

APPEL A PROJETS 2007 DE LA VILLE DE PARIS

PROGRAMME DE RECHERCHE SUR PARIS



Projet **EPICEA**

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



Rapport sur le volet 2
Etude particulière d'un phénomène extrême : la canicule de 2003
(simulation à 250 m)

INTRODUCTION	4
1 METHODOLOGIE.....	5
1.1 Présentation des modèles utilisés	5
1.1.1 Le modèle MESO-NH.....	5
1.1.2 Le système SURFEX.....	7
1.1.3 Le modèle ISBA.....	7
1.1.4 Le modèle TEB.....	8
1.2 Données d'entrée.....	10
1.3 Présentation de la base de données du couvert urbain parisien	10
1.4 Caractéristiques thermiques des parois opaques du bâti parisien	15
1.4.1. Toits.....	15
1.4.2. Murs.....	16
2 ANALYSE DES RÉSULTATS : SIMULATION DE RÉFÉRENCE.....	22
2.1 Validation de la simulation	22
2.1.1 Précipitations.....	23
2.1.2 Nébulosité.....	25
2.1.3 Températures.....	27
2.1.4 Humidité.....	30
2.1.5 Vent.....	32
2.2 Bilan d'énergie.....	34
2.2.1 Rayonnement net.....	35
2.2.2 Flux de chaleur sensible	37
2.2.3 Flux de chaleur latente	39
2.2.4 Flux de stockage	41
2.2.5 Bilan.....	43
2.3 Analyse verticale.....	46
2.3.1 Température.....	46
2.3.2 Humidité spécifique et vent	50
2.3.3 Structure de la couche limite urbaine.....	50
2.4 Analyse de l'humidité des sols	53
2.5 Analyse de l'îlot de chaleur urbain.....	55
2.6 Analyse des températures spécifiques à la zone urbaine.....	66
2.6.1 Températures au niveau des toits	66
2.6.2 Températures au niveau des murs.....	67
2.6.3 Températures au niveau des routes	68
2.6.4 Température interne des bâtiments	70
CONCLUSIONS	72

BIBLIOGRAPHIE	74
LISTE DES FIGURES	77
LISTE DES TABLEAUX	82
ANNEXES	83

Introduction

La majeure partie de la population mondiale vit aujourd'hui en ville. Ces zones urbaines représentent par ailleurs une part économique capitale de nos sociétés. Les projections climatiques 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 dans différentes régions du globe. 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 (Pigeon *et al.* 2008), 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) 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 grande 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 and 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). Dans le volet 1 du projet EPICEA (Desplat *et al.* 2009) dans lequel s'intègrent ces travaux, l'impact du changement climatique sur le climat de Paris et sa région à l'horizon 2100 a été analysé avec une méthode similaire en mettant l'accent sur l'étude des interactions entre les effets locaux du changement global et les processus urbains tels que l'îlot de chaleur. Les conclusions principales sont une hausse significative des températures en hiver en climat futur (+2.0 à +2.4 °C) particulièrement marquée dans les zones les plus urbanisées, ainsi qu'une hausse encore plus importante l'été (+3.5 à +5.0°C), plus marquée dans les zones rurales que dans les zones urbanisées en raison du fort assèchement des sols naturels. On note par conséquent une diminution substantielle des forts ICUs et l'apparition de nombreux cas d'ICUs négatifs en journée.

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 l'été 2003 pourrait concerner l'Europe de l'Ouest un été sur deux à partir de 2070 (IPCC 2007).

Le présent rapport reprend le volet 2 du projet sur l'étude approfondie d'une situation extrême et consiste en une analyse fine de la canicule de l'été 2003. Une simulation de la canicule à Paris durant la période du 8 au 13 août 2003 est effectuée, période durant laquelle a été observé un pic de surmortalité sur le territoire français et plus particulièrement à Paris (INVS, 2004).

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

1.1.1 Le modèle MESO-NH

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 and 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).

La technique de « grid-nesting » est employée. Il s'agit d'emboîter des modèles père et fils de domaines et résolutions spatiale et temporelle différents les uns dans les autres (Tableau 1), ce qui permet de descendre en échelle spatiale sur le domaine d'étude final à 250 m de résolution (Stein *et al.*, 2000). Chaque modèle « père » fournit à son modèle « fils » les conditions météorologiques aux limites latérales de son domaine par interpolation. Le modèle 1 couvre le même domaine (France étendue) que le modèle de prévision météorologique opérationnel AROME (Application de la Recherche à l'Opérationnel à MésoEchelle). Le modèle 2 couvre une partie de l'Île-de-France (IDF) et le modèle 3 couvre Paris et la petite couronne (PC) (Figure 1).

Modèle	Domaine de simulation	Résolution spatiale	Pas de temps
1	France étendue	2.5 km	4s
2	Île-de-France	1.25 km	4s
3	Paris	250 m	1s

Tableau 1 : Résolutions spatiales et temporelles des 3 modèles utilisés

Ainsi, pour le domaine 1, les analyses des prévisions météorologiques du modèle du CEPMMT sont prises par le modèle 1 (i) comme conditions initiales et (ii) toutes les 6 heures comme conditions aux limites de son domaine (limites horizontales et dernier niveau vertical). Pour les modèles 2 et 3, une interaction se fait aussi du modèle « fils » (2) vers le modèle « père » (3) : les champs météorologiques du modèle 2 sont rappelés à chaque pas de temps vers la moyenne des champs du modèle 3 (modèles emboîtés en interaction).

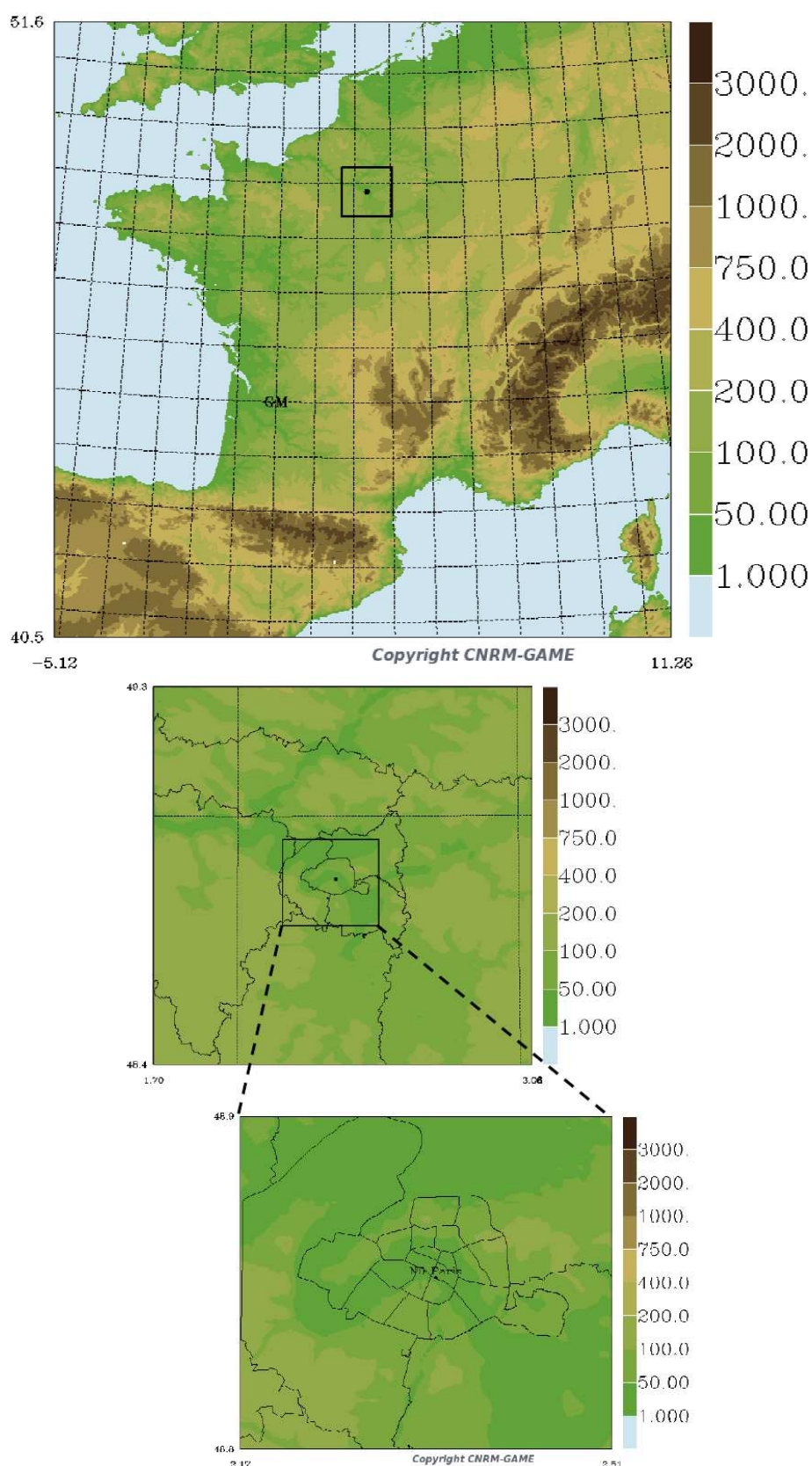


Figure 1: Altitude en m pour les 3 domaines emboîtés utilisés dans la simulation : domaine 1 « France étendue » (résolution 2.5 km), domaine 2 « IDF » (résolution 1.25 km) et domaine 3 « Paris – petite couronne » (résolution 250 m).

1.1.2 Le système SURFEX

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-Biosphere-Atmosphère (ISBA, Noilhan and Planton 1989) 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.

A chaque pas de temps, il y a couplage et échange de données entre SURFEX et MESO-NH : le modèle MESO-NH transmet à SURFEX le forçage atmosphérique, la position du soleil et les flux radiatifs et en retour, SURFEX transmet à MESO-NH les données d'albédo, d'émissivité, de températures radiatives de surface et de flux turbulents pour les différents types de surface (Figure 2).

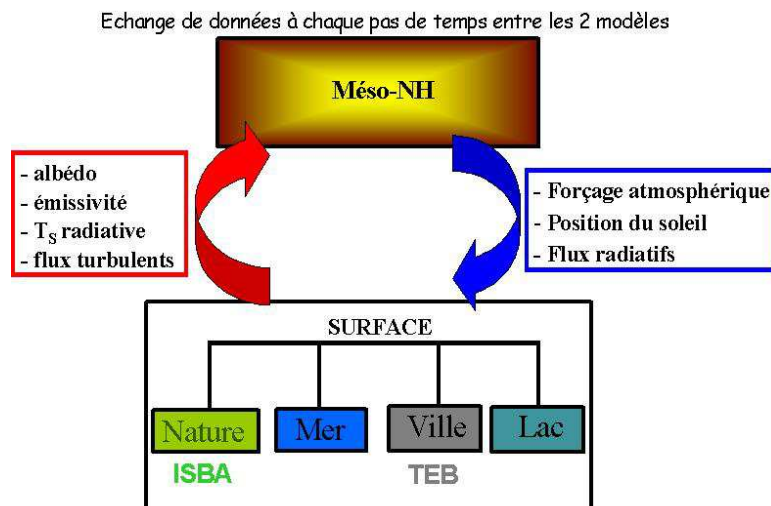


Figure 2 : Structure du système de modélisation des surfaces continentales SURFEX et fonctionnement avec le modèle MESO-NH.

1.1.3 Le modèle ISBA

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 3).

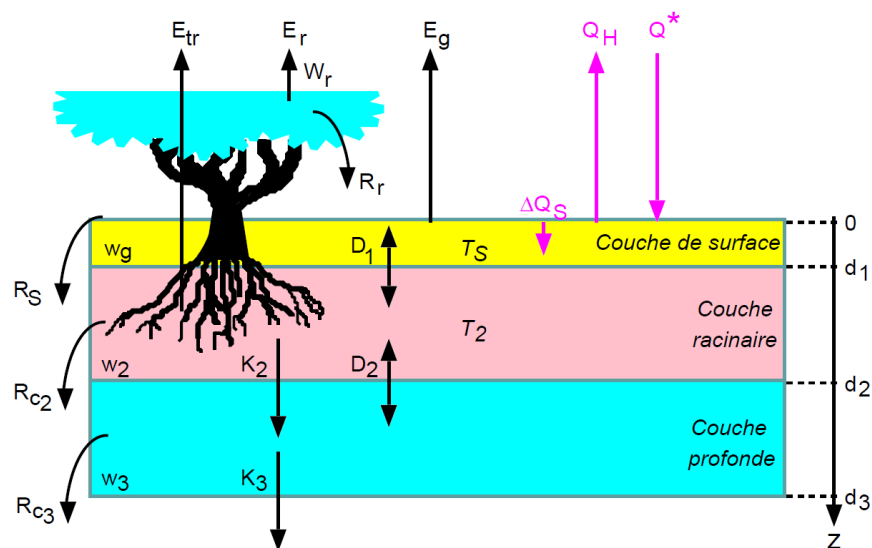


Figure 3 : Représentation des échanges dans le modèle ISBA (d'après Lemonsu, 2005) : Q^* est le rayonnement net, ΔQ_S le flux de stockage, Q_H le flux de chaleur latente, d_1 , d_2 et d_3 représentent l'épaisseur des couches de sol, T_s la température de surface, T_2 la température de la couche racinaire, 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.

1.1.4 Le modèle TEB

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 4). 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).

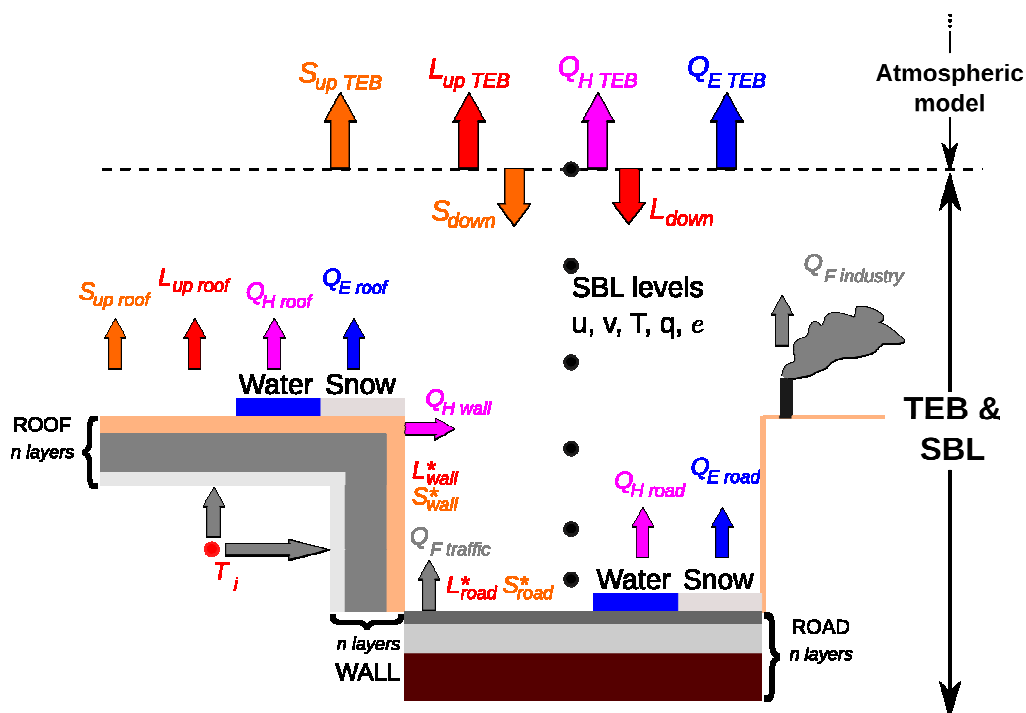


Figure 4 : Représentation schématique du fonctionnement de TEB (d'après Masson 2000).

Cette étude est menée avec la version TEB-Veg (Lemonsu 2010, Lemonsu *et al* 2012), 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 (Figure 5). Ceci permet de distinguer la végétation dite « pure », non influencée par la présence de surfaces bâties (forêts, champs, grands parcs) 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 et 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.



Figure 5 : 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).

Le module CANOPY (Masson and Seity 2009, Hamdi and Masson 2008) permet par ailleurs 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.

1.2 Données d'entrée

Les données d'entrée au système SURFEX sont multiples. Elles sont d'ordre général (topographie, type d'occupation du sol) ou propres à chaque schéma de surface.

Le relief est décrit pour chaque modèle par des données topographiques Shuttle Radar Topography Mission (SRTM, Farr et al. 2007) à fine résolution (environ 500 m de résolution pour le domaine 1 « France étendue » et environ 90 m de résolution pour les domaines 2 et 3 « IDF » et « Paris – PC »).

Les types d'occupation des sols (fraction de nature, fraction d'océan, fraction de ville et fraction d'eau douce) des domaines 1 et 2 sont caractérisés par la classification CORINE Land Cover (Heymann et al. 1993) disponible à 1 km de résolution. La base de données ECOCLIMAP (Masson et al. 2003) fournit les tables de correspondance définissant les paramètres descriptifs associés à chacune des classes d'occupation des sols et nécessaires à l'initialisation de chaque schéma de surface.

Pour le domaine « Paris – PC », une base de données du couvert urbain à 250 m de résolution est élaborée, pour laquelle on détermine les caractéristiques thermiques et radiatives des surfaces.

1.3 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 * 22,5 km centré sur Paris, on dispose pour chaque maille du domaine (de dimension 250 m * 250 m, soit une surface de 62 500 m²) des données de surface de végétation (Figure 6), surface d'eau (Figure 7) – ces deux types de données permettant de déduire la surface de ville (Figure 8), surface et type de toit

(Figure 9), altitude et hauteur moyenne des bâtiments (Figure 10). Sur Paris *intra muros*, on dispose de données plus détaillées, dont la surface de mur et la classe d'âge du bâtiment (Figure 11), la surface de sol nu (Figure 12) et la surface de bitume (Figure 13). Ces données ont été obtenues par l'analyse de photos aériennes ou par traitement de données urbanistiques de la ville. On en déduit le facteur de forme du bâti (Figure 14).

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.

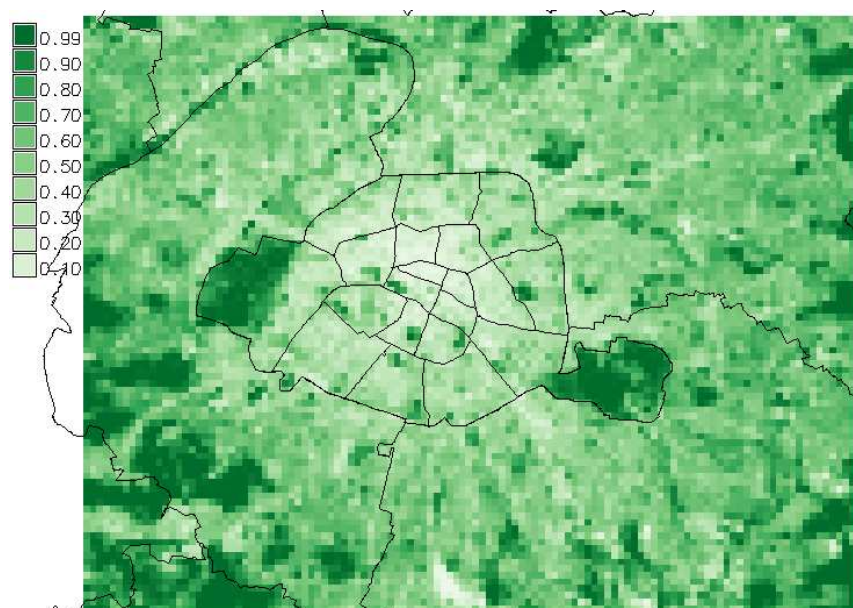


Figure 6 : Base de données du couvert urbain parisien : Fraction de végétation par maille.

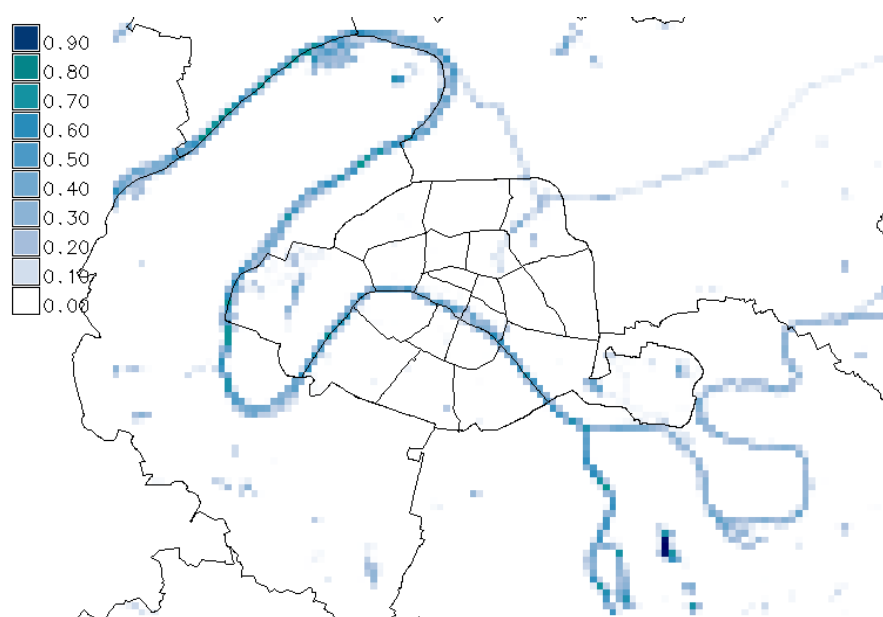


Figure 7 : Base de données du couvert urbain parisien : Fraction de surfaces aquatiques par maille.

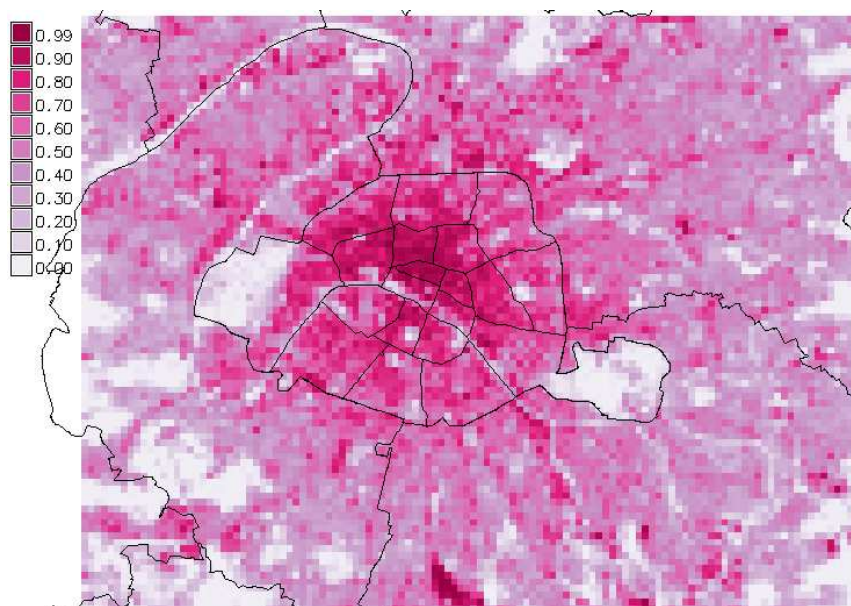


Figure 8 : Base de données du couvert urbain parisien : Fraction de ville « réelle » correspondant aux surfaces artificielles par maille (fraction de ville à laquelle on a soustrait la partie « jardin », *ie.* la végétation).

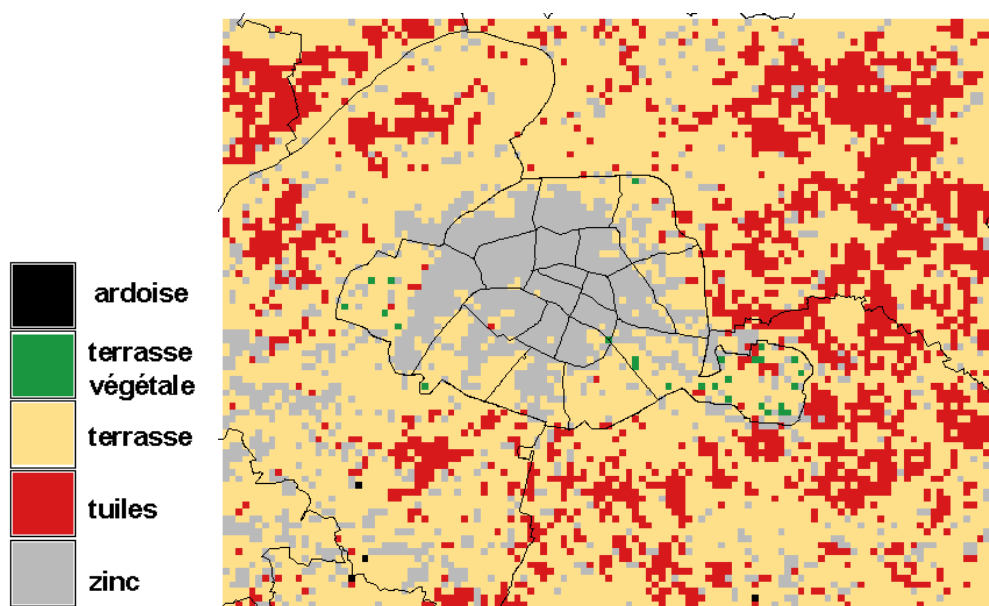


Figure 9 : Base de données du couvert urbain parisien : Répartition par maille des types de toits majoritaires, classés par matériau.

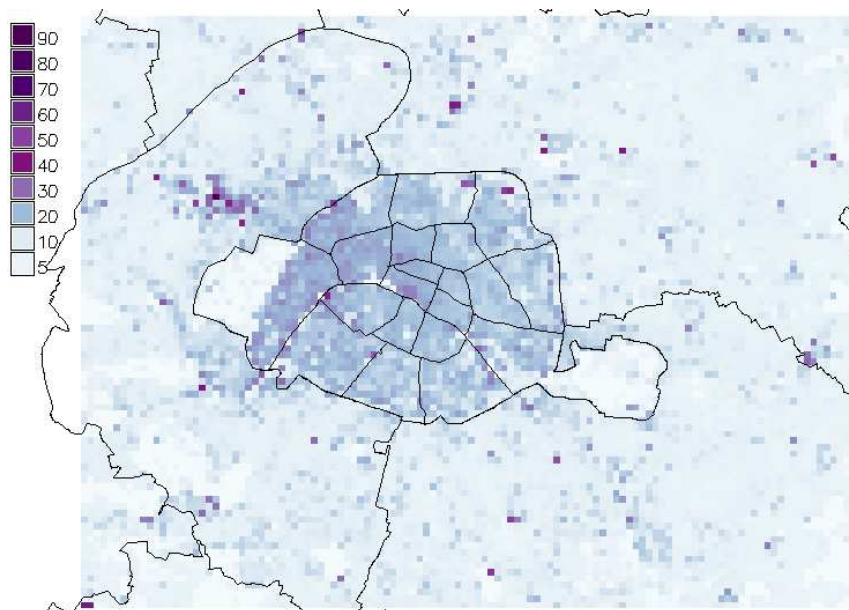


Figure 10 : Base de données du couvert urbain parisien : Répartition par maille de l'altitude moyenne des bâtiments.

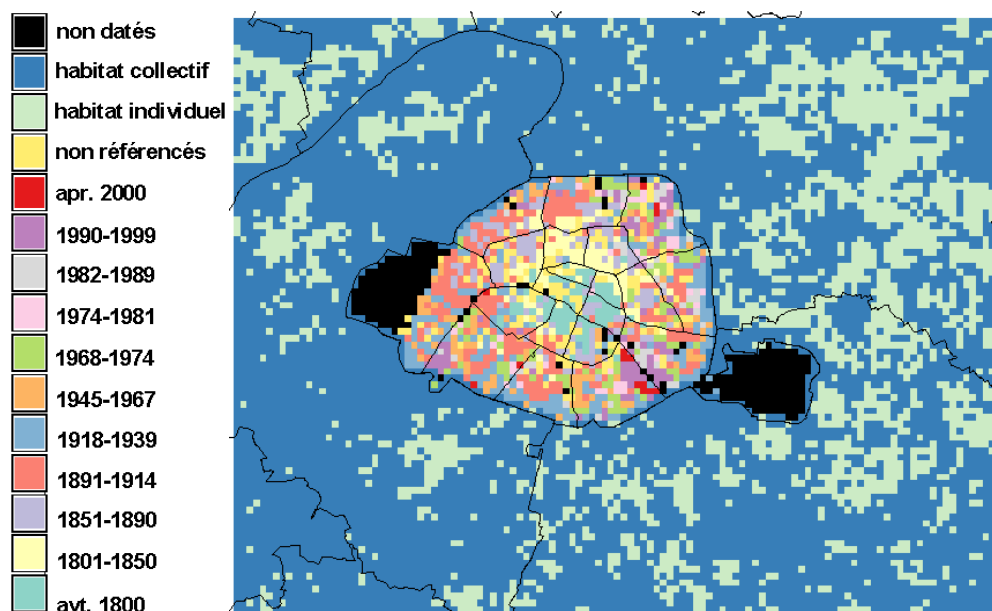


Figure 11 : Base de données du couvert urbain parisien : Répartition des types de murs des bâtiments majoritaires par maille, triés par classe d'âge.

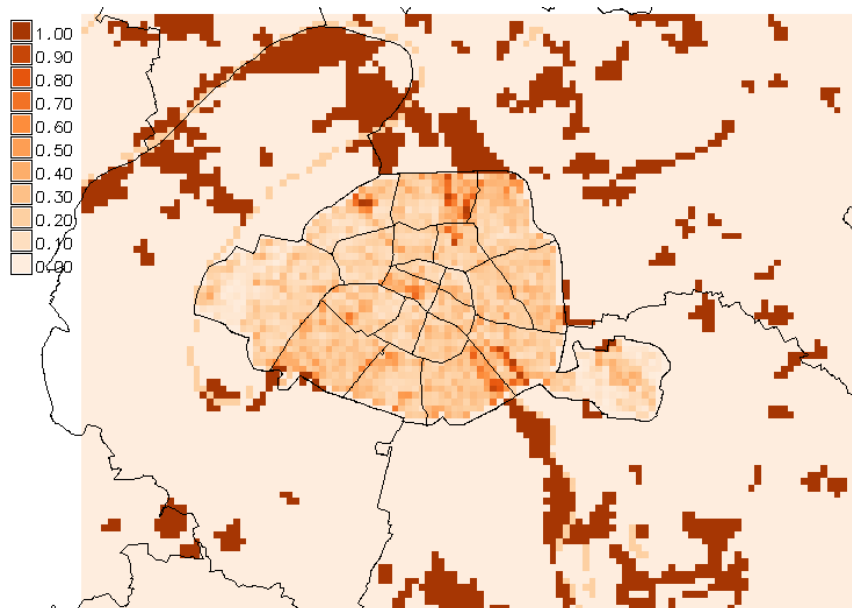


Figure 12 : Base de données du couvert urbain parisien : Fraction de sol nu par maille.

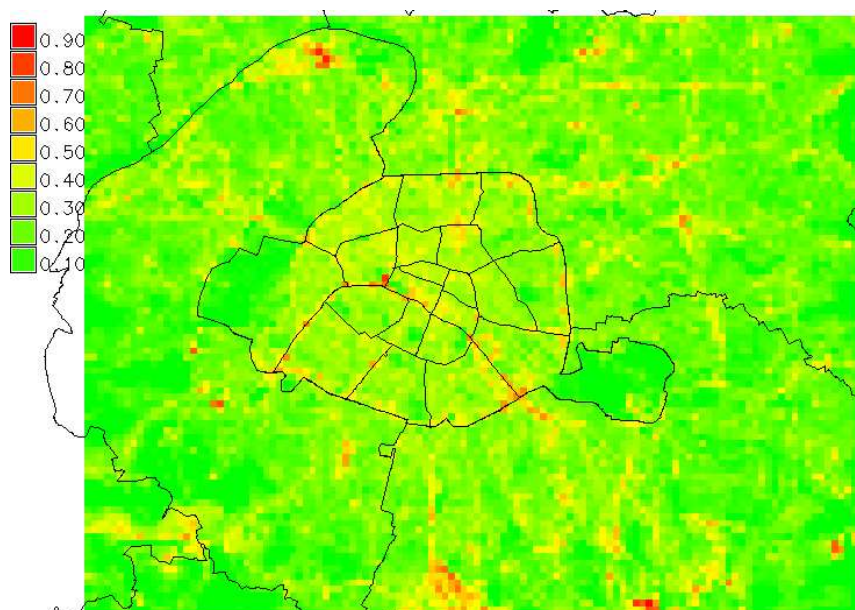


Figure 13 : Base de données du couvert urbain parisien : Fraction de bitume (routes et surfaces bitumées) par maille.

