ouest. La quatrième nuit, les températures sont encore plus élevées et dépassent 30°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 7°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 alentours.

L'analyse heure par heure du champ la nuit du 10 au 11 août, de 20 à 07 UTC (figure 17) permet d'identifier la chronologie du refroidissement qui se fait d'abord et préférentiellement sur la banlieue, moins urbanisée, et de la mise en place de l'ICU sur Paris ainsi que du panache urbain associé : à 20 UTC le 11 août, les températures sont maximales sur la moitié nord du domaine et dans une moindre mesure sur le sud-est de Paris, densément construit ; à 21 UTC, le refroidissement s'amorce sur l'ensemble du domaine ; entre 22 et 01 UTC, le refroidissement continue et s'accroît sur les sols naturels (parcs, forêts).

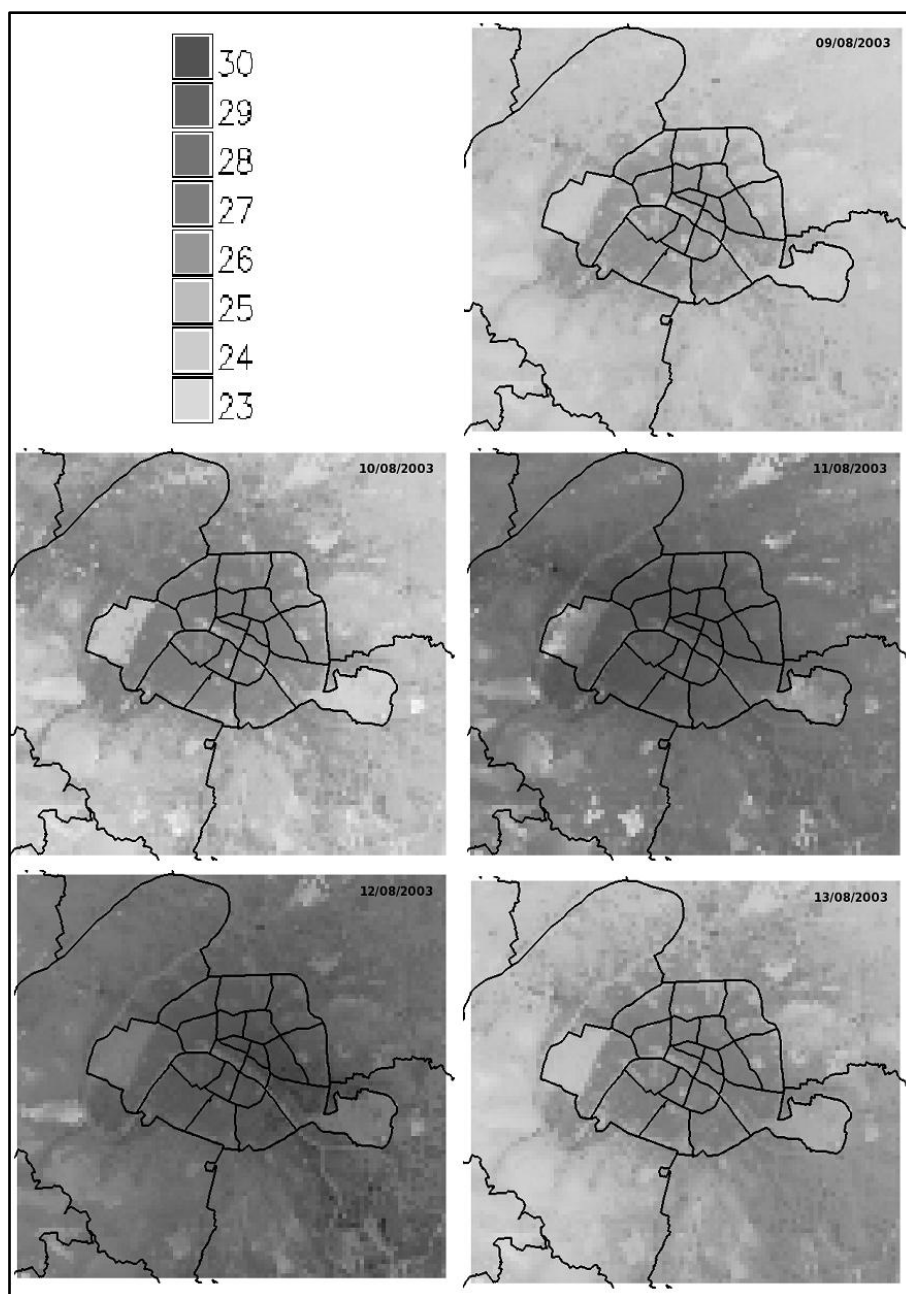


Figure 16 : Îlot de chaleur urbain simulé par le modèle (moyenne des températures de l'air à 2 m en °C à 03, 04 et 05 UTC) pour les cinq nuits de la simulation (du 9 au 13 août 2003). *Simulated Urban Heat Island (mean of simulated 2 m air temperature - °C - at 03, 04, and 05 UTC) for each night of simulation: 9-13 Aug. 2003.*

A partir de 02 UTC, l'ICU se met en place progressivement, avec des températures qui restent plus élevées sur Paris intra-muros qu'à l'extérieur de la ville ; entre 03 et 06 UTC, l'ICU est présent avec des températures maximales sur les arrondissements les plus chauds (2^{ème}, 3^{ème}, 9^{ème} et 10^{ème} au nord de la Seine) de l'ordre de 30°C, et des températures minimales sur le Parc de Saint-Cloud et la Forêt de Meudon au sud-ouest de Paris, de l'ordre de 23 à 24°C. La zone au sud-est de Paris déjà identifiée ci-dessus comme chaude pour ces échéances ne se refroidit que partiellement, avec un phénomène de panache urbain (lié au régime des vents qui s'oriente de nord-ouest et transporte donc les températures élevées du centre-ville vers le sud-est) qui se met en place et vient s'ajouter aux propriétés des sols de cette zone, densément urbanisée. A 07 UTC, le réchauffement lié au lever du jour s'amorce sur tout le domaine et l'ICU diminue. Dans la journée, l'ICU est peu voire pas du tout visible.

