

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 3

*Lien entre l'urbanisme et le climat urbain : tests de sensibilité dans le
contexte de la canicule de l'été 2003*



Introduction	5
1 Méthodologie	8
1.1 Modèles utilisés	8
1.2 Base de données du couvert urbain parisien	8
1.3 Caractéristiques thermiques des parois opaques du bâti parisien	10
2 Présentation des scénarios	14
2.1 Scénario de référence	14
2.2 Scénario réfléchissant	17
2.3 Scénario de verdissement	18
2.3.1 Végétalisation des surfaces de terre	18
2.3.2 Végétalisation partielle des chaussées	19
2.4 Humidification des chaussées	22
2.5 Scénario récapitulatif	24
2.6 Scénario supplémentaire	24
2.7 Synthèse des scénarios simulés	24
3 Faisabilité des scénarios	26
3.1 Modifier les propriétés radiatives des surfaces	26
3.1.1 Principe	26
3.1.2 Portée et limites	26
3.1.3 Technologies/produits	26
3.2 Verdissement	27
3.2.1 Principe	27
3.2.2 Portée et limites	27
3.3 Arroser les rues	28
3.3.1 Principe	28
3.3.2 Portée et limites	28
3.4 Conclusions sur la faisabilité des scénarios	28
4 Résultats	30
4.1 Impacts sur le bilan d'énergie	30
4.1.1 Impacts sur le bilan d'énergie du scénario S1	30
4.1.2 Impacts sur le bilan d'énergie des scénarios S2 et S2bis	33
4.1.3 Impacts sur le bilan d'énergie du scénario S3	35
4.1.4 Impacts sur le bilan d'énergie du scénario Stot	37
4.2 Impacts sur la température à 2 m	39
4.3 Impacts sur l'humidité relative	46
4.4 Impact sur la vitesse du vent	49
4.5 Impact sur les précipitations	49
4.6 Impacts sur l'humidité des sols	51
4.7 Analyse verticale	55
4.7.1 Température	55
4.7.2 Température au-dessus de la canopée urbaine	62
4.7.3 Humidité spécifique	64
4.7.4 Vent	64
4.8 Analyse de l'ICU	65
4.8.1 Impacts sur l'ICU calculé à partir des températures à 2 m	65
4.8.2 Impacts sur l'ICU calculé à partir des températures à 30 m	75
4.9 Analyse des températures spécifiques à la zone urbaine	81

4.9.1	Températures au niveau des toits	81
4.9.2	Températures au niveau des murs	83
4.9.3	Températures au niveau des routes	85
	Conclusions	89
	Références	92
	Liste des figures	97
	Liste des tableaux	102

Introduction

L'interaction entre des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes, d'une part, et des systèmes humains et naturels exposés et vulnérables, d'autre part, peut engendrer des catastrophes. Comprendre et gérer les risques associés aux extrêmes climatiques, pour les besoins notamment de l'adaptation au changement climatique, est un véritable enjeu aujourd'hui. La fréquence et l'intensité de certains types de phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes ont augmenté à l'échelle du globe, mais c'est aussi le cas des populations et des biens exposés aux risques et par conséquent des risques de catastrophes.

Les dommages économiques provoqués par les catastrophes liées au temps et au climat se sont accrus, mais de façon très variable d'une zone et d'une année à l'autre. L'exposition grandissante des personnes et des biens est la principale cause de la hausse durable des pertes économiques occasionnées par les catastrophes liées au temps et au climat. Les tendances que présentent les pertes à long terme, compte tenu de l'augmentation de la richesse et de l'accroissement de la population, n'ont pas été attribuées au changement climatique, sans qu'une contribution du climat ne soit pour autant exclue (IPCC 2012).

La gravité des impacts et les risques de catastrophes dépendent fortement du degré d'exposition et de vulnérabilité aux extrêmes climatiques. Il est indispensable de comprendre la nature pluridimensionnelle de l'exposition et de la vulnérabilité pour déterminer comment les phénomènes liés au temps et au climat concourent aux catastrophes et pour élaborer et mettre en oeuvre des stratégies efficaces d'adaptation et de gestion des risques. La réduction de la vulnérabilité constitue un élément central commun à l'adaptation et à la gestion des risques de catastrophes. Les extrêmes climatiques auront une incidence marquée sur les secteurs qui sont étroitement liés au climat tels que les ressources en eau, l'agriculture et la production alimentaire, la sylviculture, la santé, le tourisme, *etc.* (Rosenzweig et Solecki 2001). Pour pouvoir préparer les villes à ce changement, il est donc nécessaire d'évaluer leur vulnérabilité afin d'élaborer des stratégies d'adaptation.

Les observations effectuées depuis 1950 indiquent que certaines valeurs extrêmes changent. Il est très probable que le nombre de journées et de nuits chaudes a globalement augmenté à l'échelle de la planète. Il est probable que ces changements sont également survenus à l'échelle continentale en Amérique du Nord, en Europe et en Australie. On estime que la durée ou le nombre de périodes chaudes, ou de vagues de chaleur, a progressé dans un grand nombre de régions du globe. Certains extrêmes ont varié sous l'effet des activités humaines, notamment en raison de la hausse des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Il est ainsi probable que les influences d'origine anthropique ont entraîné une élévation des températures minimales et maximales quotidiennes sur la planète (IPCC 2012).

Les modèles prévoient une élévation prononcée des températures extrêmes d'ici à la fin du 21^{ème} siècle (Lemonsu *et al.* 2012 et EPICEA Volet 1 2010). Il est pratiquement certain que l'on observera à l'échelle du globe une augmentation en fréquence et en ordre de grandeur des valeurs extrêmes des températures maximales quotidiennes et une diminution des valeurs extrêmes minimales au cours du 21^{ème} siècle. Il est très probable que la durée, la fréquence et/ou l'intensité des périodes chaudes ou des vagues de chaleur s'accroîtront sur la majeure partie des terres émergées. Selon les scénarios d'émissions A1B et A2, il est probable qu'une journée extrêmement chaude qui revient actuellement tous les 20 ans se répétera tous les 2 ans d'ici à la fin du siècle dans la plupart des régions du globe (IPCC 2012). Ainsi, un phénomène de type caniculaire comme l'été 2003 pourrait concerner l'Europe

de l'Ouest un été sur deux à la fin du 21^{ème} siècle (IPCC 2007). Ces phénomènes viendront s'ajouter au microclimat spécifique des villes lié à la forme urbaine. De ce fait, l'îlot de chaleur urbain (ICU), processus majeur du climat urbain (Oke 1987), s'additionnera à une augmentation de l'intensité et de la durée des vagues de chaleur. En 2003, pendant l'épisode de canicule qui a touché l'Europe, la différence entre les températures minimales observées sur Paris et sur les zones rurales environnantes a atteint 6 °C (Kounkou-Arnaud *et al.* 2012 et EPICEA Volet 2 2011) et l'analyse de longues séries d'observation pour des stations situées dans des environnements urbanisés a déjà mis en évidence la présence d'un signal sur les températures lié à l'ICU. Ce signal se superpose à la tendance de macro-échelle, renforçant ainsi localement l'effet du réchauffement global (Gaffin *et al.* 2008, Fujibe 2010).

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.* 2011), les ICU (Wilby 2003), ou de manière plus générale (sur Paris comme dans le volet 1 du projet EPICEA : Lemonsu *et al.* 2012 et EPICEA Volet 1 2010, sur Delhi, Inde : Kikegawa *et al.* 2012, sur Nagoya, Japon : Iizuka *et al.* 2012, sur Cologne, Allemagne : Kossman *et al.* 2012 et Ptak et Halbig 2012). Une alternative est de s'intéresser à un événement exceptionnel survenu dans le passé sur la zone d'intérêt, et dont la fréquence augmenterait sensiblement dans les décennies à venir. Les épisodes de vagues de chaleur en sont de très bons exemples. La perspective d'un nouveau contexte climatique caractérisé par des canicules plus fréquentes et le souvenir récent de cet événement incitent à identifier quels paramètres peuvent avoir une influence sur les caractéristiques des îlots de chaleur urbains. De nombreuses études récentes menées sur différentes villes du monde s'attachent à ce dernier point, en analysant l'impact :

- de la modification de l'albédo des surfaces (Erell *et al.* 2012) ;
- de la végétation à travers les toitures végétalisées (Rosenzweig *et al.* 2006 sur New York, Etats-Unis, Kakitsuba et Amagai 2012, Speak *et al.* 2012 sur les différentes espèces possibles), les murs végétaux (Honjo *et al.* 2012, Futchter *et al.* sur Sao Paulo, Brésil) sur les arbres dans la ville (Coutts *et al.* 2012 et White *et al.* 2012 sur Melbourne, Australie, Kumar *et al.* 2012 sur Adelaide, Australie, Abreu *et al.* 2012 et Potchter *et al.* 2012 sur les différentes espèces d'arbres possibles, Konarka *et al.* 2012 sur Göteborg, Suède, Balogun *et al.* 2012 sur Akure, Nigéria) ou plus généralement la végétation intégrée dans la ville (Sun 2012 sur Taipei, Taiwan, Skelhorn *et al.* 2012 sur Manchester, Royaume Uni, Monteiro et Alucci 2012 sur Sao Paulo, Brésil, Pardyjak *et al.* 2012, Szegedi *et al.* 2012 sur Drebecen, Hongrie) ;
- de la présence d'eau dans la ville (Wong *et al.* 2012 sur Singapour, Masiero et Souza 2012 sur São José do Rio Preto, Brésil, Nice *et al.* 2012 sur Preston, Australie) ;
- de la morphologie urbaine / géométrie de la rue (Drach *et al.* 2012 sur Glasgow, Royaume Uni, Sun et Meng 2012 sur Taichung, Taiwan, Dimoudi *et al.* 2012 sur Serres, Grèce, Dubois *et al.* 2012 sur Québec, Canada) et des effets d'ombre (Fahmy *et al.* 2012 sur Karkar, Egypte, Xuan *et al.* 2012 sur Sendai, Japon et Guangzhou, Chine, Lei *et al.* 2012 sur différentes villes de Chine) ;
- de la combinaison d'un ensemble de ces leviers (Müller et Kuttler 2012 sur Oberhausen, Allemagne, Zuvela-Aloise *et al.* 2012 sur Vienne, Autriche, Johansson et Yahia 2012 sur Guayaquil, Equateur, Shahmohamadi *et al.* 2012 sur Téhéran, Israël, Hirano *et al.* 2012, Middel *et al.* 2012 sur Phoenix, Arizona).

Nos travaux s'insèrent dans le cadre du projet EPICEA (Desplat *et al.* 2009), mené conjointement par Météo-France, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB) et la Ville de Paris pour apporter une aide à la décision dans un contexte d'adaptation du territoire parisien face au changement climatique. L'objectif central du projet est de quantifier l'impact du changement climatique à l'échelle

de la ville et l'influence du bâti sur le climat urbain afin de proposer des stratégies d'adaptation. Le présent rapport concerne le volet 3 du projet sur le lien entre l'urbanisme et le climat urbain et présente les tests de sensibilité effectués dans le contexte météorologique de la canicule de l'été 2003 afin de proposer des scénarios d'adaptation au changement climatique.

Plusieurs études se sont déjà penchées sur la vague de chaleur de 2003 (Bessemoulin *et al.* 2004, Beniston et Diaz 2004, Vautard *et al.* 2007), mais la plupart d'entre elles sont axées sur la qualité de l'air et la pollution ou sur la santé et la mortalité excessive due à la chaleur. Notre étude aborde le sujet en termes de stratégies d'adaptation et utilise la canicule 2003 comme un laboratoire de travail pour les étés futurs. Des simulations numériques de la période allant du 08/08/2003 au 13/08/2003, correspondant au pic de surmortalité observé sur le territoire français et plus particulièrement à Paris (Hemon et Jouglé 2003), sont réalisées avec un maillage haute résolution (250 m). Elles utilisent le modèle atmosphérique Méso-NH (Lafore *et al.* 1998), couplé au schéma de surface SURFEX (Le Moigne 2009, Salgado et Le Moigne 2010) qui inclut notamment le schéma de couvert urbain Town Energy Budget, TEB (Masson 2000) pour les parties bâties et le schéma Interaction Sol-Biosphere-Atmosphere, ISBA (Noilhan et Planton 1989, Noilhan et Mahfouf 1996) pour les couverts naturels.

1 Méthodologie

1.1 Modèles utilisés

La méthodologie retenue s'appuie sur l'utilisation d'un modèle de recherche en prévision numérique du temps développé à Météo-France, le modèle MESO-NH, et un système de modélisation des surfaces continentales, SURFEX, présentés plus amplement dans le rapport sur le volet 2 de ce projet (EPICEA Volet 2 2011). En particulier, les schémas TEB et ISBA, modules spécifiques appliqués respectivement aux villes (surfaces minéralisées) et aux couverts naturels, y sont détaillés. TEB est utilisé dans sa version végétalisée avec intégration de la végétation directement dans la ville (Lemonsu *et al.* 2012). La partie « couvert végétal » ne fonctionne pas indépendamment de la partie « ville » puisque ISBA est appelé directement par TEB et les deux schémas sont couplés : la végétation est considérée comme des jardins urbains. Par ailleurs, la clé CANOPY (Hamdi et Masson 2008, Masson et Seity 2009), permettant de détailler différents niveaux au sein même de la canopée urbaine, est activée.

1.2 Base de données du couvert urbain parisien

La surface est décrite au moyen d'une base de données du couvert urbain parisien à la résolution de 250 m établie en collaboration avec l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR), présentée elle aussi dans le rapport sur le volet 2 de ce projet (EPICEA Volet 2 2011).

On présente ici les données de surface auxquelles nous allons nous intéresser pour les tests de sensibilité :

- types de toiture (Figure 1) ;
- types de bâtiment (Figure 2) ;
- fraction de végétation (Figure 3) ;
- fraction de sol nu (Figure 4) ;
- fraction de bitume (Figure 5).

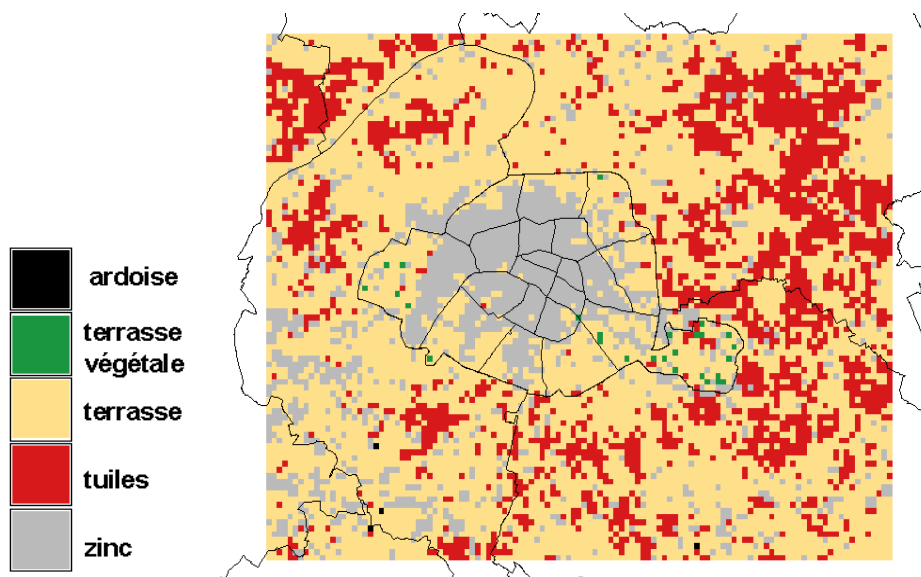


Figure 1 : Base de données du couvert urbain parisien : Répartition par maille des types de toits majoritaires, classés par matériau.

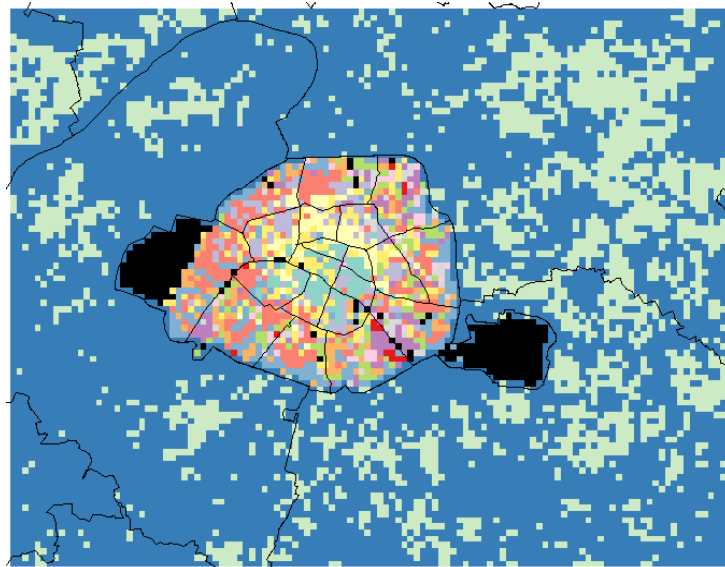


Figure 2 : Base de données du couvert urbain parisien : Répartition par maille des types de murs des bâtiments majoritaires, triés par classe d'âge.