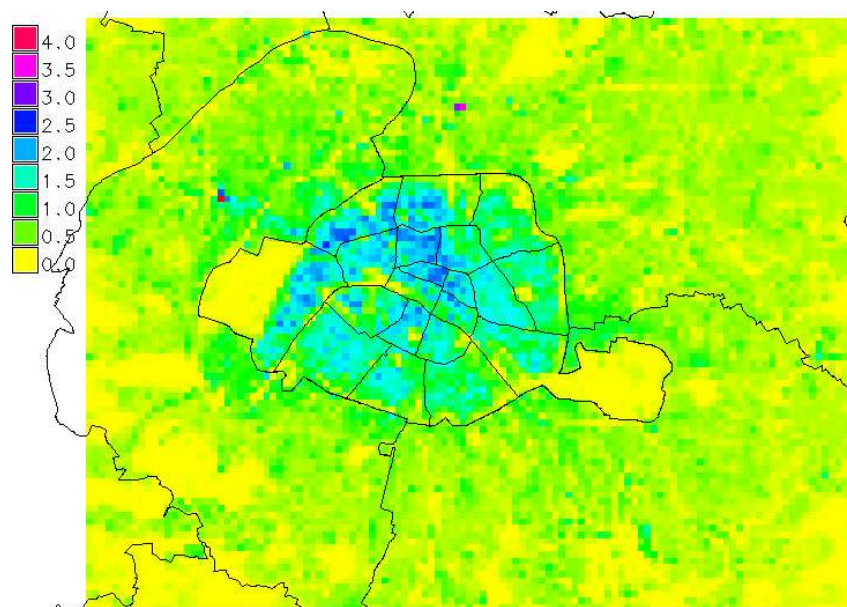


Figure 14 : Base de données du couvert urbain parisien : Facteur de forme du bâti (surface totale de murs / surface de ville) par maille.

1.4 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.

1.4.1. Toits

Les données fournies par l'APUR révèlent l'importance relative des quatre principaux types de couverture dans cette zone (zinc, tuile, ardoise, terrasse : Figure 9). Les propriétés radiatives des couvertures parisiennes dominantes (zinc et toitures 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).

L'ensemble des informations nécessaires au schéma TEB pour paramétrer les toits sont principalement issues de NF EN ISO 10456 (2008) et regroupées dans le tableau ci-après (Tableau 2).

couche extérieure : 1 (étanchéité)						
code	matériau	émissivité	albédo	épaisseur m	capacité calorifique J/m ³ K	conductivité W/mK
zinc	feuille de zinc	0,10	0,60	0,0008	2 736 000	110,00
toiture terrasse	revêtement d'étanchéité	0,80	0,20	0,004	2 100 000	0,70
tuiles	tuiles (terres cuites)	0,80	0,20	0,025	1 600 000	1,00
ardoise	ardoise	0,90	0,15	0,012	2 500 000	2,20
couche centrale : 2 (support)						
zinc	calcaire tendre	/	/	0,10	900 000	0,13
toiture terrasse	béton armé	/	/	0,20	2 300 000	2,30
tuiles	charpente et Litonnage	/	/	0,10	900 000	0,13
ardoise	charpente et voligeage / litonnage	/	/	0,10	900 000	0,13
couche intérieure intermédiaire : 3 (isolant)						
zinc	Isolant minéral ou plastique	/	/	0,10	75 000	0,035
toiture terrasse	Isolant minéral ou plastique	/	/	0,10	75 000	0,035
tuiles	Isolant minéral ou plastique	/	/	0,10	75 000	0,035
ardoise	Isolant minéral ou plastique	/	/	0,10	75 000	0,035

Tableau 2 : Caractéristiques des toits par type de toit pour l'ensemble du domaine.

1.4.2. 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 CO₂ du bâti résidentiel parisien (APUR 2007), sur lequel nous nous basons. Il propose une typologie du patrimoine bâti par tranche d'âge. 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 W.m⁻².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 avec une capacité calorifique entre 1.6 E6 et 1.8 E6 J.m⁻³.K⁻¹, une conductivité thermique de 1 W.m⁻¹.K⁻¹ et une 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 avec une capacité calorifique entre 1.48 E6 et $2.3 \text{ E6 J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$, une conductivité thermique entre 1.15 et $1.7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et une 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 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 avec une capacité calorifique entre 1.6 E6 et $1.8 \text{ E6 J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$, une conductivité thermique entre 0.8 et $1 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, et une épaisseur entre 0.02 et 0.03 m) ;
- couche intermédiaire : structure du mur en béton armé (béton banché avec une capacité calorifique de $2.3 \text{ E6 J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$, une conductivité thermique de $1.65 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et une 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 avec une capacité calorifique de $0.0575 \text{ E6 J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$, une conductivité thermique de $0.035 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et une 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 comme 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 rue) et l'ordre de grandeur de l'inertie thermique des murs, ainsi que la disposition relative des couches (isolation par l'intérieur).

Pour la zone située hors Paris intra muros, la Figure 9 révèle deux types majoritaires de couverture dans cette zone : en tuile et 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 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 2 cm , couche intermédiaire constituée par des matériaux maçonnés de 18 cm 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 3 cm , couche intermédiaire constituée par une structure en béton armé

d'épaisseur 18 cm, 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 $2 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$.

Les données analysées par le CSTB consistaient en des murs à 3 couches, avec une couche intérieure relativement épaisse pour les bâtiments conçus avant 1945 et pour les bâtiments non datés. Or, pour bien modéliser dans TEB les flux de chaleur là où les gradients de température sont forts – i.e. entre l'air extérieur et la couche extérieure ou entre la couche intérieure et l'air intérieur, il faut des couches minces. Par conséquent, la couche intérieure a été divisée en deux couches de caractéristiques thermiques identiques mais d'épaisseurs différentes pour les murs anciens et non datés (couche intérieure 4 d'épaisseur égale à 0,05 m et couche 3 calculée en fonction), ou d'épaisseurs égales pour les murs plus récents dont la couche intérieure était déjà mince.

L'ensemble des informations nécessaires au schéma TEB pour paramétrer les murs sont regroupées dans les tableaux ci-après (Tableau 3 et Tableau 4).

code	classe APUR âge bâtiment	% total (sauf non datés)	U mur W/m² K	épaisseur totale mur m			
1	avant 1800	10%	1,82	0,41			
2	1800-1850	15%	1,94	0,46			
3	1851-1890	49%	2,15	0,48			
4	1891-1914		2,15	0,48			
5	1918-1939	9%	2,05	0,36			
6	1945-1967	5%	2,91	0,26			
7	1968-1974	3%	2,91	0,26			
8	1975-1981	2%	1,68	0,23			
9	1982-1989	2%	1,13	0,24			
10	1990-1999	4%	0,63	0,265			
11	après 2000	1%	0,46	0,285			
99	non daté		2,02	0,36			
20	non référencé			0,48			
couche extérieure : 1							
code	matériau	albédo	émissivité	épaisseur m	capacité calorifique J/m3 K	conductivité W/mK	
1	enduit chaux plâtre ou plâtre et sable	0,40	0,90	0,06	1 600 000	1,00	
2				0,06	1 600 000	1,00	
3				0,03	1 600 000	1,00	
4				0,03	1 600 000	1,00	
5				0,03	1 600 000	1,00	
6	enduit ciment et sable			0,04	1 800 000	1,00	
7				0,04	1 800 000	1,00	
8				0,02	1 800 000	1,00	
9				0,02	1 800 000	1,00	
10				0,02	1 800 000	1,00	
11				0,02	1 800 000	1,00	
99	idem 1918-1939			0,03	1 600 000	0,80	
20	idem 1851-1914	0,40	0,90	0,03	1 600 000	1,00	
couche centrale : 2							
1	calcaire tendre	/	/	0,15	1 800 000	1,10	
2	Pierre (demi-ferme)	/	/	0,15	2 000 000	1,40	
3	Pierre ferme	/	/	0,15	2 200 000	1,70	
4	Pierre ferme	/	/	0,15	2 200 000	1,70	
5	brique	/	/	0,15	1 480 000	1,15	
6	béton banché	/	/	0,15	2 300 000	1,65	
7	béton banché	/	/	0,15	2 300 000	1,65	
8	béton banché	/	/	0,20	2 300 000	1,65	
9	béton banché	/	/	0,20	2 300 000	1,65	
10	béton banché	/	/	0,20	2 300 000	1,65	
11	béton banché	/	/	0,20	2 300 000	1,65	
99	idem 1918-1939	/	/	0,15	1 480 000	1,15	
20	idem 1851-1914	/	/	0,15	2 200 000	1,70	

couche intérieure intermédiaire : 3						
1	calcaire tendre	/	/	0,15	1 800 000	1,10
2	Pierre (demi-ferme)	/	/	0,20	2 000 000	1,40
3	Pierre ferme	/	/	0,25	2 200 000	1,70
4	Pierre ferme	/	/	0,25	2 200 000	1,70
5	brique	/	/	0,13	1 480 000	1,15
6	béton banché	/	/	0,035	2 300 000	1,65
7	béton banché	/	/	0,035	2 300 000	1,65
8	isolant	/	/	0,005	50 750	0,035
9	isolant	/	/	0,01	50 750	0,035
10	isolant	/	/	0,0225	50 750	0,035
11	isolant	/	/	0,0325	50 750	0,035
99	idem 1918-1939	/	/	0,13	1 480 000	1,15
20	idem 1851-1914	/	/	0,25	2 200 000	1,70
couche intérieure : 4						
1	calcaire tendre	/	/	0,05	1 800 000	1,10
2	Pierre (demi-ferme)	/	/	0,05	2 000 000	1,40
3	Pierre ferme	/	/	0,05	2 200 000	1,70
4	Pierre ferme	/	/	0,05	2 200 000	1,70
5	brique	/	/	0,05	1 480 000	1,15
6	béton banché	/	/	0,035	2 300 000	1,65
7	béton banché	/	/	0,035	2 300 000	1,65
8	isolant	/	/	0,005	50 750	0,035
9	isolant	/	/	0,01	50 750	0,035
10	isolant	/	/	0,0225	50 750	0,035
11	isolant	/	/	0,0325	50 750	0,035
99	idem 1918-1939	/	/	0,05	1 480 000	1,15
20	idem 1851-1914	/	/	0,05	2 200 000	1,70

Tableau 3 : Caractéristiques des murs pour Paris *intra muros* par classe d'âge du bâtiment.

individuel						
code	U mur W/m ² K	épaisseur totale mur m				
30	2,04	0,205				
couche extérieure : 1						
code	matériau	albédo	émissivité	épaisseur m	capacité calorifique J/m ³ K	conductivité W/mK
30	enduit	0,40	0,90	0,02	1 800 000	1,00
couche centrale : 2						
30	maçonnerie	/	/	0,18	1 850 000	1,15
couche intérieure intermédiaire : 3						
30	isolant	/	/	0,0025	50 750	0,035
couche intérieure : 4						
30	isolant	/	/	0,0025	50 750	0,035
collectif						
code	U mur W/m ² K	épaisseur totale mur m				
40	1,68	0,22				
couche extérieure : 1						
code	matériau	albédo	émissivité	épaisseur m	capacité calorifique J/m ³ K	conductivité W/mK
40	enduit	0,40	0,90	0,03	1 800 000	1,00
couche centrale : 2						
40	maçonnerie	/	/	0,18	2 300 000	1,65
couche intérieure intermédiaire : 3						
40	isolant	/	/	0,005	50 750	0,035
couche intérieure : 4						
40	isolant	/	/	0,005	50 750	0,035

Tableau 4 : Caractéristiques des murs pour la banlieue (Petite Couronne et une petite partie de la Grande Couronne) par type d'habitat (individuel ou collectif, déterminé en fonction du type de toit).

La préparation des données provenant de l'APUR et du CSTB pour intégration dans SURFEX est décrite en détail dans le document « Note sur la préparation des données physiographiques en entrée de SURFEX pour l'agglomération parisienne » (Annexe A).

2 Analyse des résultats

Les simulations sont élaborées avec le modèle MESO-NH et le système SURFEX (Section 1.1).

Une première simulation a auparavant été menée à la résolution de 2 km sur une vaste zone qui inclut toute la région IDF (domaine fils) où Paris est représenté 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). Quant aux forçages météorologiques, ils sont fournis au domaine « père » à travers le modèle de grande 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, afin de déterminer les zones géographiques de la capitale les plus vulnérables à ces phénomènes urbains. Cette seconde simulation est effectuée à la résolution de 250 m sur une zone beaucoup plus restreinte qui englobe l'agglomération parisienne (domaine fils : « Paris-PC »), sur la période du 08 août à 13 UTC au 14 août à 00 UTC (avec un domaine père sur l'IDF à la résolution de 1.25 km, démarrant le 08 août à 01 UTC : domaine « IDF »). Elle s'appuie sur une base de données précise du couvert parisien élaborée en collaboration avec l'APUR (Section 1.2) et sert de référence aux tests de sensibilité qui seront menés par la suite en fonction des différents leviers urbains.

2.1 Validation de la simulation

Différents outils nous permettent de valider la simulation :

- Le radar installé à Trappes permet de suivre les précipitations ;
- Les images satellites permettent de visualiser la couverture nuageuse ;
- Les observations permettent de vérifier les paramètres météorologiques simulés par le modèle. Sur le domaine « IDF », nous disposons d'un réseau de 45 stations effectuant des mesures au pas de temps horaire et quotidien tandis que sur le domaine « Paris – PC », 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 15). Ces stations sont situées en milieu urbain (fraction de ville « réelle » de la maille associée à la station supérieure à 50 %), milieu péri-urbain (fraction de ville « réelle » comprise entre 10 et 50 %) ou milieu rural (fraction de ville « réelle » inférieure à 10 %).

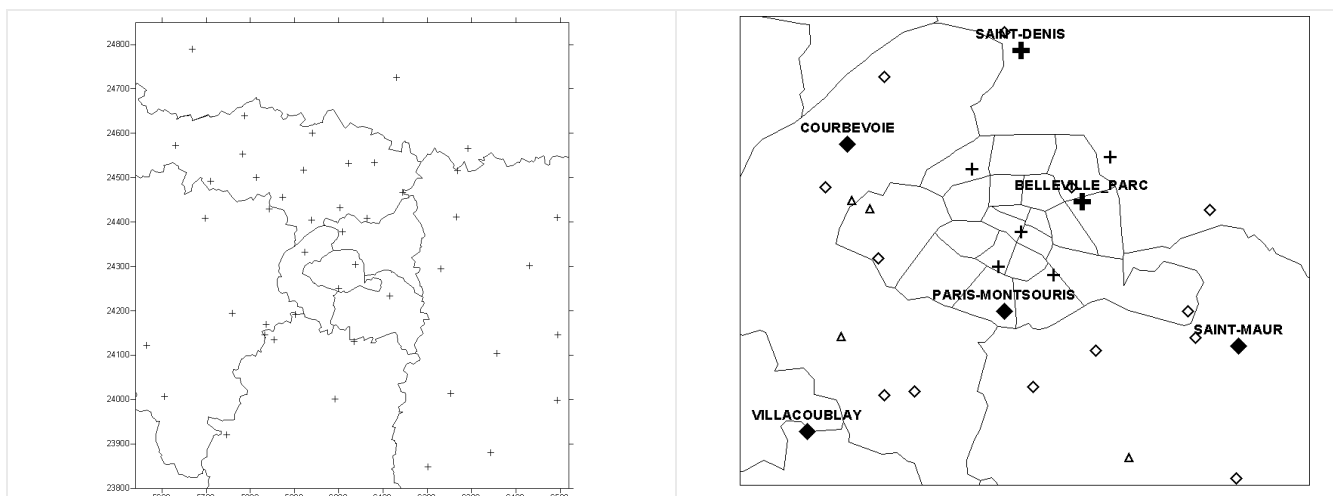


Figure 15 : Stations de mesure disponibles pour la période du 08 au 13 août 2003 sur le domaine « IDF » (à gauche) et sur le domaine « Paris – PC » (à droite). Sur le domaine « IDF », les stations sont seulement pointées, tandis que sur le domaine « Paris – PC », les croix représentent les stations en milieu urbain, les losanges les stations en milieu péri-urbain et les triangles les stations en milieu rural ; en gras sont représentées les stations à données horaires et en trait fin les stations à données quotidiennes.

2.1.1 Précipitations

La comparaison des cumuls de précipitations obtenus par la simulation sur les domaines « IDF » et « Paris – PC » avec les images du radar de Trappes (78) pour la même période montre que l'intensité et la localisation spatiale des précipitations sont bien vues par le modèle mais que leur localisation temporelle est décalée.

Des précipitations ont eu lieu principalement (Figure 16) :

- entre le 10 août 18 UTC et le 11 août 00 UTC sur le nord des Yvelines (faibles, de l'ordre de 0.5 à 1 mm)
- le 11 août entre 00 et 06 UTC sur Paris et la Petite Couronne, le Val d'Oise, le nord des Yvelines et de l'Essonne et le centre de la Seine et Marne (entre 5 et 10 mm localement)
- le 11 août entre 06 et 12 UTC sur le nord de la Seine et Marne, les Yvelines, les Hauts-de-Seine et le sud du Val d'Oise (entre 2 et 5 mm localement).

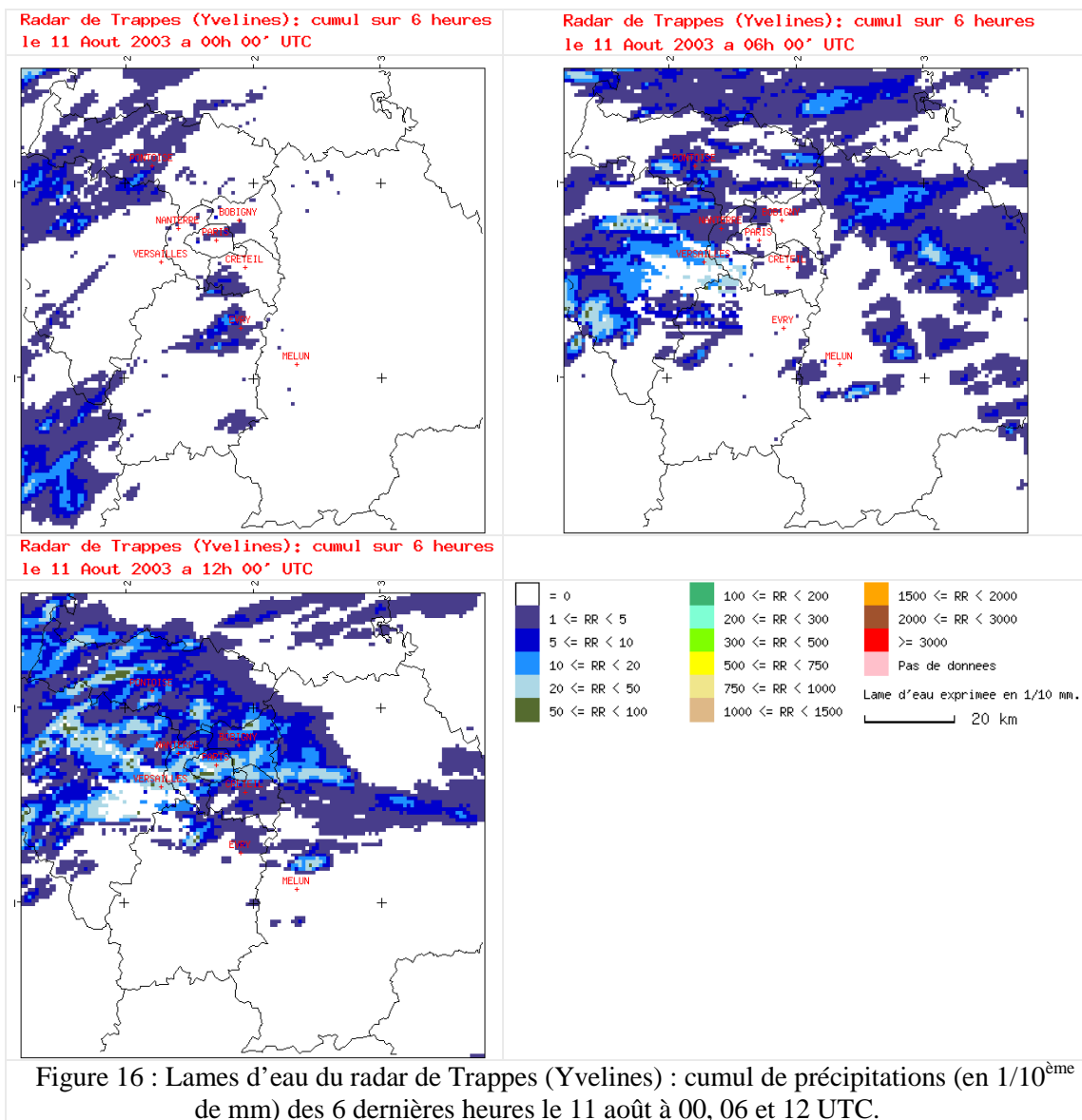
Le modèle « IDF » simule des précipitations (Figure 17) :

- entre le 08 août 17 UTC et le 09 août 04 UTC sur le nord-est et l'ouest de l'Essonne (quelques mm) et sur le centre de la Seine et Marne (localement jusqu'à 18 mm)
- le 11 août entre 15 et 16 UTC à l'est de Paris ainsi que sur le centre du Val d'Oise et le nord-est des Yvelines (quelques mm).

Le modèle « Paris – PC » simule des précipitations (Figure 17) :

- le 11 août entre 14 et 18 UTC à l'est et au nord de Paris ainsi que sur la limite sud de Paris (quelques mm).

L'événement précipitant caractéristique de cette période est un orage accompagné d'averses qui ont lieu sur une zone couvrant Paris, le nord du Val de Marne et l'est de la Seine-Saint-Denis, le nord-ouest des Yvelines et le centre du Val d'Oise dans la seconde partie de la nuit du 10 au 11 août, et qui est vu par le modèle avec un décalage temporel de quelques heures.



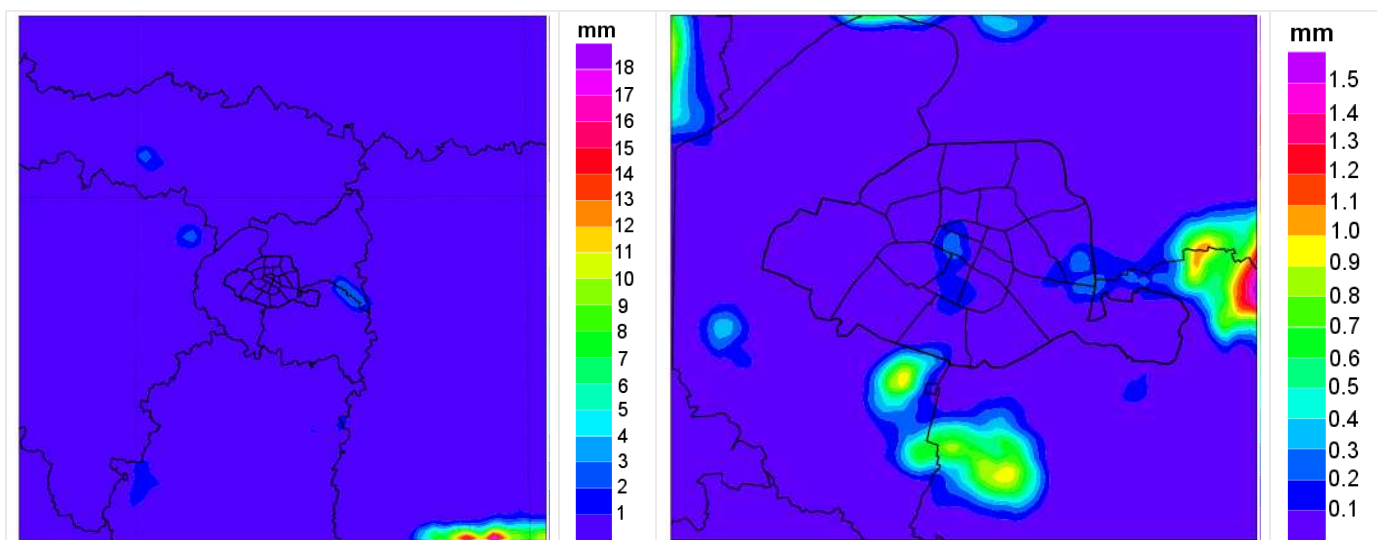


Figure 17 : Précipitations totales cumulées sur l'ensemble de la période simulées par les modèles « IDF » et « Paris – PC ».

2.1.2 Nébulosité

Les passages nuageux simulés par le modèle sont cohérents avec ce qui a été observé par le satellite Meteosat 7. En début de période, quelques rares nuages épars sont parfois présents. L'après-midi puis la soirée du 10 août sont plus nuageuses en lien avec l'orage qui se produit sur le sud-ouest de l'agglomération parisienne. Dans la nuit du 10 au 11 août, les nuages se maintiennent de manière fragmentée. Le 11 août, dans l'après-midi, un passage nuageux plus important apparaît, à la fois sur les mesures satellite et sur les simulations (Figure 18 et Figure 19).

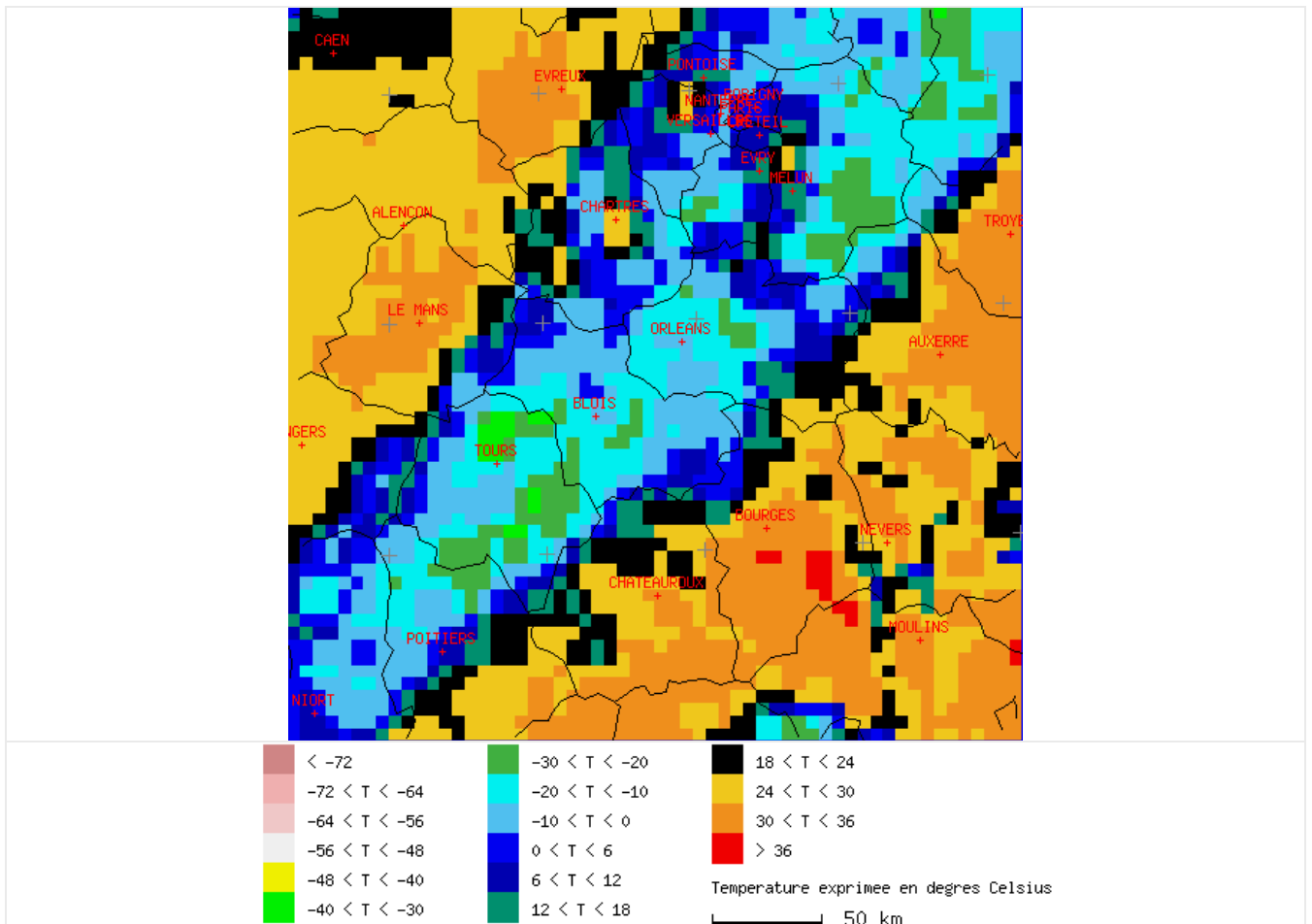


Figure 18 : Image satellitale prise par Meteosat 7 le 11 août 2003 à 15 UTC. Les températures donnent une indication de l'altitude et donc du type de nuages. Ici, on a plutôt des nuages de l'étage moyen, type altocumulus. On distingue également le sol, ici pour les températures supérieures à 24 °C.

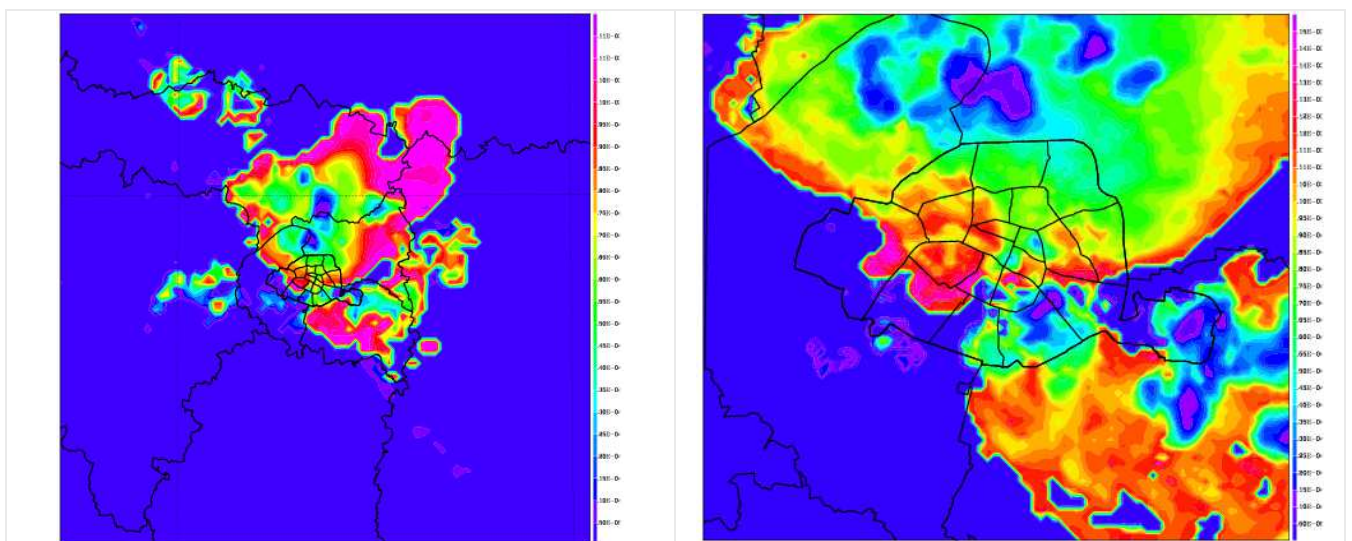


Figure 19 : Rayonnement diffus simulé par le modèle sur les domaines « IDF » et « Paris – PC » le 11 août 2003 à 15 UTC. Ce paramètre permet de détecter la présence de nuages là où le rayonnement est non nul.