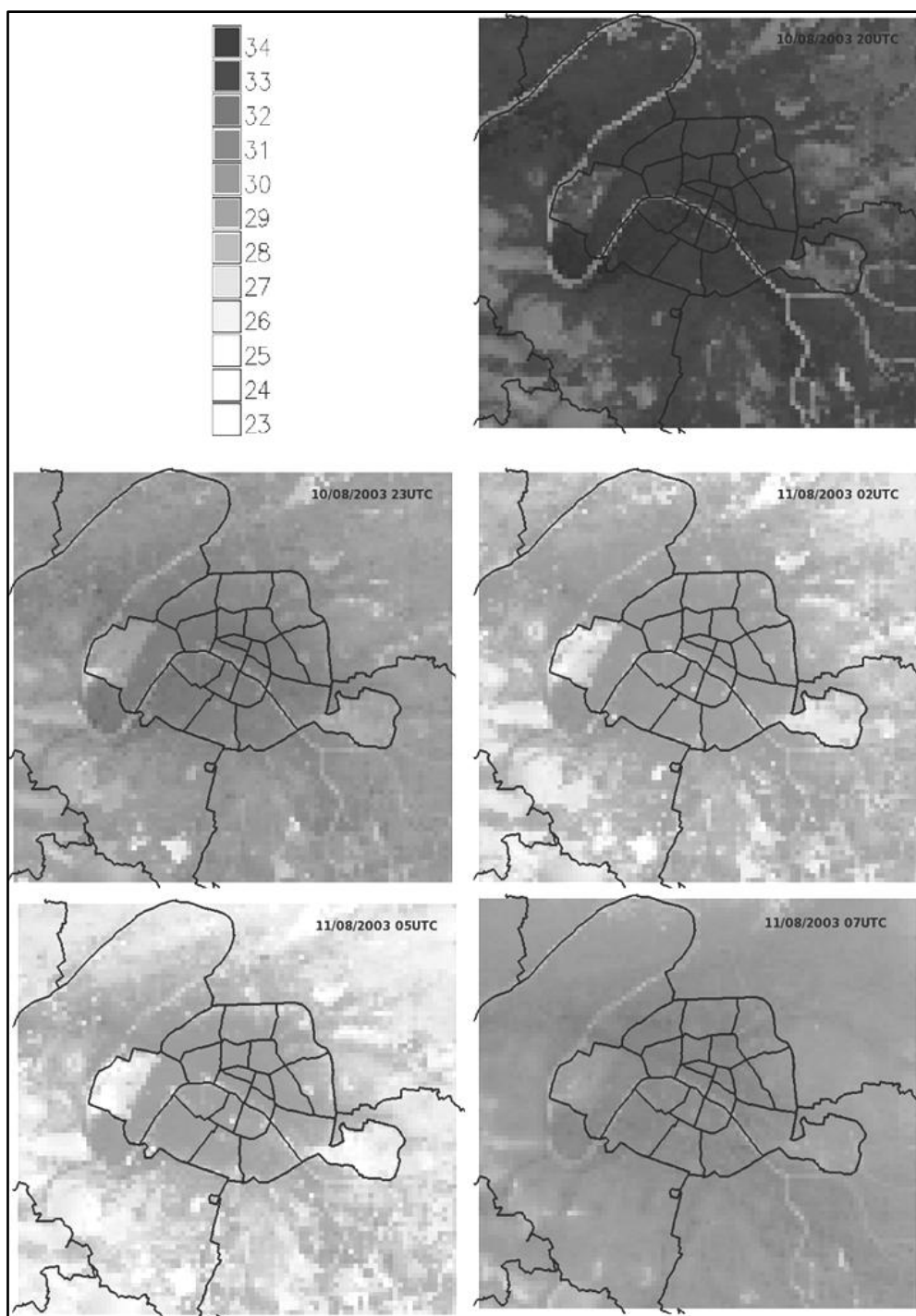
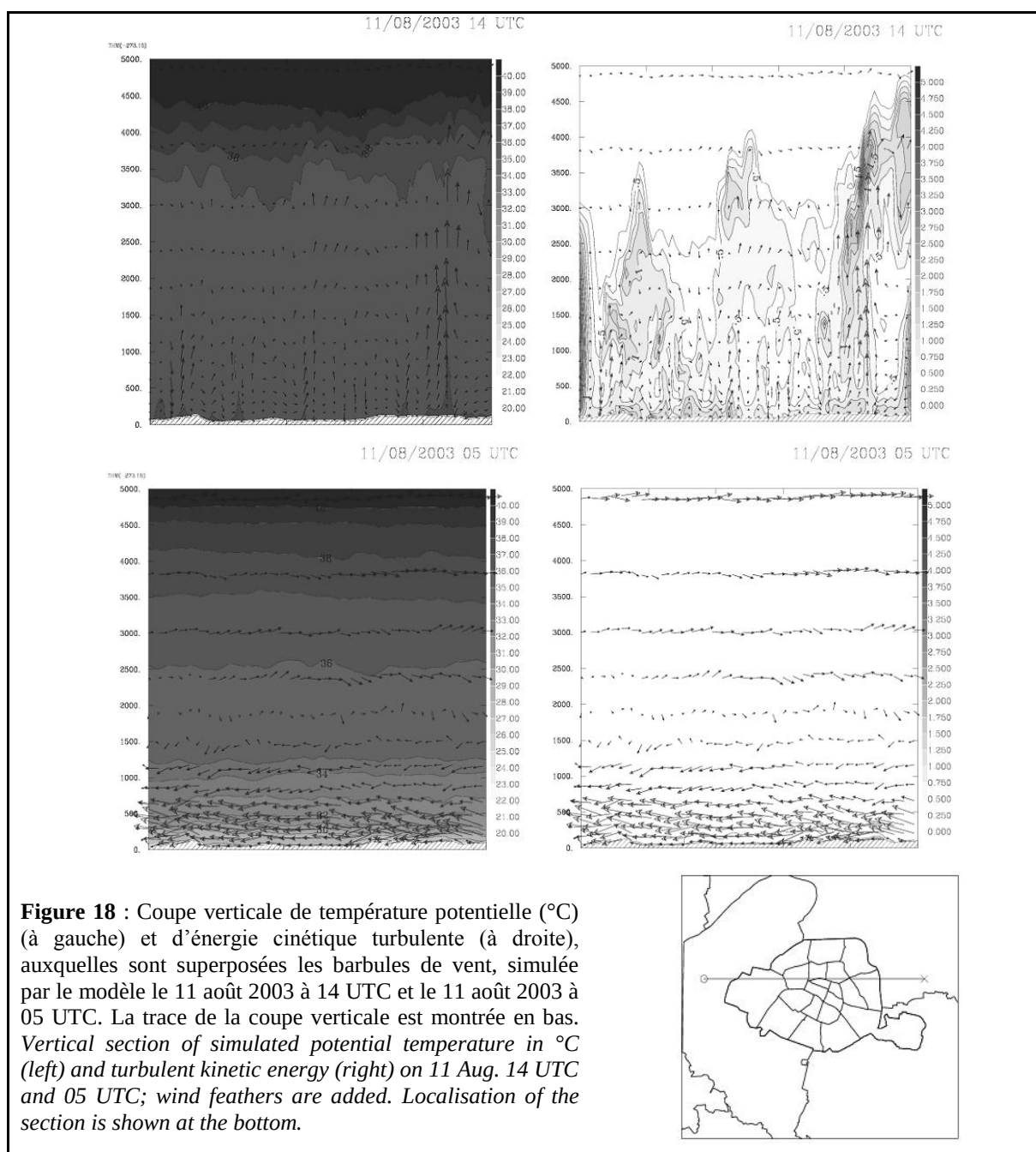