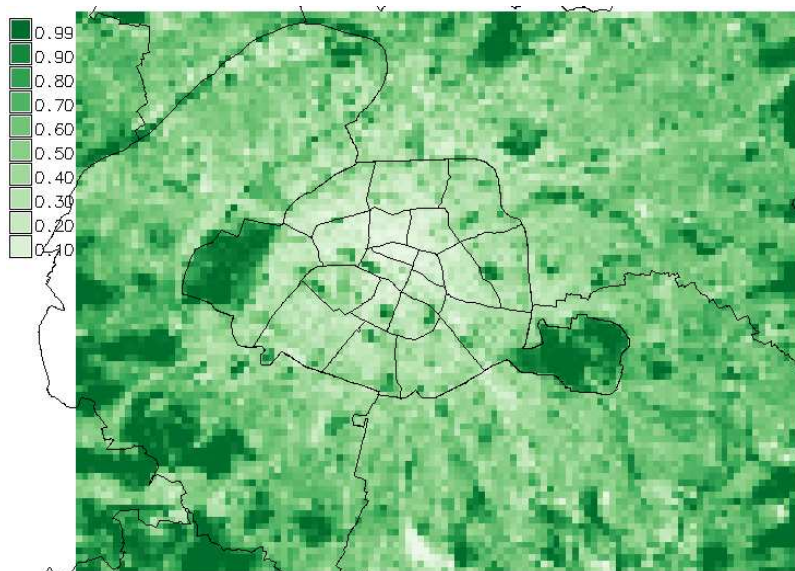


Figure 3 : Base de données du couvert urbain parisien : Fraction de végétation par maille.

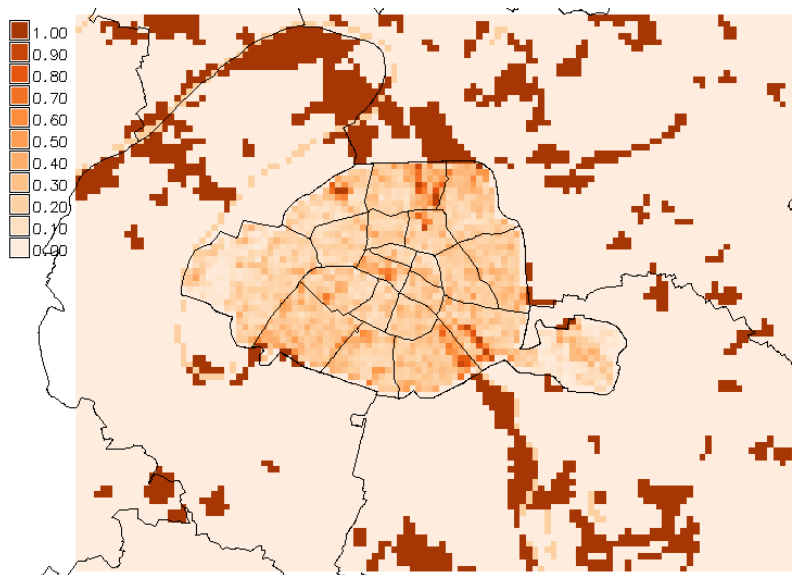


Figure 4 : Base de données du couvert urbain parisien : Fraction de sol nu par maille.

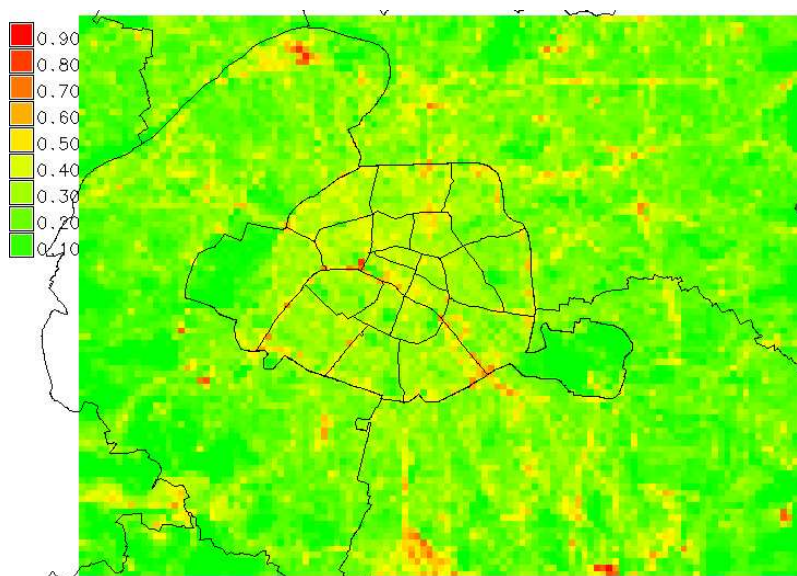


Figure 5 : Base de données du couvert urbain parisien : Fraction de bitume (rues et surfaces bitumées) par maille.

1.3 Caractéristiques thermiques des parois opaques du bâti parisien

Une analyse détaillée des caractéristiques thermiques des parois opaques des bâtiments composant le patrimoine bâti parisien – toitures et murs – a été effectuée par le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). En effet, 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 et sensible 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.*). Ces parois sont un des facteurs sur lequel on se propose de jouer en tant que levier urbain lors de nos tests de

sensibilité. On rappelle préalablement ici les propriétés thermiques et radiatives des toits et murs appliqués dans notre étude (Tableau 1, Tableau 2 et Tableau 3).

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	0.008	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	0.01	1 600 000	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 1 : Caractéristiques des toits par type de toit pour l'ensemble du domaine.

code	classe APUR âge bâtiment	% total (sauf non datés)	U mur W/m² K	épaisseur totale mur m
1	avant 1800	10%	1.99	0.36
2	1800-1850	15%	2.08	0.41
3	1851-1890	49%	2.30	0.43
4	1891-1914		2.30	0.43
5	1918-1939	9%	2.25	0.31
6	1945-1967	5%	3.10	0.23
7	1968-1974	3%	3.10	0.23
8	1975-1981	2%	2.20	0.23
9	1982-1989	2%	1.68	0.23
10	1990-1999	4%	1.05	0.24
11	après 2000	1%	0.81	0.25
99	non daté		2.22	0.31
20	non référéncé			0.43

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

Tableau 2 : 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 3 : Caractéristiques des murs pour la Petite Couronne par type d'habitat (individuel ou collectif).

2 Présentation des scénarios

L'étude de Colombert (2008) a permis d'identifier les paramètres susceptibles d'affecter le climat urbain et plus particulièrement les îlots de chaleur urbain. Ce sont les « leviers urbains ». Ils se regroupent en différents types : propriétés radiatives des surfaces, zones vertes, *ie.* végétales, et zones bleues, *ie.* aquatiques. Différents tests de sensibilité sont menés en modifiant ces paramètres afin de quantifier leur impact sur le climat urbain, dans le contexte météorologique de la canicule 2003.

Les différents scénarios considérés pour ces tests de sensibilités sont :

- (1) un scénario réfléchissant en modifiant les propriétés des parois ;
- (2) un scénario de verdissement de la ville (sans toucher au bâti) ;
- (3) un scénario d'humidification des chaussées ;
- (4) un scénario qui combine ces 3 aspects, réfléchissant en modifiant les parois, verdissement sans toucher au bâti et humidification des chaussées ;
- (5) un dernier scénario peut être envisagé. Volontairement plus tranché et poussé à l'extrême, il s'intéressera à un remaniement du bâti afin de verdir et éventuellement bleuir la ville à grande échelle. Il sera précisé au regard des résultats obtenus sur les précédents scénarios.

L'étude portant sur l'agglomération parisienne et étant réalisée en partenariat avec la Ville de Paris, ces modifications ne sont appliquées que sur Paris *intra muros*.

2.1 Scénario de référence

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 Méso-NH (EPICEA Volet 2 2011). Cette première simulation, dite de référence, est effectuée à la résolution de 250 m avec les caractéristiques actuelles de Paris issues d'une description précise de Paris en termes d'occupation des sols et de morphologie du bâti élaborée en collaboration avec l'APUR.

Elle représente correctement l'évolution de la température et du vent et le cycle d'humidité diurne, ainsi que les différents processus impliqués dans le climat urbain. Les résultats montrent notamment (Figure 6) :

- un îlot de chaleur urbaine (ICU) sur les températures à 2 m qui 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 7 °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). Cet ICU est piloté par le phénomène de refroidissement, qui se fait plus rapidement et de manière plus importante sur les zones végétalisées ;
- un ICU sur les températures à 30 m de l'ordre de 2 °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 panache urbain sur les températures à 2 m qui, selon la force du vent, peut se former sous le vent en aval de la zone la plus chaude conduisant à une hausse des températures jusqu'à 2 °C sur les arrondissements périphériques et les communes avoisinantes. 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 ;
- un panache urbain sur les températures à 30 m au sud-est de Paris sur le nord du Val-de-Marne ;

- des micro ICU au sein même de Paris de 2 à 4 ° C ;
- la présence d'eau comme facteur de refroidissement prépondérant des températures à 2 m durant la journée, tandis que la nuit, ce sont les zones de végétation ;
- le rôle très important du type de bâtiment 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 ;
- la forte instabilité de la couche limite urbaine (CLU), 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.

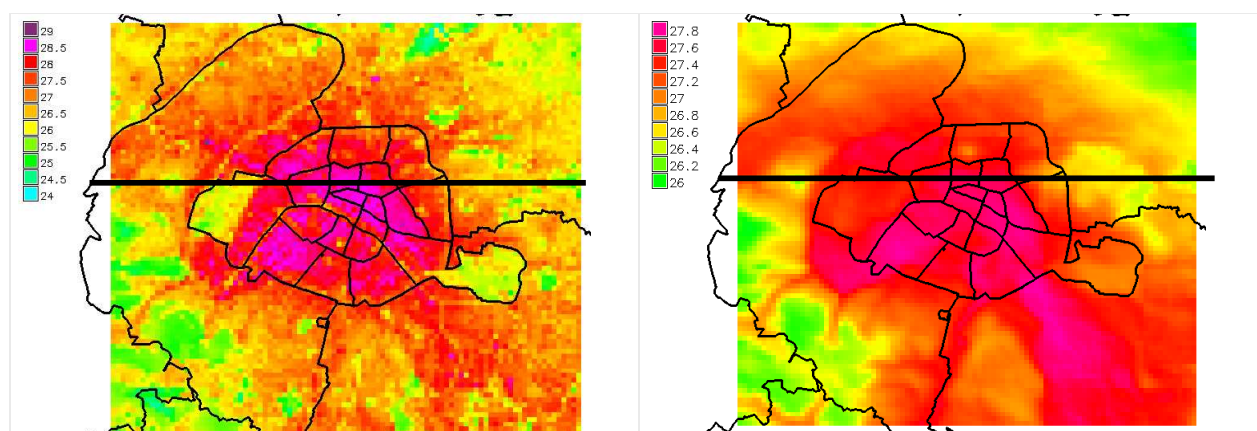


Figure 6 : Mise en évidence de l'îlot de chaleur urbain : moyenne des températures à 2 m (à gauche) et à 30 m (à droite) à 02, 03 et 04 UTC pour les 5 nuits de simulation.

La coupe transversale (Figure 7) indiquée en noir sur la Figure 6 montre une structure classique d'ICU, qui permet de voir l'influence du couvert sur la température (notamment les influences des zones densément urbanisées au centre, du bois de Boulogne et de la Seine). On met ainsi en évidence une amplitude d'ICU dans cette direction d'environ 3.5°C, amplitude que l'on tentera de diminuer par le biais des tests de sensibilité.

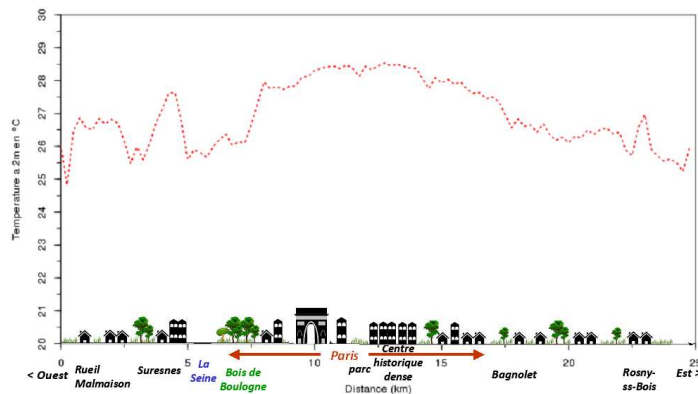


Figure 7 : Coupe transversale (traversant les 16^{ème}, 8^{ème}, 9^{ème}, 10^{ème} et 20^{ème} arrondissements d'ouest en est) de la température moyenne à 02, 03 et 04 UTC à 2 m pour la situation de référence, mettant en évidence l'îlot de chaleur urbain sur Paris *intra muros*.

A 30 m, cette structure d'ICU est encore visible (Figure 8), notamment avec les zones moins urbanisées à l'est de Paris. Le minimum de température (26.2°C) sur la coupe dans la direction ouest correspond au Mont Valérien qui culmine à plus de 160 m de hauteur et est en partie couvert de végétation. Au-dessus du centre densément urbanisé de Paris, la température à 30 m atteint les 27.7 °C tandis qu'elle diminue à 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.

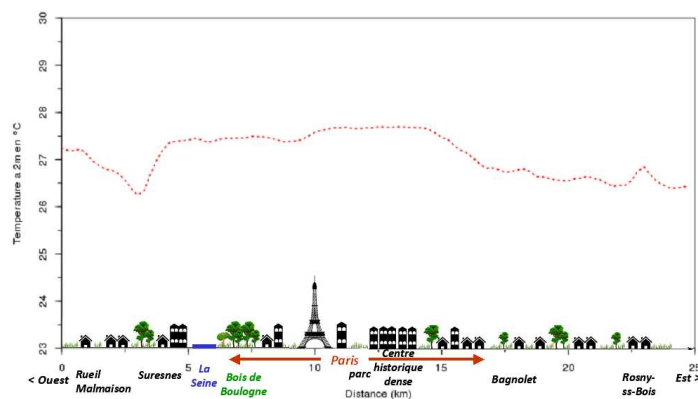


Figure 8 : Coupe transversale (traversant les 16^{ème}, 8^{ème}, 9^{ème}, 10^{ème} et 20^{ème} arrondissements d'ouest en est) de la moyenne des températures de l'air à 30 m à 02, 03 et 04 UTC les 5 nuits de la simulation pour la situation de référence.

Cette première phase de notre 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 pour la période considérée). Le but des tests de sensibilités est de diminuer l'intensité notamment de cet ICU sur Paris *intra muros*.

2.2 Scénario réfléchissant

Nous faisons l'hypothèse d'une modification donnant aux matériaux de façade les propriétés d'un marbre très « blanc », avec un albédo de 0.8 et une émissivité de 0.9 (Figure 9). Techniquement, des revêtements adaptés aux différents supports existants (bardages, membranes, peintures) pourraient être envisagés mais la question reste à étudier, de même que celle de l'évolution dans le temps des propriétés initiales.



Figure 9 : Albédo des murs sur le domaine : référence à gauche, albédo uniforme sur le domaine, et scénario S1 (réfléchissant) à droite.

En ce qui concerne les toitures, on s'intéresse aux couvertures rafraîchissantes (cool roofs). Des membranes ou enduits spécifiques, caractérisés par des valeurs élevées de l'albédo (0.9) et de l'émissivité (0.9), utilisés comme matériau de couverture permettent de limiter le flux de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment. Ceci doit contribuer à limiter l'apport d'énergie aux espaces intérieurs. Comme la majorité des toitures parisiennes sont recouvertes de zinc ou bien sont du type toiture terrasse, nous considérerons uniquement les modifications de ces deux catégories de couverture (Figure 10 et Figure 11).