2.1.3 Températures

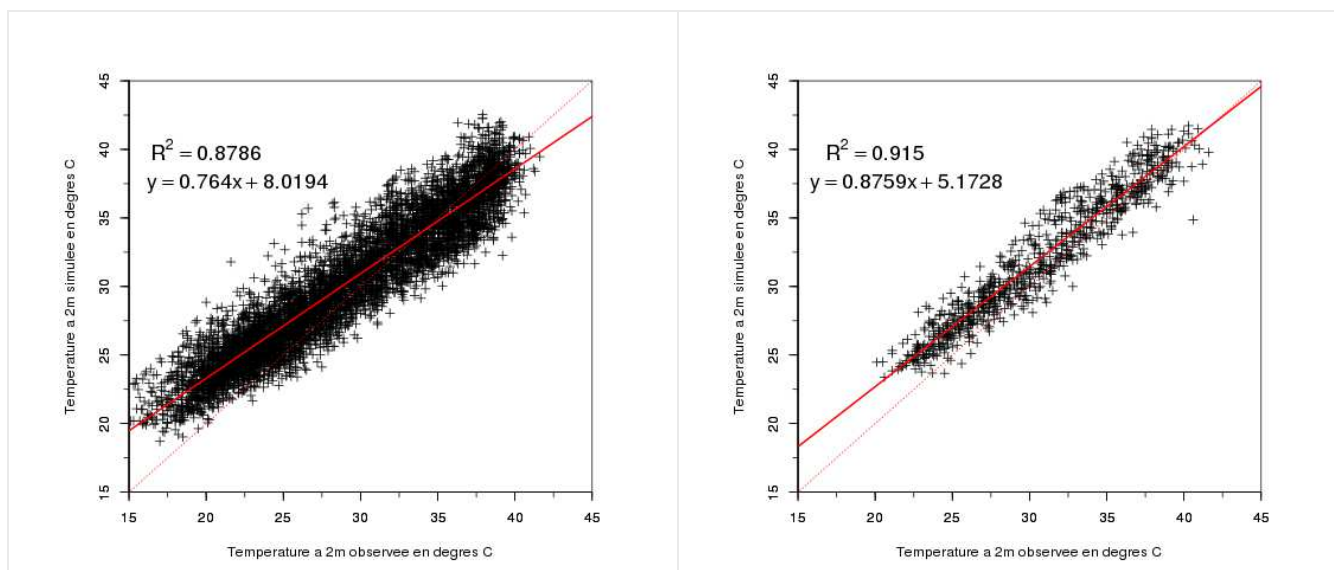


Figure 20 : Diagrammes de dispersion de la température de l'air à 2 m observée et simulée par le modèle pour l'ensemble des stations horaires des domaines « IDF » (à gauche, 45 stations) et « Paris – PC » (à droite, 6 stations). La droite de régression (ajustement linéaire) est superposée en rouge en traits pleins, ainsi que la première bissectrice en pointillés rouges.

Les diagrammes de dispersion des températures horaires à 2 m (valeurs simulées vs. valeurs observées) sur l'ensemble des stations pour les deux domaines (Figure 20) montrent que le modèle reproduit bien les observations avec une tendance à surestimer les températures, notamment les plus basses. Pour les deux domaines, la corrélation entre températures simulées et observées à 2 m est bonne, avec une erreur quadratique moyenne (EQM) de 2.57 °C pour le domaine «IDF» à 1.25 km de résolution et de 2.03 °C pour le domaine « Paris – PC » à 250 m de résolution avec une très bonne corrélation pour ce dernier ($R^2= 0.915$). L'augmentation de résolution entre les deux domaines permet donc un gain en EQM de 0.5 °C. Sur le domaine « Paris –PC », l'EQM est comprise entre 1.34 °C et 1.95 °C entre le 08 et le 12 août et se dégrade le 13 août en atteignant 3.04 °C (Tableau 5).

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	2.019	1.419	1.165	2.156	1.944	3.171
COURBEVOIE	1.735	1.154	1.014	1.676	1.575	2.849
ST-DENIS	2.245	2.075	1.639	2.091	1.804	3.349
ST-MAUR	2.453	1.903	2.641	2.725	2.886	2.513
VILLACOUBLAY	1.790	1.121	0.786	1.280	1.638	3.291
MOYENNE	2.01	1.46	1.34	1.95	1.94	3.04

Tableau 5 : Erreurs quadratiques moyennes sur la température de l'air à 2 m au pas de temps horaire et pour les six stations du domaine « Paris – PC », sur l'ensemble de la période de simulation et jour par jour.

La Figure 21 montre l'évolution de ces températures au pas de temps horaire sur toute la période et pour les stations à mesures horaires situées dans le domaine « Paris – PC ». Nous constatons que le cycle diurne est correctement simulé sur l'ensemble de la période pour ces stations. Néanmoins, des différences existent, notamment sur les minima de température qui ne sont pas toujours bien vus. Cela s'explique par la situation des stations : Paris-Montsouris par exemple est située dans un vaste parc (Parc Montsouris) et considérée par le modèle comme placée en milieu péri-urbain. Pendant la canicule 2003, les sols très secs du parc ont vraisemblablement été arrosés afin de maintenir la végétation au sein du parc. Le modèle lui 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 elle 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 données par le modèle du CEPMMT.

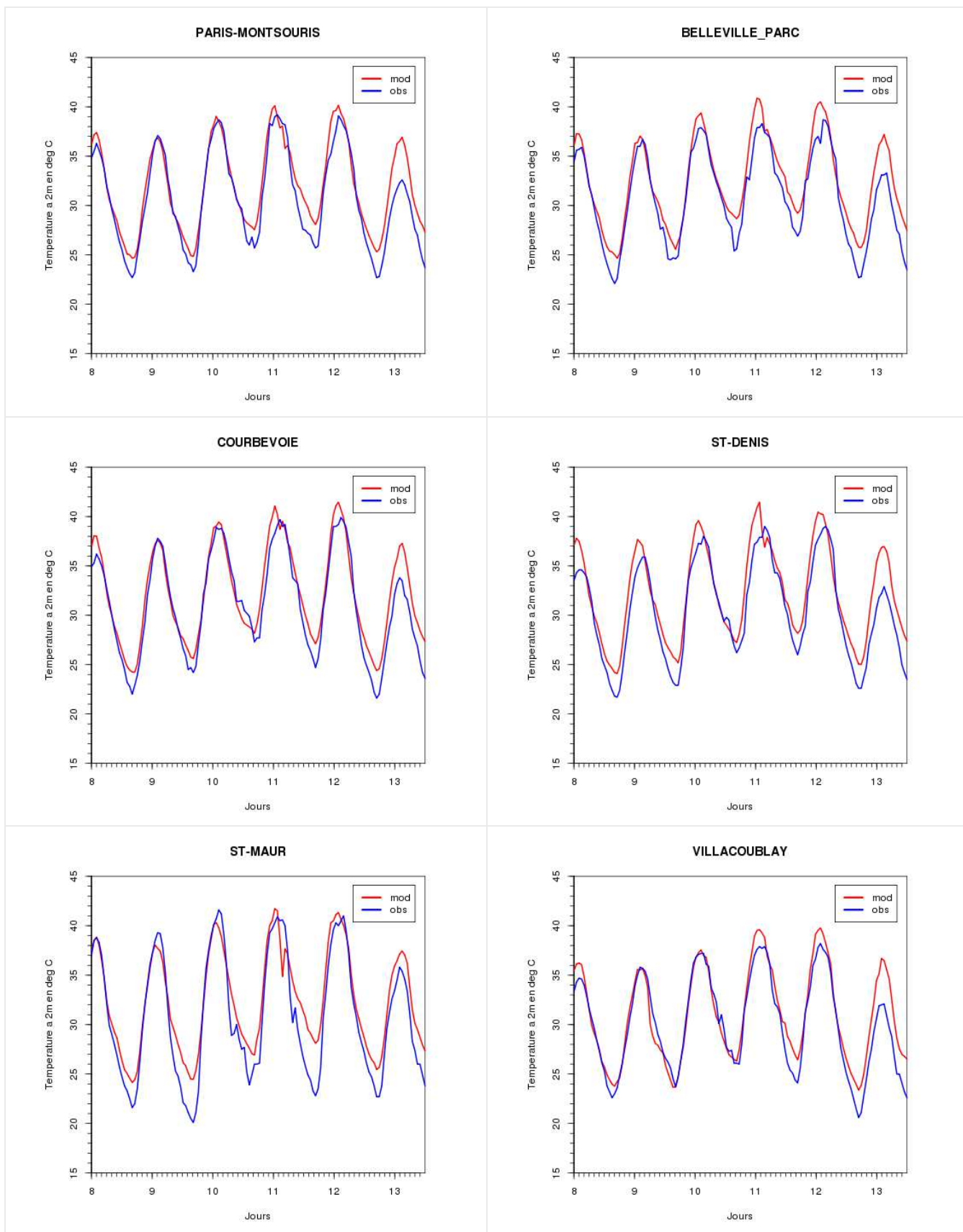
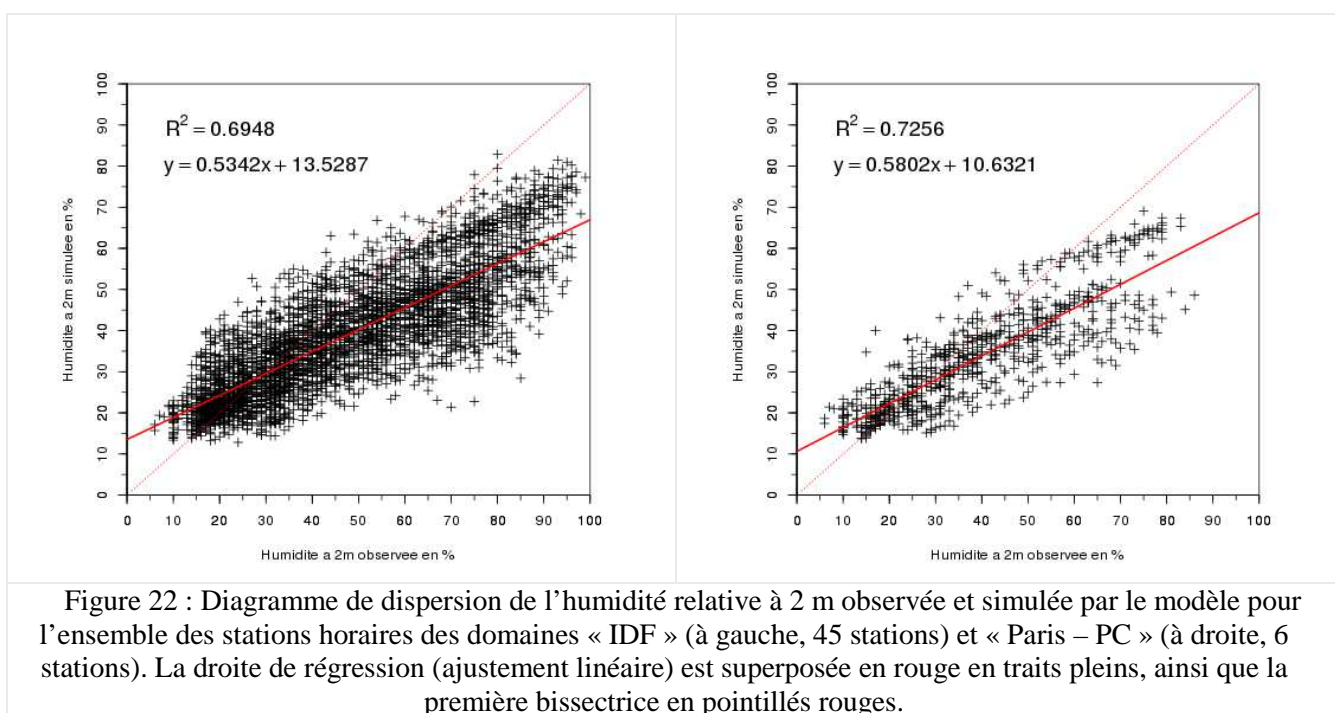


Figure 21 : Température de l'air à 2 m simulée par le modèle (rouge) et observée (bleu) pour les stations horaires situées dans le domaine « Paris – PC » pour l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003).

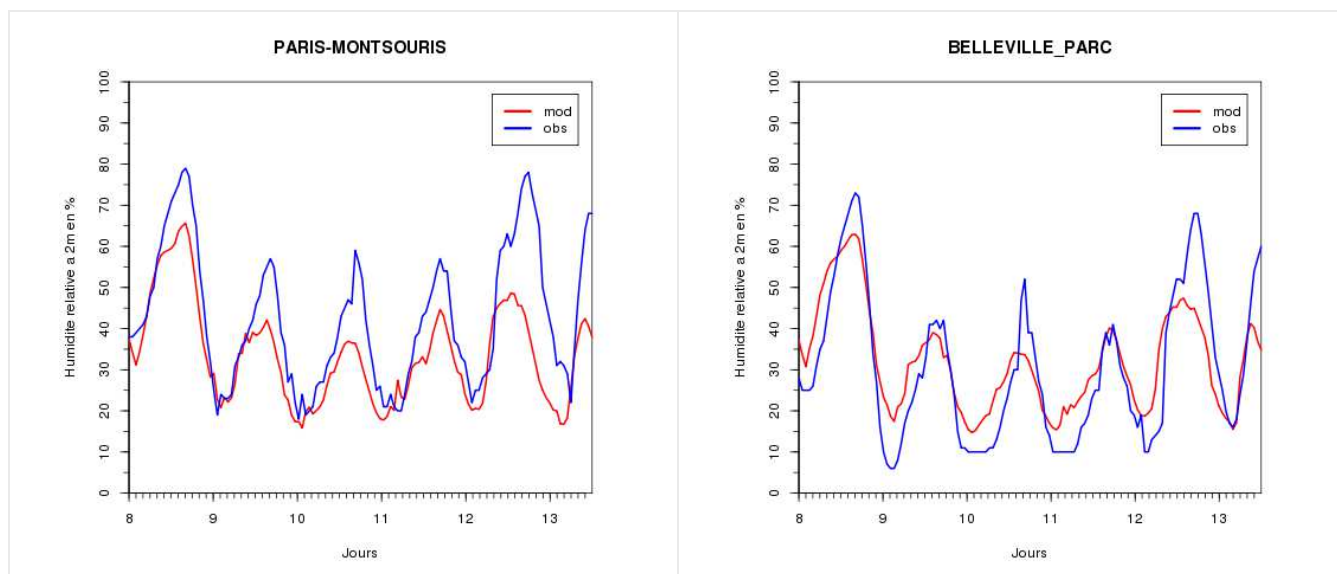
2.1.4 Humidité

Le diagramme de dispersion des humidités relatives horaires à 2 m (valeurs observées vs. valeurs simulées) sur l'ensemble des stations (Figure 22) montre que le modèle reproduit correctement les observations avec une tendance à surestimer les humidités relatives très faibles et sous-estimer les fortes humidités. Là encore, l'augmentation de résolution entre les deux domaines permet un gain en EQM (de l'ordre de 3.5 %). L'erreur quadratique moyenne est de 11.7 % sur toute la période (Tableau 6) et comprise entre 8.2 et 9.5 % entre le 08 et le 12 août et une valeur qui se dégrade (20.1 %) le 13 août. L'évolution de ces humidités relatives au pas de temps horaire sur toute la période pour les 6 stations (Figure 23) 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 vraisemblable 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.



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	12.97	8.51	9.09	10.40	9.47	23.71
BELLEVILLE_PARC	9.46	9.02	6.67	8.30	7.89	13.70
COURBEVOIE	11.62	6.80	6.60	8.20	9.29	22.13
ST-DENIS	10.77	8.70	7.90	8.89	6.68	19.07
ST-MAUR	13.60	9.88	15.12	11.49	14.46	18.46
VILLACOUBLAY	11.70	6.75	3.76	5.70	9.54	23.79
MOYENNE	11.7	8.3	8.2	8.8	9.5	20.1

Tableau 6 : Erreurs quadratiques moyennes sur la température de l'air à 2 m au pas de temps horaire et pour les six stations du domaine « Paris – PC », sur l'ensemble de la période de simulation et jour par jour.



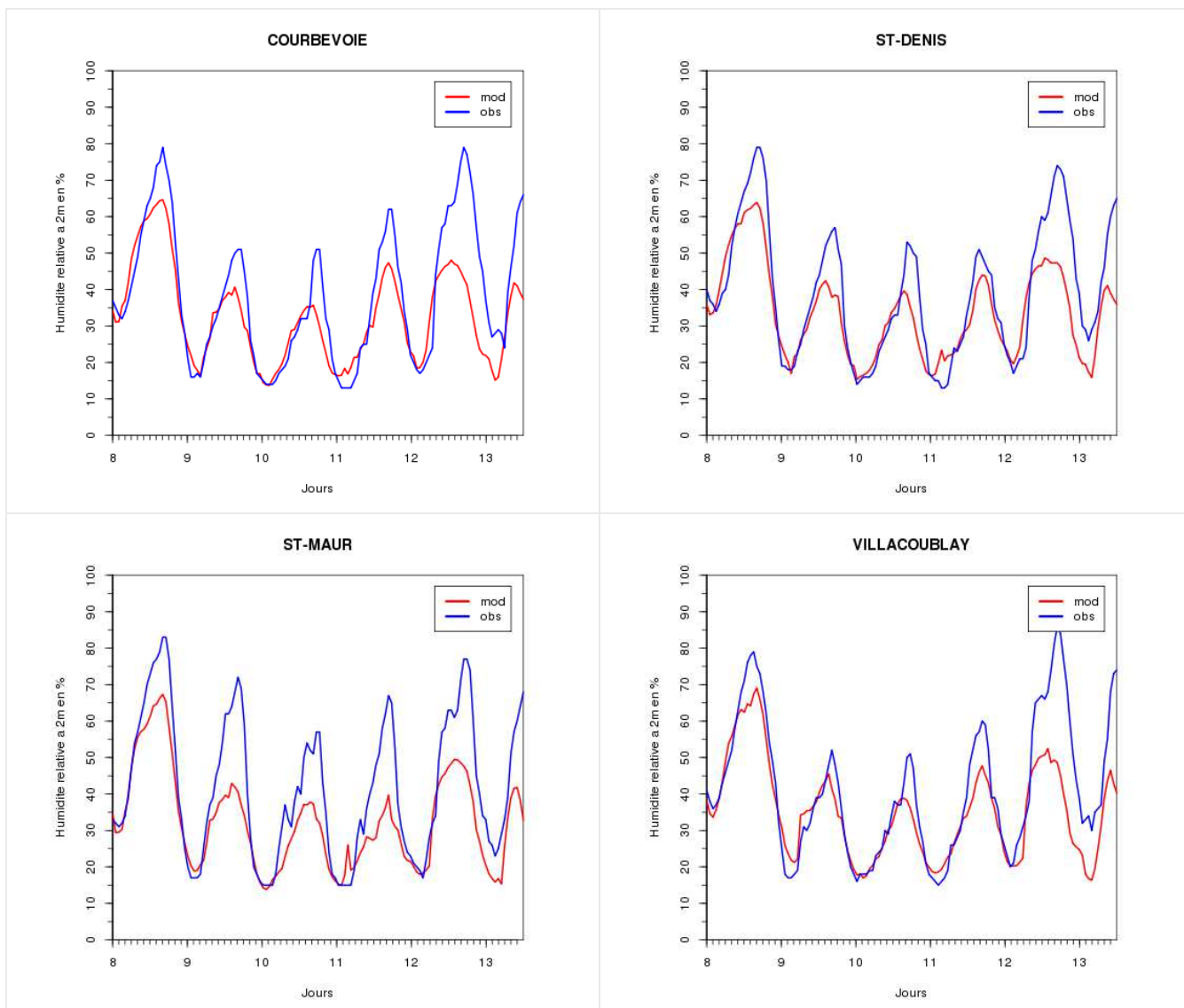
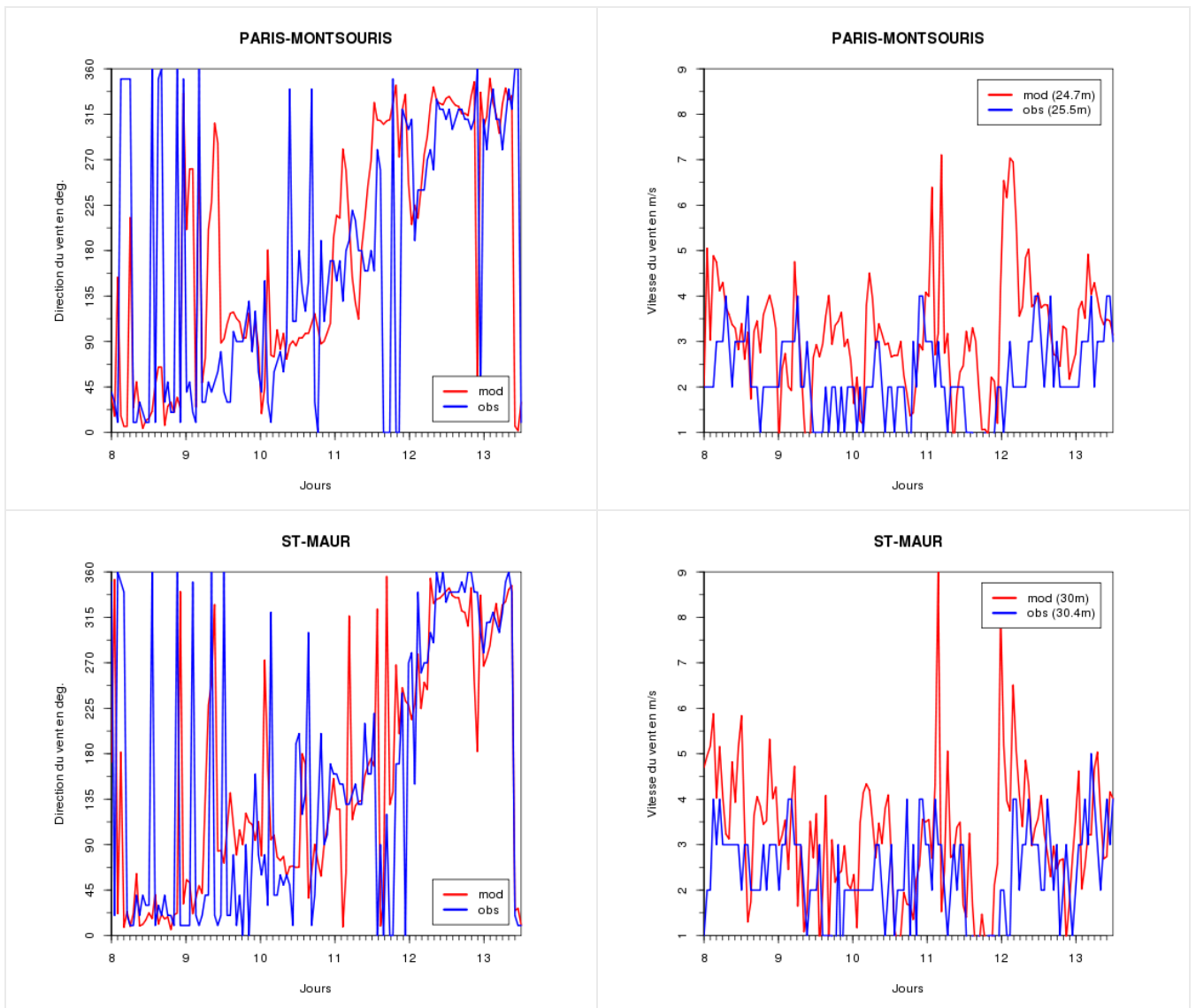
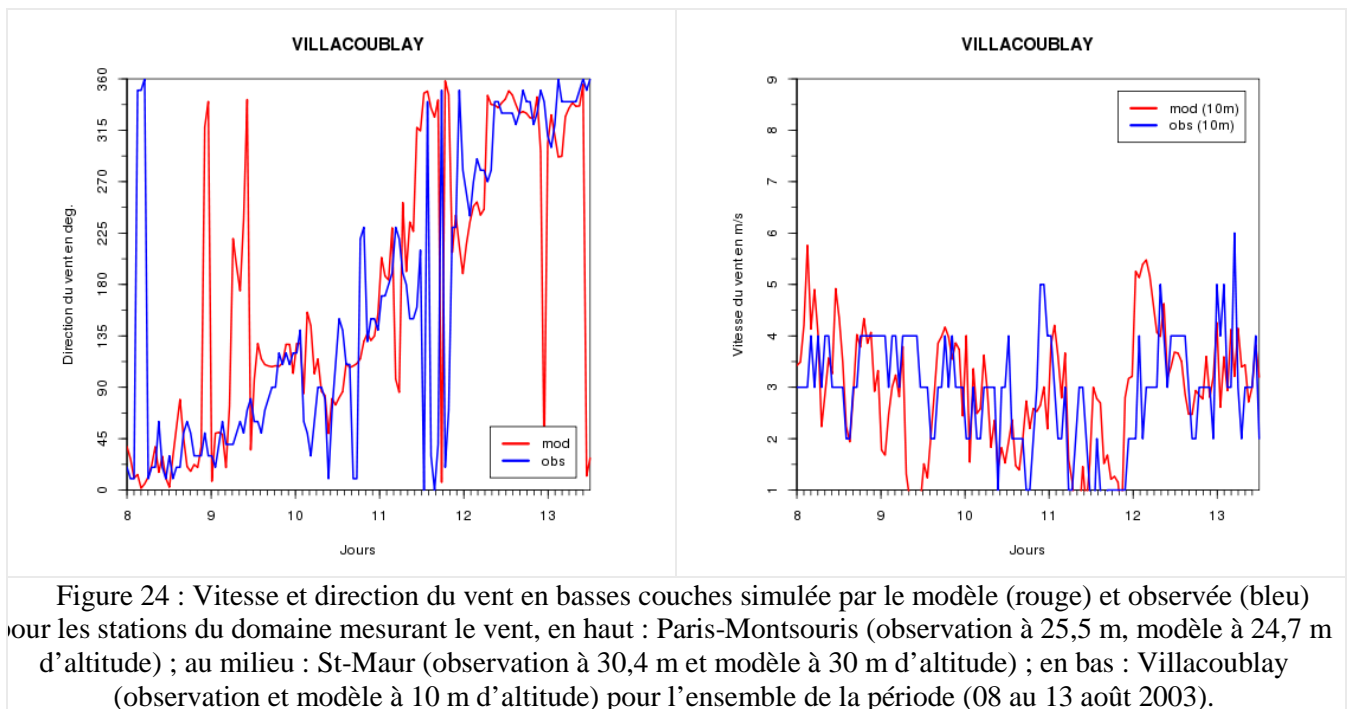


Figure 23 : Humidité relative de l'air à 2 m simulée par le modèle (rouge) et observée (bleu) pour les stations horaires situées dans le domaine « Paris – PC » pour l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003).

2.1.5 Vent

Le vent est mesuré par trois stations sur le domaine « Paris – PC », dont une seule dans Paris *intra muros*. La Figure 24 montre l'évolution des vitesses et directions du vent en surface pour ces trois stations (Paris-Montsouris, Saint-Maur et Villacoublay). 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 vus, à la fois temporellement et en valeur angulaire.





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 présenté en annexe B (piégeage de rayonnement solaire 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, correspondant à la conduction dans l'air de la chaleur transmise par les surfaces, plus fort en milieu urbain ;

Q_E : flux de chaleur latente, correspondant à l'évapotranspiration des végétaux, réduit en milieu urbain 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.

2.2.1 Rayonnement net

Le bilan radiatif détaillé est présenté en annexe B. Le rayonnement net est plus élevé sur les zones fortement ruralisées (forêts, grands espaces verts) que dans les zones plus urbanisées (Figure 25). La journée, le rayonnement net est positif et correspond donc à un rayonnement reçu par les surfaces, moins important sur les zones urbanisées. La nuit, le rayonnement net est négatif et correspond donc à un rayonnement émis par les surfaces. La nuit, l'influence de la surface urbaine est fortement visible. (propriétés radiatives des surfaces).

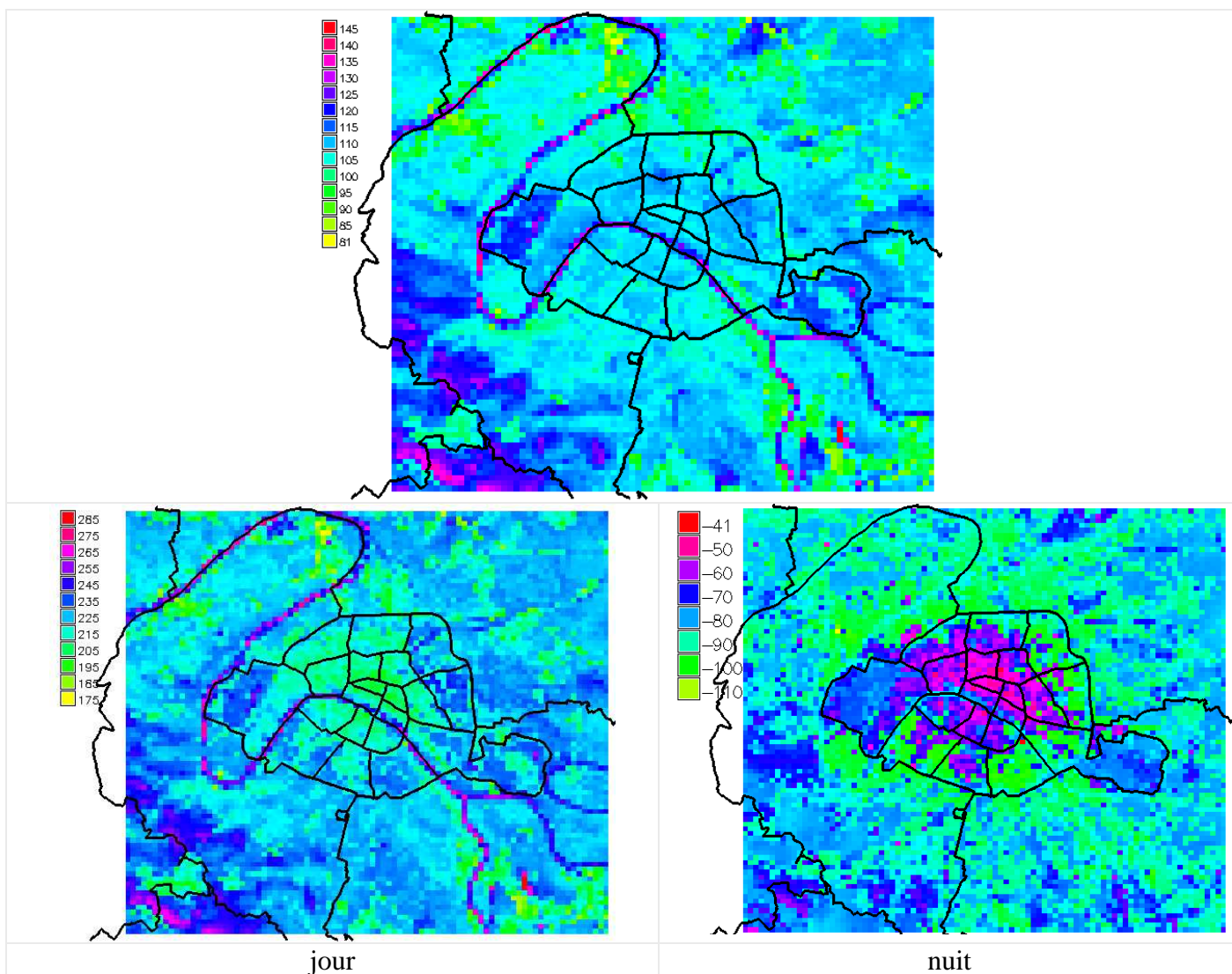


Figure 25 : Flux de rayonnement net en Wm^{-2} sur le domaine « Paris – PC » : moyenne quotidienne le 10 août 2003 (en haut), moyenne diurne le 10 août 2003 (en bas à gauche) et moyenne nocturne le 10 août 2003 (en bas à droite).

Les boîtes à moustaches du flux de rayonnement net (Figure 26) montrent une forte corrélation du rayonnement net avec la fraction d'eau ($R^2=0.2473$, très fortement significative selon le test de Pearson). Pendant la journée (Figure 27), on note une corrélation très fortement significative selon le test de Pearson avec la fraction de végétation ($R^2=0.1111$). La nuit (Figure 28), c'est le type de toit qui est fortement corrélé avec le rayonnement net ($R^2=0.1019$, très fortement significative selon le test de Pearson), avec des valeurs plus élevées (moins négatives, donc moins de rayonnement émis par les surfaces) au niveau des toitures en zinc en raison de la faible émissivité du zinc (0.1).