Figure 17 : Températures à 2 m en °C simulées par le modèle entre le 10 août 2003 à 20 UTC et le 11 août 2003 à 07 UTC. *Simulated 2 m air temperatures (°C) from 2003/08/10 at 20 UTC to 2003/08/11 at 07 UTC.*

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 cas observés et le nombre de cas attendus) de l'ordre de 6,5 sur l'Île-de-France (Hémon et Jouglu, 2003).

2.4. Analyse de la couche limite atmosphérique urbaine

La structure de la CLU dépend du bilan d'énergie en surface. Durant la journée (figure 18, haut), la convection se met en place, la CLU devient très instable et d'extension verticale maximale (presque 3500 m). Les ascendances et subsidences au sein de cette couche limite permettent un brassage vertical important. La température potentielle y est homogène et élevée (36°C le 11 août 2003 à 14 UTC). Au-delà de la CLU, on retrouve un gradient positif de température potentielle et des vents qui restent faibles. Le sommet de la CLU est le plus élevé sur les arrondissements les plus chauds en raison du brassage intensifié par les températures plus élevées en basses couches. Les valeurs simulées correspondantes d'énergie cinétique turbulente (Turbulent Kinetic Energy TKE) montrent que des processus très turbulents sont induits au-dessus de Paris et, plus particulièrement, au niveau des arrondissements les plus chauds, en raison du réchauffement et du stockage de chaleur en surface sur cette zone.



La nuit, au contraire (figure 18, bas), la CLU a une extension verticale très limitée de quelques centaines de mètres. La composante verticale du vent est très faible, la TKE est nulle ou quasi nulle, il n'y a pas de brassage vertical et la CLU est la plupart du temps stable. Un gradient vertical de température potentielle (de 28°C en surface à 36°C vers 2500 m d'altitude le 11 août 2003 à 05 UTC) est bien visible. Localement, la TKE peut être non nulle et un petit flux turbulent de chaleur se maintient au-dessus des zones les plus chaudes, où la CLU peut alors rester neutre et ne pas se stabiliser (au dessus des arrondissements les plus chauds, température potentielle de 27°C et homogène sur 300 m de hauteur le 11 août 2003 à 05 UTC).

La version CANOPY du modèle TEB permet d'obtenir des profils verticaux de paramètres au sein du canyon urbain. La figure 19 montre le profil vertical de la température de l'air à l'intérieur du canyon pour Paris-Montsouris et Belleville Parc, moyennée la nuit et le jour. Pendant la journée, un gradient vertical de température est bien visible avec des températures maximales près de la surface en liaison avec le fort rayonnement incident et le stockage de chaleur induit, qui décroissent le long de la verticale. Ce phénomène se produit sur les deux stations.