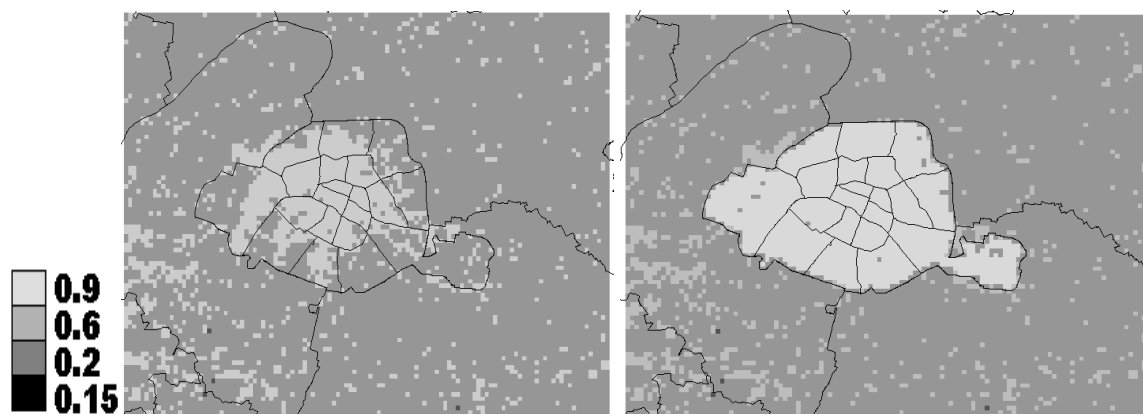


Figure 10 : Albédo des toits sur le domaine : référence à gauche et scénario S1 (réfléchissant) à droite.

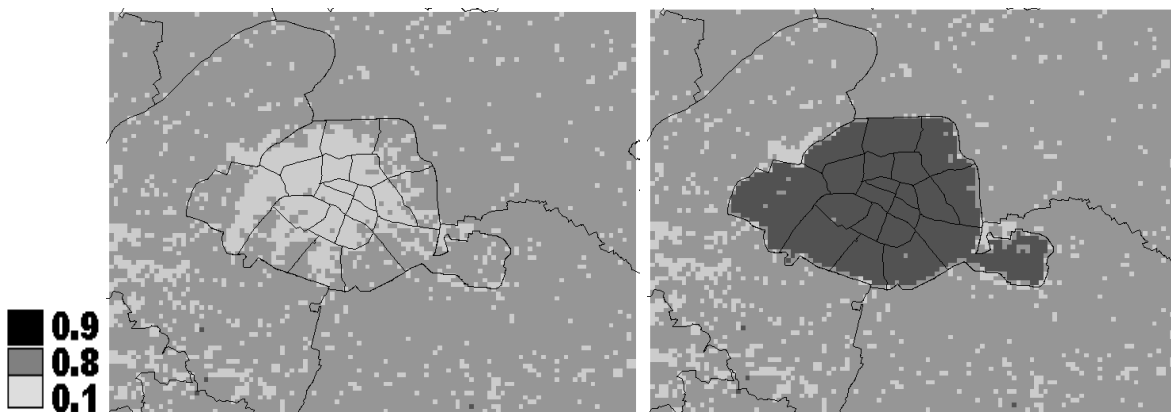


Figure 11 : Emissivité des toits sur le domaine : référence à gauche et scénario S1 (réfléchissant) à droite.

Ces modifications de l'albédo des toits et des murs induisent un pouvoir plus réfléchissant dans le visible.

2.3 Scénario de verdissement

Il s'agit de recouvrir les surfaces concernées de végétation adaptée. Deux cas seront testés :

- la végétation évolue librement dans les conditions hydrologiques de la canicule 2003 (sécheresse) : scénario S2 ;
- végétation continuellement arrosée afin d'échanger de la chaleur latente : scénario S2bis.

Le choix est fait d'implanter de la végétation basse (type pelouse). Les surfaces candidates à un verdissement sont les surfaces de terre, les chaussées et les toitures. On ne traitera pas ici le verdissement des toitures en raison des limites actuelles de TEB en terme de modélisation de toitures végétalisées. On se propose donc de verdier les surfaces de terre disponibles ainsi qu'une partie des rues dites « larges ».

L'arrosage des jardins est simulé de façon très simple : le contenu en eau des réservoirs du sol naturel dans les jardins est forcé à 50%. La végétation n'est jamais en stress hydrique et elle peut évaporer et ainsi échanger de la chaleur latente avec l'atmosphère.

Un scénario supplémentaire a par ailleurs été testé en simulant un Paris dit « verdi » avec ajout de végétation haute dans la ville. La végétation est dans ce cas laissée libre d'évoluer dans les conditions hydrologiques de la canicule 2003 (pas d'apport d'eau extérieur). La description précise de ce scénario se trouve en annexe.

2.3.1 Végétalisation des surfaces de terre

La base de données établie avec l'APUR ainsi que la base de données ECOCLIMAP (Masson *et al.* 2003) permettent d'estimer la surface totale dans Paris *intra muros* de :

- végétation : 39 644 246 m², soit 3 964 ha de végétation (Figure 3) ;
- terre nue : 8 625 487 m², soit 862 ha (Figure 4) ;
- végétation basse : 13 101 726 m² soit 1310 ha.

Sous l'appellation « terre nue », on regroupe :

- les zones de sol « nu » (terre, roche, surfaces sableuses, etc.) ;
- les allées, généralement sablées, des parcs, jardins, cimetières ;
- les voies de chemin de fer et leurs abords (ballast, accotements, talus de remblai ou déblai).

Nous considérons l'hypothèse d'un verdissement de la totalité des surfaces de terre nue malgré la difficulté de la tâche liée à la dispersion de ces surfaces et à leurs usages variés. Un verdissement total de l'ensemble de ces surfaces de terre conduit à une hausse de 66 % de la végétation basse.

2.3.2 Végétalisation partielle des chaussées

Il s'agit ici de verdir une partie des rues dites larges. Il faut tout d'abord définir la notion de rues larges au sein du modèle. Pour cela, on va déterminer la largeur des rues en utilisant la relation existant entre le rapport d'aspect (rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur de rue), la largeur de rue et le facteur de forme du bâti (« wall_o_hor » qui donne lui aussi une indication sur l'encaissement de la rue canyon).

Par définition : $rapport\ d'aspect = \frac{hauteur\ des\ bâtiments}{largeur\ de\ rue}$

Dans TEB : $rapport\ d'aspect = \frac{0.5 * Wall_o_hor}{1 - fraction\ de\ bâti}$

On en déduit ensuite la largeur de rue : $largeur\ de\ rue = \frac{hauteur\ des\ bâtiments * (1 - fraction\ de\ bâti)}{0.5 * Wall_o_hor}$

Quelques calculs préalables sur les données dont on dispose sont nécessaires.

- 1) Tout d'abord, on va restreindre les mailles utilisées pour le calcul à celles avec une fraction de bâti suffisamment importante pour s'affranchir des espaces contenant de vastes portions de routes (périphérique, grandes places, etc.) qui, n'étant pas des rues à proprement parler, pourraient fausser le calcul.

On considère les mailles avec une fraction de bâti supérieure à 25 %. Cette valeur représente un bon compromis pour déterminer la largeur des rues : on s'affranchit du périphérique, des abords de la Seine et des principales grandes places (Figure 12). La valeur de largeur de rue obtenue sera ainsi plus réaliste, en tout cas se rapportera plus à ce qu'on entend communément par « rue » (pas seulement une surface bitumée).

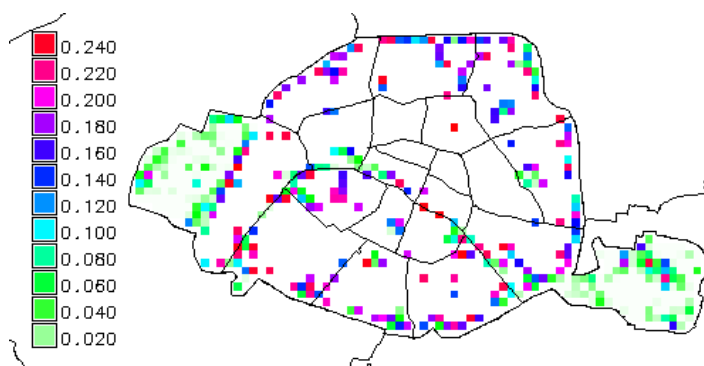


Figure 12 : Mailles pour lesquelles la fraction de bâti est inférieure à 25 %, supprimées dans le cadre du calcul de la largeur de rues.

- 2) La largeur de rue obtenue intègre l'ensemble de la végétation puisqu'on travaille avec la végétation sous forme de jardins intégrés dans TEB. On va donc s'affranchir de la végétation pour le calcul de la largeur de rue. Le calcul montre que :

$$\text{largeurderuehorsvégétation} = \frac{\text{largeurderueavecvégétation} * \text{surfacederoute}}{\text{surfacedevégétation} + \text{surfacederoute}}$$

3) Cependant, la végétation considère à la fois les arbres d'alignement et la végétation sous forme d'espaces verts. On va donc séparer ces deux « types » de végétation de ville.

On détermine au préalable la surface des arbres d'alignement dans la maille :

- Disposant des données précises sur les arbres d'alignement à Paris (ParisData 2011), on dénombre le nombre d'arbres d'alignement par maille ainsi que leur circonférence moyenne (87.55 cm) en ne considérant que les arbres majoritaires (platanes, érables, marronniers, sophoras et tilleuls : 75.8 % des arbres d'alignement).
- On considère que le rapport diamètre du houppier/ diamètre du fût à 1.3 m est compris entre 12 et 23 selon les espèces majoritaires (Bastien 2002). On considère la valeur moyenne de 18.

$$\text{diamètrémoyendufût} = \frac{2 * \text{Circ}}{2 * \pi} = \frac{87.55}{\pi} = 27.87 \text{ cm}$$

$$\rightarrow \text{diamètrémoyenduhouppier} = 18 * 27.87 = 501.6 \text{ cm} = 5 \text{ m}$$

$$\rightarrow \text{surfacedmoyenneduhouppier} = \pi * \left(\frac{5}{2}\right)^2 = 19.6 \text{ m}^2 = 20 \text{ m}^2 \text{ par arbre}$$

- On en déduit la surface moyenne d'arbres d'alignement par maille :

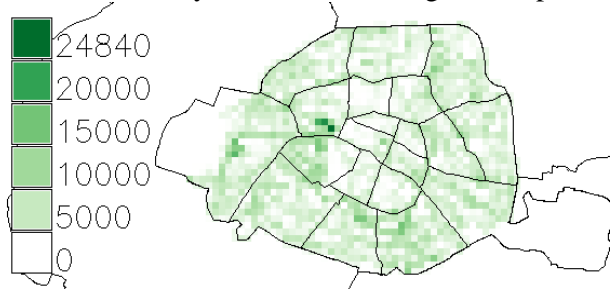


Figure 13 : Surface en m² d'arbres d'alignement par maille (surface du houppier donc « vue de haut »).

- Puis on supprime la surface de végétation « hors arbres d'alignement » pour le calcul de la largeur des rues.
- On obtient la répartition suivante des largeurs de rue à Paris :

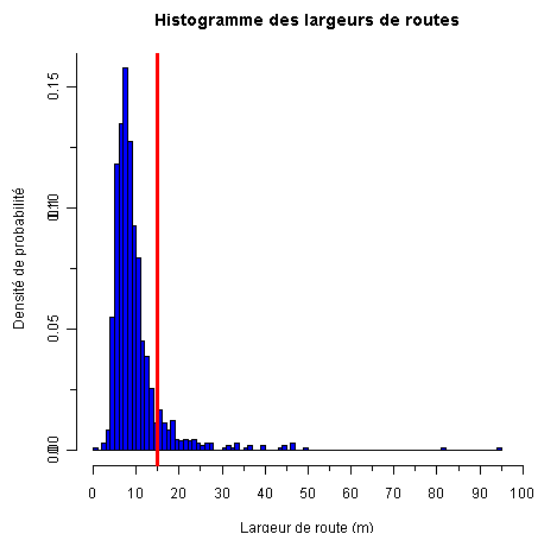


Figure 14 : Histogramme des fréquences des largeurs de routes sur Paris *intra muros* obtenues par calcul en ne considérant que les mailles pour lesquelles la fraction de bâti est supérieure à 25 %.

- 4) On propose une largeur de 15 m comme seuil de rues larges (soit le 9^{ème} décile Q90 : 15.12 m), ce qui correspond à peu près à 4 petites voies (2 voies circulées + stationnement des 2 côtés + trottoirs) de largeur moyenne.
- 5) On obtient un total de 6 106 909 m², soit 611 ha de surface de rues de largeur supérieure à 15 m en considérant à nouveau toutes les mailles concernant Paris *intra muros*, dont on en végétalise la moitié : 3 053 454 m², soit 305 ha de rues végétalisés.

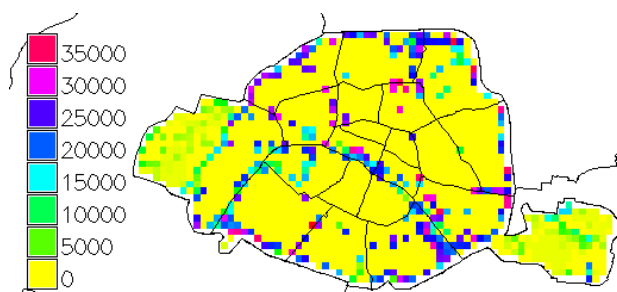


Figure 15 : Surface de routes (en m²) de largeur supérieure à 15 m par maille sur Paris *intra muros*.

En comparant aux 25 548 652 m², soit 2 555 ha de routes sur Paris *intra muros*, on verdit 12 % (en surface) des routes de la ville avec de la végétation basse, ce qui conduit à une hausse de 8 % de la végétation totale et 23 % de la végétation basse sur Paris *intra muros*.

On obtient :

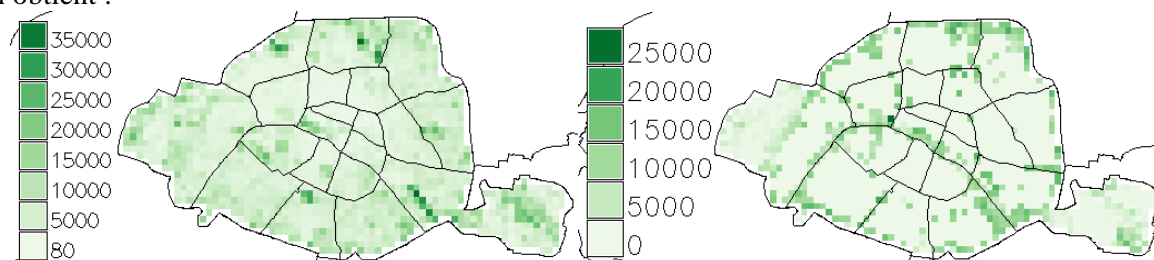


Figure 16 : Surfaces supplémentaires (en m²) de végétation basse ajoutées pour les scénarii 2 et 2bis dans le cas de la transformation des espaces de sol nu (à gauche) et de la végétalisation partielle des rues larges (à droite).

Soit au total :

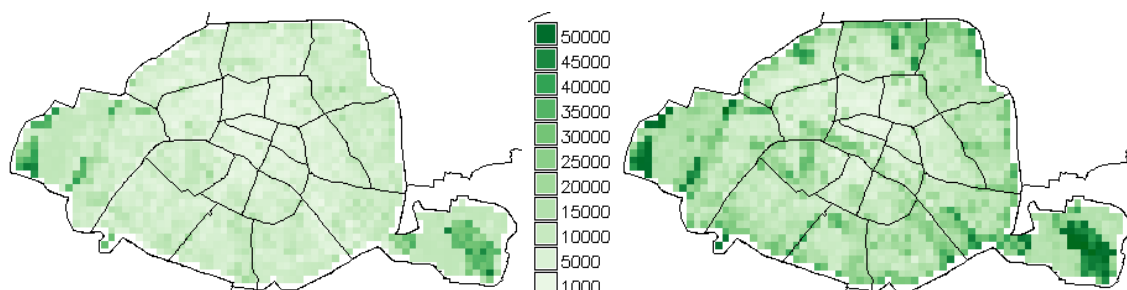


Figure 17 : Surfaces (en m²) de végétation basse dans le cas de référence (à gauche) et dans le cas du scénario 2 (à droite).