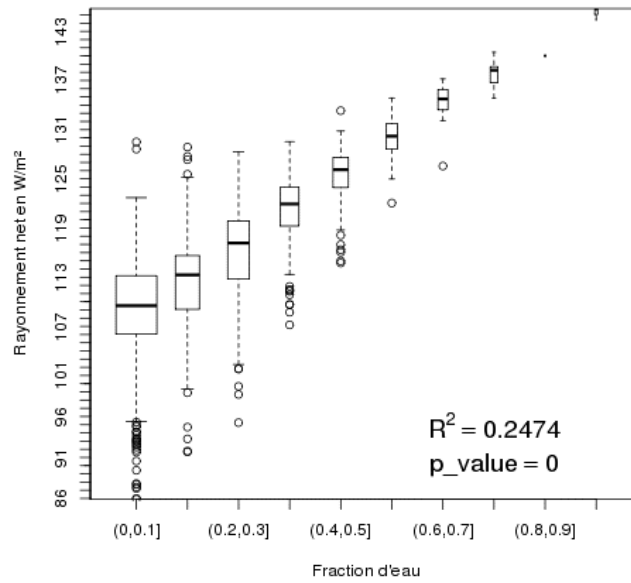


Figure 26 : Boîtes à moustaches du flux de rayonnement net en moyenne quotidienne pour le 10 août 2003 en fonction de la fraction d'eau dans la maille. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).

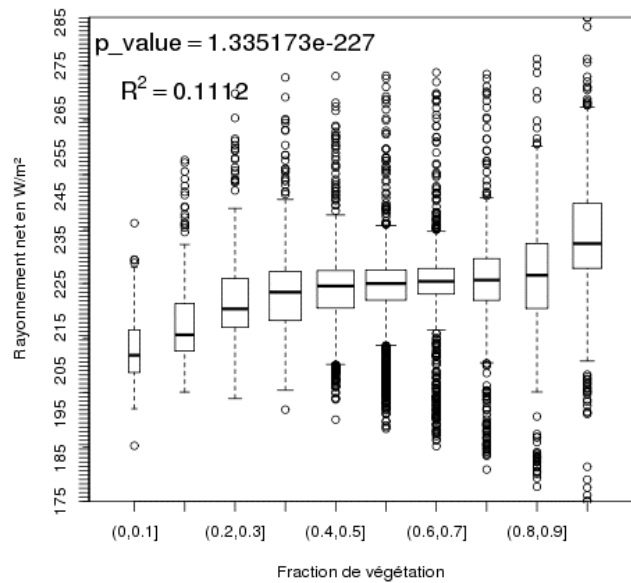


Figure 27 : Boîtes à moustaches du flux de rayonnement net en moyenne diurne pour le 10 août 2003 en fonction de la fraction de végétation dans la maille. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).

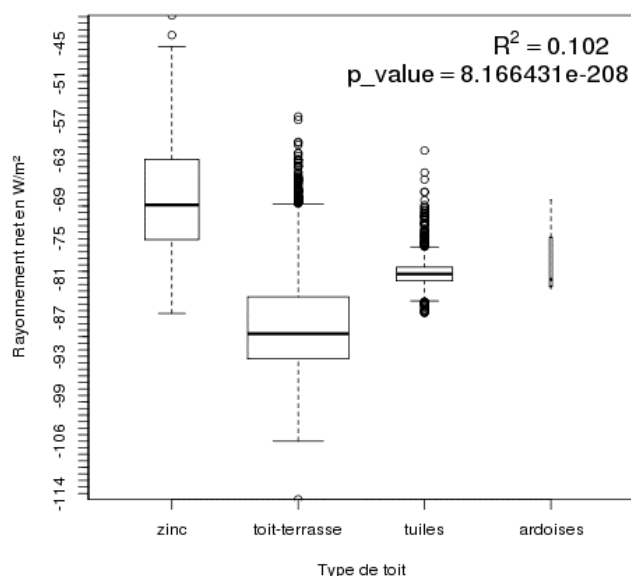
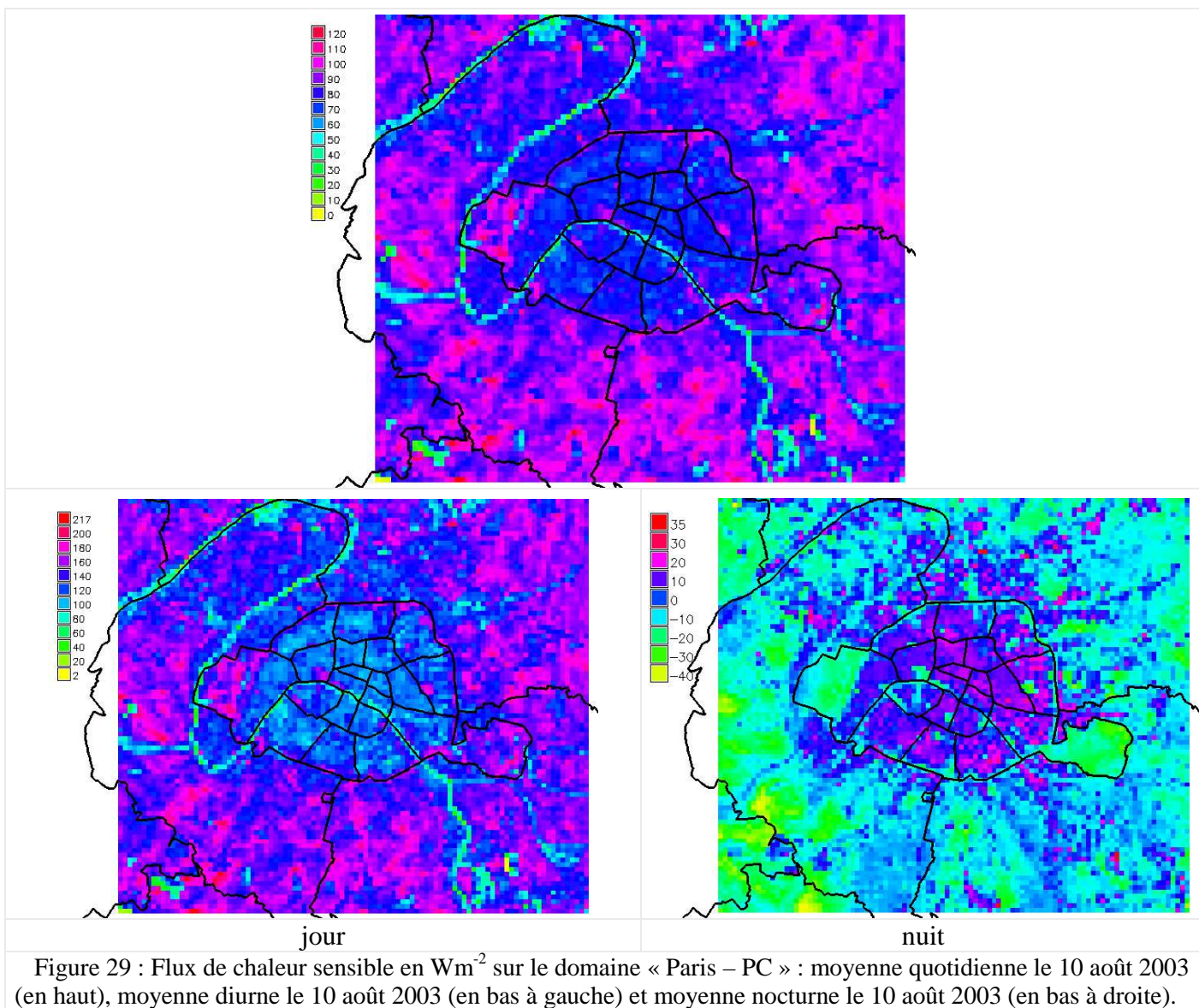


Figure 28 : Boîtes à moustaches du flux de rayonnement net en moyenne nocturne pour le 10 août 2003 en fonction du type de toit. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).

2.2.2 Flux de chaleur sensible

Le flux de chaleur sensible est un peu plus faible en zone urbaine qu'en zone rurale. Le détail sur l'agglomération parisienne donné par le domaine « Paris – PC » le 10 août 2003 (Figure 29) montre un flux de chaleur sensible en moyenne quotidienne et en moyenne diurne minimal au-dessus des zones aquatiques et plus faible sur Paris *intra muros* que sur la banlieue. Les zones péri-urbaines où le flux de chaleur sensible est important (180 à 220 Wm⁻² en moyenne diurne) sont les zones où la part végétale est importante (autour de 50%) et qui sont densément bâties sur leur partie « ville ». En effet, sur ces zones, le phénomène de conduction se produit à la fois au niveau des végétaux et au niveau des surfaces artificielles. En zone exclusivement urbaine ou exclusivement végétale, ce phénomène est moins important et le flux de chaleur sensible est donc moindre. Ceci est valable pour la journée. La nuit (Figure 30), en l'absence de rayonnement solaire, la végétation est au repos et n'absorbe pas de chaleur. Le phénomène de conduction se produit alors principalement au niveau des surfaces artificielles et le flux de chaleur sensible est maximum sur les zones où la fraction de ville est la plus élevée (corrélation très significative selon le test de Pearson, avec $R^2=0.5203$). Le flux peut même s'inverser et devenir négatif sur les zones les plus végétalisées, correspondant à une libération de chaleur par conduction.



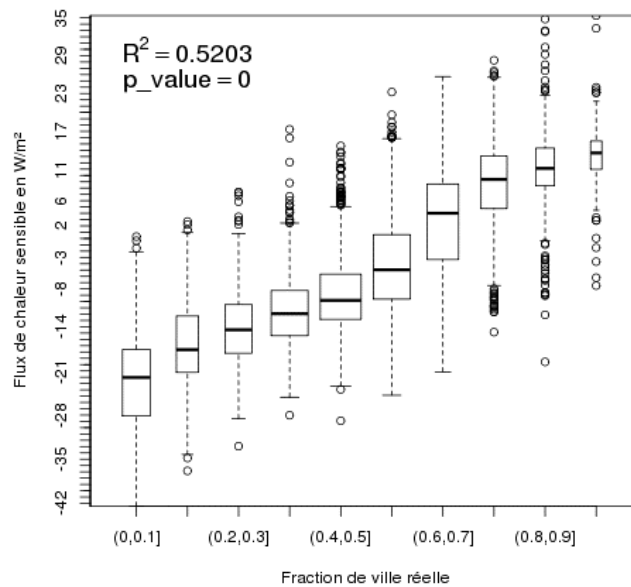


Figure 30 : Boîtes à moustaches du flux de chaleur sensible en moyenne nocturne pour le 10 août 2003 en fonction de la fraction de ville dans la maille. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).

2.2.3 Flux de chaleur latente

Le flux de chaleur latente le 10 août 2003 en moyenne quotidienne (Figure 31) est globalement faible sur la région parisienne. On observe (Figure 31 et Figure 32) que le flux de chaleur latente se maintient la nuit au-dessus des zones aquatiques (corrélation très fortement significative selon le test de Pearson avec $R^2=0.9458$) et qu'il est maximal le jour sur les zones fortement végétalisées (corrélation très fortement significative selon le test de Pearson avec $R^2=0.2431$).

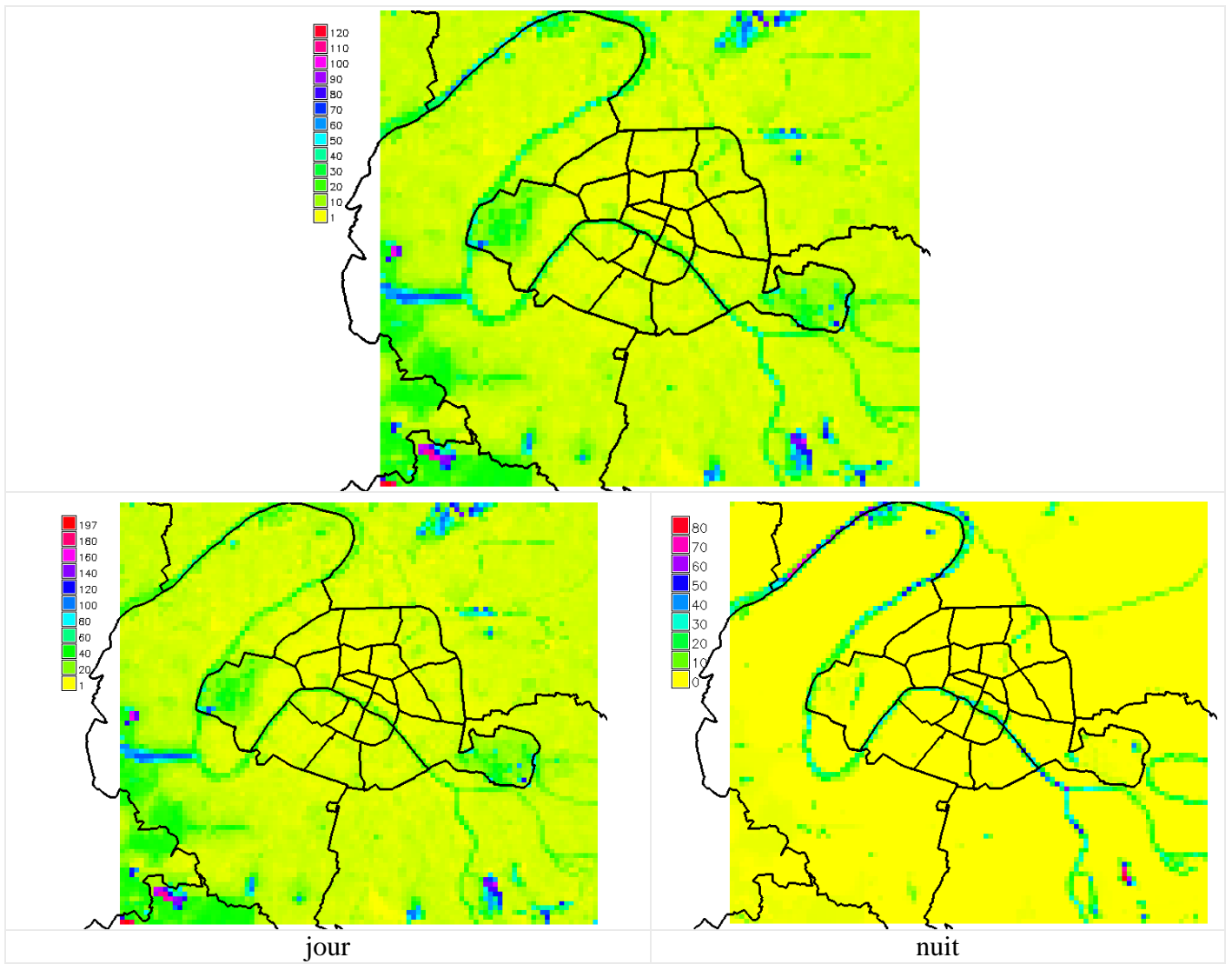


Figure 31 : Flux de chaleur latente en Wm^{-2} et sur le domaine « Paris – PC » : moyenne quotidienne le 10 août 2003 (en haut), moyenne diurne le 10 août 2003 (en bas à gauche) et moyenne nocturne le 10 août 2003 (en bas à droite).

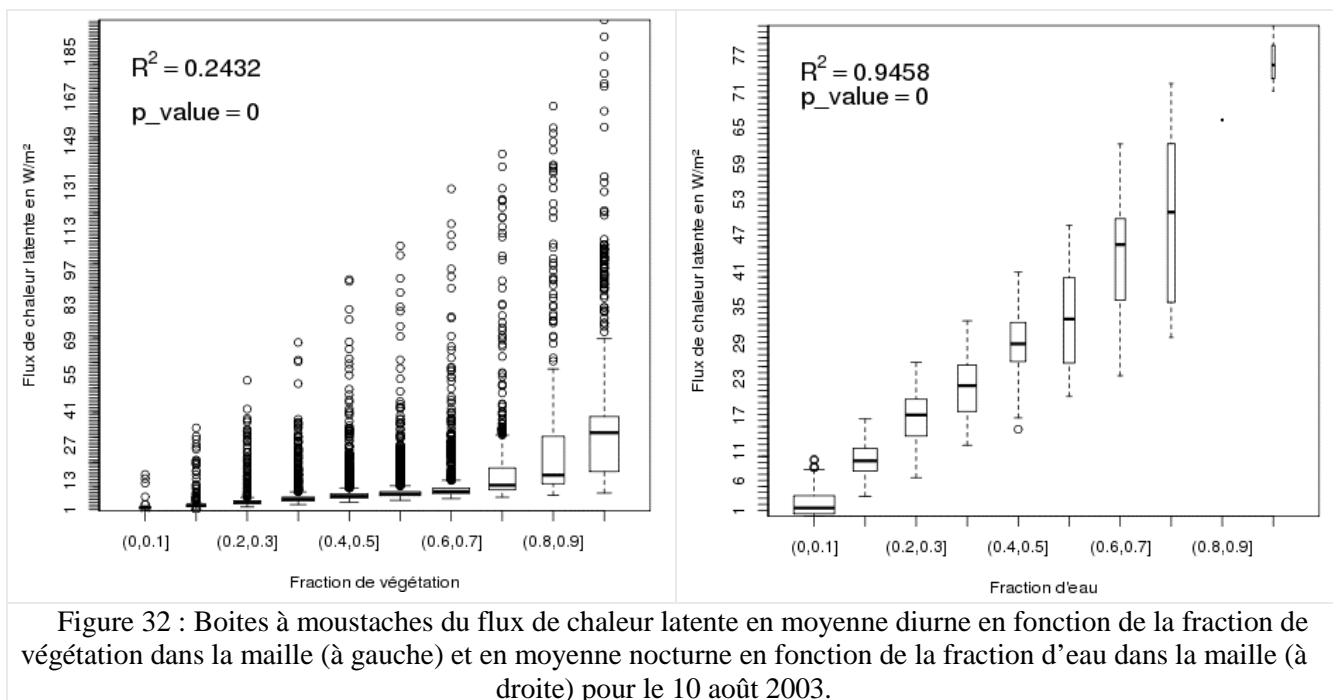
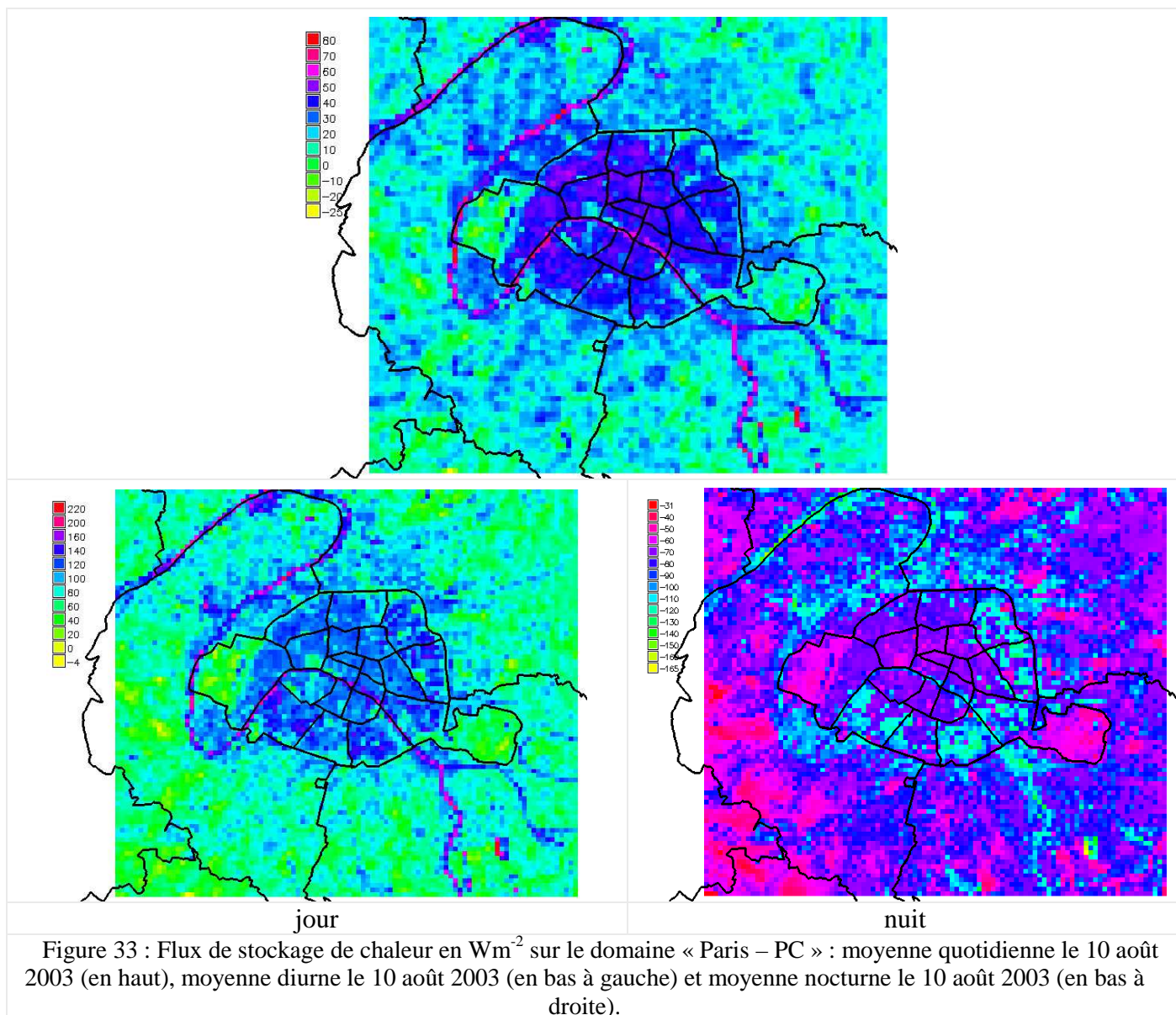


Figure 32 : Boîtes à moustaches du flux de chaleur latente en moyenne diurne en fonction de la fraction de végétation dans la maille (à gauche) et en moyenne nocturne en fonction de la fraction d'eau dans la maille (à droite) pour le 10 août 2003.

2.2.4 Flux de stockage

Le flux de stockage pour la journée du 10 août 2003 est présenté Figure 33. Il est maximum sur les zones aquatiques (40 à 80 Wm^{-2}), avec lesquelles il est fortement corrélé ($R^2=0.255$, fortement significatif selon le test de Pearson, Figure 34) et un peu plus important sur Paris *intra muros* que sur la banlieue. En moyenne diurne, on constate que le flux de stockage est légèrement plus important sur les arrondissements périphériques est et sud que sur le reste de Paris intramuros (jusqu'à 140-160 Wm^{-2} sur ces arrondissements contre jusqu'à 120 Wm^{-2} sur les autres arrondissements). En moyenne nocturne, ces mêmes arrondissements connaissent un flux de libération maximal, ainsi que certaines zones autour de Paris. L'ensemble de ces zones où le stockage est maximal correspond aux zones de bâtiments à toiture terrasse et densément bâties (Figure 34) : les toits terrasses sont caractérisés par un albédo faible de 0.2 (donc peu de rayonnement réfléchi) et une capacité calorifique élevée de $2.1 E6 J.m^{-3}.K^{-1}$ (qui permet donc un stockage d'autant plus important).



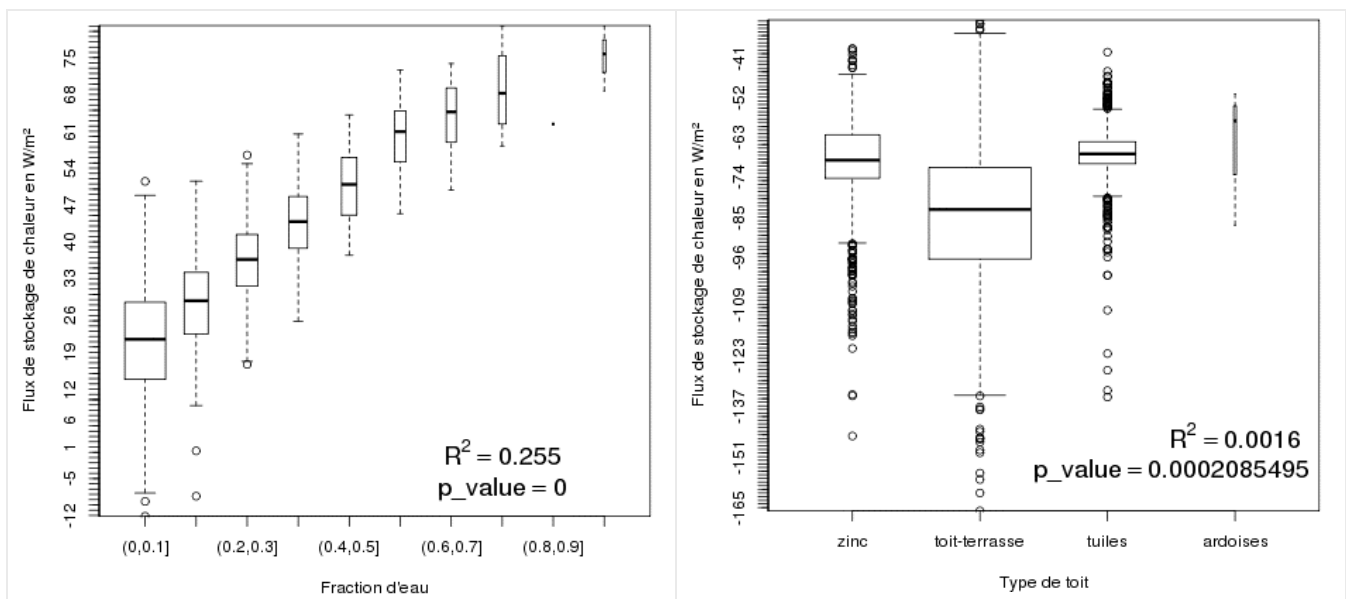


Figure 34 : Boîtes à moustaches du flux de stockage de chaleur en moyenne quotidienne en fonction de la fraction d'eau dans la maille (à gauche) et en moyenne nocturne en fonction du type de toit dans la maille (à droite) pour le 10 août 2003. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).

2.2.5 Bilan

Le modèle TEB reproduit bien les flux d'énergie de surface (Lemonsu et al. 2004), avec un flux de chaleur sensible positif le jour 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 pour la journée du 10 août 2003 (Figure 35) pour les 2 domaines de simulation puis la comparaison des bilans d'énergie simulés pour cette même journée pour les parties « bâtie » et « jardin » sur le domaine « Paris – PC », sachant que nous ne disposons pas d'observation de flux pour Paris et sa région à confronter à nos résultats. 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.

Sur le domaine « IDF », les flux de chaleur sensible et de chaleur latente sont majoritaires et du même ordre de grandeur. Ils sont positifs le jour, avec un maximum de 210 Wm^{-2} pour le flux de chaleur latente et de 185 Wm^{-2} pour le flux de chaleur sensible l'après-midi aux alentours de 12-13 UTC, et s'annulent la nuit. Le flux de stockage de chaleur présente un cycle diurne marqué, avec une valeur maximale de 135 Wm^{-2} en fin de matinée (09-10 UTC), où le stockage est maximum, et une valeur négative la nuit de -50 à -80 Wm^{-2} , où il y a libération de la chaleur emmagasinée par les bâtiments et par le sol (matériaux artificiels) durant la journée. Il est moins important que le flux de chaleur latente en raison de la bonne représentativité de la végétation par rapport aux zones urbaines à l'échelle de ce domaine.

Sur le domaine « Paris – PC », le rapport des flux est différent. Le flux de chaleur sensible est prépondérant le jour, avec un maximum de 260 Wm^{-2} l'après-midi (13 UTC), et s'annule la nuit. Le flux de chaleur latente est quasi nul le jour (inférieur à 25 Wm^{-2}) en raison de la raréfaction de la végétation sur ce domaine, ce qui limite l'évapotranspiration, et des faibles stocks d'eau disponibles sur les surfaces urbaines (ruissellement important et évaporation faible) et nul la nuit. Le flux de stockage de chaleur présente là aussi un cycle diurne marqué, avec une valeur maximale de 210 Wm^{-2} en fin de matinée (10-11 UTC) et une valeur négative la nuit de -60 à -90 Wm^{-2} . En raison de la part

plus importante de la ville sur ce domaine, le flux de stockage est plus élevé en valeur absolue (et indique donc un plus grand stockage et donc une libération de chaleur plus importante) que sur le domaine « IDF ».

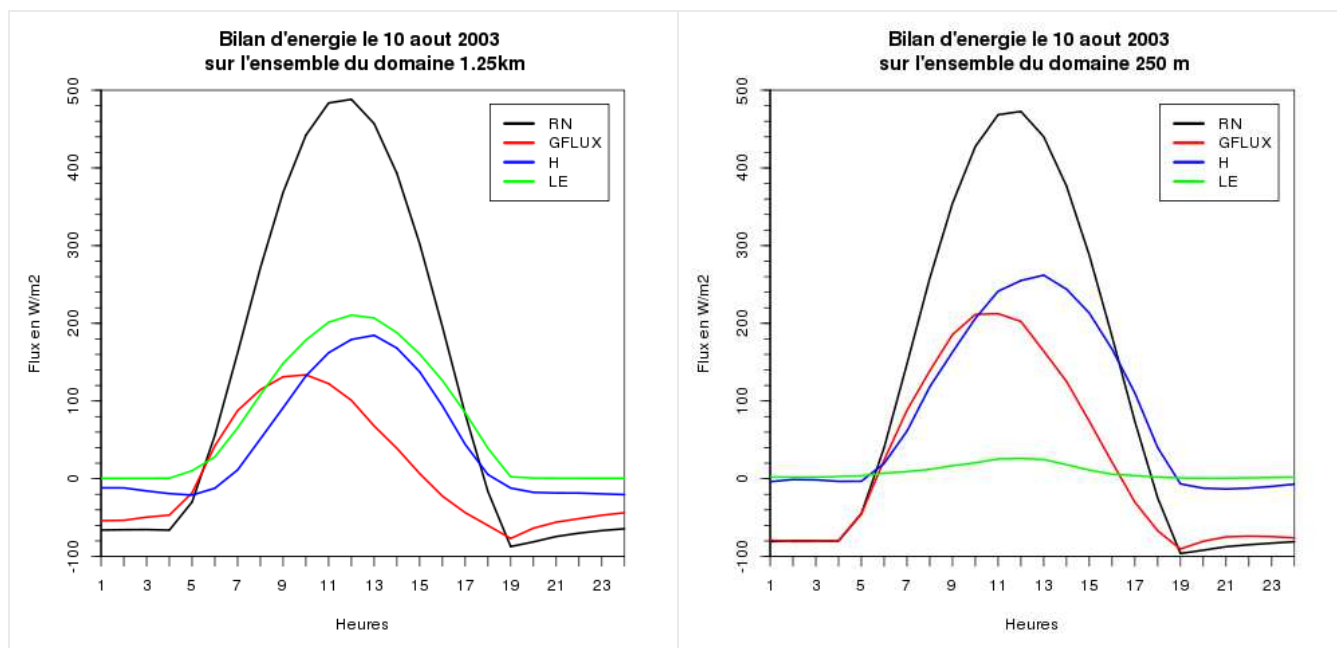


Figure 35 : Bilan d'énergie le 10 août 2003 simulé par le modèle et moyenné sur le domaine « IDF » (à gauche) et sur le domaine « Paris – PC » (à droite) : rayonnement net RN, flux de chaleur sensible H, flux de chaleur latente LE et flux de stockage GFLUX.

La Figure 36 présente la différence entre les bilans d'énergie en surface pour les parties « bâtie » (traitées comme de la ville par TEB) et « jardin » (traitées par ISBA au sein de TEB) sur le domaine « Paris – PC » : 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.