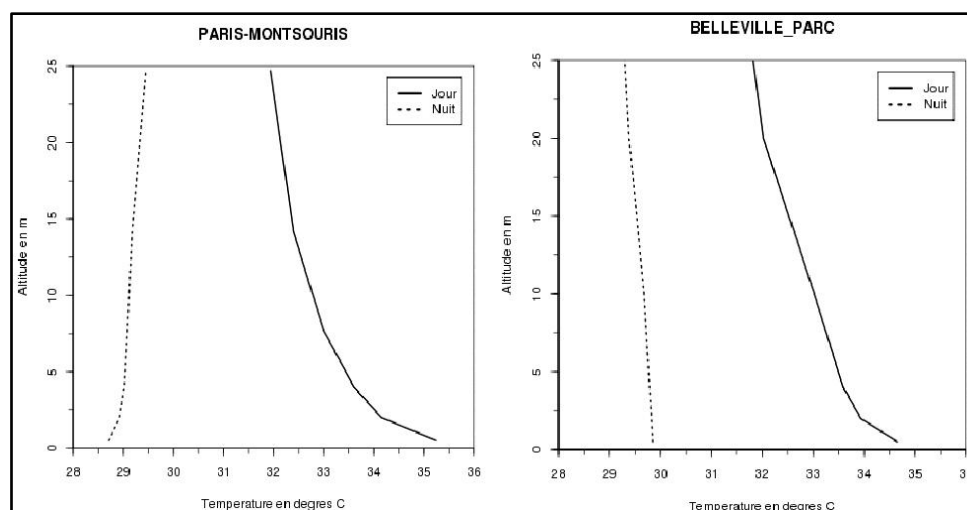


Figure 19 : Profils verticaux de température de l'air (°C) simulée par le modèle dans le canyon urbain la nuit (pointillés) et le jour (trait plein) sur les stations de Paris-Montsouris (gauche) et de Belleville Parc (droite). *Simulated air temperature (°C) vertical profile inside the canyon on night (dotted line) and day (solid line) over Paris-Montsouris (left) and Belleville Parc (right) stations.*

La nuit par contre, on observe une différence entre elles. Paris-Montsouris est caractérisée par une inversion thermique avec des températures plus faibles en très basses couches et qui augmentent avec l'altitude. Ce phénomène est typique des situations anticycloniques et lié au refroidissement radiatif. La couche limite est alors très stable. Au contraire, Belleville Parc est caractérisée par une valeur quasiment constante sur 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 des deux stations s'explique à nouveau par leur situation différente en termes d'urbanisation dans le modèle (milieu périurbain vs milieu urbain).

3. Etude de sensibilité : les différents scénarios envisagés

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 facteurs peuvent avoir une influence sur les caractéristiques des îlots de chaleur urbains. En amont du

projet EPICEA, 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 », et de chiffrer dans des conditions particulières leurs effets sur le bilan d'énergie. Le bilan d'énergie permet de mettre en avant les facteurs qui gouvernent l'augmentation et la diminution de la température de l'air et, par là-même, l'ICU. Cependant, ces leviers ont été déterminés par le biais de simulations utilisant TEB en mode « forçage », donc sans rétroaction sur l'atmosphère. Différents tests de sensibilité vont maintenant être menés en utilisant TEB en mode couplage au sein du modèle MESO-NH et en modifiant ces paramètres afin de quantifier leur impact sur le climat urbain, dans le contexte de la canicule 2003. Les cinq différents scénarios envisagés pour ces tests de sensibilités sont : 1) un scénario réfléchissant en modifiant les parois, 2) un scénario de verdissement sans toucher au bâti, 3) un scénario d'humidification des chaussées, 4) un scénario qui combine ces 3 différents aspects ; 5) le cinquième scénario, volontairement plus tranché et poussé à l'extrême, s'intéressera à un verdissement de grande ampleur en modifiant le cadre bâti. Il sera précisé au regard des résultats obtenus sur les précédents scénarios. L'étude portant sur l'agglomération parisienne et étant réalisée en partenariat avec la Ville de Paris, ces modifications ne sont appliquées que sur Paris intra-muros.

Une remarque générale s'impose. Ces scénarios à moyen et long termes explorent des trajectoires 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 nécessitera la maturation de décisions prenant en compte les performances escomptées mais également leurs coûts (investissement, 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, etc.).

3.1. Scénario réfléchissant

Nous faisons l'hypothèse d'une modification donnant aux matériaux de façade les propriétés d'un marbre très « blanc », avec un albédo de 0,8 et une émissivité de 0,9 (figure 20). Techniquement, des revêtements adaptés aux différents supports existants (bardages, membranes, peintures) pourraient être envisagés mais la question reste à étudier, de même que celle de l'évolution dans le temps des propriétés initiales.