En terme de fraction de végétation totale :

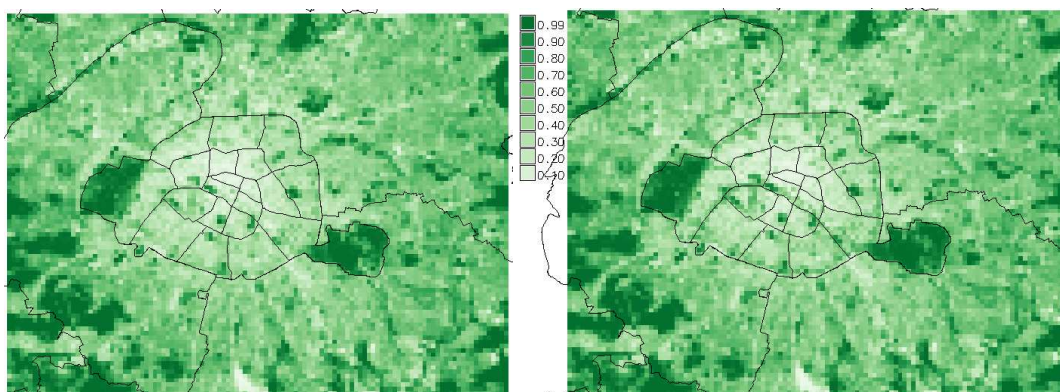


Figure 18 : Fraction de végétation sur l'ensemble du domaine dans le cas de référence (à gauche) et dans le cas des scénarios 2 et 2bis (à droite).

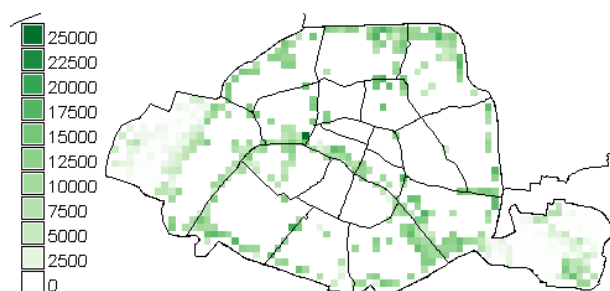


Figure 19 : Différence de surface de végétation sur Paris *intra muros* entre le cas de référence et le cas des scénarii 2 et 2bis.

La différence est assez faible sur la fraction totale de végétation (hausse de 8 % de la surface de végétation totale) car les modifications les plus importantes (verdissement des espaces de sol nu) se font au sein de la végétation totale et ne sont qu'un transfert de type d'occupation du sol.

Cependant, en terme de flux de chaleur latente et sensible, la différence devrait se faire sentir puisque on a augmenté de 89 % la surface de végétation basse sur Paris *intra muros*, introduisant un indice foliaire supplémentaire loin d'être négligeable.

2.4 Humidification des chaussées

Une expérience a été menée en 2009 au Japon sur l'humidification des chaussées par ruissellement d'eau en surface (Takahashi *et al.* 2010). Ce 3^{ème} scénario se base sur les conclusions de cette étude. Il est fondé sur la possibilité d'asperger de l'eau sur l'ensemble des rues de la capitale (le modèle TEB ne fait pas la distinction chaussée/trottoir). L'impact sur la température devrait se faire par l'évaporation de cette eau et l'absorption de chaleur correspondante sous forme de chaleur latente. Dans le modèle TEB, la rue peut être recouverte d'une certaine quantité d'eau via la paramétrisation d'un réservoir d'eau. Celui-ci se vide par évaporation lorsque l'air en surface n'est pas saturé en humidité (le surplus d'eau étant éliminé par ruissellement) et ce, jusqu'à ce que toute l'eau ait disparu de la surface imperméable qu'est la route (Le Moigne 2009). Il peut par conséquent être calibré de manière à ce qu'il ne se vide jamais pour qu'il y ait évaporation constante au niveau de la chaussée (apport constant d'eau dans le réservoir).

Dans la version de TEB utilisée initialement, ce réservoir se remplit sous l'effet des apports en eau issus des précipitations, et se vide par évaporation selon l'équation :

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P - \frac{Q_E}{L_V} \text{ pour } W < W_{\max}$$

avec : W : contenu en eau du réservoir de la route

W_{\max} : contenu maximal en eau que peut contenir le réservoir de la route

P : apport en eau provenant des précipitations (taux de précipitations exprimé en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)

$\frac{Q_E}{L_V} = E_r$: terme d'évaporation (Q_E : flux de chaleur latente et L_V : chaleur latente de vaporisation).

Ce réservoir a une capacité maximale d'interception (processus de captation des précipitations ou d'eau provenant d'une autre source) fixée par défaut à 1 mm (soit 1 Lm^{-2}). Lorsque le réservoir reçoit de l'eau et que sa capacité maximale d'interception est atteinte, l'eau est évacuée par ruissellement de surface. Cette quantité d'eau est perdue pour le système et elle rejoint directement, par hypothèse, le réseau d'évacuation des eaux de pluie.

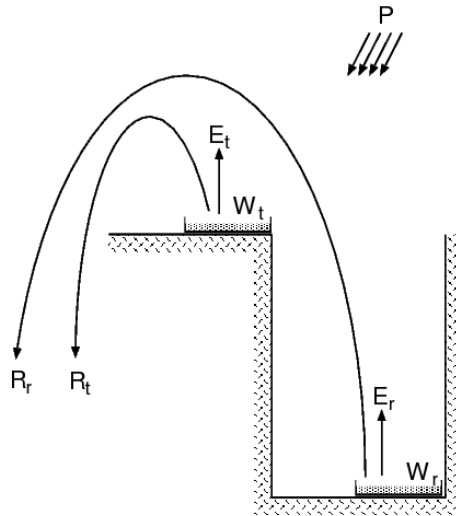


Figure 20 : Représentation des échanges en eau dans TEB. W_i : contenu en eau des réservoirs ; E_i : termes d'évaporation ; R_i : ruissellement ($i=t$ (toit) ou r (road)).

Afin de représenter le processus d'humidification des chaussées dans TEB, le modèle est modifié par l'ajout dans l'équation d'évolution du réservoir d'eau de la route d'une constante I_r représentant le taux d'irrigation des routes. Cette grandeur est exprimée en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ de la même façon que le taux de précipitation :

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P + I_r - \frac{Q_E}{L_V} \text{ pour } W < W_{\max}$$

avec : I_r : apport en eau provenant de l'irrigation (taux d'irrigation en $\text{kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$).

Cette condition d'irrigation peut ne pas être imposée sur l'ensemble des routes du domaine de simulation, grâce à la lecture en début de simulation d'un fichier d'entrée indiquant les points de grille irrigués.

Une étude menée préalablement à la simulation (voir Annexe B) permet de conclure sur la quantité d'eau à apporter la plus pertinente, en optimisant à la fois l'impact sur la température et la consommation d'eau. Elle a conclu sur un apport en eau par irrigation de 0.2 L d'eau par m² en 3 mn au début de chaque heure et ce, uniquement en période diurne (entre 05:00 et 19:00 UTC inclus).

Techniquement, on peut envisager d'utiliser à terme le réseau d'eau non potable présent dans la ville de Paris (réseau développé sous toutes les rues).

2.5 Scénario récapitulatif

Le quatrième scénario combine ces trois premiers scénarios (réfléchissant, verdissement et humidification). Le verdissement se fait par ajout de végétation basse arrosée et l'humidification des rues se fait sur la part de rues non verdies.

2.6 Scénario supplémentaire

Ce scénario S5 propose de modifier le tissu urbain afin de verdir et éventuellement bleuir la ville. Une piste est par exemple la surélévation de certains bâtiments (tout en conservant la morphologie du centre historique de Paris, la géométrie urbaine étant relativement figée au sein de Paris) en maintenant constante la surface de plancher. La surface de sol ainsi dégagée serait couverte de végétation haute (type arbres) afin d'obtenir un signal significatif. Ainsi, en amenant par exemple à la hauteur de 50 m tous les bâtiments construits après 1914 (non haussmanniens), la surface de végétation haute supplémentaire serait de 973 ha, soit une hausse de 30.1 % de la végétation totale sur Paris *intra muros*. Ce scénario est volontairement difficilement faisable en terme technique mais il se veut une exploration de ce vers quoi pourrait évoluer Paris à l'horizon 2100. Il n'a finalement pas été abordé dans le cadre d'EPICEA.

2.7 Synthèse des scénarios simulés

Le Tableau 4 reprend les différents scénarios simulés dans ce projet. Les sigles présentés dans ce tableau (REF, S1, S2, S2bis, S3 et Stot) sont utilisés par la suite dans l'analyse des résultats.

Simulation	Description
REF	Simulation de référence : Paris « actuel » (EPICEA Volet 2 2011)
S1	Simulation d'un Paris dit « réfléchissant » avec modification des albédos et émissivités des murs et des toits dans Paris <i>intra muros</i> .
S2	Simulation d'un Paris dit « verdi » avec ajout de végétation basse dans la ville. La végétation est dans ce cas laissée libre d'évoluer dans les conditions de la canicule 2003 (pas d'apport d'eau extérieur par arrosage)..
S2bis	Simulation d'un Paris dit « verdi » avec ajout de végétation basse dans la ville. Un arrosage de la végétation est paramétré qui fait que la végétation n'est jamais en situation de stress hydrique.
S3	Simulation d'un Paris « humidifié » avec humidification des chaussées en journée.
Stot (Stot=S1 +S2bis+S3)	Scénario qui regroupe tous les aspects précédemment étudiés : Paris « réfléchissant », « verdi » (ajout de végétation basse arrosée) et « humidifié » (sur l'ensemble des rues non verdies).

Tableau 4 : Synthèse des scénarios testés par rapport à la simulation de référence.

3 Faisabilité des scénarios

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

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

3.1 Modifier les propriétés radiatives des surfaces

3.1.1 Principe

La modification des propriétés radiatives des matériaux de façade (toits et murs) conduit à une forte réflexion du rayonnement solaire. Les valeurs élevées d'albédo et d'émissivité modifient le bilan énergétique entre les surfaces modifiées et l'atmosphère. Par conséquent, les surfaces se réchauffent moins et le flux de chaleur par conduction de l'extérieur vers l'intérieur du bâtiment est fortement réduit, ce qui limite l'apport d'énergie aux espaces intérieurs.

3.1.2 Portée et limites

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

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

3.1.3 Technologies/produits

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

des bâtiments commerciaux ou de bureaux. Le surcoût lié à ces produits nouveaux devrait diminuer avec leur diffusion.

3.2 Verdissement

3.2.1 Principe

L'introduction de végétation dans la ville modifie le bilan énergétique par l'échange de chaleur latente entre la végétation (via le phénomène d'évapotranspiration) et l'atmosphère.

Des techniques de verdissement disponibles laissent également augurer de la faisabilité technique du verdissement des surfaces concernées, qu'il s'agisse des surfaces de terre ou même des chaussées, à l'image de l'engazonnement des voies du tramway parisien.

3.2.2 Portée et limites

Le service en charge des parcs et jardins dispose d'éléments économiques permettant d'estimer le coût de réalisation et d'entretien de ces espaces verts. La capacité de rafraîchissement attribuée à ces surfaces repose cependant sur la disponibilité en eau, disponibilité qui peut être problématique notamment en période de canicule, et également sur leurs performances en matière d'évapotranspiration, dépendant de la nature du sol et des végétaux. En effet, une végétation en situation de stress hydrique suite à une sécheresse ne pourra pas échanger de chaleur latente avec l'atmosphère.

Les principales limites des scénarios de verdissement sont donc liées à la disponibilité de la ressource en eau. Le volet 1 du projet EPICEA (EPICEA Volet 1 2010) a montré une diminution des contenus en eau des sols naturels conduisant à un assèchement important pendant l'été.

Le projet CLIMSEC (CLIMSEC 2012) mené par la Direction de la Climatologie de Météo-France avec le soutien de la Fondation MAIF a quant à lui porté sur l'impact du changement climatique sur la sécheresse et l'eau du sol. Il a permis de caractériser la typologie des sécheresses en métropole sur la période 1958-2008 et d'établir un diagnostic sur leurs évolutions attendues au cours du 21^{ème} siècle. Les principaux résultats sont :

- Pour le premier tiers du siècle (années 2020), les changements semblent peu marqués même si la probabilité de sécheresse agricole semble s'accroître, notamment pour les sécheresses longues ;
- Au milieu du siècle (années 2050), malgré une évolution encore limitée du régime pluviométrique, des évolutions majeures commencent à concerner les sécheresses agricoles avec des sécheresses inhabituelles en termes d'expansion spatiale ou d'intensité et des évolutions marquées en matière d'assèchement des sols dans certaines régions, et notamment les zones montagneuses, du fait de probables modifications du régime nival ;
- A la fin du siècle (années 2080), des sécheresses météorologiques plus fortes apparaissent, notamment en été, et les sécheresses du sol pourraient devenir extrêmes (par comparaison au climat actuel) sur la majeure partie du territoire. La durée de ces sécheresses extrêmes (plusieurs années ou décennies) relève de typologie de phénomène totalement inconnu dans le climat actuel.

- Ces travaux montrent également que la prise en compte des précipitations comme seule variable explicative des sècheresses s'avère tout à fait inadaptée pour décrire l'évolution des déficits hydriques, passés et bien sûr à venir. Il est particulièrement notable que l'assèchement des sols sous l'effet de la hausse de l'évaporation sera un élément essentiel de l'évolution du cycle hydrologique au cours du 21^{ème} siècle.

Pour toutes ces raisons, il est nécessaire dans des opérations de verdissement, surtout de grande ampleur, d'utiliser de la végétation la plus performante possible en matière de rendement pour optimiser le rapport « évapotranspiration de la plante / consommation d'eau par la plante ». Quelques études s'intéressent à l'impact différentiel de divers types de végétation comme la végétation basse ou les arbres (Skelhorn *et al.* 2012). Cet aspect a également rapidement été abordé dans ce volet 3 du projet EPICEA. Il serait intéressant, à l'image de ce qui est fait pour les toitures végétalisées (De Munck *et al.* 2012), d'aller plus loin sur les différentes espèces possibles et leurs performances respectives.

3.3 Arroser les rues

3.3.1 Principe

L'arrosage des rues est une pratique traditionnelle dans de nombreux pays chauds (Espagne ou Japon par exemple). Cet arrosage, souvent matinal, produit un rafraîchissement temporaire lié à l'évaporation de l'eau. L'existence du réseau d'eau non potable suivant les rues de Paris est un élément favorable à la faisabilité du scénario prônant l'humidification des chaussées.

3.3.2 Portée et limites

Ceci étant, la consommation d'eau, le coût de mise en œuvre et de maintenance de l'arrosage (manuel, automatique) doivent être évalués. L'arrosage de surfaces par ailleurs exposées à la pollution urbaine peut soulever des questions relatives à la santé des passants et des riverains qui devront aussi être examinées. Il en est de même des aspects environnementaux.

Comme pour les scénarios de verdissement, les principales limites de ce scénario d'arrosage des chaussées résident dans la raréfaction des ressources en eau.

A noter par ailleurs que dans cette étude, il n'est pas fait de distinction entre chaussée et trottoir dans la modélisation de la ville : on appelle « rue » l'espace bitumé situé entre deux bâtiments en l'absence d'espaces verts. La température simulée – au niveau de la route (au sol) mais aussi la température de l'air à 2 m – est localisée au milieu de la chaussée.

3.4 Conclusions sur la faisabilité des scénarios

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

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

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

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

4 Résultats

On présente tout d'abord les impacts des divers scénarios sur le bilan d'énergie avant de s'intéresser aux effets sur la température et l'humidité à 2 m et en altitude. Enfin, une analyse des modifications induites sur l'ICU est menée, ainsi que sur l'ensemble des températures spécifiques à la ville.