En milieu totalement urbanisé (partie bâtie) comme en milieu végétal (partie jardin), l'élément majoritaire du bilan d'énergie est le flux de chaleur sensible. Celui-ci est plus élevé sur la partie bâtie, avec une différence quasi tout le temps positive et maximale de 75 Wm^{-2} en fin de matinée. Ceci s'explique par le fait que les surfaces artificielles atteignent des températures de surface plus élevées que les surfaces végétales car elles « chauffent » plus vite lors du retour du soleil le matin. Cependant, le phénomène de conduction se produit également en journée au niveau de la végétation. La différence diminue ainsi en cours de matinée et atteint un minimum relatif en milieu de journée puis augmente en cours d'après-midi et atteint un second pic en début de soirée, 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 milieu de journée) 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 $1.5 \text{ à } 2 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 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 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.

La somme de ces trois flux correspond au rayonnement net (Equation 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 infra-rouge 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 du rayonnement net sur la partie construite montre que l'effet majoritaire est l'effet de piégeage du rayonnement (Lemonsu and Masson 2002).

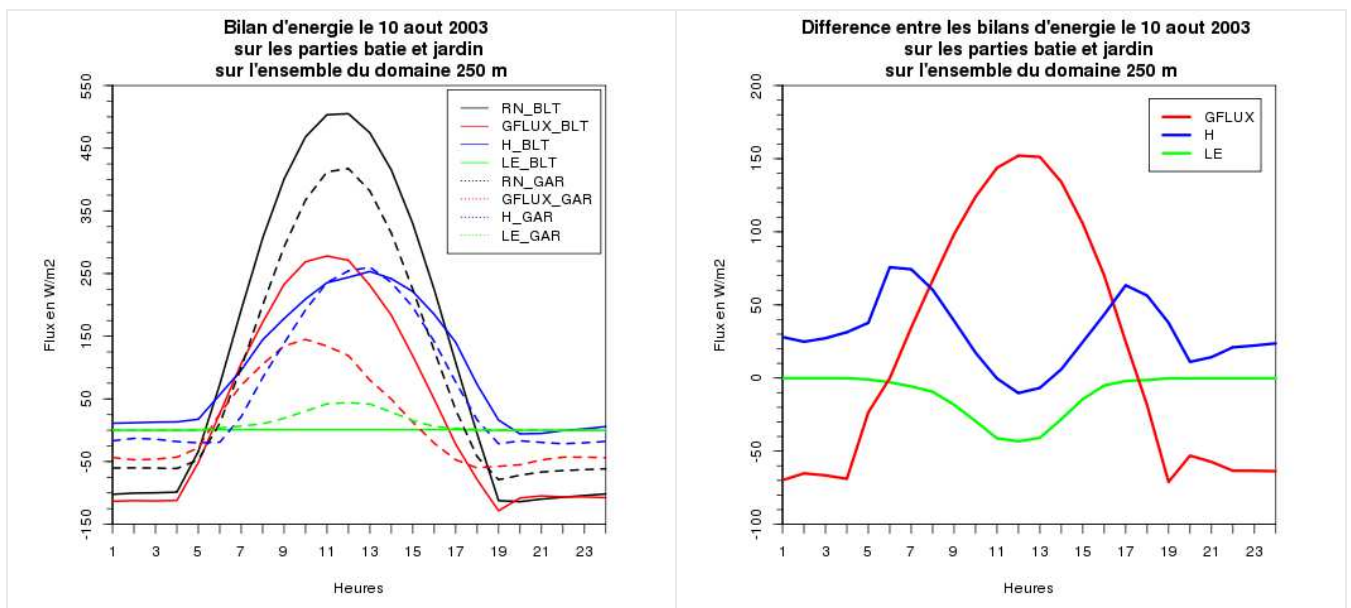
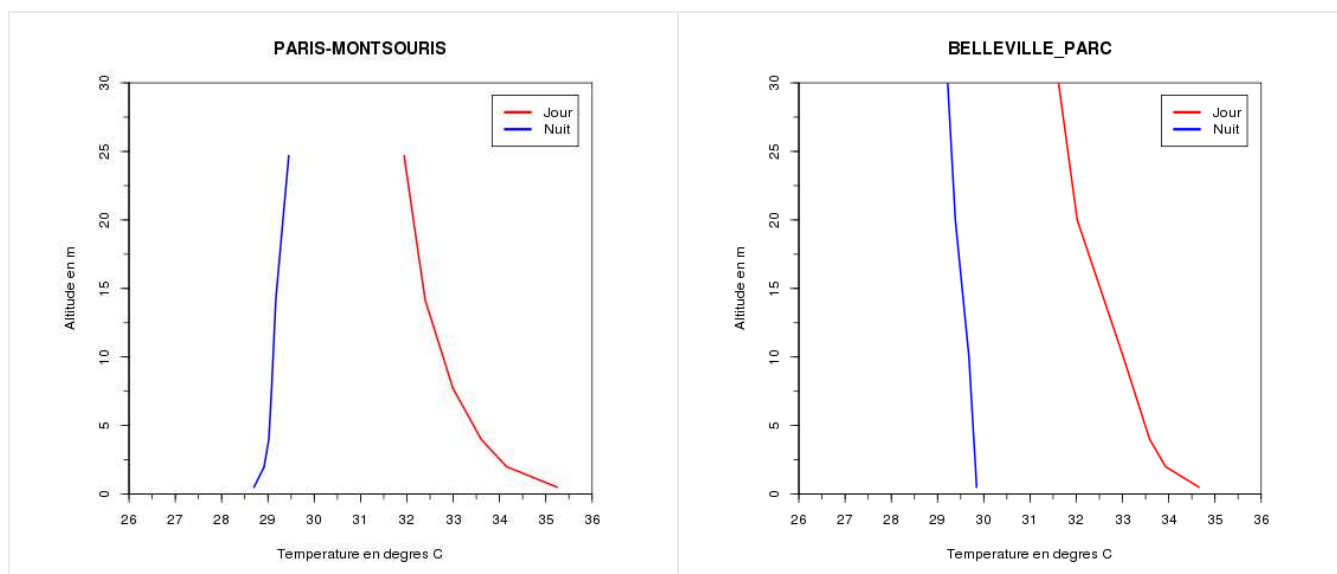


Figure 36 : Bilan d'énergie le 10 août 2003 (à gauche) simulé par le modèle et moyenné sur la partie urbaine (traits pleins) et sur la partie rurale (pointillés) : rayonnement net RN, flux de chaleur sensible H, flux de chaleur latente LE et flux de stockage GFLUX et différence « ville – végétation » entre les flux de chaleur sensible H, flux de chaleur latente LE et flux de stockage GFLUX (à droite) moyennés sur la partie urbaine et sur la partie rurale le 10 août 2003 sur le domaine « Paris – PC ».

2.3 Analyse verticale

2.3.1 Température

La version CANOPY du modèle TEB permet d'obtenir des profils verticaux de paramètres au sein du canyon urbain. La Figure 37 montre le profil vertical de la température de l'air à l'intérieur du canyon pour les 6 stations de mesure dont nous disposons sur le domaine « Paris – PC », 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 l'ensemble des stations. La nuit par contre, on observe une différence entre elles. Paris-Montsouris, Courbevoie, Saint-Maur et Villacoublay sont caractérisées 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 et à la présence de végétation en surface, qui limite la restitution de l'énergie emmagasinée, contrairement à l'altitude, où la végétation est absente la plupart du temps. La couche limite est alors très stable. Au contraire, Belleville_Parc et Saint-Denis sont caractérisées 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 stations s'explique par leur situation différente en terme d'urbanisation dans le modèle (milieu péri-urbain pour Paris-Montsouris, Courbevoie, Saint-Maur et Villacoublay vs. milieu urbain pour Belleville_Parc et Saint-Denis).



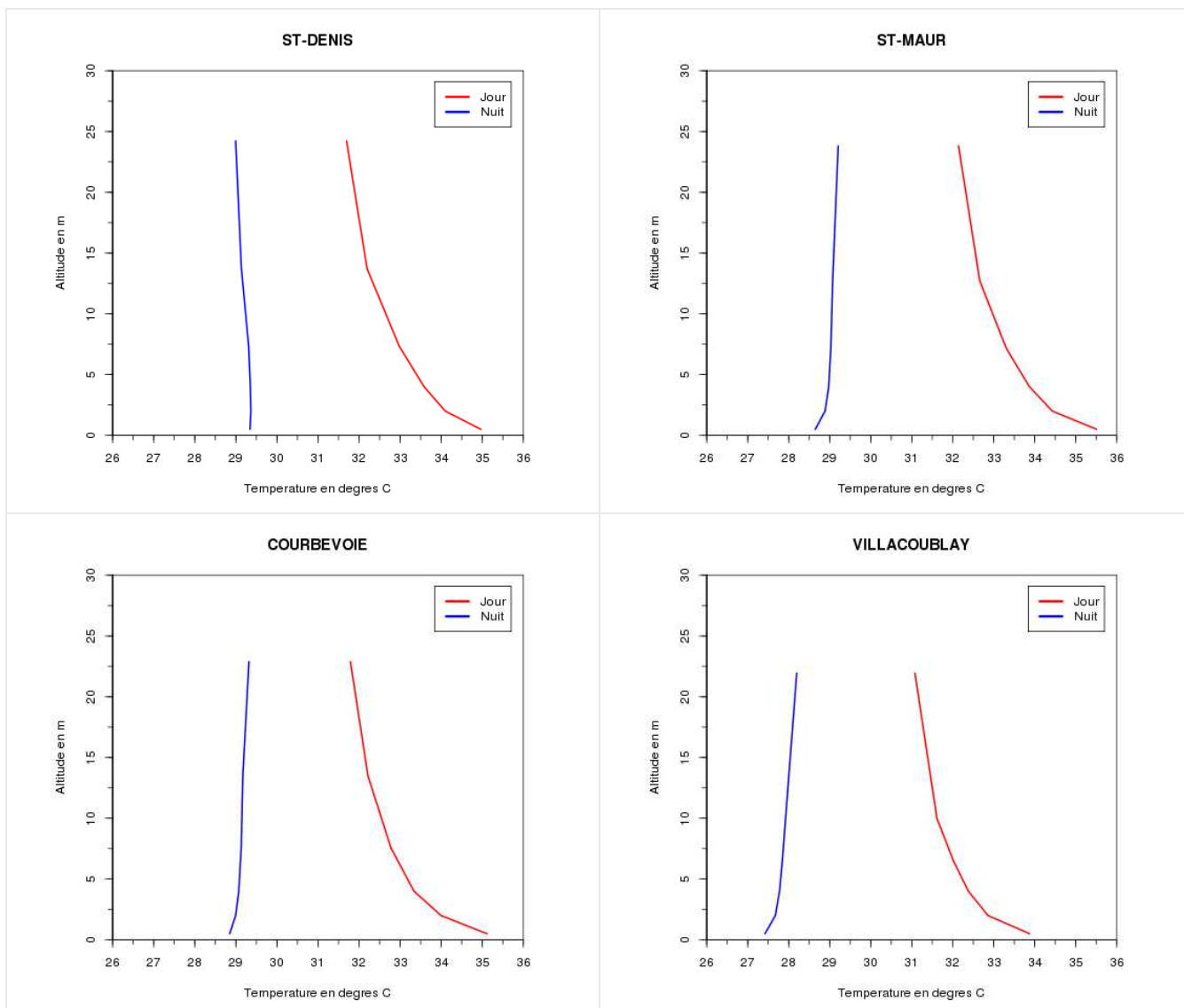
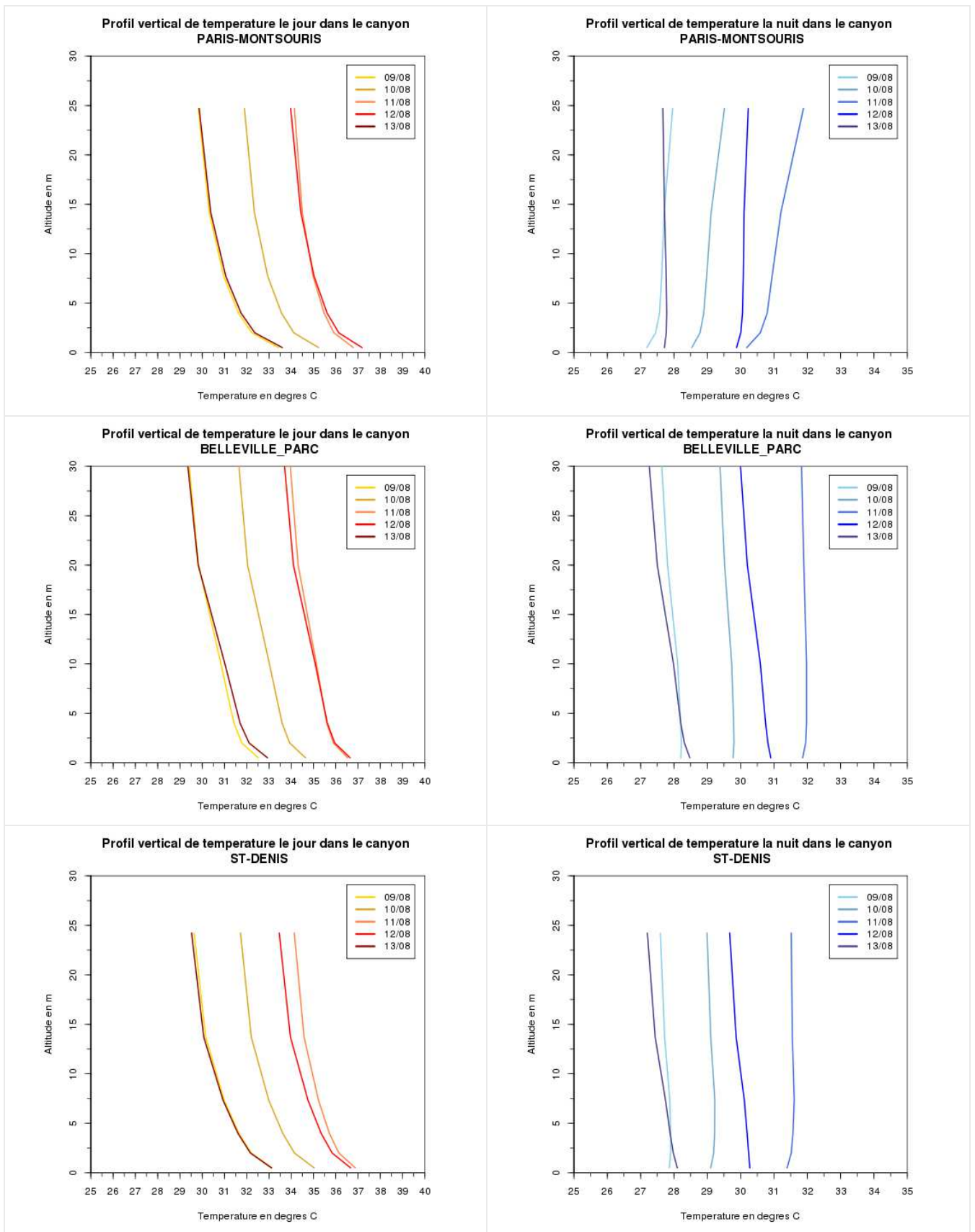


Figure 37 : Profils verticaux de température de l'air simulée par le modèle dans le canyon urbain la nuit (bleu) et le jour (rouge) sur les 6 stations de mesures horaires disponibles sur le domaine « Paris – PC ».

Si on s'intéresse à l'évolution jour par jour de ces profils verticaux de température (Figure 38), on voit que la température augmente graduellement le jour au sein du canyon entre le 09 et le 11 août puis stagne le 12 août avant de diminuer fortement le 13 août. Le gradient vertical conserve cependant le même comportement sur ces 5 jours. La nuit, la température augmente également graduellement au sein du canyon entre le 09 et le 11 août puis diminue les 12 et 13 août. Le 11 août, la température nocturne est maximale et augmente fortement sur la verticale, conduisant à des valeurs atteignant 31 à 32 °C en altitude (Paris-Montsouris, Belleville-Parc, Saint-Denis, Courbevoie). Le 13 août, l'inversion thermique a tendance à disparaître et les valeurs de températures sont quasiment constantes sur la verticale voire diminuent pour chaque station.



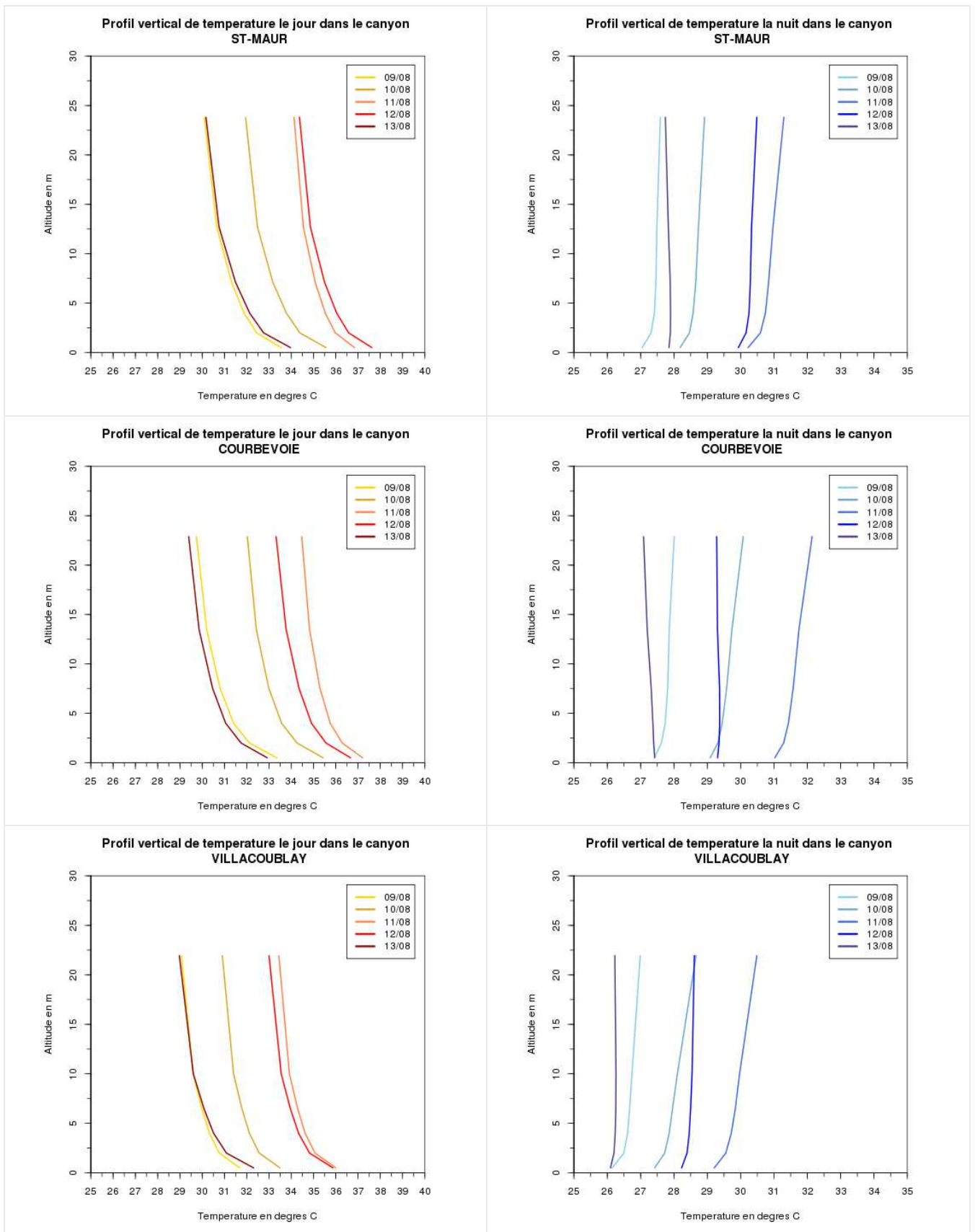


Figure 38 : Profils verticaux de température de l'air simulée par le modèle dans le canyon urbain pour les 5 jours de simulation sur les 6 stations de mesures horaires disponibles sur le domaine « Paris – PC ».

2.3.2 Humidité spécifique et vent

L'humidité spécifique est plus élevée la nuit que le jour et est constante sur la verticale pour les différentes stations (Figure 39 haut).

Le vent est croissant sur la verticale le jour et la nuit. Sur Paris-Montsouris, il est plus élevé le jour que la nuit (Figure 39 bas). Il est quasi égal le jour et la nuit sur Belleville_Parc.

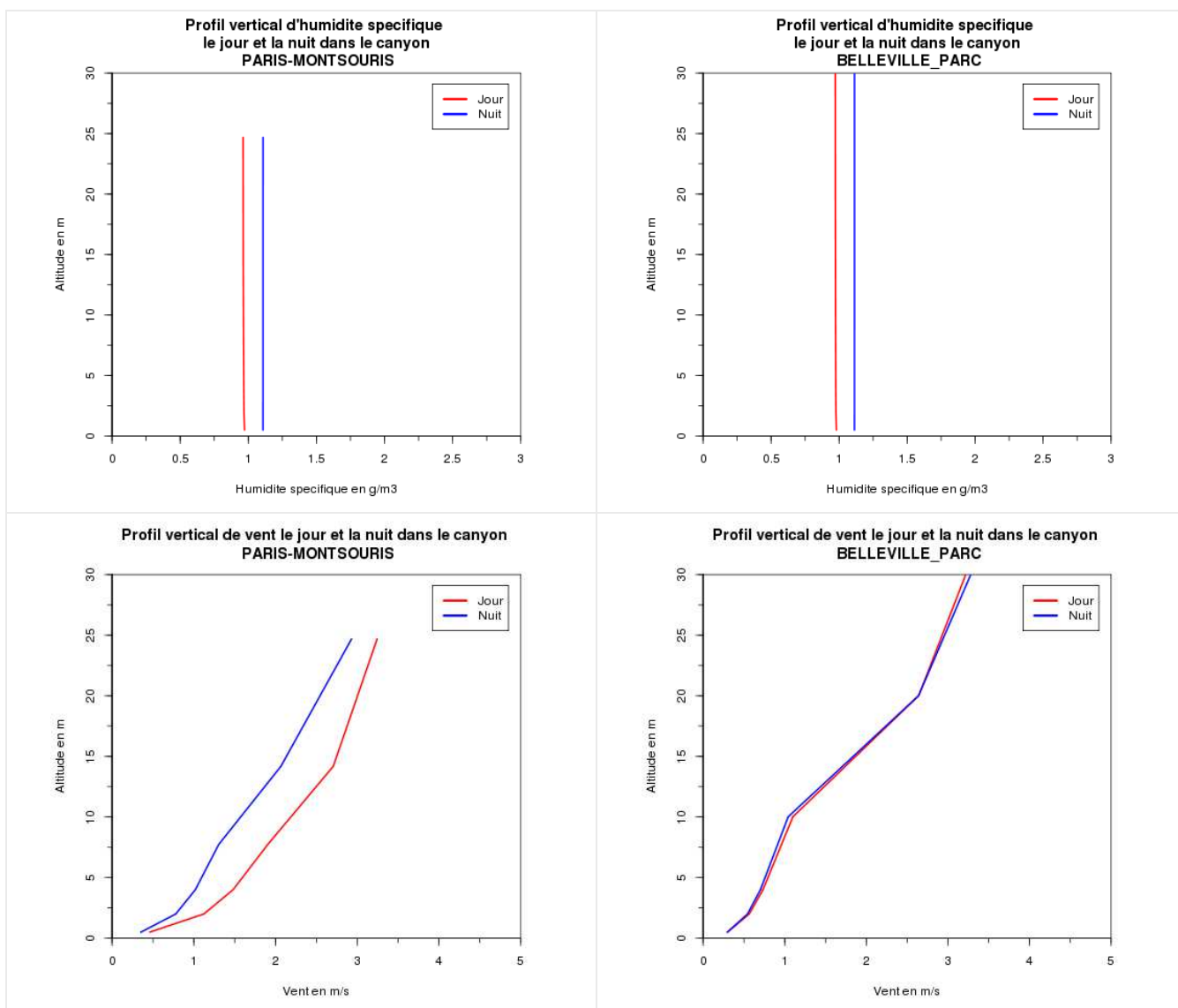


Figure 39 : Profils verticaux d'humidité spécifique de l'air (en haut) et de vent (en bas) simulés par le modèle dans le canyon urbain la nuit (bleu) et le jour (rouge) sur Paris-Montsouris (à gauche) et Belleville_Parc (à droite).

2.3.3 Structure de la couche limite urbaine

La structure de la couche limite urbaine (CLU) dépend du bilan d'énergie en surface. Durant la journée (Figure 40 gauche), une circulation verticale se met en place, la CLU devient très instable et d'extension verticale maximale (de 3000 à 3500 m). Les ascendances et subsidences au sein de cette couche limite permettent un brassage vertical important. La température potentielle (température qu'acquerrait une parcelle d'air après déperdition préalable de sa vapeur d'eau, chaque fois qu'elle

aurait été ramenée verticalement au niveau de pression de référence 1 000 hPa de manière adiabatique, *ie.* sans avoir échangé de chaleur avec le milieu extérieur) y est homogène et élevée (36 à 37 °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 40 droite), 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 02 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 29 °C et homogène sur 300 m de hauteur le 11 août 2003 à 02 UTC).

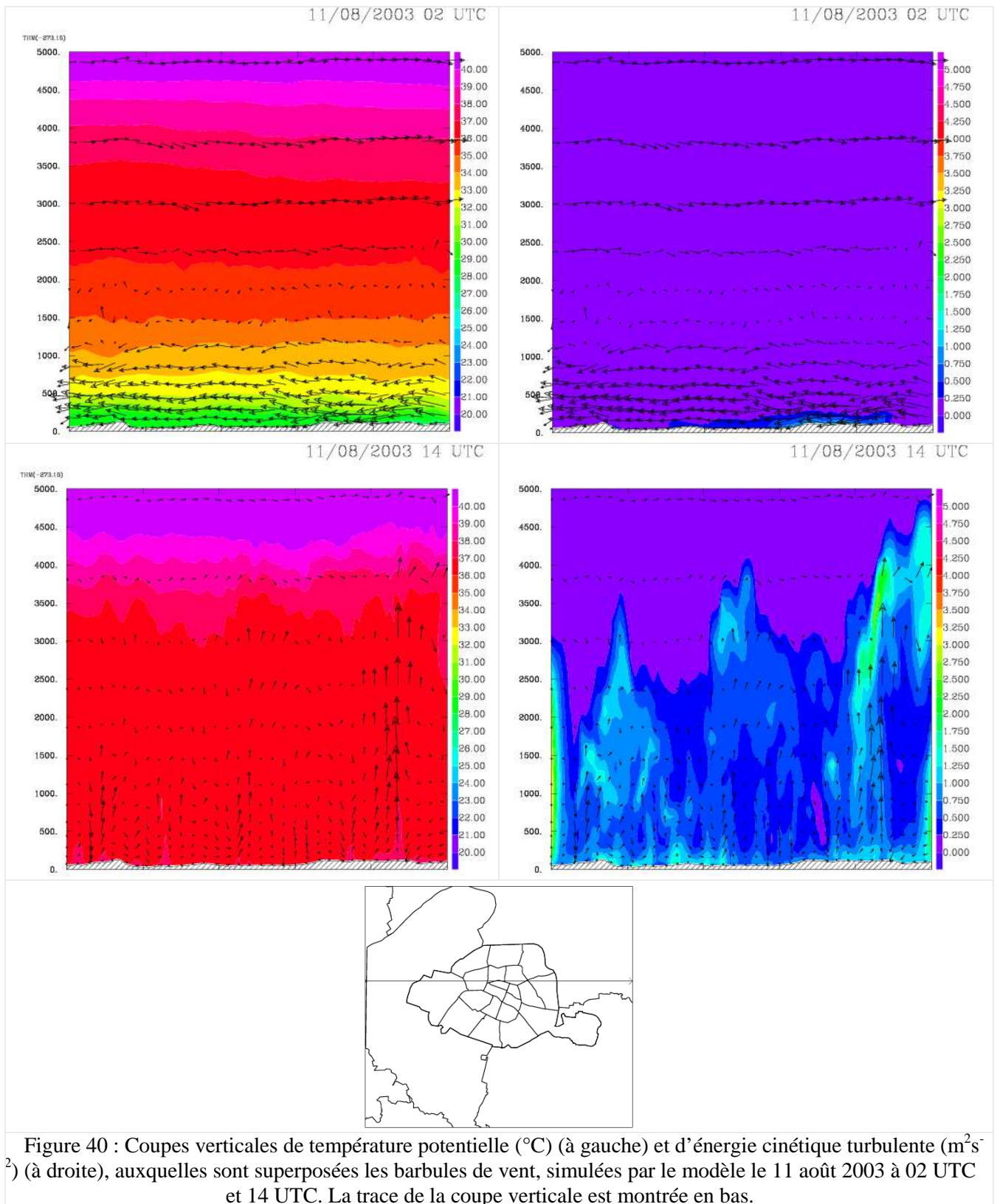


Figure 40 : Coupes verticales de température potentielle ($^{\circ}\text{C}$) (à gauche) et d'énergie cinétique turbulente (m^2s^{-2}) (à droite), auxquelles sont superposées les barbules de vent, simulées par le modèle le 11 août 2003 à 02 UTC et 14 UTC. La trace de la coupe verticale est montrée en bas.

2.4 Analyse de l'humidité des sols

Au cours de cette période, le sol est très sec, avec des valeurs de contenu en eau du réservoir superficiel du sol au sein de Paris inférieures à 0.1 mm (Figure 41). Cet assèchement des sols conduit à un déficit hydrique pour la végétation qui souffre par conséquent de déshydratation.

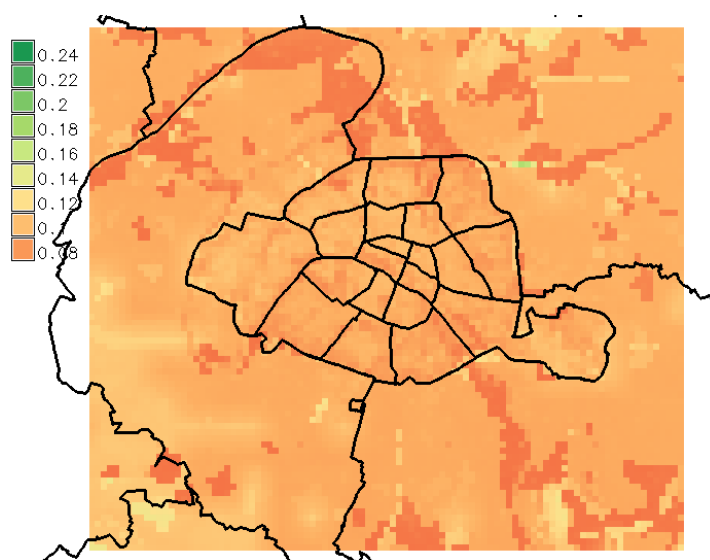


Figure 41 : Contenu en eau du réservoir superficiel du sol moyenné sur toute la période, simulé par le modèle (en mm).

L'évolution jour par jour de ce contenu en eau du réservoir superficiel du sol (Figure 42) montre que l'on part d'un sol déjà très sec le 09/08 et que celui-ci s'assèche partout et de manière notable dès le 10/08, avec un réservoir superficiel presque vide sur une grande partie du domaine. Cette situation se prolonge le 11/08 avant un très léger regain les 12 et 13/08. La végétation, déjà fortement desséchée dès le début de simulation, ne peut donc pas se régénérer et jouer pleinement son rôle.