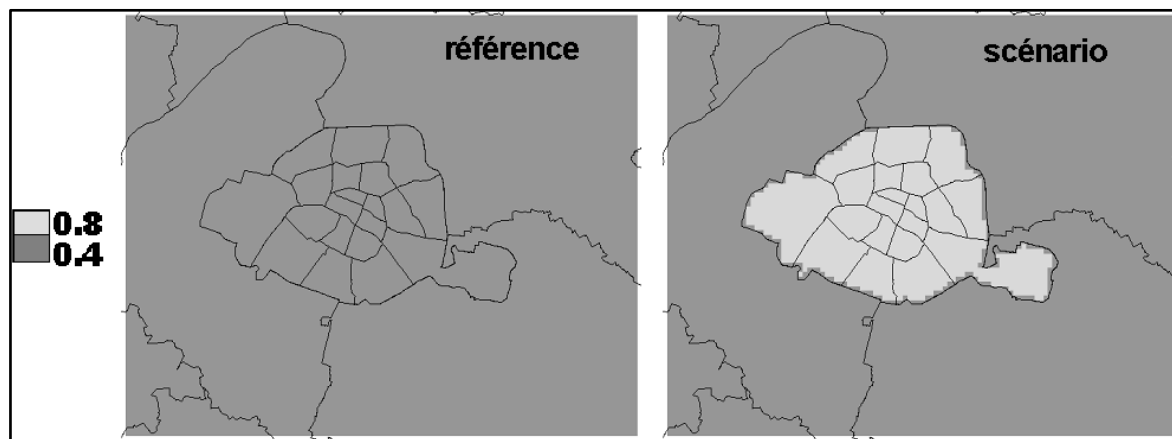


Figure 20 : Albédo des murs sur le domaine : référence à gauche et scénario 1 (réfléchissant) à droite. *Wall albedo over the whole domain: reference (left) and scenario 1 (reflecting one) (right).*

En ce qui concerne les toitures, on s'intéresse aux couvertures rafraîchissantes (cool roofs). Des membranes ou enduits spécifiques, caractérisés par des valeurs élevées de l'albédo (0,9) et de l'émissivité (0,9) et donc, avec une température de surface abaissée, utilisés comme matériau de couverture, permettent de limiter le flux de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment, ce qui doit contribuer à limiter l'apport d'énergie aux espaces intérieurs. Comme la majorité des toitures parisiennes sont recouvertes de zinc ou bien sont du type toiture terrasse, nous considérerons uniquement les modifications de ces deux catégories de couverture (figure 21).

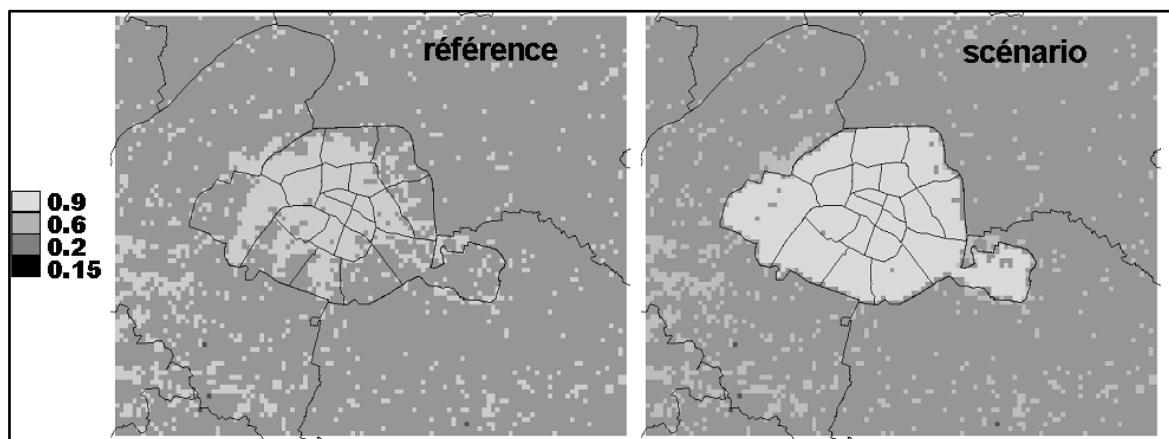


Figure 21 : Albédo des toits sur le domaine : référence à gauche et scénario 1 (réfléchissant) à droite. *Roof albedo over the whole domain: reference (left) and scenario 1 (reflecting one) (right).*

3.2. Scénario de verdissement

Il s'agit de recouvrir les surfaces concernées de végétation adaptée maintenue dans un état permettant un échange de chaleur latente (arrosage éventuel) ; on fait le choix d'implanter de la végétation basse. Les surfaces candidates à un verdissement sont les surfaces de terre, les chaussées et les toitures. On ne traitera pas ici le verdissement des toitures en raison des limites actuelles de TEB en termes de modélisation de toitures végétalisées. Pour le cas présent, la base de données établie avec l'APUR ainsi que la base de données ECOCLIMAP (Masson *et al.*, 2003) permettent d'estimer la surface totale de végétation basse dans Paris intra-muros à 1 311 ha.

Pour ce qui est des surfaces de terre, nous considérons l'hypothèse d'un verdissement de la totalité malgré la difficulté de la tâche liée à la dispersion de ces surfaces et à leurs usages variés. La surface de terre disponible dans Paris intra-muros est de 833 ha d'après la base de données établie avec l'APUR. Un verdissement total de l'ensemble de ces surfaces de terre conduit à une hausse de 63,5 % de végétation basse et correspond à une augmentation de 25,8 % de végétation effective totale (en excluant les sols naturels).

On se propose par ailleurs de verdir partiellement les chaussées larges, définies comme suit. La méthode consiste à déterminer la largeur des rues en utilisant la relation existant entre le rapport d'aspect, la largeur de rue et le rapport entre la surface de mur et la surface de ville (*wall_o_hor*), qui donne une indication sur la forme des bâtiments et donc du canyon). On obtient :

$$largeur\ de\ rue = \frac{hauteur\ des\ bâtiments * (1 - fraction\ de\ bâti)}{0.5 * Wall_o_hor} \quad (2)$$

Le calcul se fait sur les mailles avec une fraction de bâti suffisamment importante (25 %) pour s'affranchir des espaces contenant de vastes portions de routes (périphérique, grandes

places, etc.) et en s'affranchissant de la végétation non intégrée à la rue, *i.e.* hormis les arbres d'alignement.