4.1 Impacts sur le bilan d'énergie

On rappelle tout d'abord que le bilan d'énergie d'un paysage urbain s'exprime ainsi :

$$Q^* = Q_H + Q_E + \Delta Q_S$$

Avec : Q^* : rayonnement net, résultant du bilan radiatif (somme des flux de rayonnement incident, dans les courtes et grandes longueurs d'onde, et de rayonnement montant, dans les courtes et grandes longueurs d'onde), noté par la suite RN ;

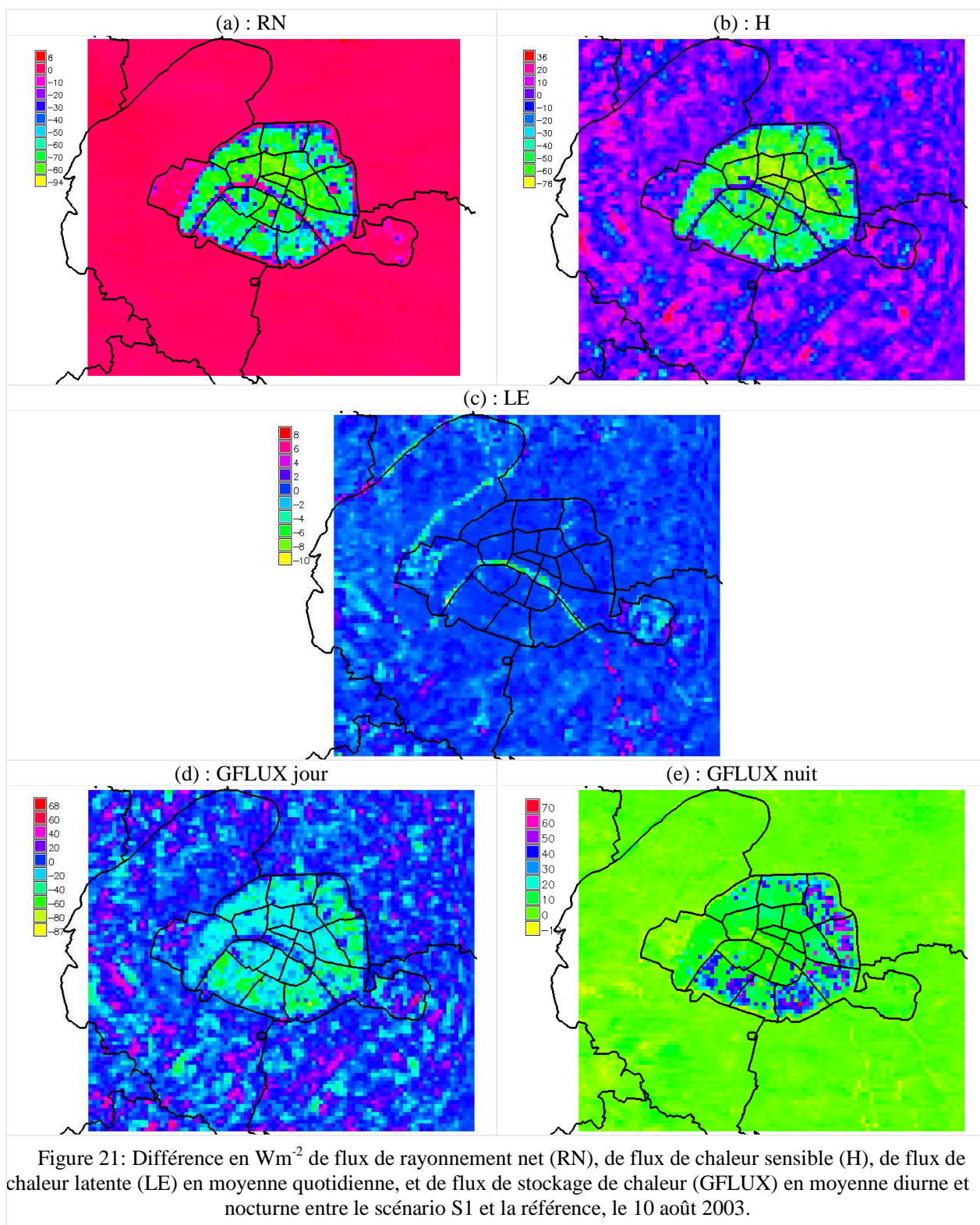
Q_H : flux de chaleur sensible, correspondant à la conduction dans l'air de la chaleur transmise par les surfaces, plus fort en milieu urbain, noté par la suite H ;

Q_E : flux de chaleur latente, correspondant à l'évapotranspiration des végétaux, réduit en milieu urbain avec la raréfaction de la végétation, noté par la suite LE ;

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, noté par la suite GFLUX.

4.1.1 Impacts sur le bilan d'énergie du scénario S1

Le rayonnement net simulé dans le scénario S1 (Figure 21a) est inférieur à celui de la référence sur les zones les plus denses et en journée. La nuit, la différence s'estompe. Il en est de même pour le flux de chaleur sensible qui est faiblement positif dans le scénario S1 (Figure 21b). Ceci est dû à l'albédo plus élevé des parois dans les longueurs d'onde du visible (toits et murs) : le rayonnement réfléchi est plus important d'où un rayonnement net plus faible et donc un flux de chaleur sensible plus faible car il y a moins d'énergie reçue disponible. Le flux de chaleur latente n'est pas modifié puisque lié à la végétation sur laquelle on ne joue pas dans le scénario S1 (Figure 21c). Le flux de stockage semble peu modifié en moyenne quotidienne. Cependant, lorsqu'on regarde le détail des moyennes diurne (Figure 21d) et nocturne (Figure 21e), on voit une diminution du flux de stockage en journée en raison de la moindre disponibilité de chaleur suite au rayonnement net plus faible et une augmentation la nuit sur les zones est et sud de Paris (correspondant aux toits terrasse, voir Figure 1). Ceci correspond en fait à une diminution du déstockage de chaleur pendant la nuit puisqu'une quantité moindre de chaleur a été emmagasinée.



Ces caractéristiques se retrouvent sur le cycle quotidien du bilan d'énergie (Figure 22). Les différences sont accentuées sur la partie urbaine puisque les modifications d'albédo et d'émissivité affectent la partie urbanisée du domaine : diminution du rayonnement net, du flux de chaleur sensible et du flux de stockage. Cette baisse est maximale en milieu de journée, ce qui correspond par ailleurs au maximum de ces paramètres. Sur la partie végétation, il n'y a pas ou très peu d'impact puisque les modifications dans le scénario S1 n'affectent pas cette partie végétale..

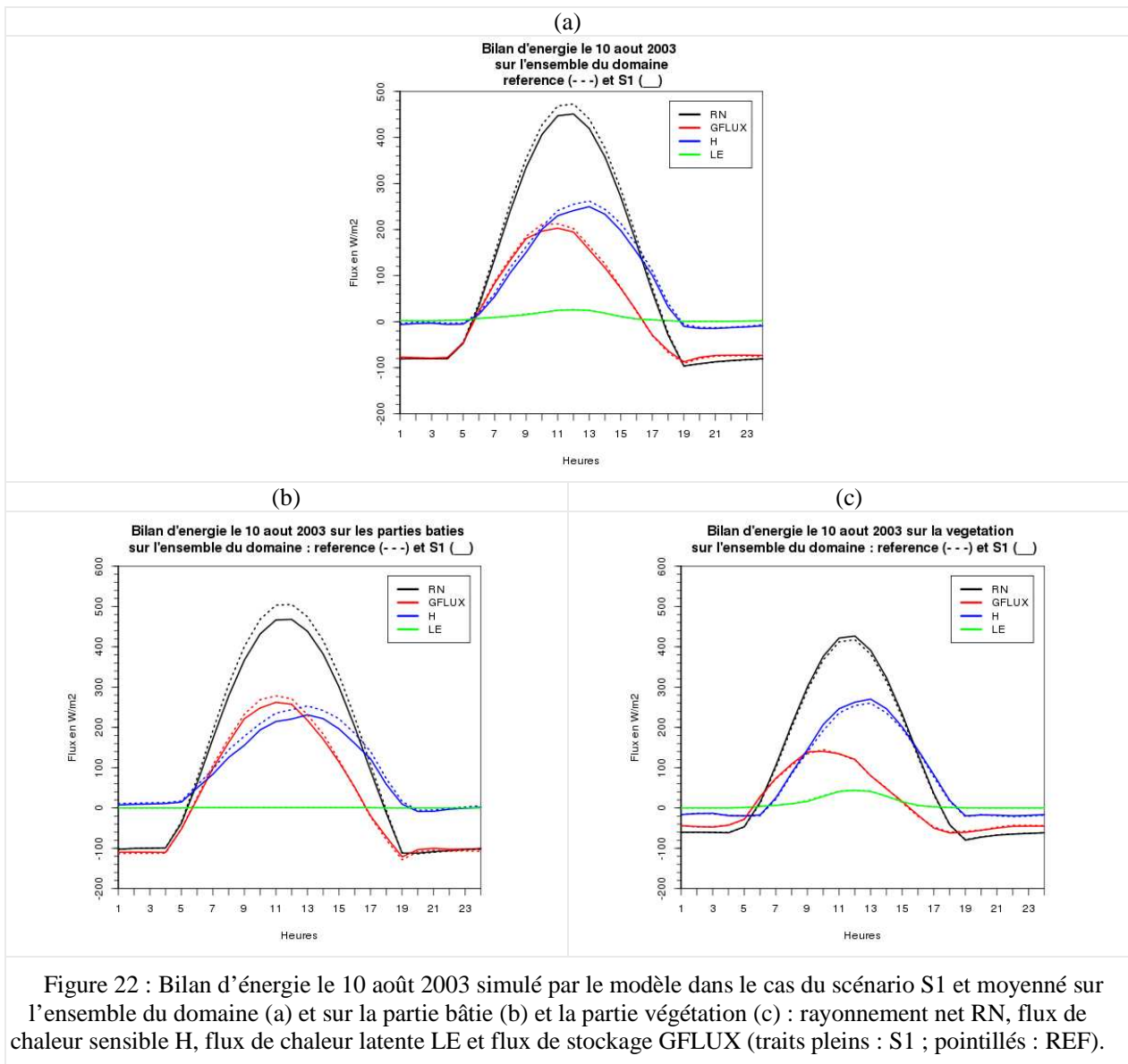
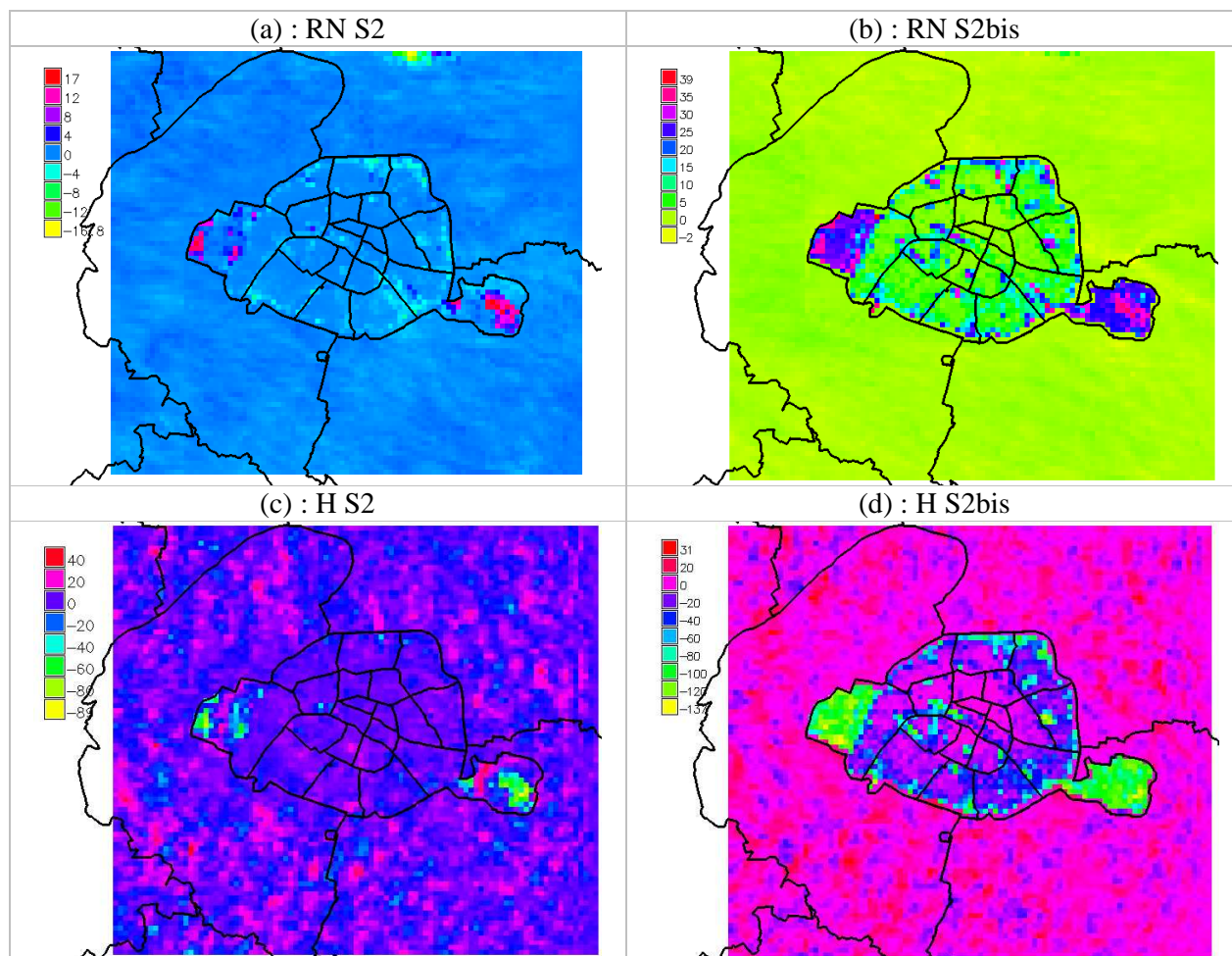


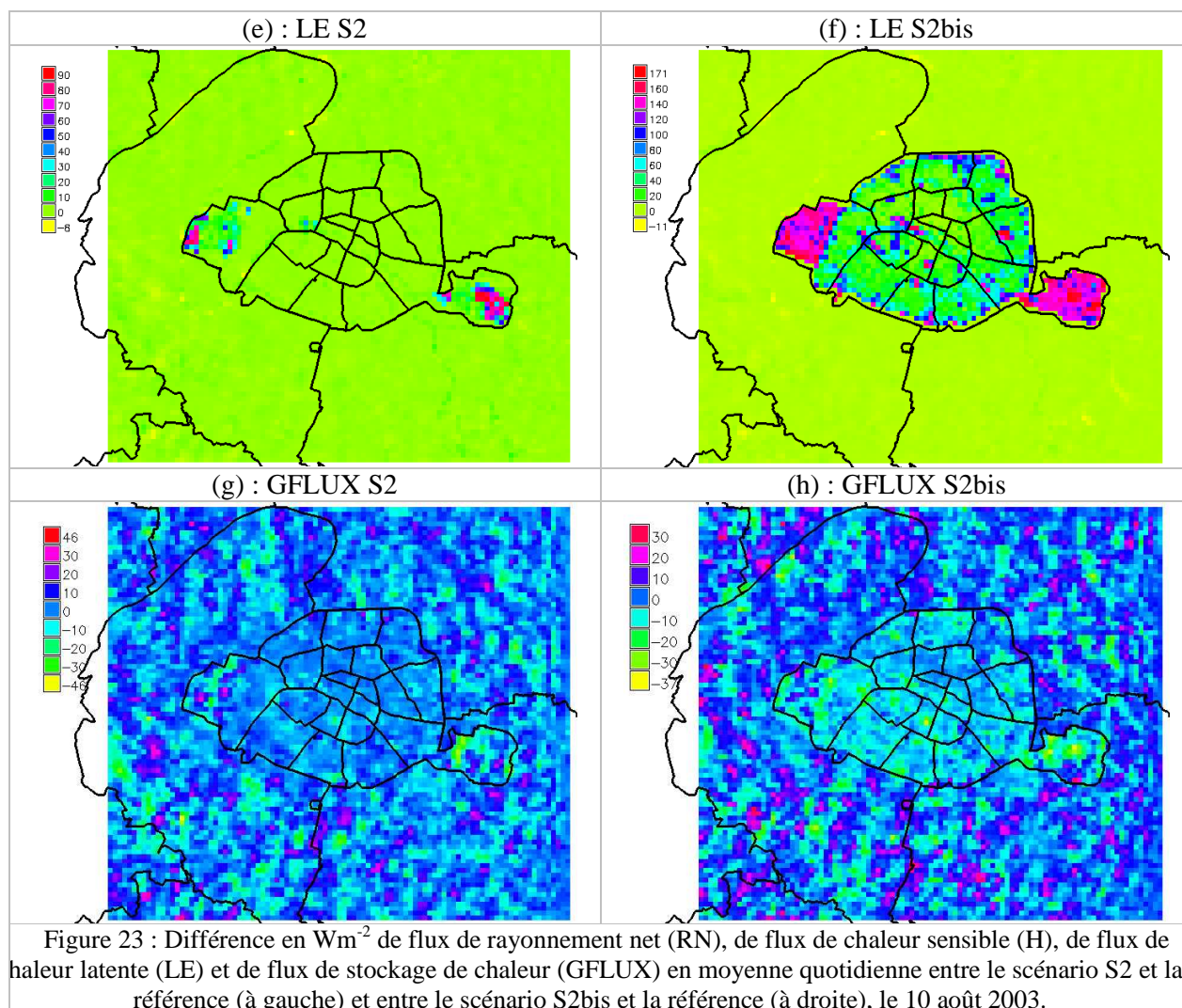
Figure 22 : Bilan d'énergie le 10 août 2003 simulé par le modèle dans le cas du scénario S1 et moyenné sur l'ensemble du domaine (a) et sur la partie bâtie (b) et la partie végétation (c) : rayonnement net RN, flux de chaleur sensible H, flux de chaleur latente LE et flux de stockage GFLUX (traits pleins : S1 ; pointillés : REF).