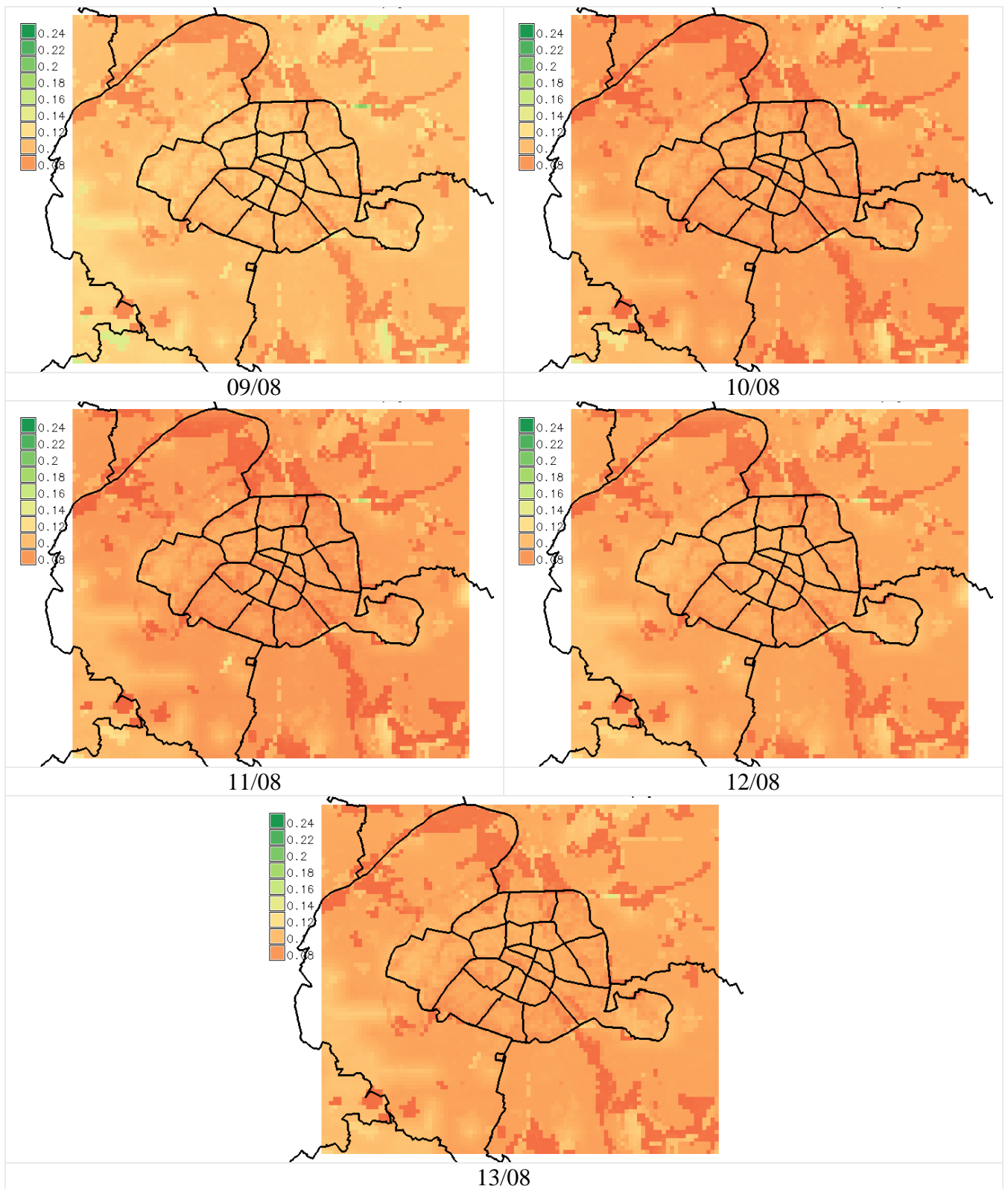


Figure 42 : Contenu en eau moyen du réservoir superficiel du sol en moyenne quotidienne simulé par le modèle (en mm).

Le contenu en eau du réservoir superficiel du sol est maximum en début de simulation le 08/08/2003 à 13 UTC (Figure 43) avec des valeurs de 0.12 à 0.14 mm, et minimum en cours de simulation le 10/08/2003 à 15 UTC avec des valeurs de 0.5 à 0.8 mm dans Paris *intra muros*. Après cette échéance, le réservoir se remplit partiellement suite aux quelques précipitations simulées le 11/08/2003 puis rediminue ensuite jusqu'à la fin de la simulation.

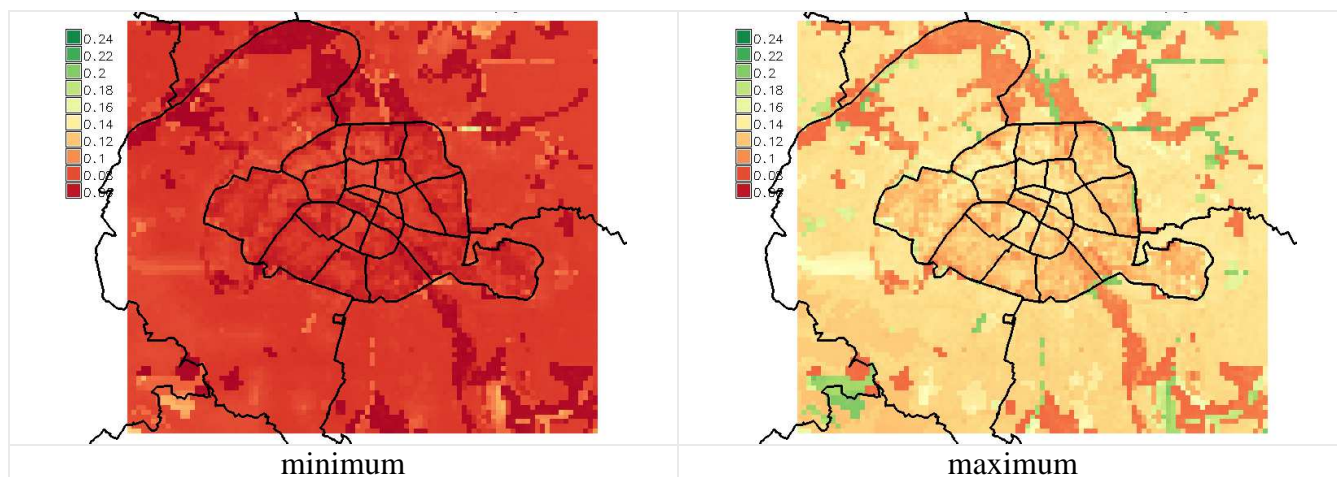


Figure 43 : Contenus en eau minimum (le 10/08/2003 à 15 UTC) et maximum (le 08/08/2003 à 13 UTC en tout début de période) simulés par le modèle (en mm).

2.5 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 îlot de chaleur urbain (ICU). L'ICU 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 (Oke, 1987). Il est connu que la région parisienne peut être le siège de forts ICUs de l'ordre de 8 à 10°C en période nocturne (Lemonsu and Masson 2002). De telles différences de températures ont notamment été observées lors de la canicule de l'été 2003 (Figure 44).

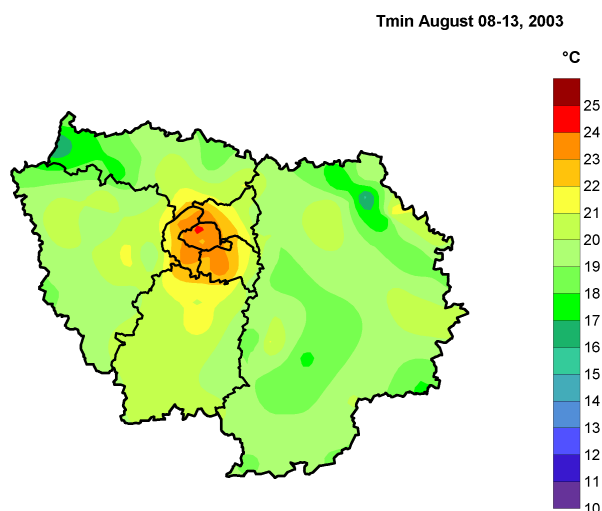
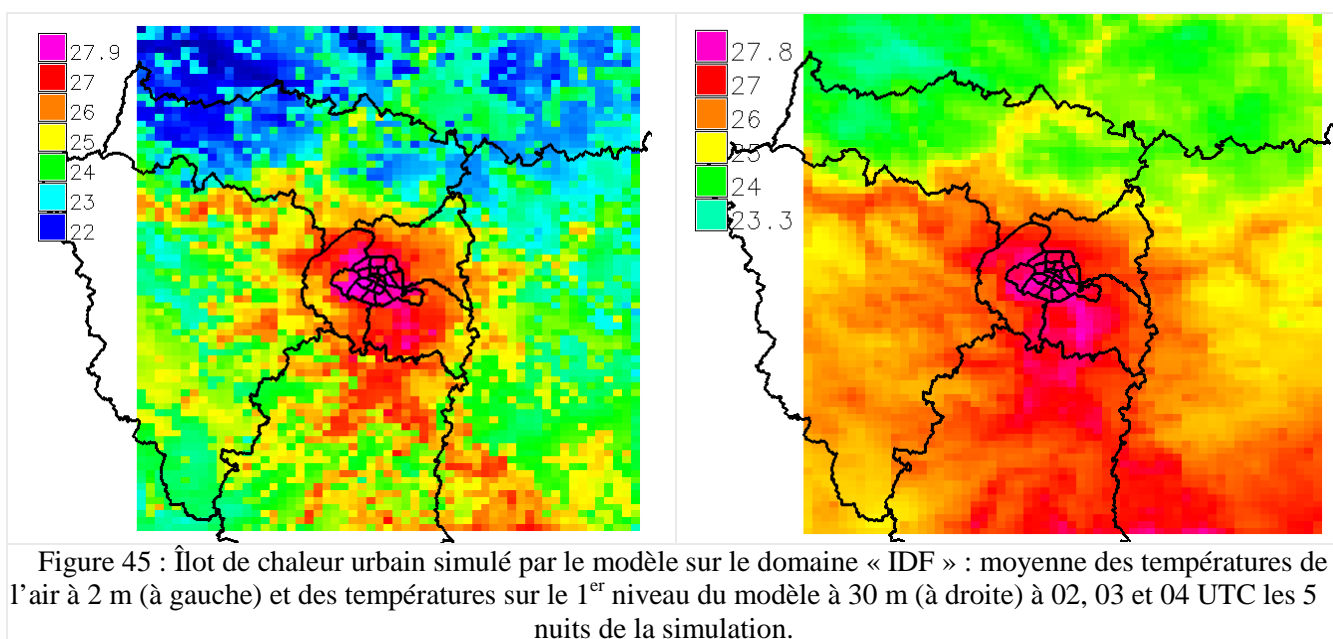


Figure 44 : Températures minimales moyennes observées sur l'IDF du 08 au 13 août 2003.

Pour analyser l'ICU moyen, on retient et on moyenne d'une part les températures à 2 m des échéances nocturnes horaires de 02, 03 et 04 UTC des 5 nuits de simulation et d'autre part les températures de l'air sur le premier niveau vertical du modèle situé à 30 m pour les deux domaines.

Un ICU est bien visible sur l'agglomération parisienne à l'échelle du domaine « IDF » (Figure 45). Les températures à 2 m dépassent les 27 °C sur Paris *intra muros*, diminuent progressivement sur la Petite Couronne et ne sont que de 22 à 23 °C à l'ouest du Val d'Oise. Les températures de l'air à 30 m dépassent également les 27 °C au-dessus de Paris *intra muros*, mais le dôme chaud au-dessus de l'agglomération parisienne est un peu plus étendu et les températures diminuent moins rapidement sur la Petite et la Grande Couronne et se maintiennent par exemple entre 23.5 et 24 °C sur l'ouest du Val d'Oise.



Pour analyser plus précisément l'ICU, on s'intéresse au domaine « Paris – PC » (Figure 46). Les températures à 2 m les plus élevées se situent sur le centre de Paris au niveau des 2^{ème}, 3^{ème}, 8^{ème}, 9^{ème}, 10^{ème}, 11^{ème} arrondissements (28 à 29 °C) et dans un moindre mesure le 15^{ème} arrondissement, tandis que les températures à 2 m les plus basses se situent sur les zones plus aérées (nombreux parcs et forêts) au sud-ouest de Paris, des bois de Vincennes et de Boulogne ou au nord et au nord-est de Paris (24 à 25 °C). La température à 30 m est maximale (> 27.5 °C) sur le centre de Paris (arrondissements 1 à 4, 7, nord des 5^{ème} et 6^{ème} et sud des 8^{ème}, 9^{ème} et 10^{ème}) ainsi que sur l'ouest du 12^{ème}, le 13^{ème} et le 15^{ème} arrondissements. Un léger refroidissement est visible au-dessus du Bois de Vincennes avec une température à 30 m qui avoisine les 26.5 °C mais il est moins net au-dessus du Bois de Boulogne. Les zones plus aérées au sud-ouest et au nord-est de Paris ont des températures à 30 m plus faibles de l'ordre de 26 °C. Une zone également très chaude en terme de températures à 30 m (autour de 28 °C) se situe au sud-est de Paris sur le nord du Val-de-Marne. L'ICU simulé présente ainsi une amplitude maximale de 4 à 6 °C en terme de températures à 2 m et de seulement 2 °C au plus en terme de températures à 30 m. On identifie également des micro ICU au sein même de Paris *intra muros* d'amplitude 2 à 4 °C entre les arrondissements du centre cités ci-dessus (2^{ème}, 3^{ème}, 8^{ème}, 9^{ème}, 10^{ème}, 11^{ème}) ainsi que le 15^{ème} et les autres arrondissements périphériques (12^{ème}, 13^{ème}, 14^{ème}, 16^{ème}, 17^{ème}, 18^{ème}, 19^{ème} et 20^{ème}).

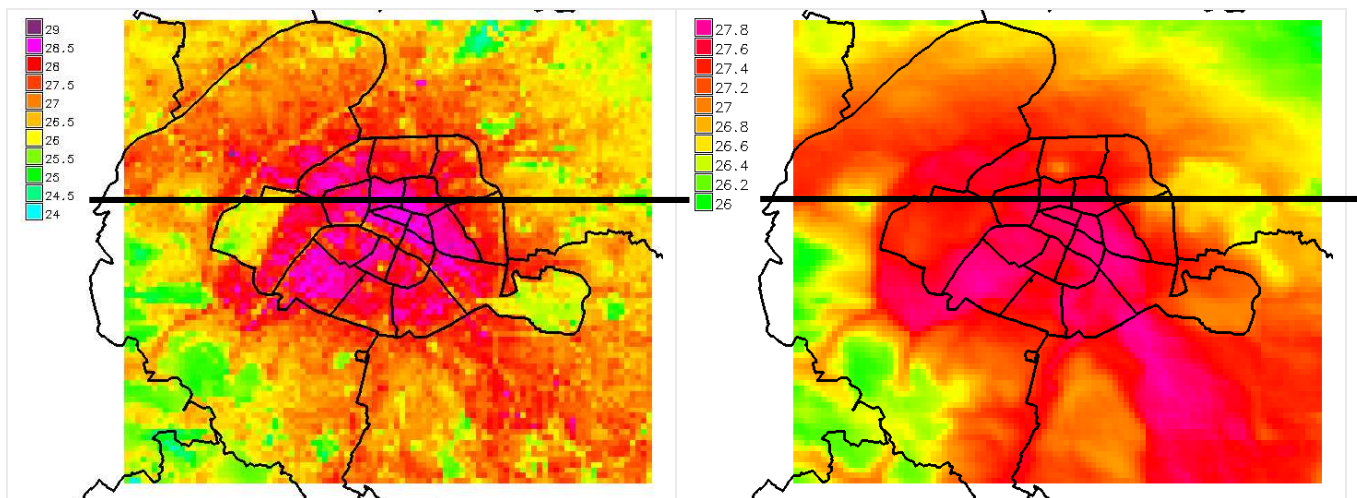


Figure 46 : Îlot de chaleur urbain simulé par le modèle sur le domaine « Paris – PC » : moyenne des températures de l'air à 2 m (à gauche) et des températures sur le 1^{er} niveau du modèle à 30 m (à droite) à 02, 03 et 04 UTC les 5 nuits de la simulation.

La coupe transversale (Figure 47) indiquée sur la Figure 46 permet d'affiner l'amplitude de l'ICU à 2 m dans la direction indiquée (ouest-est) et de visualiser la structure de l'ICU présenté ci-dessus. On retrouve une structure classique d'ICU à 2 m :

- températures plus élevées sur Paris, maximales au niveau du cœur densément construit (8^{ème}, mais surtout 9^{ème} et 10^{ème} arrondissements) et plus basses sur la périphérie (16^{ème} et 20^{ème} arrondissements) ;
- températures qui diminuent sur la banlieue, plus aérée, d'autant plus faibles que l'on s'éloigne du centre urbain ;
- chute de températures au niveau du Bois de Boulogne, mais aussi au niveau d'autres parcs de moindre ampleur ;
- baisse importante de température au niveau de la Seine.

L'amplitude de l'ICU visible sur cette coupe est de 3.5 °C. A noter qu'il est limité par l'absence de grandes zones rurales éloignées de Paris le long de la coupe.

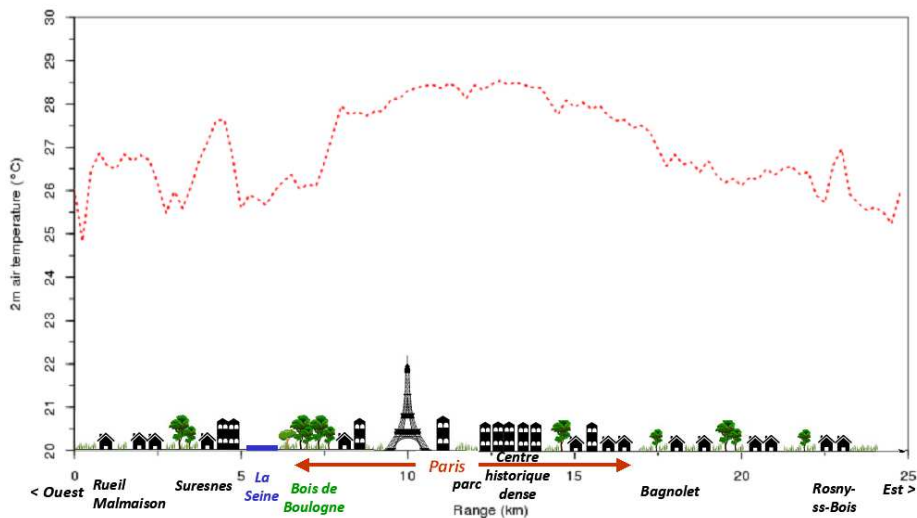


Figure 47 : Coupe transversale (traversant les 16^{ème}, 8^{ème}, 9^{ème}, 10^{ème} et 20^{ème} arrondissements d’ouest en est) de la moyenne des températures de l’air à 2 m à 02, 03 et 04 UTC les 5 nuits de la simulation pour la situation de référence.

A 30 m, cette structure d’ICU est encore visible (Figure 48), notamment avec les zones moins urbanisées à l’est de Paris mais elle est bien plus lissée. On peut distinguer trois grandes zones d’ouest en est sur cette coupe, qui structurent l’ICU à 30 m :

- Le minimum de température (26.2°C) sur la coupe dans la direction ouest qui correspond au Mont Valérien qui culmine à plus de 160 m de hauteur et est en partie couvert de végétation ;
- La zone la plus chaude en continuant vers l’est et notamment au-dessus du centre densément urbanisé de Paris, où la température à 30 m atteint les 27.7 °C ;
- Une diminution de la température à 30 m autour de 26.4 °C à l’est de Paris.

L’amplitude de l’ICU à 30 m dans cette direction est donc de 1.3 à 1.5 °C.

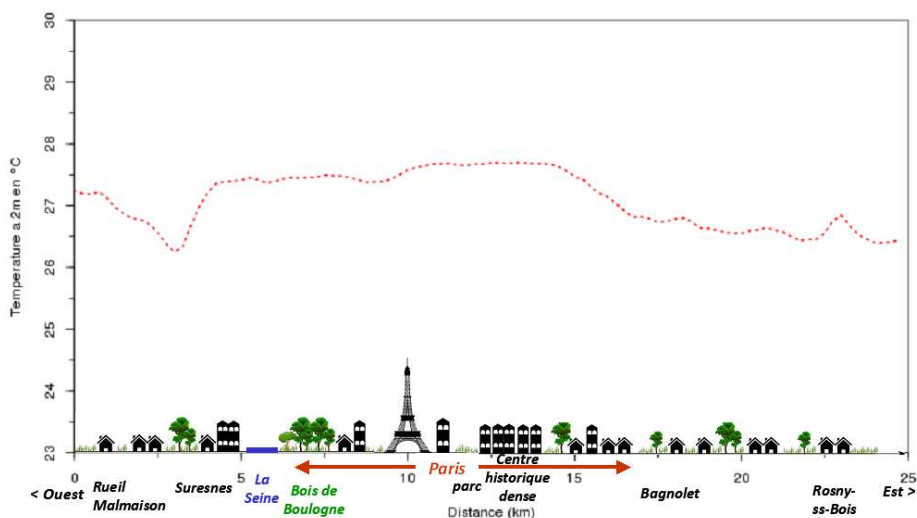
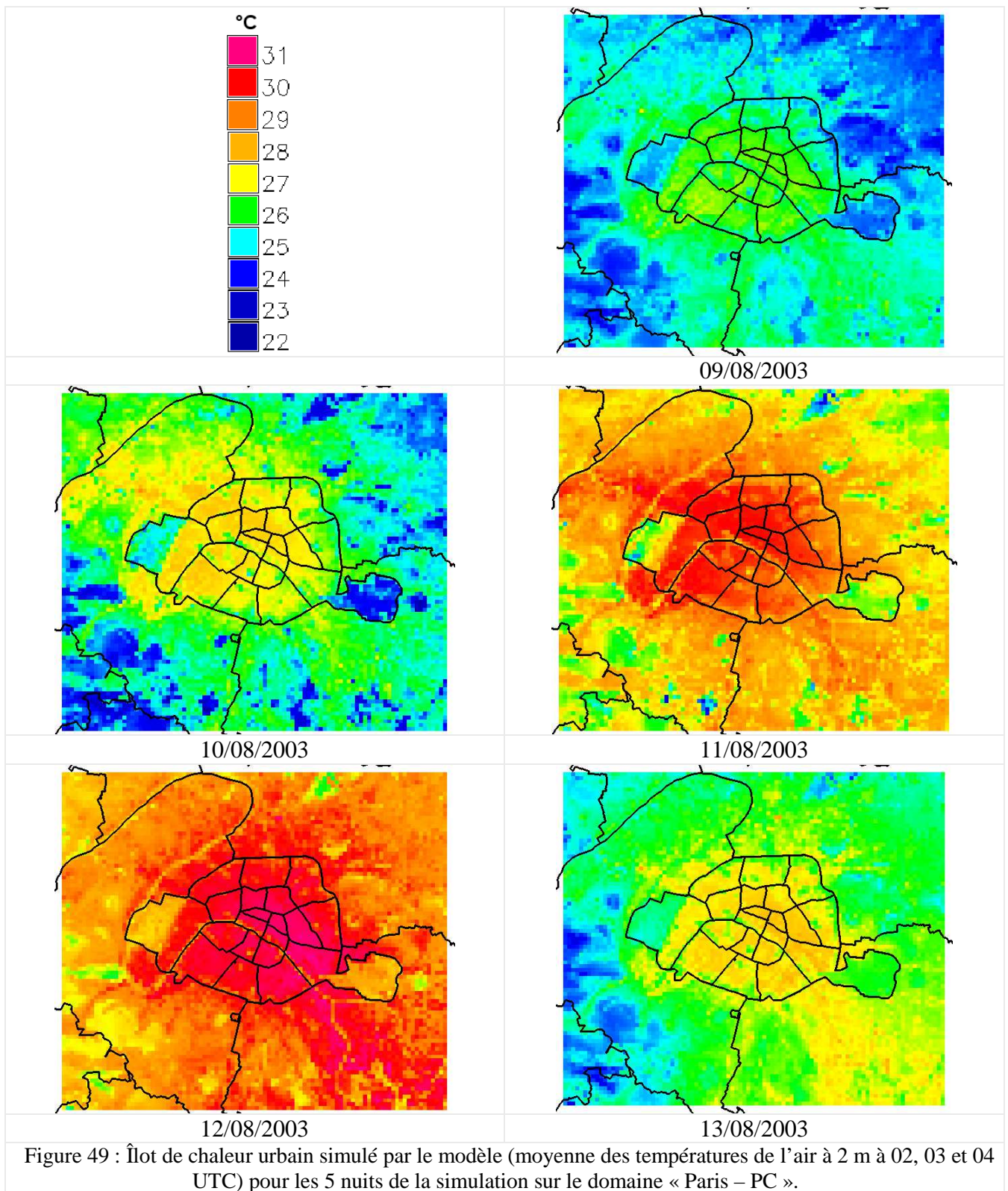


Figure 48 : Coupe transversale (traversant les 16^{ème}, 8^{ème}, 9^{ème}, 10^{ème} et 20^{ème} arrondissements d’ouest en est) de la moyenne des températures de l’air à 30 m à 02, 03 et 04 UTC les 5 nuits de la simulation pour la situation de référence.

L'analyse nuit par nuit de l'ICU montre sa variabilité quotidienne (Figure 49 et Figure 50). La première nuit, l'ICU est encore peu marqué. Seuls les sols naturels se détachent avec des températures à 2 m plus faibles (22 à 24 °C). La deuxième nuit, l'ICU se renforce avec des valeurs de températures à 2 m 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. Ce panache est bien mis en évidence avec les températures à 30 m qui sont plus élevées dans ce panache (jusqu'à 28 °C) qu'au-dessus de Paris *intra muros*. La troisième nuit, les températures à 2 m et à 30 m sont très élevées sur toute la zone densément urbanisée (29 à 30 °C) avec un ICU de 3 à 8 °C en terme de températures à 2 m et de l'ordre de 3 à 4 °C en terme de températures à 30 m ; 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 les températures à 2 m) et le nord-ouest, très visible sur les températures à 30 m. La quatrième nuit, les températures à 2 m sont encore plus élevées et dépassent les 31 °C sur les arrondissements du centre et du sud-est de Paris. Une rotation des vents (désormais de secteur nord-ouest) entraîne un déplacement du panache urbain, qui se matérialise au sud-est de Paris. C'est dans ce panache que l'on trouve les températures à 30 m les plus élevées (> 31 °C sur le Val-de-Marne et de l'ordre de 30 °C sur les 11^{ème}, 12^{ème} et 13^{ème} arrondissements). L'ICU est compris entre 3 et 5 °C en terme de températures à 2 m et est de l'ordre de 2 à 3 °C en terme de températures à 30 m. La dernière nuit voit s'opérer un refroidissement généralisé. Les températures à 2 m avoisinent les 27 °C sur Paris, 28 °C sur les 2^{ème}, 3^{ème}, 11^{ème} et ouest du 12^{ème} arrondissements, tandis que les températures à 30 m ne sont plus que de 26 à 27 °C sur Paris. Néanmoins, un ICU de 3 à 5 °C est toujours visible entre le centre de Paris et les zones alentours en terme de températures à 2 m. Le panache urbain est encore très visible au sud-est de Paris avec des températures à 2 m et à 30 m de l'ordre de 27 °C sur le Val-de-Marne.



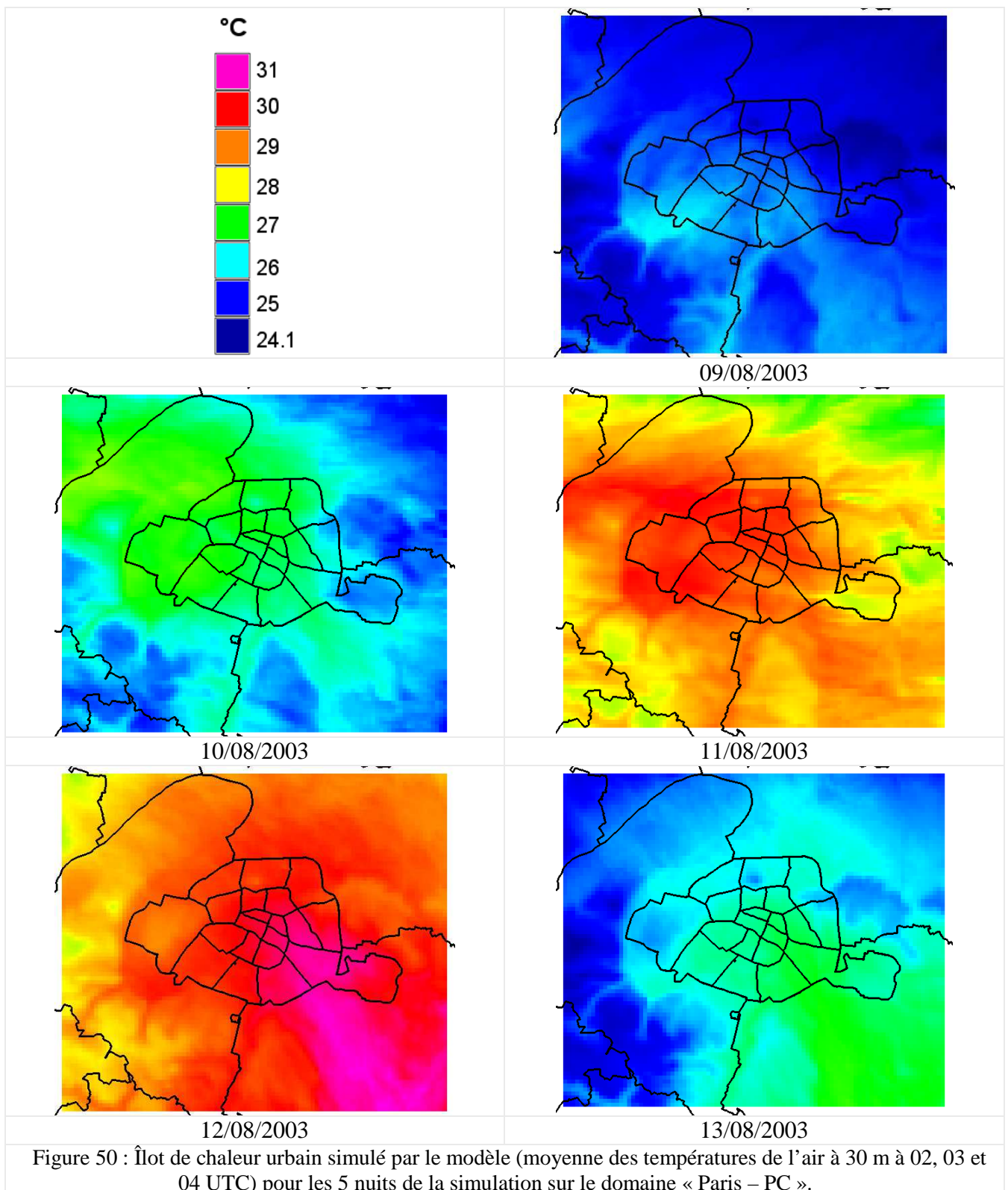
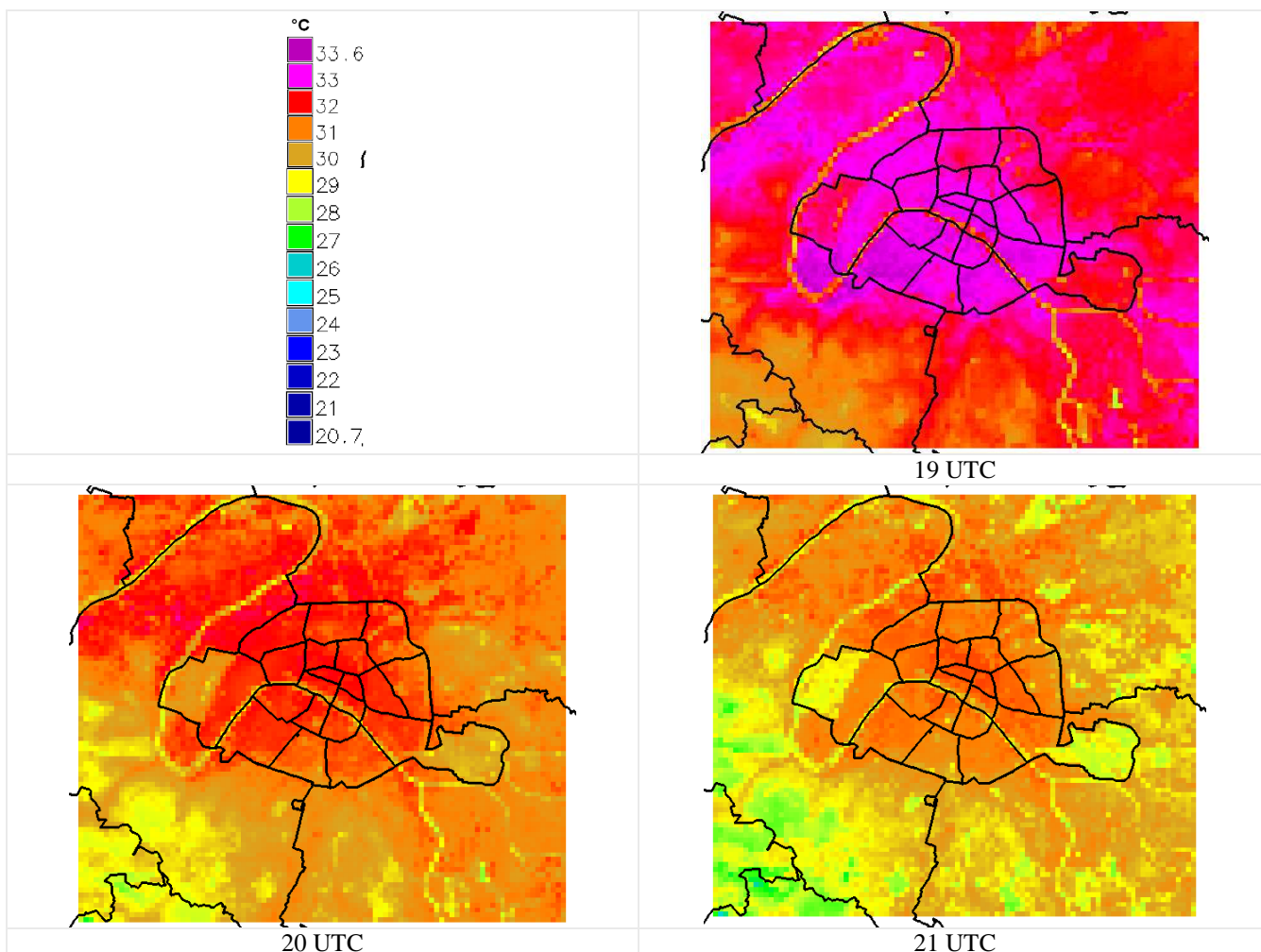
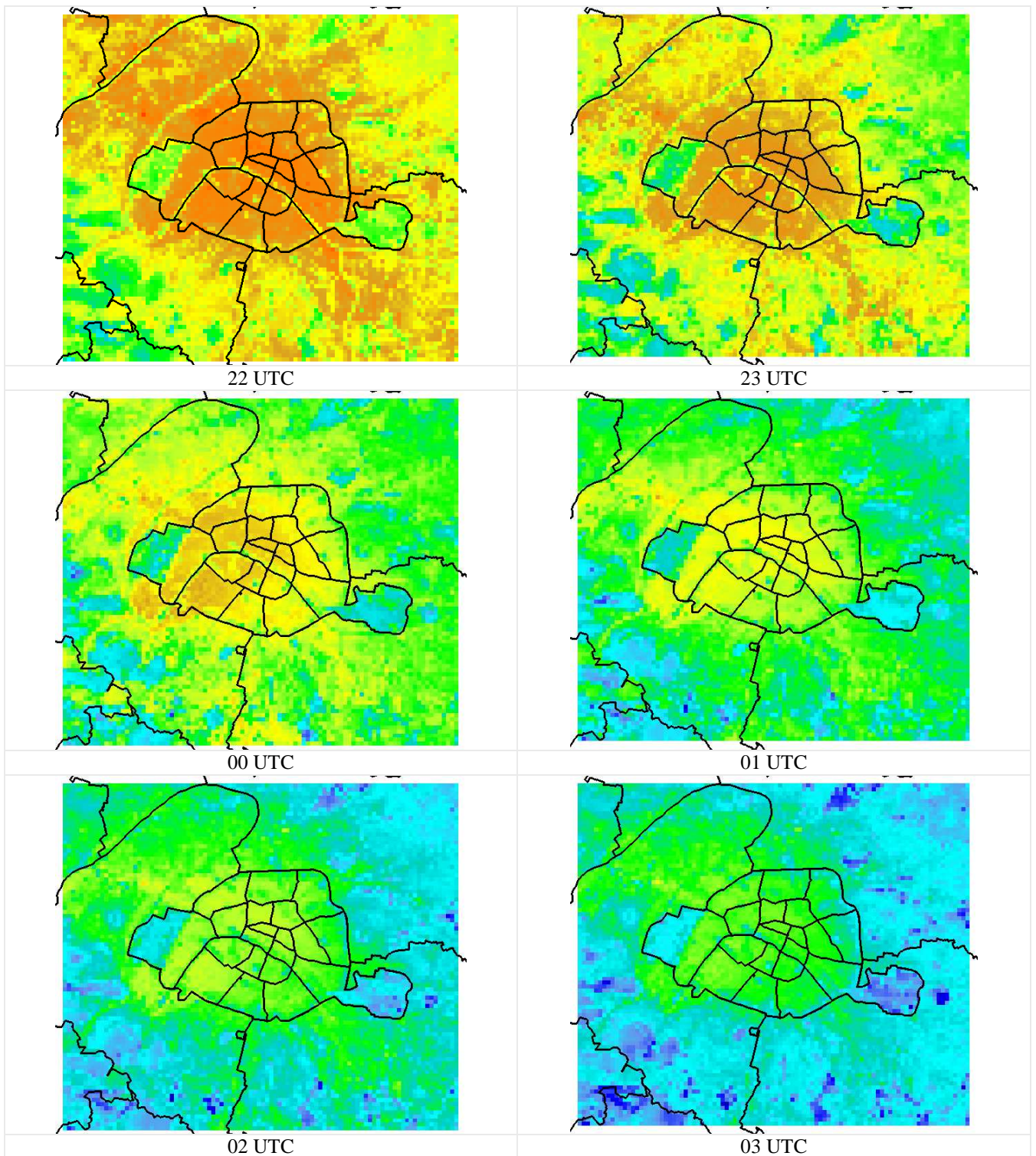