Finalement, à partir de la répartition des largeurs de rue à Paris obtenue via l'équation (2), on propose une largeur de 15 m comme seuil de chaussées larges, dont le décile supérieur est à 15,44 m, ce qui correspond à peu près à 3 à 4 voies (2 voies circulées + stationnement éventuellement des 2 côtés + trottoirs). On obtient finalement 602 ha de surface de chaussée de largeur supérieure à 15 m. Il est décidé au final de verdir avec de la végétation basse 50 % de la surface de rues larges, autrement dit 301 ha, soit 12 % des chaussées de la ville. Ceci conduit à une hausse de 23 % de la végétation basse (figure 22) et de 8 % de la végétation totale sur Paris intra-muros.

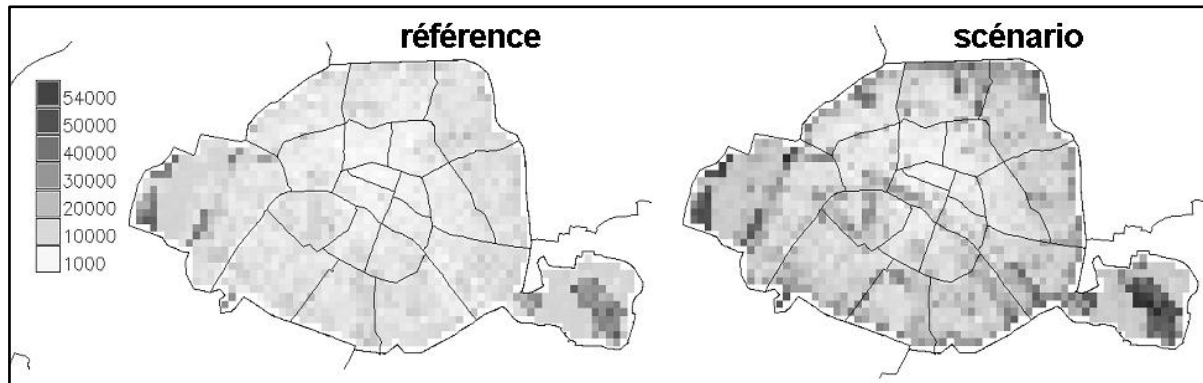


Figure 22 : Surfaces de végétation basse en m^2 dans le cas de référence (à gauche) et dans le cas du scénario 2 (verdissement sans modifier le cadre bâti ; à droite). *Low vegetation surfaces (m^2) inside Paris: reference (left) and scenario 2 (greening without modification of the built part; right).*

Cette différence assez faible sur la fraction totale de végétation s'explique par le fait que les modifications les plus importantes (verdissement des espaces de sol nu) se font au sein de la végétation totale et ne sont qu'un transfert d'occupation de sols déjà non artificiels. Cependant, en termes de flux de chaleurs latente et sensible, la différence devrait se faire sentir puisqu'on ajoute aux 1 311 ha de végétation basse déjà présents un total de 1 134 ha ($833 + 301$), soit une hausse de 86 % de la surface de végétation basse sur Paris intra-muros.

3.3. Humidification des chaussées

Des expériences ont été menées au Japon sur l'humidification des chaussées par ruissellement d'eau en surface (Sera, 2006 ; Sato, 2008). Ce 3^{ème} scénario se base sur le même principe. En utilisant le réseau d'eau non potable présent dans la ville (réseau développé sous toutes les rues), ce scénario est fondé sur la possibilité de faire ruisseler de l'eau en permanence sur l'ensemble des chaussées de la capitale. L'impact sur la température devrait se faire par l'évaporation de cette eau et l'absorption de chaleur latente correspondante. Dans le modèle TEB, la rue peut être recouverte d'une certaine quantité d'eau via la paramétrisation d'un réservoir d'eau. La surface de rue étant imperméable, le réservoir se vide par évaporation lorsque l'air en surface n'est pas saturé en humidité (le surplus d'eau étant éliminé par ruissellement) et théoriquement jusqu'à ce que toute l'eau ait disparu de la surface imperméable (Le Moigne, 2009). Ce réservoir peut par conséquent être calibré de manière à ce qu'il ne se vide jamais pour qu'il y ait évaporation constante au niveau de la chaussée (apport constant d'eau dans le réservoir).

Le quatrième scénario combine ces trois premiers scénarios (réfléchissant, verdissement, humidification), l'humidification des chaussées se faisant sur la part de chaussées non verdies.

3.4. Verdissement par modification du tissu urbain

Les scénarios précédents sont envisageables à plus ou moins long terme sur le tissu urbain actuel sous les réserves exposées. Dans ce dernier scénario, on se propose de modifier le tissu urbain afin de verdir et éventuellement bleuir la ville. Une piste est par exemple la surélévation de certains bâtiments (tout en conservant la morphologie du centre historique de Paris) en maintenant constante la surface de plancher. La surface de sol ainsi dégagée serait couverte de végétation haute (arbres, pris en compte par le modèle comme type « forêt ») afin d'obtenir un signal significatif. Ainsi, en amenant par exemple à la hauteur de 50 m tous les bâtiments construits après 1914 (non haussmanniens), la surface de végétation haute supplémentaire serait de 973 ha, soit une hausse de 30,1 % de la végétation totale sur Paris intra-muros (figure 23).