4.1.2 Impacts sur le bilan d'énergie des scénarios S2 et S2bis

Dans le scénario S2 de verdissement de Paris, la végétation, bien que plus importante que dans le cas de référence, est en situation de stress hydrique suite à la raréfaction de l'eau. Elle ne peut donc pas jouer son rôle de régulateur thermique. Ainsi, le bilan d'énergie n'est que très peu modifié dans le scénario S2 (Figure 23, gauche). Seul le flux de chaleur latente est significativement augmenté mais dans les deux grands bois parisiens seulement, où il y a ajout de végétation important, (voir 2.3 Scénario de verdissement).

Au contraire, dans le scénario S2bis, la végétation ne souffre jamais de stress hydrique suite à son arrosage quasi constant. Elle peut donc jouer pleinement son rôle de régulateur thermique. Ainsi, le bilan d'énergie est modifié (Figure 23, droite) : hausse du rayonnement net sur les zones plus végétalisées puisqu'une plus grande partie de l'énergie reçue est « consommée » sous forme de chaleur latente et pas libérée sous forme de rayonnement infrarouge montant. Le flux de chaleur latente connaît une forte hausse (essentiellement la journée pendant que la végétation est active) et le flux de chaleur sensible est en baisse. Le flux de stockage quant à lui n'est que peu modifié, la végétation n'intervenant que dans une bien moindre mesure dans ce phénomène de stockage de chaleur.





Ainsi, le cycle quotidien du bilan d'énergie pour le scénario S2 ne présente pas de différence avec la référence (Figure 24, en haut à gauche). Au contraire, pour le scénario S2bis, on constate une légère diminution des flux de chaleur sensible et de stockage et une augmentation du flux de chaleur latente lié à l'activité de la végétation. En détaillant partie bâtie et partie végétation dans le cas du scénario S2bis, on voit que la modification du bilan d'énergie n'affecte que la partie végétale puisque les modifications de ce scénario n'ont trait qu'à cette partie végétation, avec une hausse plus forte du flux de chaleur latente et une diminution d'autant plus importante des flux de chaleur sensible et de stockage de chaleur.

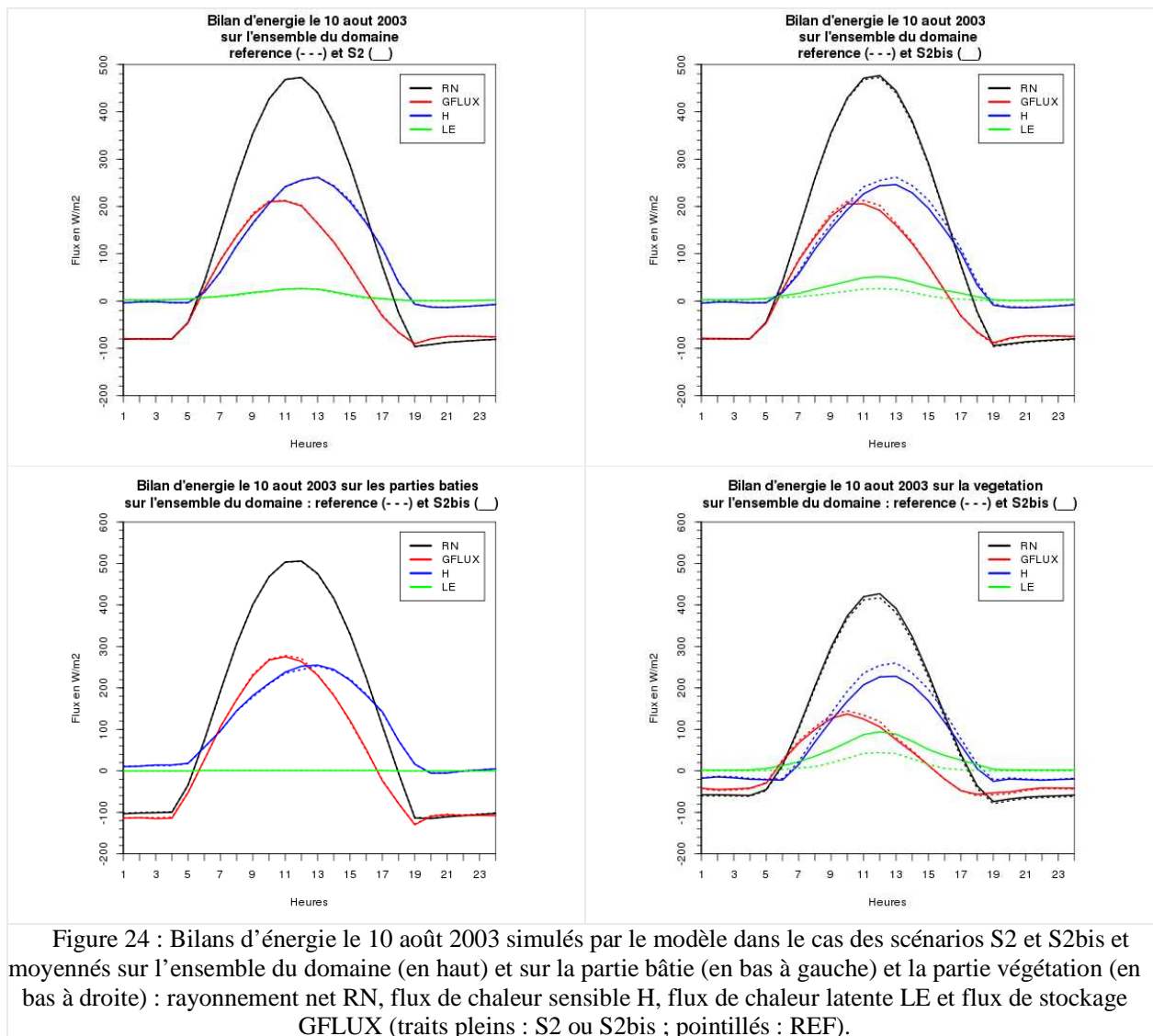
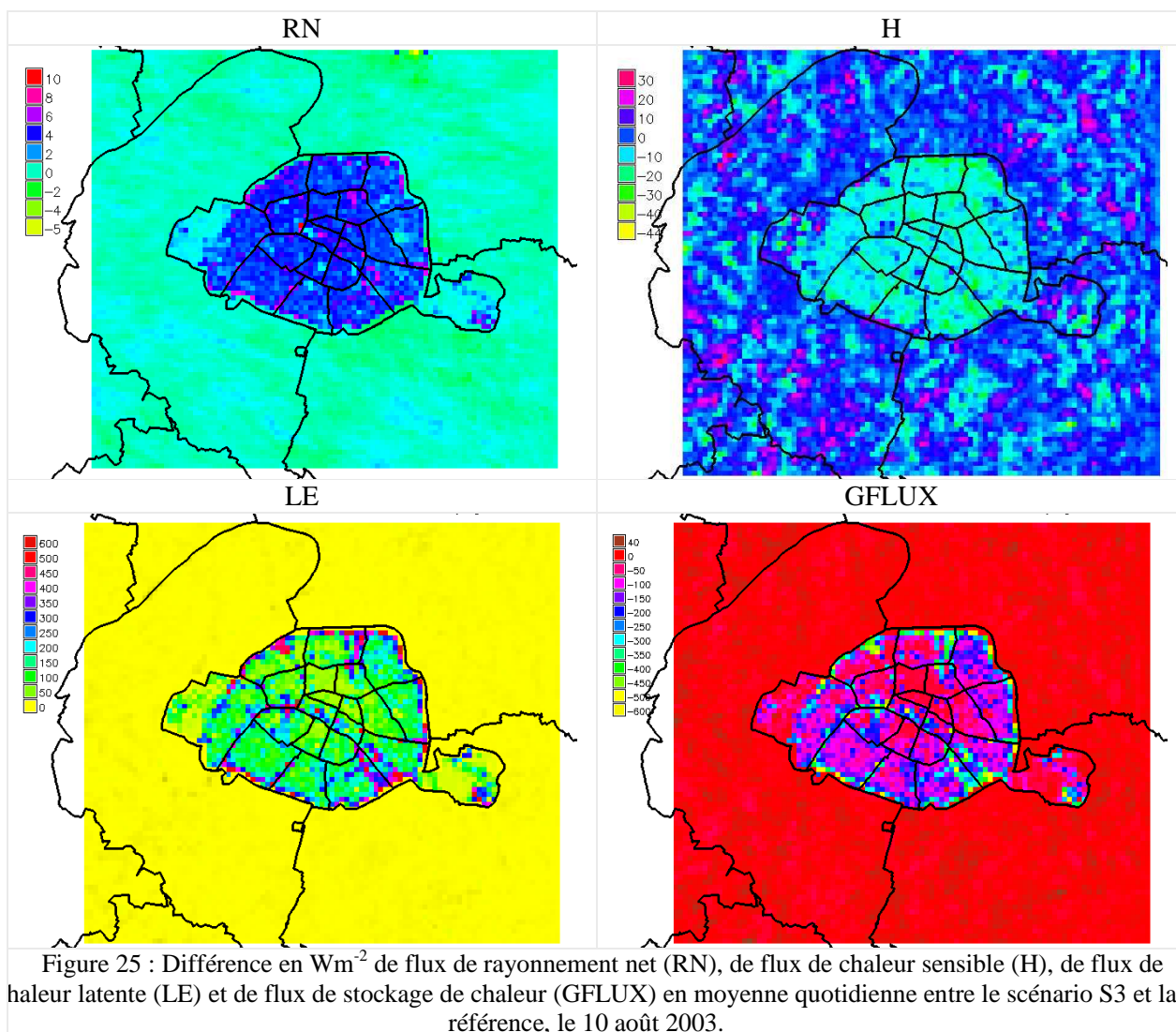


Figure 24 : Bilans d'énergie le 10 août 2003 simulés par le modèle dans le cas des scénarios S2 et S2bis et moyennés sur l'ensemble du domaine (en haut) et sur la partie bâtie (en bas à gauche) et la partie végétation (en bas à droite) : rayonnement net RN, flux de chaleur sensible H, flux de chaleur latente LE et flux de stockage GFLUX (traits pleins : S2 ou S2bis ; pointillés : REF).

4.1.3 Impacts sur le bilan d'énergie du scénario S3

Dans le scénario S3 d'humidification des chaussées (Figure 25), le rayonnement net n'est que très peu modifié. Par contre, le flux de stockage de chaleur est fortement diminué en journée sur Paris *intra muros* et le flux de chaleur sensible légèrement diminué en journée, tandis que le flux de chaleur latente est fortement augmenté en journée sur Paris *intra muros* (humidification des chaussées en journée), particulièrement sur les zones où la proportion de rues dans la maille est élevée. L'humidification des rues entraîne la consommation d'énergie pour évaporer l'eau aspergée, d'où la hausse du flux de chaleur latente. L'énergie disponible pour les autres phénomènes (stockage de chaleur et transfert par conduction) est moindre ; les flux de stockage de chaleur et de chaleur sensible vont donc diminuer.



Ceci est confirmé par le cycle quotidien du bilan d'énergie (Figure 26), avec un flux de stockage qui diminue à partir du milieu de matinée jusqu'au début de soirée, particulièrement en milieu de journée, et un flux de chaleur latente qui augmente dès que l'humidification des rues est mise en place (entre 05:00 et 19:00 UTC). Si on s'intéresse en détail à la partie bâtie, on voit que le flux de chaleur latente, nul dans la référence, atteint un maximum de l'ordre de $180 Wm^{-2}$ tandis que le flux de stockage change de signe bien plus tôt dans l'après-midi (début de la libération de chaleur emmagasinée par les matériaux). Il n'y a pas, comme attendu, de modification sur la partie végétation.

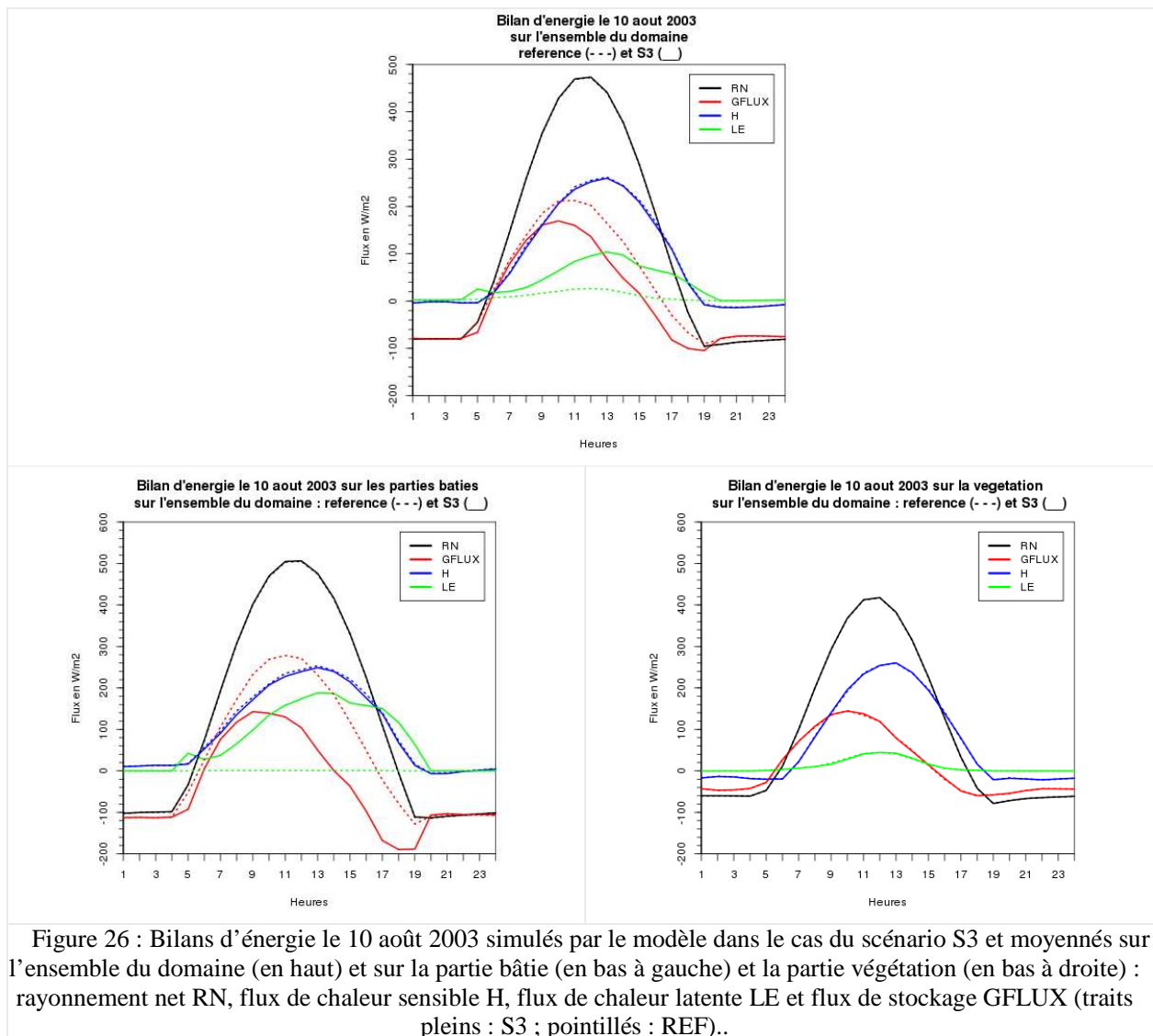
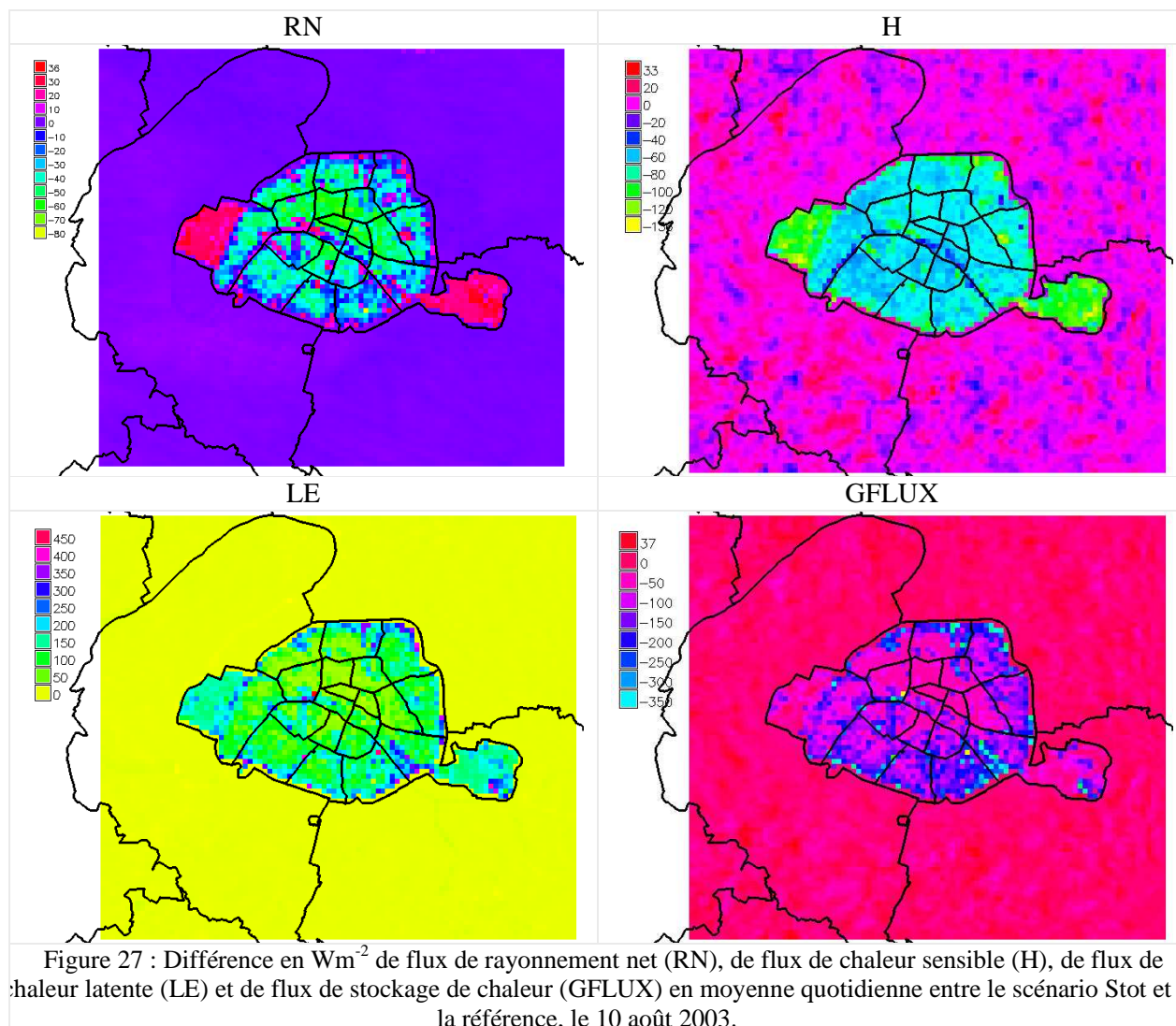