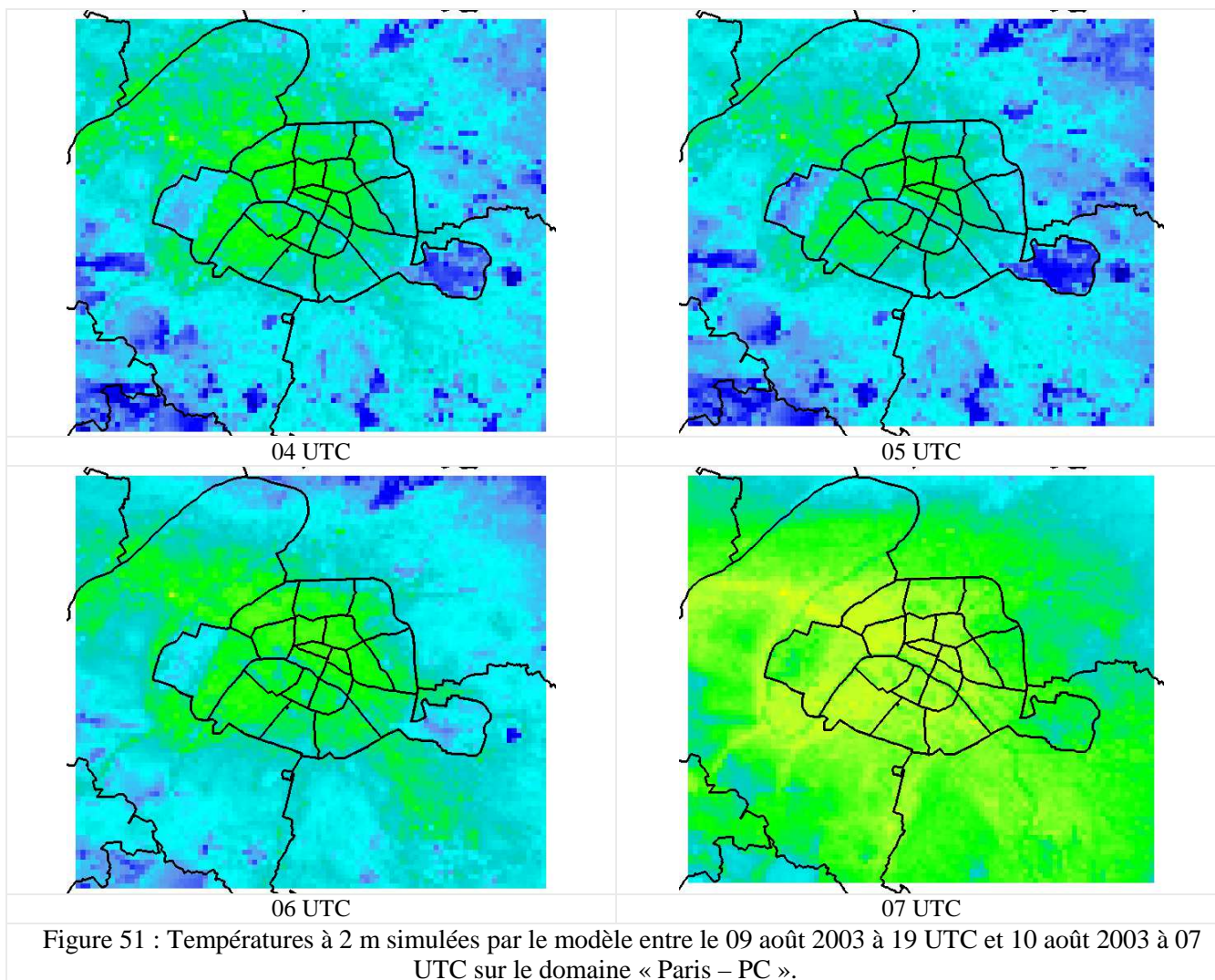
Figure 50 : Îlot de chaleur urbain simulé par le modèle (moyenne des températures de l'air à 30 m à 02, 03 et 04 UTC) pour les 5 nuits de la simulation sur le domaine « Paris – PC ».

L'analyse heure par heure du champ de température à 2 m la nuit du 09 au 10 août, de 19 à 07 UTC (Figure 51) 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 19 UTC le 09 août, les températures à 2 m sont maximales sur une bande

diagonale allant du nord-ouest au sud-est du domaine en incluant Paris au niveau des zones densément construites ; à 20 UTC, le refroidissement s’amorce sur l’ensemble du domaine ; entre 21 et 01 UTC, le refroidissement continue et s’accroît sur les sols naturels (parcs, forêts) ; puis l’ICU se met en place progressivement, avec des températures qui restent plus élevées sur le centre et la moitié ouest de Paris *intra muros*, ainsi que sous le vent dans le panache au nord-ouest de Paris ; entre 02 et 05 UTC, l’ICU est bien présent avec des températures à 2 m maximales sur les arrondissements les plus chauds (2^{ème}, 3^{ème}, 9^{ème} au nord de la Seine et 15^{ème} au sud de la Seine) et sur l’ouest de Paris de l’ordre de 27 à 29 °C et des températures à 2 m minimales sur le Parc de Saint Cloud et la Forêt de Meudon au sud-ouest de Paris, les Bois de Vincennes et de Boulogne et le Parc de la Courneuve au nord de Paris de l’ordre de 20 à 22 °C ; la zone au nord-ouest 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 orienté de sud-est qui transporte donc les températures élevées du centre-ville vers le nord-ouest) qui se met en place et vient s’ajouter aux propriétés des sols de cette zone ; à 06 et 07 UTC, le réchauffement lié au lever du jour s’amorce sur toute le domaine et l’ICU diminue. Dans la journée, l’ICU est peu voire pas du tout visible.







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'IDF (Hémon et Jouglà 2003).

La moyenne diurne des températures à 2 m (Figure 52, gauche) montre que, en journée, le facteur de refroidissement prépondérant des températures à 2 m est la présence d'eau (Seine, Marne, canaux), avec des températures à 2 m fortement corrélées avec la fraction d'eau ($R^2=0.5389$, très fortement significatif selon le test de Pearson, Figure 53 gauche). Les grands espaces verts au sud-ouest et au nord-est de Paris permettent également de limiter les températures à 2 m le jour mais dans une moindre mesure ($R^2=0.1503$, peu élevé mais très fortement significatif selon le test de Pearson). En dehors de ces zones, les températures à 2 m moyennes le jour sont relativement homogènes autour de 34 °C sans présence d'îlot de chaleur.

La nuit (Figure 52, droite), on constate la présence d'un îlot de chaleur sur Paris *intra muros* et plus particulièrement sur le centre de Paris, avec des températures à 2 m de 30 à 31 °C et des températures à 30 m autour de 30 °C. Les zones aquatiques sont toujours un facteur de refroidissement des températures à 2 m mais les zones de végétations apparaissent désormais comme le facteur de refroidissement prépondérant de ces températures à 2 m avec une corrélation élevée ($R^2=0.6466$, très fortement significatif selon le test de Pearson, Figure 53 droite). Sur Paris *intra muros*, ceci est très marqué au niveau des Bois de Vincennes et de Boulogne mais également, même si dans une moindre mesure, les autres grands parcs et espaces verts de la ville (Parc Montsouris, Parc Monceau, Cimetière du Père Lachaise, Esplanade des Invalides, Parc de la Villette, Parc des Buttes Chaumont, héliport, etc.).

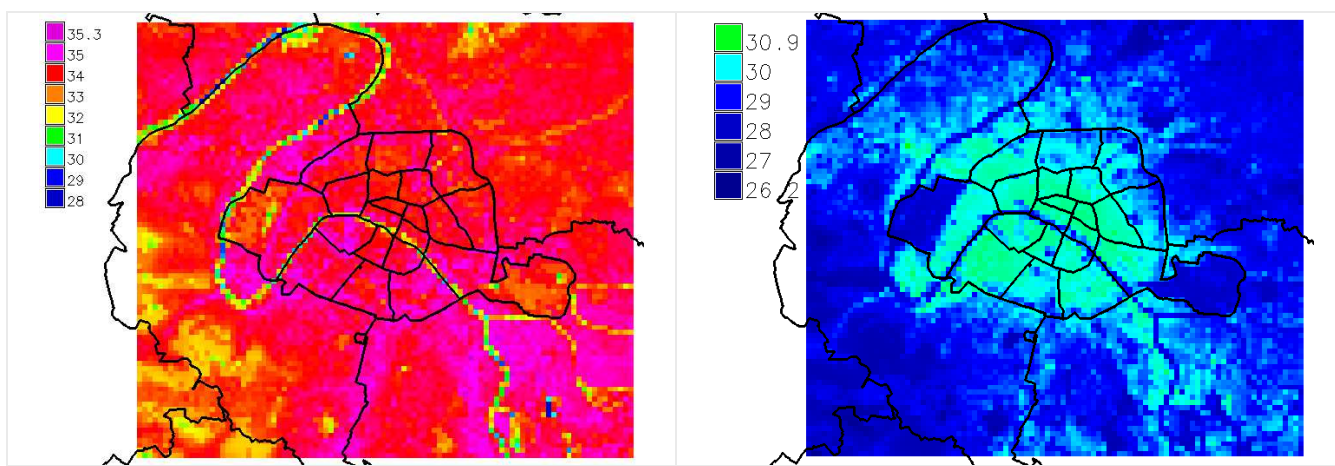


Figure 52 : Moyennes diurne (à gauche) des températures à 2 m simulées par le modèle sur le domaine « Paris – PC » sur l'ensemble de la période.

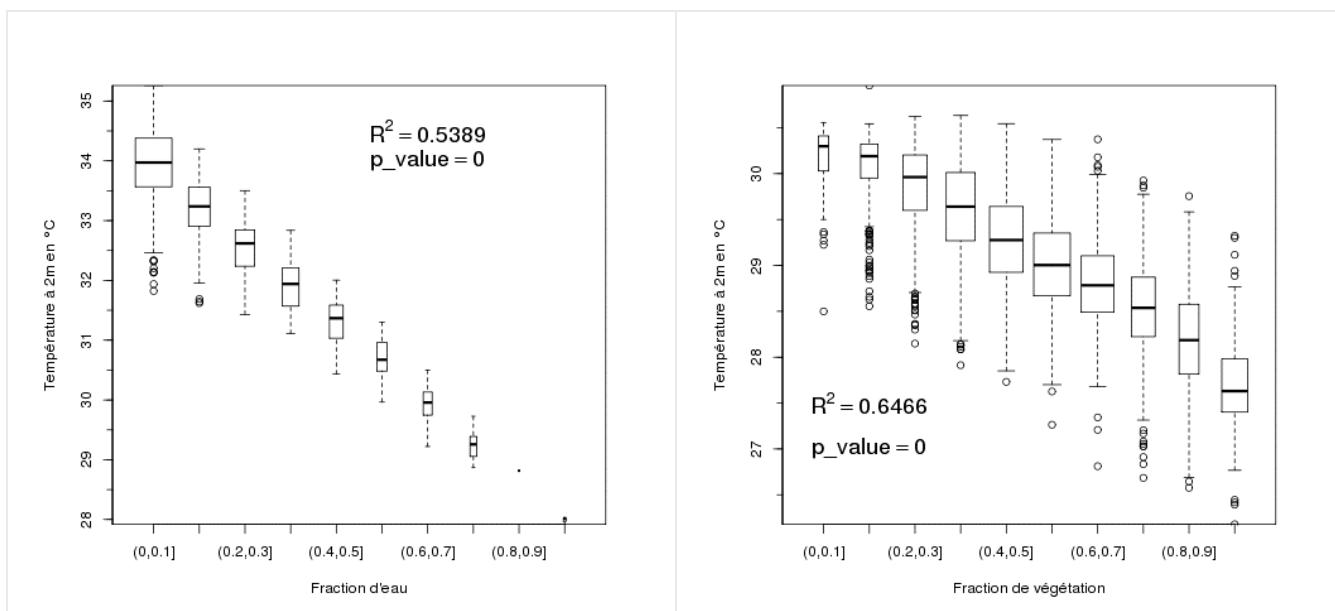
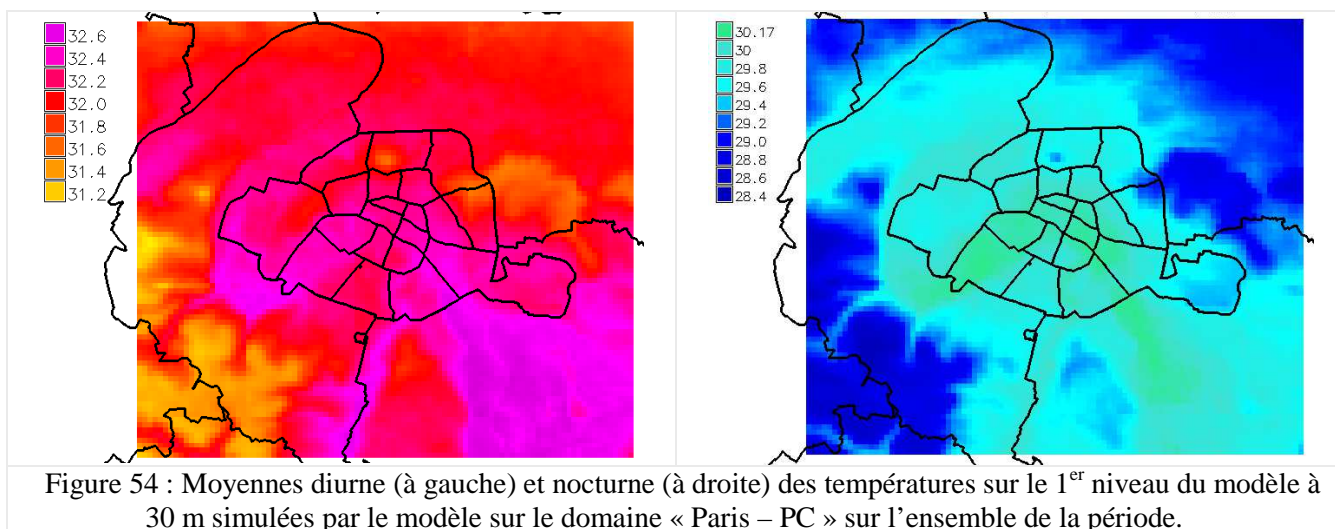


Figure 53 : Boîtes à moustaches de la température à 2 m en moyenne diurne en fonction de la fraction d'eau dans la maille (à gauche) et en moyenne nocturne en fonction de la fraction de végétation dans la maille (à droite) sur toute la période de simulation. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).

Les températures à 30 m moyennes le jour (Figure 54, gauche) sont elles aussi relativement homogènes autour de 31-32 °C ; à cette hauteur, l'eau ne joue plus son rôle de limitation des températures et l'impact de la fraction d'eau sur la température à 30 m n'est plus visible. Les températures à 30 m moyennes nocturnes (Figure 54, droite) sont encore impactées par ces zones de végétation mais dans une moindre mesure.



2.6 Analyse des températures spécifiques à la zone urbaine

2.6.1 Températures au niveau des toits

En journée (Figure 55 gauche), la température au niveau des toits est très élevée. Elle est peu influencée par le type de toit. En revanche, elle est corrélée avec la fraction de ville « réelle » ($R^2=0.1458$, corrélation faible mais très fortement significative selon le test de Pearson, Figure 56 gauche) pour Paris *intra muros* avec des valeurs supérieures à 43 °C sur les parties les plus denses de la ville et de 41 à 42 °C ailleurs. Sur la banlieue, elle est assez variable est minimale au sein des zones de végétation (36 à 38 °C).

La nuit (Figure 55 droite), plusieurs remarques s'offrent à nous :

- la température au niveau des toits est fortement corrélée au type de toit ($R^2=0.4446$, très fortement significatif selon le test de Pearson, Figure 56 droite) ;
- les températures sont maximales au niveau des toits terrasse (près de 33 °C dans Paris *intra muros* et 31 à 32 °C en banlieue) qui combinent une émissivité importante (0.8), une capacité calorifique élevée ($2.1E6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$) et une conductivité thermique faible ($0.7 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), d'où un fort stockage de chaleur au niveau de la couche extérieure d'étanchéité du toit et une restitution de chaleur importante la nuit ;
- les températures sont également élevées au niveau des toits en zinc (30 à 31 °C dans Paris *intra muros* et 28 à 29 °C en banlieue) en liaison avec l'importante capacité calorifique ($2.736E6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$) de la couche extérieure d'étanchéité. Elles sont moins élevées que pour les toits terrasse en raison de la très forte conductivité thermique du zinc ($110 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et de sa faible émissivité (0.1) ;
- les températures sont minimales au niveau des toits en tuiles (24 °C) et en ardoise (23 °C). A émissivité égale avec les toits terrasse, les toits en tuile ont cependant une capacité calorifique

réduite ($1.6E6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$) et ont donc moins de chaleur à restituer la nuit. A émissivité légèrement plus forte que les toits en tuile (0.9) et à même capacité calorifique, les toits en ardoise ont quant à eux une température de surface moins élevée en raison d'une conductivité thermique plus élevée ($2.2 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

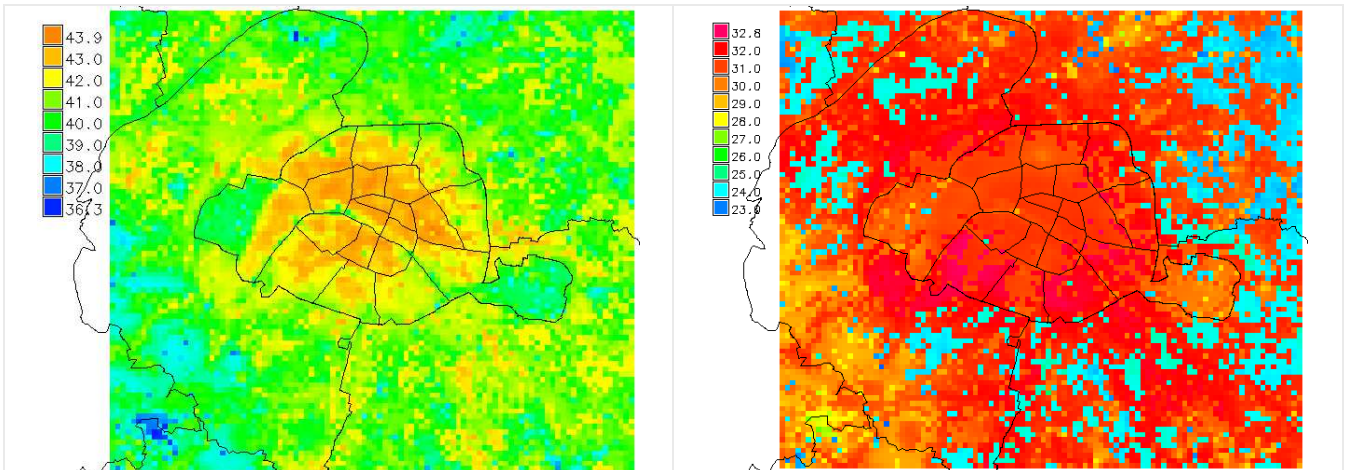


Figure 55 : Moyennes diurne (à gauche) et nocturne (à droite) des températures au niveau des toits simulées par le modèle sur le domaine « Paris – PC » sur l'ensemble de la période.

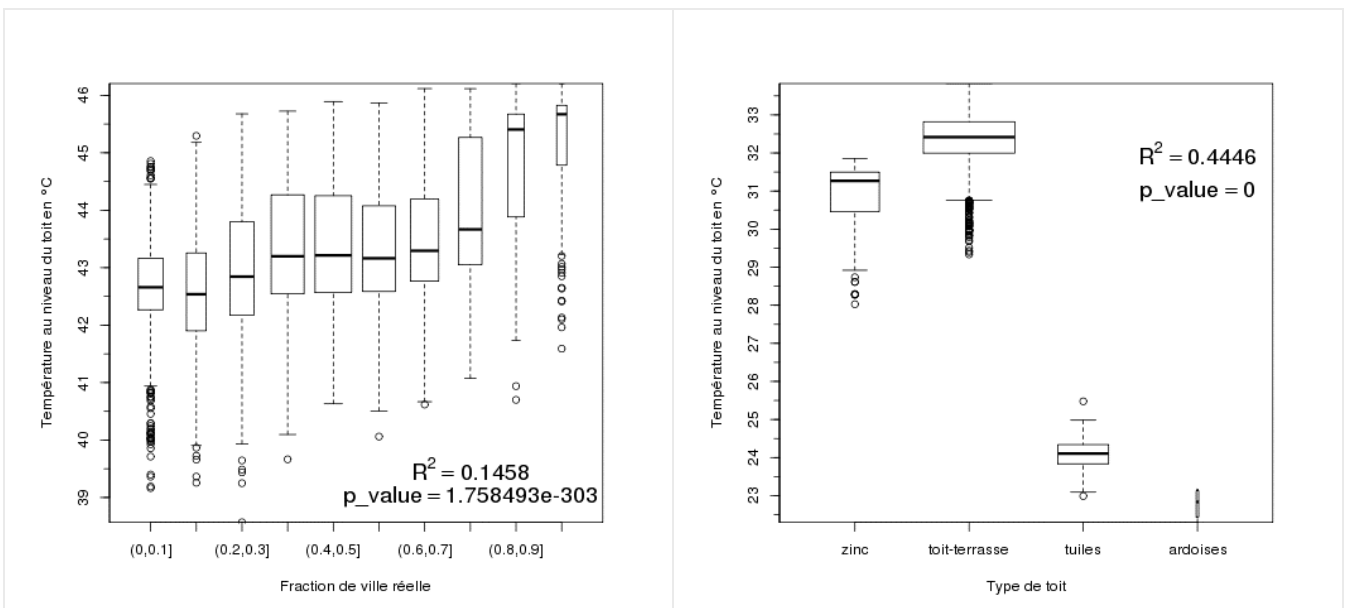


Figure 56 : Boîtes à moustaches de la température au niveau des toits en moyenne diurne en fonction de la fraction de ville réelle dans la maille (à gauche) et en moyenne nocturne en fonction du type de toit (à droite) sur toute la période de simulation. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).

2.6.2 Températures au niveau des murs

En journée (Figure 57 gauche), la température au niveau des murs est très élevée en dehors de Paris au nord-ouest, nord et sud-est (35 à 36 °C), là où la température de l'air à 2 m atteint des valeurs très importantes dans l'après-midi. Au sein de Paris *intra muros*, on peut remarquer que la température des

murs est dépendante de la densité urbaine puisque les zones les plus denses de Paris sont majoritairement concernées par des températures de murs plus faibles.

La nuit (Figure 57 droite), la température au niveau des murs est maximale sur Paris *intra muros* et sur une partie de la Petite Couronne (30.5 à 31 °C). Ces hautes valeurs coïncident avec les zones denses en terme de fraction de ville « réelle » (coefficient de corrélation $R^2=0.436$ mais très fortement significatif selon le test de Pearson, Figure 58) et avec le rayonnement incident infrarouge nocturne. Ailleurs, la température au niveau des murs varie entre 26-28 °C (au niveau des zones de végétation) et 28-29 °C.

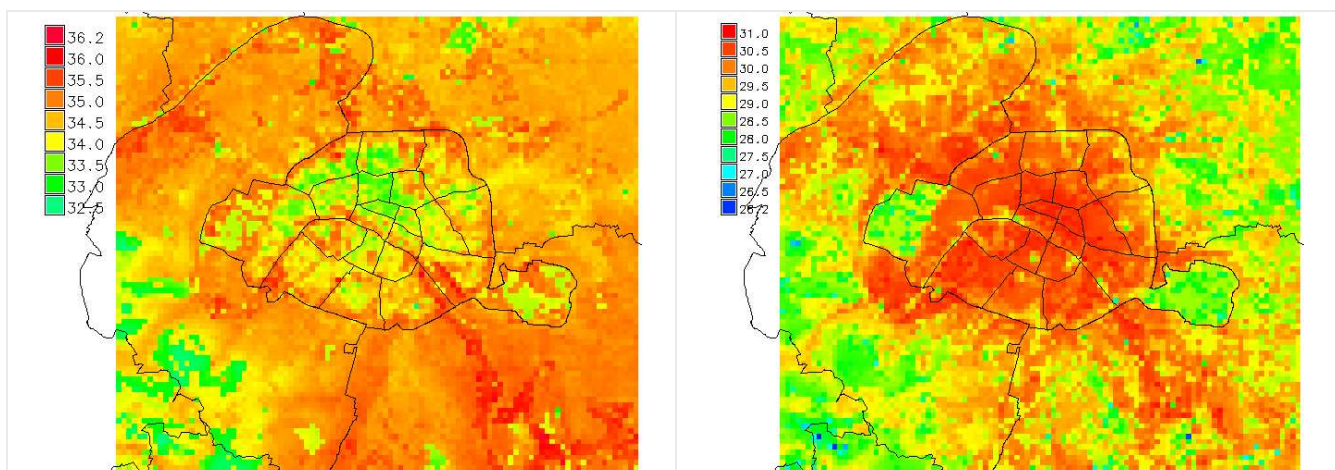


Figure 57 : Moyennes diurne (à gauche) et nocturne (à droite) des températures au niveau des façades des murs simulées par le modèle sur le domaine « Paris – PC » sur l'ensemble de la période.

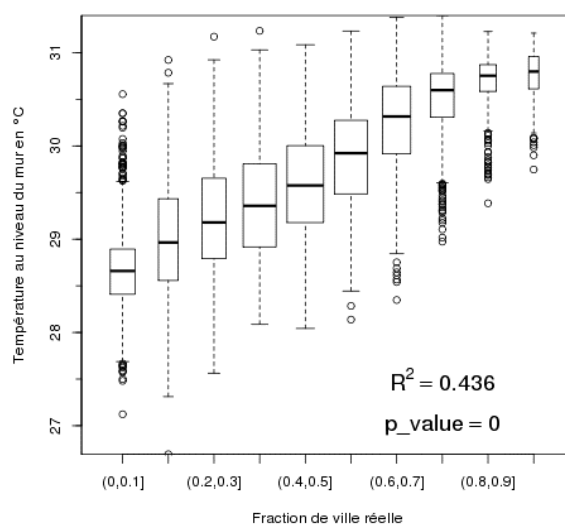


Figure 58 : Boîtes à moustaches de la température au niveau des murs en moyenne diurne en fonction de la fraction de ville réelle dans la maille (à gauche) sur toute la période de simulation. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).