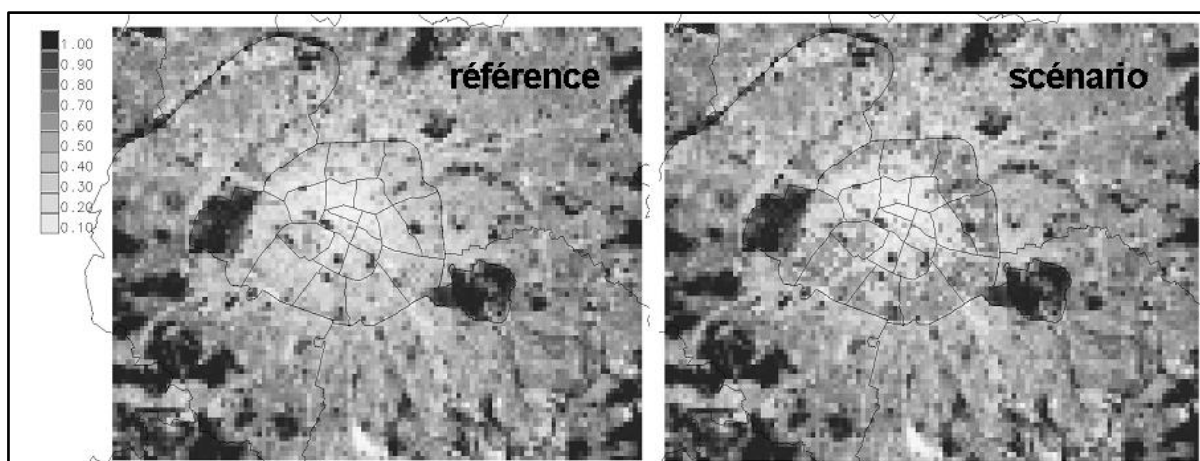


Figure 23 : Fraction de végétation sur l'ensemble du domaine dans le cas de référence à gauche et dans le cas du scénario 5 à droite en prenant l'option d'un verdissement par élévation des bâtiments non historiques à la hauteur de 50 m. *Vegetation fraction over the whole domain: reference (left) and scenario 5 (eg. greening by raising of building at 50 m height ; right).*

Ces différents scénarios permettent d'explorer quelques situations envisageables. Les premiers scénarios (modification des propriétés radiatives et thermiques des parois, verdissement sans toucher au bâti et humidification des chaussées) se veulent plus facilement réalisables en terme technique et sont proposés pour une évolution de Paris à l'horizon 2030-2050. Une limite cependant réside dans le coût de l'entretien des transformations effectuées, qui conditionne leur durabilité. Le dernier scénario (ajout de végétation par modification du tissu urbain) est volontairement plus difficilement faisable en terme technique mais il se veut une exploration de ce vers quoi pourrait évoluer Paris à l'horizon 2100.

Conclusion

Dans le cadre du volet 2 du projet EPICEA, mené conjointement par Météo-France, le CSTB et la Ville de Paris, la période la plus chaude de la canicule d'août 2003 sur Paris (du 08 au 13 août 2003) est simulée avec le schéma de ville TEB dans sa dernière version et le modèle MESO-NH. Une collaboration avec l'APUR a permis de réaliser cette 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.

Les résultats sont très satisfaisants : le modèle reproduit bien les observations de température et de vent, ainsi que le cycle diurne d'humidité relative en simulant un Paris « actuel » pour la période de référence.

L'urbanisation modifie le bilan d'énergie par modification de l'occupation des sols. Le flux de stockage de chaleur et le flux de chaleur sensible sont les éléments prépondérants de ce bilan alors que le flux de chaleur latente est très faible. Des différences notables existent entre les bilans d'énergie en surface pour les parties « bâties » et « jardin », avec en milieu totalement urbanisé : rayonnement net légèrement plus élevé (effet majoritaire du piégeage du rayonnement dans le canyon urbain), flux de stockage de chaleur beaucoup plus élevée le jour et la nuit (surface de stockage et conduction des matériaux plus grande sur les surfaces urbaines artificielles), flux de chaleur latente inexistant (pas d'évapotranspiration). Ces particularités modifient le climat urbain. Tout d'abord, un ICU apparaît en fin de nuit entre le centre de Paris (arrondissements les plus chauds : 2^{ème}, 3^{ème}, 9^{ème} et 10^{ème}) et les arrondissements périphériques de l'ordre de 2 à 4°C, et plus généralement avec les zones boisées au sud-ouest de Paris (Parc de Saint-Cloud et Forêt de Meudon notamment) et au nord de Paris (Parc de la Courneuve) de l'ordre de 4 à 7°C. 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. 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, comme certains arrondissements périphériques et communes limitrophes. De plus, la CLU présente une forte instabilité associée à de la turbulence le jour ce qui conduit à un brassage vertical important. La nuit, la CLU peut se stabiliser par refroidissement radiatif (plutôt dans les zones où la végétation est présente) ou rester neutre par la permanence d'un petit flux de chaleur turbulent lié au fort rayonnement infrarouge au-dessus des surfaces artificielles.

Des tests de sensibilité sur différents leviers urbains sont actuellement menés. Les scénarios retenus s'appliquent à trois modalités : la modification des paramètres radiatifs des surfaces (toits et murs) et l'ajout d'eau ou de végétation. Ces derniers points sont abordés sous deux aspects, en modifiant ou non la morphologie de la ville et le cadre bâti, afin de se placer à plus ou moins long terme.