Figure 26 : Bilans d'énergie le 10 août 2003 simulés par le modèle dans le cas du scénario S3 et moyennés sur l'ensemble du domaine (en haut) et sur la partie bâtie (en bas à gauche) et la partie végétation (en bas à droite) : rayonnement net RN, flux de chaleur sensible H, flux de chaleur latente LE et flux de stockage GFLUX (traits pleins : S3 ; pointillés : REF)..

4.1.4 Impacts sur le bilan d'énergie du scénario Stot

Le scénario Stot inclut toutes les modifications des précédents scénarios (voir 2.5 Scénario récapitulatif). Le rayonnement net (Figure 27) diminue sur les zones les plus denses de Paris *intra muros* (sous l'influence des modifications d'albédo) mais augmente sur les zones plus aérées, notamment sur les deux grands bois de Boulogne et Vincennes (sous l'influence de la végétalisation de la ville ; la végétation « consomme » de l'énergie qui n'est plus libérée sous forme de rayonnement infrarouge). Le flux de chaleur sensible diminue fortement sur les zones plus aérées, notamment les deux grands bois, en raison du transfert d'énergie au profit du flux de chaleur latente et diminue, mais dans une moindre mesure, sur les zones plus denses (moins de stockage possible en raison de l'albédo plus élevé des parois et de l'humidification des rues). Le flux de chaleur latente augmente fortement par rapport à la référence, particulièrement sur les zones en bordure de Paris où se combinent une végétalisation conséquente de la ville et la présence de grandes artères humidifiées en journée. Le flux de stockage diminue également assez fortement sur ces mêmes zones en raison de la raréfaction des surfaces minérales disponibles pour emmagasiner de la chaleur.



Sur le cycle quotidien du bilan d'énergie (Figure 28), c'est l'ensemble des flux qui diminue dans le cadre du scénario Stot, excepté le flux de chaleur latente qui augmente. Le rayonnement net diminue légèrement, les flux de chaleur sensible et de stockage diminuent fortement, particulièrement en milieu de journée. Sur la partie bâtie, la hausse du flux de chaleur latente est très importante (évaporation de l'eau aspergée sur les chaussées), de même que la baisse du flux de stockage (moins de stockage sur les trois surfaces artificielles en raison de la hausse d'albédo des toits et murs et de l'humidification des chaussées qui empêche une partie du stockage de chaleur par les routes), le rayonnement net et le flux de chaleur sensible diminuant dans une moindre mesure. Sur la partie végétation, le flux de chaleur latente augmente (activité photosynthétique et évapotranspiration de la végétation) et le flux de chaleur sensible diminue presque d'autant.

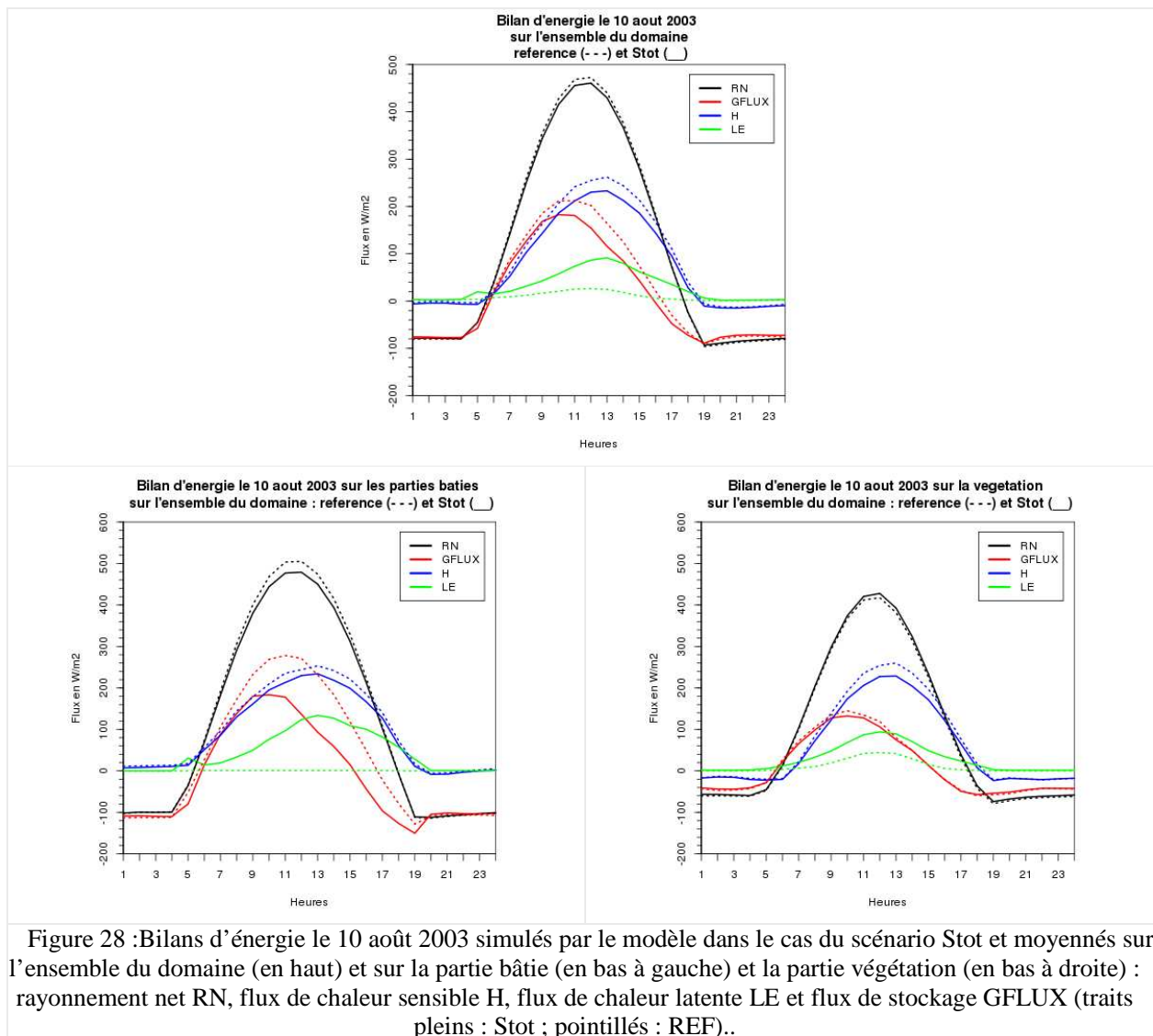


Figure 28 : Bilans d'énergie le 10 août 2003 simulés par le modèle dans le cas du scénario Stot et moyennés sur l'ensemble du domaine (en haut) et sur la partie bâtie (en bas à gauche) et la partie végétation (en bas à droite) : rayonnement net RN, flux de chaleur sensible H, flux de chaleur latente LE et flux de stockage GFLUX (traits pleins : Stot ; pointillés : REF)..

4.2 Impacts sur la température à 2 m

Pour avoir une vision tout d'abord globale des modifications induites par les divers scénarios, on s'intéresse aux diagrammes de dispersion des données, calculés sur 28 points : les 6 points où nous avons une station de mesure horaire et 22 points pris sur chacun des vingt arrondissements et des deux grands bois (Figure 29).

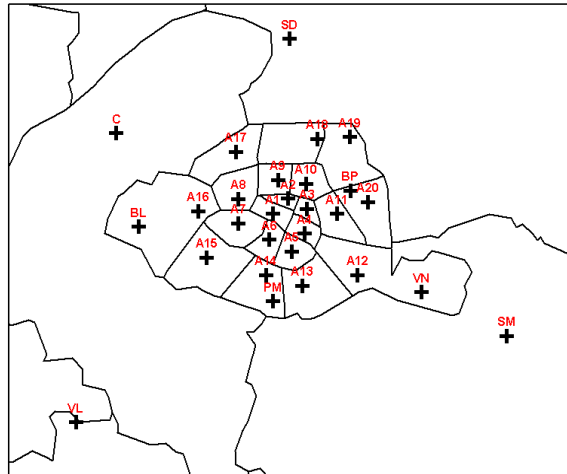


Figure 29 : Localisation des points où nous disposons de stations de mesure horaire (Paris-Montsouris (PM), Belleville-Parc (BP), Courbevoie (C), Saint-Denis (SD), Saint-Maur (SM) et Villacoublay (VL)) ainsi que des 22 points d'intérêt sur les 20 arrondissements (A1 à A20) et les 2 bois (Boulogne (BL) et Vincennes (VN)).

Le scénario S1 conduit à une baisse des plus fortes valeurs de températures associée à un certain nombre de températures abaissées dans la plage des valeurs intermédiaires (Figure 30). Le scénario S2 ne modifie pas les températures simulées, tandis que le scénario S2bis entraîne une diminution plus importante des fortes valeurs de températures que S1. Le scénario S3 conduit à une faible diminution des fortes valeurs de température. Enfin, le scénario Stot présente une forte baisse des températures les plus élevées, en cumulant les effets des scénarios S1, S2bis et S3. On remarque sur ce dernier diagramme une absence de modifications sur un certain nombre de points (visible aussi avec le scénario S2bis) qui correspondent aux différentes stations non situées dans Paris *intra muros* (Courbevoie, Saint-Denis, Saint-Maur et Villacoublay). Ceci illustre le fait que les modifications effectuées dans Paris *intra muros* affectent principalement Paris *intra muros* et finalement assez peu la banlieue, exceptées certaines zones situées sous le panache urbain (voir 4.8 Analyse de l'ICU).

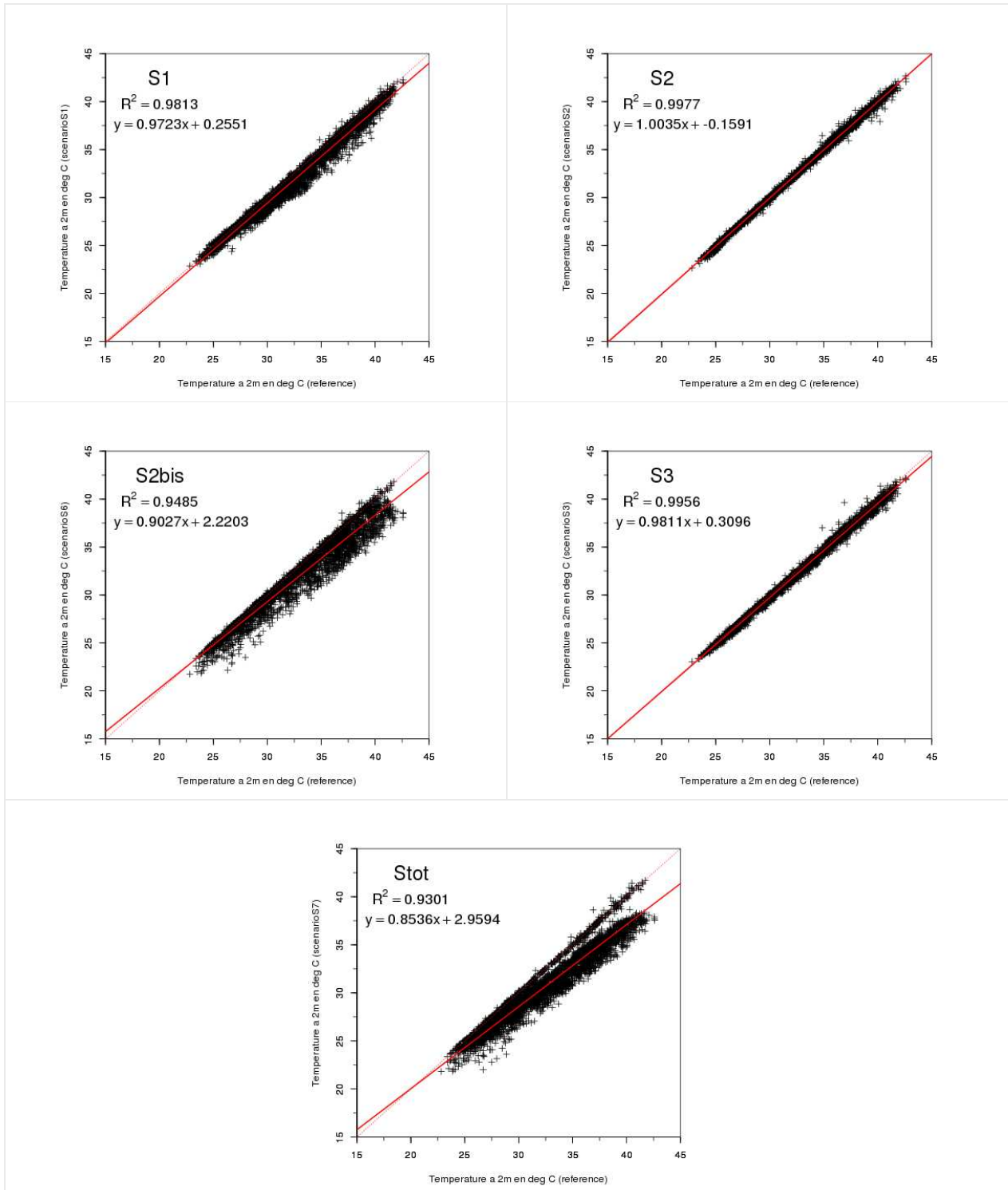


Figure 30 : Diagrammes de dispersion de la température de l'air à 2 m simulée par le modèle dans le cas de référence et pour chacun des scénarios S1, S2, S2bis, S3 et Stot, sur lesquels sont superposées la première bissectrice (droite $y=x$, en pointillés rouge) et la droite de régression linéaire (en traits pleins rouges). calculés pour les différents points présentés Figure 29. Sont indiqués sur le graphe le coefficient de corrélation et l'équation de la droite de régression.