2.6.3 Températures au niveau des routes

En journée (Figure 59 gauche), la température au niveau des routes est très élevée en dehors de Paris au nord-ouest et sud-est (41 à 43 °C), là où la température de l'air à 2 m atteint des valeurs très

importantes dans l'après-midi. Dans Paris *intra muros*, la température au niveau des routes est inversement corrélée au rapport d'aspect ($R^2=0.4926$, corrélation moyenne mais très fortement significative selon le test de Pearson, Figure 60 gauche). Celui-ci se définit comme la hauteur des bâtiments sur la largeur de rue et donne une idée de l'encaissement du canyon urbain. Il est fonction du facteur de forme du bâti. Plus le rapport d'aspect (et le facteur de forme du bâti) est élevé, plus le canyon urbain est encaissé et donc plus la portion de route peut être ombrée par les bâtiments présents, ce qui limite son chauffage et conduit à une température plus faible, comme sur le centre de Paris et une partie des arrondissements de l'ouest et du sud (35 à 37 °C). Là où le facteur de forme du bâti est faible, notamment le long des grosses artères comme le boulevard périphérique et les voies sur berge, la température au niveau des routes est très élevée (42 à 43 °C).

La nuit, la Figure 59 (droite) montre que la température au niveau des routes est plus élevée dans Paris *intra-muros*. Elle est corrélée avec le rapport d'aspect ($R^2=0.7299$, corrélation plus forte et très fortement significative selon le test de Pearson, Figure 60 droite) et est maximale au niveau des zones où le canyon urbain est le plus encaissé : 30 à 31.5 °C sur les 2^{ème}, 3^{ème}, 9^{ème} arrondissements ; ce sont également les arrondissements les plus denses (coefficient de corrélation $R^2=0.5911$, très fortement significatif selon le test de Pearson, Figure 61). A l'inverse, les grands axes apparaissent moins chauds (27-28 °C), ce qui est également le cas au sein des zones de végétation (24 à 27 °C).

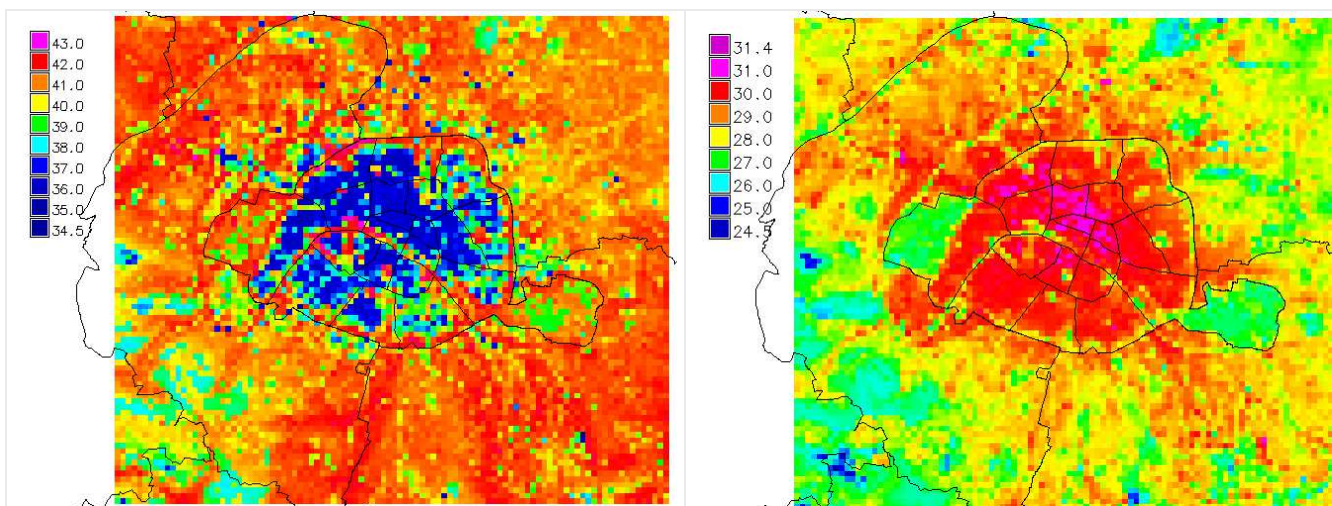


Figure 59 : Moyennes diurne (à gauche) et nocturne (à droite) des températures au niveau des routes simulées par le modèle sur le domaine « Paris – PC » sur l'ensemble de la période.

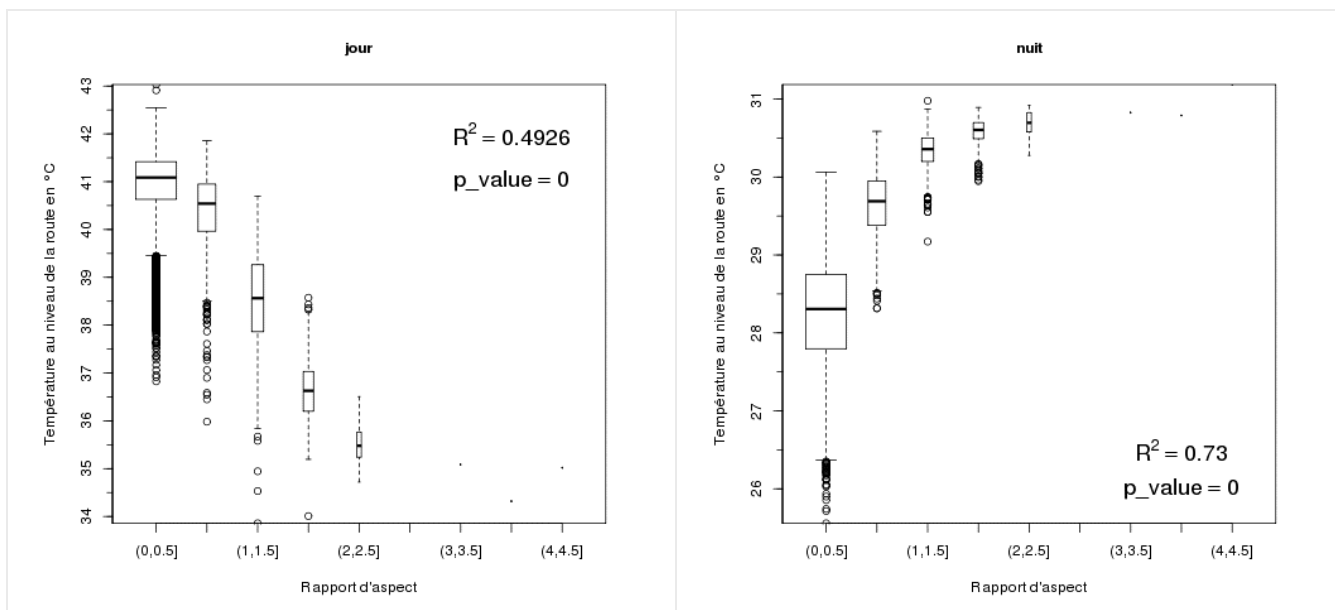


Figure 60 : Boîtes à moustaches de la température au niveau des routes en fonction du rapport d'aspect en moyenne diurne (à gauche) et en moyenne nocturne (à droite) sur toute la période de simulation. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).

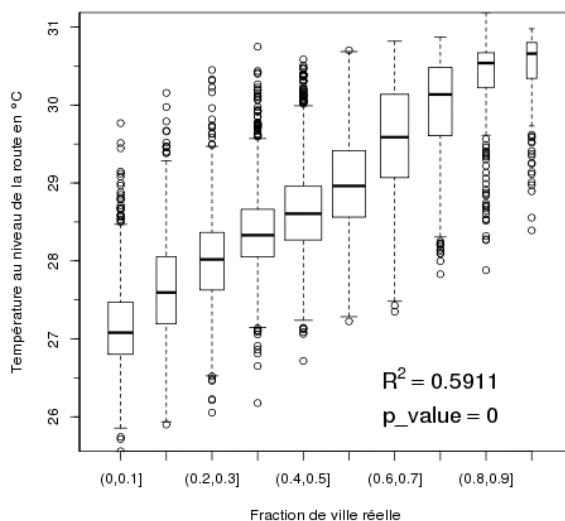


Figure 61 : Boîtes à moustaches de la température au niveau des routes en moyenne nocturne en fonction de la fraction de ville réelle dans la maille sur toute la période de simulation. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).

2.6.4 Température interne des bâtiments

Le modèle urbain TEB simule d'une manière simple le microclimat à l'intérieur des bâtiments en calculant la température intérieure $T_{i\text{bât}}$. Cette température suit une équation d'évolution fonction de la température intérieure au pas de temps précédent et de la moyenne des températures de surface du plafond intérieur, du mur, et du toit (Masson *et al.* 2002). $T_{i\text{bât}}$ est minorée à 19 °C, seuil en deçà duquel on considère que le chauffage est éventuellement mis en route l'hiver. Les systèmes de climatisation ne sont pas paramétrés dans la version actuelle du modèle, ainsi $T_{i\text{bât}}$ évolue librement pendant l'été. Les températures internes des bâtiments en moyenne diurne et nocturne sont très

proches, et nous présenterons par conséquent la moyenne sur toute la période de simulation (Figure 62).

Sur la banlieue, elles sont relativement homogènes de l'ordre de 27 °C, excepté sur le nord-ouest, le sud-ouest et dans une moindre mesure le sud-est de Paris, en corrélation avec le rayonnement infrarouge incident, conduisant à des températures de surface des bâtiments (murs, toits) relativement élevées. Sur Paris *intra muros*, on observe une corrélation avec le type de toit ($R^2=0.1877$, faible mais très fortement significative selon le test de Pearson, Figure 63) : les bâtiments à toit en zinc ont des températures internes élevées (28 à 29 °C), en liaison avec le fort albédo du zinc (0.6) et les propriétés de la couche extérieure avec une forte capacité calorifique ($2.736E6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$) et une très forte conductivité thermique ($110 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$). Les bâtiments à toit terrasse ont des températures internes qui peuvent être également élevées en liaison avec leur faible albédo (0.2), la capacité calorifique importante des couches extérieures d'étanchéité ($2.1E6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$) et intermédiaire support ($2.3E6 \text{ J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$) et la forte conductivité thermique de la couche intermédiaire support ($2.3 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$).

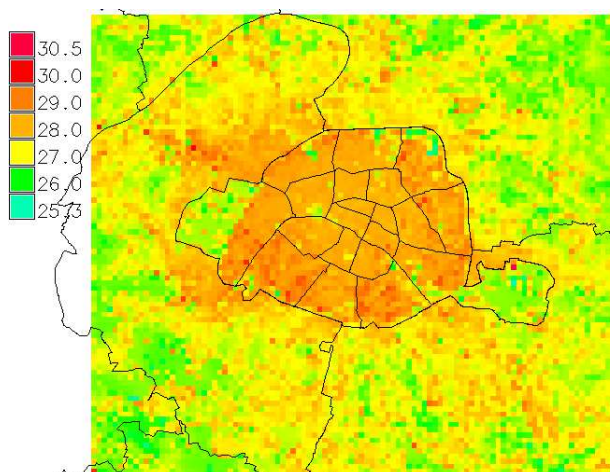


Figure 62 : Moyenne des températures internes des bâtiments simulées par le modèle sur le domaine « Paris – PC » sur l'ensemble de la période.

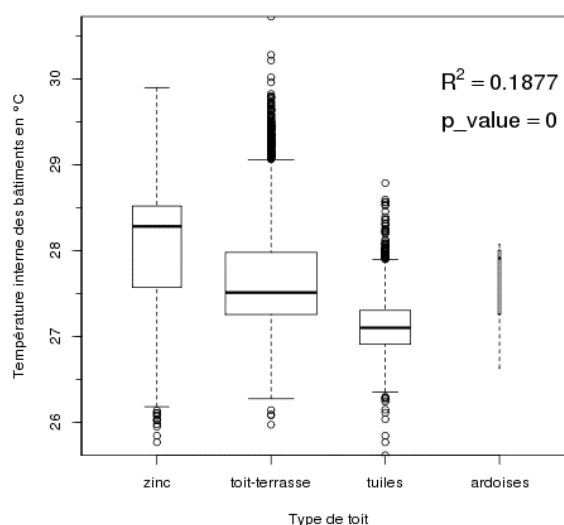


Figure 63 : Boîtes à moustaches de la température interne des bâtiments en fonction du type de toit sur toute la période de simulation. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).

Conclusions

Dans le cadre du volet 2 du projet EPICEA, mené conjointement par Météo-France et le CSTB pour 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 et le modèle MESO-NH. Une forte 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 : l'augmentation de la résolution permet d'améliorer la qualité de la simulation et le modèle reproduit bien les observations de température et de vent, ainsi que le cycle diurne d'humidité relative en simulant un Paris « actuel » de référence pour la période de simulation.

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, un rayonnement net légèrement plus élevé (effet majoritaire du piégeage du rayonnement dans le canyon urbain), un flux de stockage de chaleur beaucoup plus élevé le jour et la nuit (surface de stockage et conduction des matériaux plus grande sur les surfaces urbaines artificielles) et un flux de chaleur latente inexistant (pas d'évapotranspiration). Ces particularités modifient le climat urbain.

Tout d'abord, un îlot de chaleur urbaine (ICU) apparaît en fin de nuit entre le centre de Paris (arrondissements les plus chauds : 2^{ème}, 3^{ème}, 8^{ème}, 9^{ème}, 10^{ème} et 11^{ème}) et les zones rurales alentour de l'ordre de 4 à 6 °C, particulièrement marqué 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). 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.

Par ailleurs, la couche limite urbaine (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 (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 infra-rouge au-dessus des surfaces artificielles.

Durant la journée, la présence d'eau est le facteur de refroidissement prépondérant des températures à 2 m, tandis que la nuit, ce sont les zones de végétation. Le type de bâtiment va jouer un rôle très important sur les paramètres de température : la température au niveau de la surface des toits est fortement corrélée au type de toit la nuit, la température au niveau de la surface des murs est fonction de la classe d'âge du bâtiment (qui conduisent à des propriétés thermiques et radiatives différentes) et de la densité en terme de fraction de ville « réelle », ce qui conduit à des différences notables sur la température interne des bâtiments. La température au niveau de la surface des routes est elle pilotée par le facteur de forme du bâti, autrement dit par le rapport d'aspect.

Cette étude a permis d'identifier les zones urbaines de Paris les plus vulnérables aux processus urbains comme les arrondissements fortement urbanisés du centre de Paris, les arrondissements périphériques

au sud et à l'est, ainsi que les zones situées dans le panache urbain (sud-est et nord-ouest de Paris dans ce cas précis).

Cette étude va se prolonger par des tests de sensibilité sur différents leviers urbains préalablement identifiés. 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 bâti, afin de se placer à plus ou moins long terme. D'autres simulations vont donc être menées en modifiant ces paramètres afin de quantifier leur impact sur le climat urbain dans les mêmes conditions (canicule de l'été 2003) que la simulation présentée ici, considérée comme référence.

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 attachés 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.

Bibliographie

- APUR, 2007, *Consommations d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes*, 44 pp., disponible en ligne : <http://www.apur.org/etude/consommations-energie-et-emissions-gaz-effet-serre-liees-au-chauffage-residences-principales-p>
- Arnfield, A. (1982), An approach to the estimation of the surface radiative properties and radiation budgets of cities, *Phys. Geogr.*, 3, 97–122.
- 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, 539p.
- De Munck, C., Pigeon, G., Meunier, F.-E., Tréméac, B., Bousquet, P., Merchat, M., Poeuf, P., and Marchadier, C., 2010 : *Projet CLIM2 : Climat urbain et climatisation. Rapport final du projet. Rapport scientifique*, 85 pp.
- Desplat, J., Salagnac, J.-L., Koukou-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, 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*, AFNOR.
- Farr, T. G., et al. (2007), The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- Früh, B., Becker, P., Deuschlinder, 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., Tejada 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.
- Hémon, D. et Jouglu, 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., 59p.
- Heymann, Y., and Coauthors, CORINE land cover: Technical guide. Environment, nuclear safety and civil protection series, *Commission of the European Communities*, Office for Official Publication of the European Communities, Luxembourg. 144 pp (1993).

- InVS, 2004, *Etude des facteurs de décès des personnes âgées résidant à domicile durant la vague de chaleur d'août 2003*, 116p.
- IPCC, 2007, *Climate Change 2007: Synthesis report*, CoreWriting Team, Pachauri, R.K. and Reisinger, A. (Eds.) IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- 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 al., 1998, The Meso-NH atmospheric simulation system. Part I: adiabatic formulation and control simulations, *Annales Geophysicae*, **16**, 90-109.
- 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, 241pp.
- 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 pp.
- Lemonsu A., V. Masson, L. Shashua-Bar, E. Erell, and D. Pearlmutter, 2012. 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.
- Mallet, M., J. Roger, S. Despiiau, O. Dubovik, et J. Putaud (2003), Microphysical and optical properties of aerosol particles in urban zone during ESCOMPTE, *Atmos. Res.*, **69**, 73–97. 34
- Mallet, M., V. Pont, C. Lioussé, J. C. Roger, et P. Dubuisson (2006), Simulation of aerosol radiative properties with the ORISAM-RAD model during a pollution event (ESCOMPTE 2001), *Atmos. Environ.*, **40**, 7696–7705. 34
- Masson, V., 2000, A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Bound.-Layer Meteorol.*, **94**, 357-397.
- Masson, V., Grimmond, C.S.B., and Oke, T.R., Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities, *J. Appl. Meteorol.*, **41**, 1011-1026 (2002).
- 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.
- Oke, T. R., 1987 : *Boundary Layer Climates*, Methuen, London and New York, 435 p.
- Pigeon G., 2007, *Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine - projets CLU-ESCOMPTE et CAPITOU*, Thèse de doctorat de l'Université Toulouse III – Paul Sabatier, 170 pp.
- Pigeon, G., Lemonsu, A., Masson, V., and Hidalgo, J., 2008, De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville, *La Météorologie*, **62**, 39-47.
- 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*, Vol.3.
- 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
- Wilby, R.L., 2003, Past and projected trends in London's urban heat island, *Weather*, **58**(7), 251-260.

Liste des figures

- Figure 1: Altitude en m pour les 3 domaines emboîtés utilisés dans la simulation : domaine 1 « France étendue » (résolution 2.5 km), domaine 2 « IDF » (résolution 1.25 km) et domaine 3 « Paris – petite couronne » (résolution 250 m). 6
- Figure 2 : Structure du système de modélisation des surfaces continentales SURFEX et fonctionnement avec le modèle MESO-NH. 7
- Figure 3 : Représentation des échanges dans le modèle ISBA (d'après Lemonsu, 2005) : 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..... 8
- Figure 4 : Représentation schématique du fonctionnement de TEB (d'après Masson 2000).. 9
- Figure 5 : 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)..... 10
- Figure 6 : Base de données du couvert urbain parisien : Fraction de végétation par maille.. 11
- Figure 7 : Base de données du couvert urbain parisien : Fraction de surfaces aquatiques par maille. 11
- Figure 8 : Base de données du couvert urbain parisien : Fraction de ville « réelle » correspondant aux surfaces artificielles par maille (fraction de ville à laquelle on a soustrait la partie « jardin », *ie.* la végétation)..... 12
- Figure 9 : Base de données du couvert urbain parisien : Répartition par maille des types de toits majoritaires, classés par matériau. 12
- Figure 10 : Base de données du couvert urbain parisien : Répartition par maille de l'altitude moyenne des bâtiments. 13
- Figure 11 : Base de données du couvert urbain parisien : Répartition des types de murs des bâtiments majoritaires par maille, triés par classe d'âge..... 13
- Figure 12 : Base de données du couvert urbain parisien : Fraction de sol nu par maille. 14
- Figure 13 : Base de données du couvert urbain parisien : Fraction de bitume (routes et surfaces bitumées) par maille. 14
- Figure 14 : Base de données du couvert urbain parisien : Facteur de forme du bâti (surface totale de murs / surface de ville) par maille. 15
- Figure 15 : Stations de mesure disponibles pour la période du 08 au 13 août 2003 sur le domaine « IDF » (à gauche) et sur le domaine « Paris – PC » (à droite). Sur le domaine « IDF », les stations sont seulement pointées, tandis que sur le domaine « Paris – PC », les croix représentent les stations en milieu urbain, les losanges les stations en milieu péri-urbain et les triangles les stations en milieu rural ; en gras sont représentées les stations à données horaires et en trait fin les stations à données quotidiennes. 23
- Figure 16 : Lames d'eau du radar de Trappes (Yvelines) : cumul de précipitations (en 1/10^{ème} de mm) des 6 dernières heures le 11 août à 00, 06 et 12 UTC. 24
- Figure 17 : Précipitations totales cumulées sur l'ensemble de la période simulées par les modèles « IDF » et « Paris – PC »..... 25
- Figure 18 : Image satellitale prise par Meteosat 7 le 11 août 2003 à 15 UTC. Les températures donnent une indication de l'altitude et donc du type de nuages. Ici, on a

plutôt des nuages de l'étage moyen, type altocumulus. On distingue également le sol, ici pour les températures supérieures à 24 °C.	26
Figure 19 : Rayonnement diffus simulé par le modèle sur les domaines « IDF » et « Paris – PC » le 11 août 2003 à 15 UTC. Ce paramètre permet de détecter la présence de nuages là où le rayonnement est non nul.	26
Figure 20 : Diagrammes de dispersion de la température de l'air à 2 m observée et simulée par le modèle pour l'ensemble des stations horaires des domaines « IDF » (à gauche, 45 stations) et « Paris – PC » (à droite, 6 stations). La droite de régression (ajustement linéaire) est superposée en rouge en traits pleins, ainsi que la première bissectrice en pointillés rouges.	27
Figure 21 : Température de l'air à 2 m simulée par le modèle (rouge) et observée (bleu) pour les stations horaires situées dans le domaine « Paris – PC » pour l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003).	29
Figure 22 : Diagramme de dispersion de l'humidité relative à 2 m observée et simulée par le modèle pour l'ensemble des stations horaires des domaines « IDF » (à gauche, 45 stations) et « Paris – PC » (à droite, 6 stations). La droite de régression (ajustement linéaire) est superposée en rouge en traits pleins, ainsi que la première bissectrice en pointillés rouges.	30
Figure 23 : Humidité relative de l'air à 2 m simulée par le modèle (rouge) et observée (bleu) pour les stations horaires situées dans le domaine « Paris – PC » pour l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003).	32
Figure 24 : Vitesse et direction du vent en basses couches simulée par le modèle (rouge) et observée (bleu) pour les stations du domaine mesurant le vent, en haut : Paris-Montsouris (observation à 25,5 m, modèle à 24,7 m d'altitude) ; au milieu : St-Maur (observation à 30,4 m et modèle à 30 m d'altitude) ; en bas : Villacoublay (observation et modèle à 10 m d'altitude) pour l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003).	34
Figure 25 : Flux de rayonnement net en Wm^{-2} sur le domaine « Paris – PC » : moyenne quotidienne le 10 août 2003 (en haut), moyenne diurne le 10 août 2003 (en bas à gauche) et moyenne nocturne le 10 août 2003 (en bas à droite).	35
Figure 26 : Boîtes à moustaches du flux de rayonnement net en moyenne quotidienne pour le 10 août 2003 en fonction de la fraction d'eau dans la maille. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).	36
Figure 27 : Boîtes à moustaches du flux de rayonnement net en moyenne diurne pour le 10 août 2003 en fonction de la fraction de végétation dans la maille. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).	36
Figure 28 : Boîtes à moustaches du flux de rayonnement net en moyenne nocturne pour le 10 août 2003 en fonction du type de toit. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).	37
Figure 29 : Flux de chaleur sensible en Wm^{-2} sur le domaine « Paris – PC » : moyenne quotidienne le 10 août 2003 (en haut), moyenne diurne le 10 août 2003 (en bas à gauche) et moyenne nocturne le 10 août 2003 (en bas à droite).	38
Figure 30 : Boîtes à moustaches du flux de chaleur sensible en moyenne nocturne pour le 10 août 2003 en fonction de la fraction de ville dans la maille. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).	39

Figure 31 : Flux de chaleur latente en Wm^{-2} et sur le domaine « Paris – PC » : moyenne quotidienne le 10 août 2003 (en haut), moyenne diurne le 10 août 2003 (en bas à gauche) et moyenne nocturne le 10 août 2003 (en bas à droite).	40
Figure 32 : Boîtes à moustaches du flux de chaleur latente en moyenne diurne en fonction de la fraction de végétation dans la maille (à gauche) et en moyenne nocturne en fonction de la fraction d'eau dans la maille (à droite) pour le 10 août 2003.	41
Figure 33 : Flux de stockage de chaleur en Wm^{-2} sur le domaine « Paris – PC » : moyenne quotidienne le 10 août 2003 (en haut), moyenne diurne le 10 août 2003 (en bas à gauche) et moyenne nocturne le 10 août 2003 (en bas à droite).	42
Figure 34 : Boîtes à moustaches du flux de stockage de chaleur en moyenne quotidienne en fonction de la fraction d'eau dans la maille (à gauche) et en moyenne nocturne en fonction du type de toit dans la maille (à droite) pour le 10 août 2003. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).	43
Figure 35 : Bilan d'énergie le 10 août 2003 simulé par le modèle et moyenné sur le domaine « IDF » (à gauche) et sur le domaine « Paris – PC » (à droite) : rayonnement net RN, flux de chaleur sensible H, flux de chaleur latente LE et flux de stockage GFLUX.	44
Figure 36 : Bilan d'énergie le 10 août 2003 (à gauche) simulé par le modèle et moyenné sur la partie urbaine (traits pleins) et sur la partie rurale (pointillés) : rayonnement net RN, flux de chaleur sensible H, flux de chaleur latente LE et flux de stockage GFLUX et différence « ville – végétation » entre les flux de chaleur sensible H, flux de chaleur latente LE et flux de stockage GFLUX (à droite) moyennés sur la partie urbaine et sur la partie rurale le 10 août 2003 sur le domaine « Paris – PC ».	45
Figure 37 : Profils verticaux de température de l'air simulée par le modèle dans le canyon urbain la nuit (bleu) et le jour (rouge) sur les 6 stations de mesures horaires disponibles sur le domaine « Paris – PC ».	47
Figure 38 : Profils verticaux de température de l'air simulée par le modèle dans le canyon urbain pour les 5 jours de simulation sur les 6 stations de mesures horaires disponibles sur le domaine « Paris – PC ».	49
Figure 39 : Profils verticaux d'humidité spécifique de l'air (en haut) et de vent (en bas) simulés par le modèle dans le canyon urbain la nuit (bleu) et le jour (rouge) sur Paris-Montsouris (à gauche) et Belleville_Parc (à droite).	50
Figure 40 : Coupes verticales de température potentielle ($^{\circ}C$) (à gauche) et d'énergie cinétique turbulente (m^2s^{-2}) (à droite), auxquelles sont superposées les barbules de vent, simulées par le modèle le 11 août 2003 à 02 UTC et 14 UTC. La trace de la coupe verticale est montrée en bas.	52
Figure 41 : Contenu en eau moyen sur toute la période du réservoir superficiel du sol (en mm).	53
Figure 42 : Contenu en eau moyen du réservoir superficiel du sol en moyenne quotidienne (en mm).	54
Figure 43 : Températures minimales moyennes observées sur l'IDF du 08 au 13 août 2003.	55
Figure 44 : Îlot de chaleur urbain simulé par le modèle sur le domaine « IDF » : moyenne des températures de l'air à 2 m (à gauche) et des températures sur le 1 ^{er} niveau du modèle à 30 m (à droite) à 02, 03 et 04 UTC les 5 nuits de la simulation.	56
Figure 45 : Îlot de chaleur urbain simulé par le modèle sur le domaine « Paris – PC » : moyenne des températures de l'air à 2 m (à gauche) et des températures sur le 1 ^{er} niveau du modèle à 30 m (à droite) à 02, 03 et 04 UTC les 5 nuits de la simulation.	57

Figure 46 : Coupe transversale (traversant les 16 ^{ème} , 8 ^{ème} , 9 ^{ème} , 10 ^{ème} et 20 ^{ème} arrondissements d'ouest en est) de la moyenne des températures de l'air à 2 m à 02, 03 et 04 UTC les 5 nuits de la simulation pour la situation de référence.....	58
Figure 47 : Coupe transversale (traversant les 16 ^{ème} , 8 ^{ème} , 9 ^{ème} , 10 ^{ème} et 20 ^{ème} arrondissements d'ouest en est) de la moyenne des températures de l'air à 30 m à 02, 03 et 04 UTC les 5 nuits de la simulation pour la situation de référence.....	58
Figure 48 : Îlot de chaleur urbain simulé par le modèle (moyenne des températures de l'air à 2 m à 02, 03 et 04 UTC) pour les 5 nuits de la simulation sur le domaine « Paris – PC ».	60
Figure 49 : Îlot de chaleur urbain simulé par le modèle (moyenne des températures de l'air à 30 m à 02, 03 et 04 UTC) pour les 5 nuits de la simulation sur le domaine « Paris – PC ».....	61
Figure 50 : Températures à 2 m simulées par le modèle entre le 09 août 2003 à 19 UTC et 10 août 2003 à 07 UTC sur le domaine « Paris – PC ».....	64
Figure 51 : Moyennes diurne (à gauche) des températures à 2 m simulées par le modèle sur le domaine « Paris – PC » sur l'ensemble de la période.....	65
Figure 52 : Boîtes à moustaches de la température à 2 m en moyenne diurne en fonction de la fraction d'eau dans la maille (à gauche) et en moyenne nocturne en fonction de la fraction de végétation dans la maille (à droite) sur toute la période de simulation. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).	65
Figure 53 : Moyennes diurne (à gauche) et nocturne (à droite) des températures sur le 1 ^{er} niveau du modèle à 30 m simulées par le modèle sur le domaine « Paris – PC » sur l'ensemble de la période.....	66
Figure 54 : Moyennes diurne (à gauche) et nocturne (à droite) des températures au niveau des toits simulées par le modèle sur le domaine « Paris – PC » sur l'ensemble de la période.....	67
Figure 55 : Boîtes à moustaches de la température au niveau des toits en moyenne diurne en fonction de la fraction de ville réelle dans la maille (à gauche) et en moyenne nocturne en fonction du type de toit (à droite) sur toute la période de simulation. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).	67
Figure 56 : Moyennes diurne (à gauche) et nocturne (à droite) des températures au niveau des façades des murs simulées par le modèle sur le domaine « Paris – PC » sur l'ensemble de la période.....	68
Figure 57 : Boîtes à moustaches de la température au niveau des murs en moyenne diurne en fonction de la fraction de ville réelle dans la maille (à gauche) sur toute la période de simulation. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).	68
Figure 58 : Moyennes diurne (à gauche) et nocturne (à droite) des températures au niveau des routes simulées par le modèle sur le domaine « Paris – PC » sur l'ensemble de la période.....	69
Figure 59 : Boîtes à moustaches de la température au niveau des routes en fonction du rapport d'aspect en moyenne diurne (à gauche) et en moyenne nocturne (à droite) sur toute la période de simulation. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value).....	70
Figure 60 : Boîtes à moustaches de la température au niveau des routes en moyenne nocturne en fonction de la fraction de ville réelle dans la maille sur toute la période de	

simulation. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value)..... 70

Figure 61 : Moyenne des températures internes des bâtiments simulées par le modèle sur le domaine « Paris – PC » sur l'ensemble de la période..... 71

Figure 62 : Boîtes à moustaches de la température interne des bâtiments en fonction du type de toit sur toute la période de simulation. Sont indiqués sur le graphique le coefficient de corrélation et la valeur du test de significativité de cette corrélation (p-value)..... 71

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résolutions spatiales et temporelles des 3 modèles utilisés.....	5
Tableau 2 : Caractéristiques des toits par type de toit pour l'ensemble du domaine.	16
Tableau 3 : Caractéristiques des murs pour Paris <i>intra muros</i> par classe d'âge du bâtiment.	20
Tableau 4 : Caractéristiques des murs pour la banlieue (Petite Couronne et une petite partie de la Grande Couronne) par type d'habitat (individuel ou collectif, déterminé en fonction du type de toit).	21
Tableau 5 : Erreurs quadratiques moyennes sur la température de l'air à 2 m au pas de temps horaire et pour les six stations du domaine « Paris – PC », sur l'ensemble de la période de simulation et jour par jour.	28
Tableau 6 : Erreurs quadratiques moyennes sur la température de l'air à 2 m au pas de temps horaire et pour les six stations du domaine « Paris – PC », sur l'ensemble de la période de simulation et jour par jour.	31

Annexes

Annexe A : Note sur la préparation des données physiographiques en entrée de SURFEX pour l'agglomération parisienne

Annexe B : Bilan radiatif