Le projet EPICEA contribue à donner des repères sur la modification de l'intensité de l'ICU et des autres spécificités du climat urbain, induite par des actions sur les leviers urbains. En poussant assez loin ces leviers, les résultats permettent d'apprécier l'ampleur de ces modifications. L'analyse de ces résultats éclaire les perspectives ouvertes par EPICEA mais reste 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.

Les simulations atmosphériques à très haute résolution réalisées dans le cadre d'EPICEA ont 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.

Remerciements : Les auteurs remercient J. Bigorgne de l'Atelier Parisien d'Urbanisme pour sa précieuse collaboration lors de l'élaboration de la base de données du couvert urbain parisien, M. Colombert pour son travail préalable sur le sujet et G. Pigeon, C. De Munck, S. Faroux et V. Masson pour leur aide.

Bibliographie

APUR, 2007 : *Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes*. 44 pages, disponible en ligne :

www.apur.org/etude/consommations-energie-et-emissions-gaz-effet-serre-liees-au-chauffage-residences-principales-p.

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 pages.

DESPLAT J., SALAGNAC J.-L., KOUNKOU-ARNAUD R., LEMONSU A., COLOMBERT M., LAUFFENBURGER M. and MASSON V., 2009 : *EPICEA project [2008-2010]: multidisciplinary study of the impacts of climate change on the scale of Paris*. 7th International Conference on Urban Climate, Yokohama, Japan.

DTU 40.41, AFNOR, 2004 : *Norme Française NF P 34-211-1, Travaux de bâtiment – Couvertures par éléments métalliques en feuilles et longues feuilles en zinc – Partie 1 : cahier des clauses techniques*.

FRÜH B., BECKER P., DEUTSCHLINDER T., HESSEL J.-D., KOSSMANN M., MIESKES I., NAMYSLO J., ROOS M., SIEVERS U., STEIGERWALD T., TURAU H. and WIENERT U., 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.

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.

GAFFIN S. R., ROSENZWEIG C., KHANBILVARDI R., PARSHALL L., MAHANI S., GLICKMAN H., GOLDBERG R., BLAKE R., SLOSBERG R. B. and HILLEL D., 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., TEJEDA MARTÍNEZ A. and JÁUREGUI OSTOS E., 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.

HAMDI R. and MASSON V., 2008 : Inclusion of a Drag Approach in the Town Energy Balance (TEB) Scheme: Offline 1D Evaluation in a Street Canyon, *J. of Appl. Meteorol. And Climatol.*, 47, 2627-2644.

HEMON D. et JOUGLA E., 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 pages.

IPCC, 2007 : *Climate Change 2007: Synthesis report*. CoreWriting Team, Pachauri, R. K. and Reisinger, A. (Eds.) IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pages.

JONES P. D., GROISMAN P. Y. A., COUGHLAN M., PLUMMER N., WANG W.-C. and KARL T. R., 1990 : Assessment of urbanization effects in time series of surface air temperature over land. *Nature*, 347, 169-172.

LAFORE J.-P. et collaborateurs, 1998 : The Meso-NH atmospheric simulation system. Part I: adiabatic formulation and control simulations. *Annales Geophysicae*, 16, 90-109.

LE MOIGNE P., 2009 : *Surfex scientific documentation*. 211 pages, disponible en ligne : <http://www.cnrm.meteo.fr/surfex/>.

LEMONSU A. and MASSON V., 2002 : Simulation of a summer urban breeze over Paris. *Bound. Layer Meteorol.*, 104, 463-490.

LEMONSU A., GRIMMOND C. S. B. and MASSON V., 2004 : Modeling the surface energy balance of the core of an old Mediterranean city: Marseille. *J. Appl. Meteorol.*, 43, 312-327.

- LEMONSU A., 2005 : *Modélisation des processus de surface et de la couche limite en milieu urbain*. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, 241 pages.
- 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 pages.
- MASSON V., 2000 : A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Bound.-Layer Meteorol.*, 94, 357-397.
- MASSON V., CHAMPEAUX J.-L., CHAUVIN F., MERIGUET C. and LACAZE R., 2003 : A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. *J. Climate*, 16, 9, 1261-1282.
- MASSON V. and SEITY Y., 2009 : Including atmospheric layers in vegetation and urban offline surface schemes. *J. Appl. Meteorol.*, 48, 1377-1397, doi: 10.1175/2009JAMC1866.1.
- NF EN ISO 10456, 2008 : *Matériaux et produits pour le bâtiment. Propriétés hygrothermiques. Valeurs utiles tabulées et procédures pour la détermination des valeurs thermiques déclarées et utiles (indice de classement : P75-110)*.
- NOILHAN J. and PLANTON S., 1989 : A simple parameterisation of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 536-549.
- NOILHAN J. and MAHFOUF J.-F., 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 pages.
- ROSENZWEIG C. and SOLECKI W. D., 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.
- SATO K., 2008 : Cooling the metropolis: an economic analysis to alleviate urban heat island. *Journal of Heat Island Institute International*, 3, 41-45.
- SERA T., 2006 : *Japan's Policy Instruments on Urban Heat Island. Measures by MLIT*, International Workshop on Countermeasures to Urban Heat Island, IEA, Tokyo.
- WILBY R. L., 2003 : Past and projected trends in London's urban heat island. *Weather*, 58(7), 251-260.