La Figure 31 présente le cycle quotidien moyen de température à 2 m en différents points du domaine (voir Figure 29). Selon l'environnement immédiat du point où est effectué le profil, l'impact des différents scénarios n'est pas le même (voir Tableau 5). Ainsi, le point arr7 est situé à proximité des Invalides, dans un endroit très aéré où beaucoup de surface est disponible pour végétaliser la ville. Le point arr9 est situé en plein cœur du Paris densément bâti, qui laisse lui peu de place à la végétation. Le point arr13 est situé dans un quartier intermédiaire en terme de densité urbaine.

Paramètre	Point Arr7	Point Arr9	Point Arr13
Part de végétation totale : Référence, scénarios S1 et S3 :	58.7 % soit 36687.5 m ²	3.8 % soit 2375 m ²	27.8 % soit 17375 m ²
Scénarios S2, S2bis et Stot :	69.2 % soit 43250 m ²	3.8 % soit 2375 m ²	39.4 % soit 24625 m ²
Part de végétation basse (au sein de la part de végétation totale) Référence, scénarios S1 et S3 :	31.3 % soit 11483 m ²	38.9 % soit 924 m ²	40.3 % soit 7002 m ²
Scénarios S2, S2bis et Stot :	73.4 % soit 31745.5 m ²	61.1 % soit 1451 m ²	71.1 % soit 17508 m ²
Part de sol nu (au sein de la part de végétation totale) Référence, scénarios S1 et S3 :	37.4 % soit 13721 m ²	22.2 % soit 527 m ²	19.3 % soit 3353 m ²
Scénarios S2, S2bis et Stot :	0	0	0
Part de bâti	19.2 % soit 12000 m ²	55.4 % soit 34625 m ²	39.6 % soit 24750 m ²
Albédo des toits Référence, scénarios S2, S2bis et S3 :	0.6	0.6	0.2
Scénarios S1 et Stot :	0.9	0.9	0.9
Emissivité des toits Référence, scénarios S2, S2bis et S3 :	0.1	0.1	0.8
Scénarios S1 et Stot :	0.9	0.9	0.9
Part de rue	22.1 % soit 13812.5 m ²	40.8 % soit 25500 m ²	32.6 % soit 20375 m ²
Largeur de rue	51.5 m	9.6 m	20.1 m
Surface de rue végétalisée Référence, scénarios S1 et S3 :	0	0	0
Scénarios S2, S2bis et Stot :	6906 m ²	0	10187.5 m ²
Surface de rue arrosée Référence, scénarios S1, S2 et S2bis :	0	0	0
Scénario S3 :	13812.5 m ²	25500 m ²	20375 m ²
Scénario Stot :	6906 m ²	25500 m ²	10187.5 m ²

Tableau 5 : Synthèse des caractéristiques des trois points du domaine analysés en détail (Arr7 : 7^{ème} arrondissement ; Arr9 : 9^{ème} arrondissement ; Arr13 : 13^{ème} arrondissement, voir Figure 29) dans la référence et les différents scénarios. On rappelle qu'une maille est un carré de 250 m de côté et de 62500 m² de surface.

Remarque : les valeurs indiquées dans le tableau sont arrondies et les sommes de surfaces peuvent par conséquent ne pas tomber juste.

La Figure 31 montre le cycle quotidien moyen de la température horaire à 2 m pour les trois points du domaine présentés ci-dessus (Tableau 5).

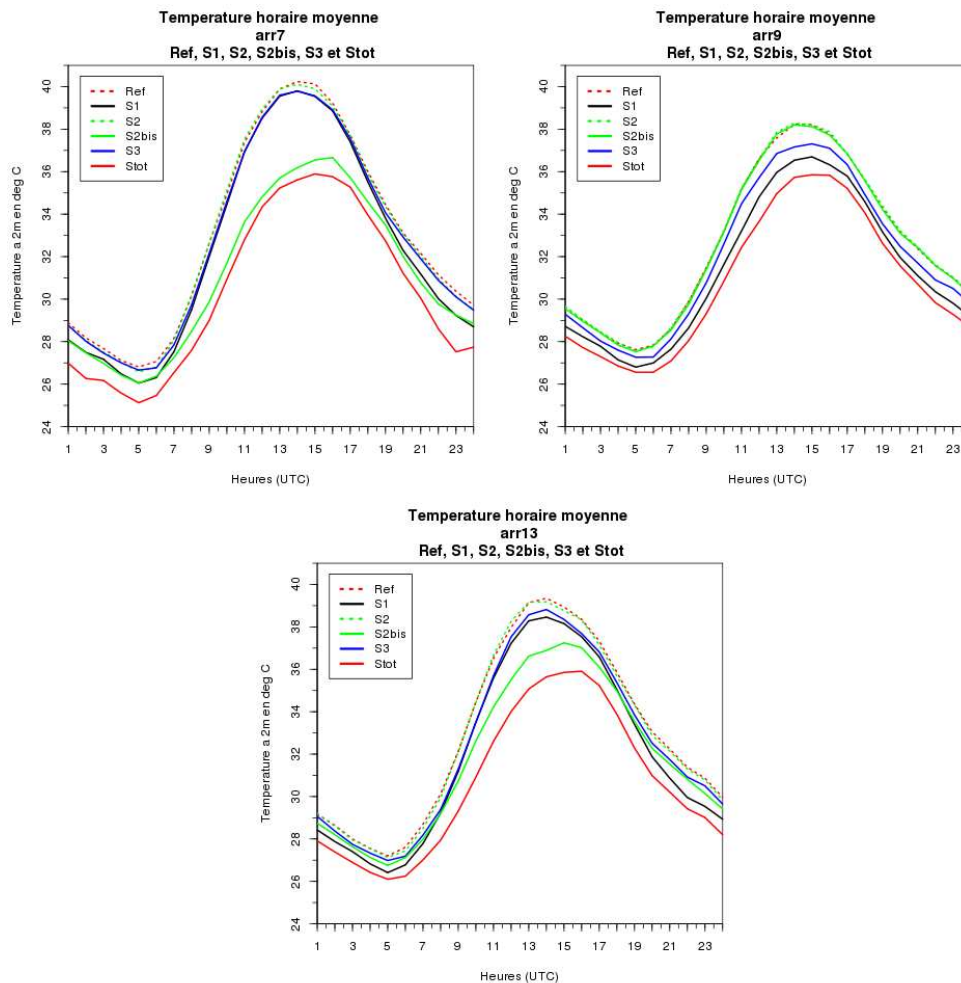


Figure 31 : Cycle quotidien moyen de la température à 2 m (en °C) (moyenne des températures horaires sur les 6 jours de simulation) pour la simulation de référence (pointillés) et l'ensemble des scénarios S1, S2, S2bis, S3 et Stot (traits pleins sauf S2, pointillés) sur différents points situés dans Paris *intra muros* : 7^{ème} arrondissement (arr7), 9^{ème} arrondissement (arr9) et 13^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29).

Sur le point arr7, le scénario S1 n'a que très peu d'impact en raison de la faible part de bâtiments présents (moins de 20 %). L'impact de S1 est plus visible la nuit (diminution de la température de l'ordre de 1°C). De même, le scénario S3 a un impact très limité, à la fois en journée et la nuit, du fait du peu de chaussées disponibles pour l'humidification (22.1 %). Au contraire, cette zone possède une grande part de sol nu (37.4 % de la végétation totale) que l'on choisit de végétaliser (scénarios S2 et S2bis). Le scénario S2 n'a quasiment pas d'impact (stress hydrique de la végétation) ; le scénario S2bis au contraire conduit à des baisses de température qui dépassent les 3°C en milieu de journée quand la température est maximale et la végétation en pleine activité d'évapotranspiration. La nuit, bien que la végétation ne soit plus en activité, une diminution résiduelle de température de l'ordre de 0.5 à 1°C perdure. Le scénario Stot donne comme attendu la plus forte diminution de température, de plus de 4°C au plus chaud de la journée sur le point arr7 (Tableau 6).

Sur le point arr9, c'est le scénario S1 qui a le plus d'impact puisque, situé dans les quartiers les plus densément construits et avec une part de bâti de plus de 55 %, c'est en touchant au cadre bâti que l'on pourra jouer sur les températures en ce point. On atteint ainsi une baisse de température de l'ordre de 1.5 à 2°C au maximum en milieu de journée. Les scénarios S2 et S2bis n'ont pas d'impact en la quasi-absence de végétation. Le scénario S3 a un impact relatif (part de rues de 40 %), avec une diminution de température de 1°C au maximum à la mi-journée. Le scénario Stot permet en combinant tous les effets d'abaisser la température jusqu'à près de 3°C sur le point arr9 (Tableau 6).

Sur le point arr13 (28 % de végétation, 40 % de bâti et 32 % de rues), les scénarios S1 et S3 ont un impact limité et relativement semblable, avec une légère baisse de température sur toute la journée, maximale en milieu de journée (de l'ordre de 1°C). Le scénario S2bis a un impact plus fort avec une baisse de la température de 2 à 2.5°C au maximum. Le scénario Stot permet quant à lui de diminuer la température jusqu'à 3.5°C (Tableau 6).

Point	Scénario	09/08		10/08		11/08		12/08		13/08		Moy	
		ΔT_n	ΔT_x	ΔT_n	ΔT_x	ΔT_n	ΔT_x	ΔT_n	ΔT_x	ΔT_n	ΔT_x	ΔT_n	ΔT_x
Arr 7	S1	-0.83	-0.40	-0.55	-0.73	-1.22	-0.32	-0.76	-0.24	-0.32	-0.44	-0.76	-0.44
	S2	-0.63	0.14	-0.18	-0.29	-0.08	0.09	-0.25	-0.30	-0.19	-0.16	-0.24	-0.12
	S2bis	-0.54	-3.23	-0.63	-3.38	-0.91	-4.00	-0.94	-3.54	-0.66	-3.25	-0.75	-3.57
	S3	-0.30	-0.34	-0.11	-0.46	-0.17	-0.42	-0.02	-0.29	-0.30	-0.41	-0.15	-0.45
	Stot	-0.82	-3.66	-1.03	-4.51	-3.98	-4.67	-1.91	-4.15	-1.17	-3.97	-1.68	-4.34
Arr 9	S1	-0.57	-1.42	-0.70	-1.92	-1.32	-2.18	-0.87	-1.55	-0.59	-1.76	-0.82	-1.54
	S2	-0.47	0.16	-0.12	0.09	0.01	-0.32	-0.02	0.08	-0.07	-0.02	-0.07	-0.05
	S2bis	-0.05	-0.10	-0.13	-0.01	-0.10	-0.31	-0.03	0.01	-0.03	-0.48	-0.10	-0.04
	S3	-0.59	-0.28	-0.36	-0.44	-0.39	-0.91	-0.54	-1.33	-0.68	-1.20	-0.36	-0.93
	Stot	-0.61	-1.52	-0.88	-2.12	-1.78	-2.65	-1.45	-2.58	-1.30	-2.76	-1.06	-2.38
Arr 13	S1	-0.93	-0.70	-0.49	-0.52	-0.88	-0.88	-1.08	-0.78	-0.58	-1.04	-0.79	-0.89
	S2	-0.50	-0.04	0.05	0.28	0.01	0.03	-0.11	-0.11	-0.07	0.14	-0.07	-0.17
	S2bis	-0.41	-1.72	-0.31	-1.79	-0.52	-2.54	-0.58	-2.06	-0.43	-1.51	-0.45	-2.10
	S3	-0.45	-0.66	-0.16	-0.43	-0.22	-0.74	-0.30	-0.47	-0.43	-0.32	-0.22	-0.53
	Stot	-0.64	-2.80	-0.66	-3.32	-1.58	-3.87	-1.86	-3.32	-1.43	-2.99	-1.10	-3.44

Tableau 6 : Différences de température à 2 m minimale (ΔT_n) et maximale (ΔT_x) entre les différents scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot) et la référence pour chaque jour de simulation (08, 09, 10, 11, 12 et 13 août 2003) et en moyenne sur l'ensemble de la simulation sur différents points situés dans Paris *intra muros* : 7^{ème} arrondissement (arr7), 9^{ème} arrondissement (arr9) et 13^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29).

Sur les séries temporelles couvrant l'ensemble de la période pour ces trois mêmes points (Figure 32) ainsi que sur le Tableau 6, on voit que l'impact des différents scénarios varie d'un jour à l'autre et est maximal le 11 août et que l'impact est plus visible le jour que la nuit.. Cette dernière date correspond à la journée où les températures sont les plus élevées dans la simulation de référence.

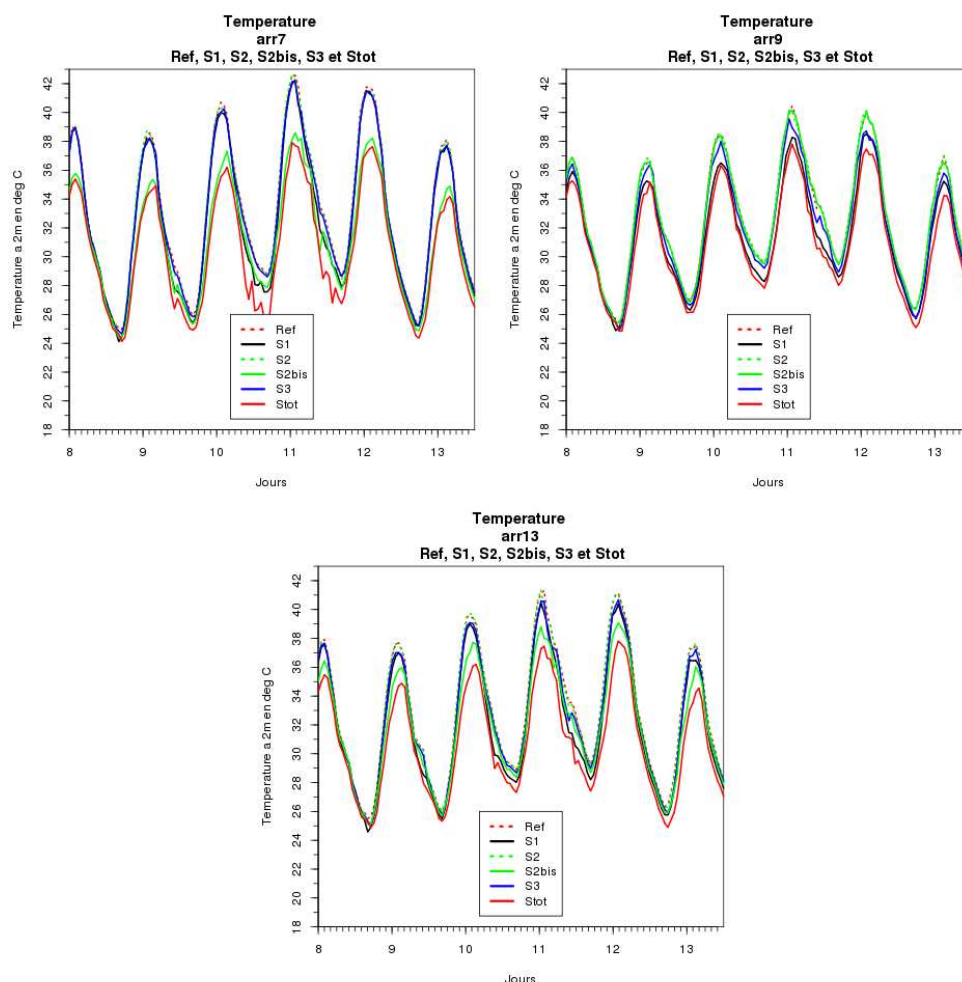
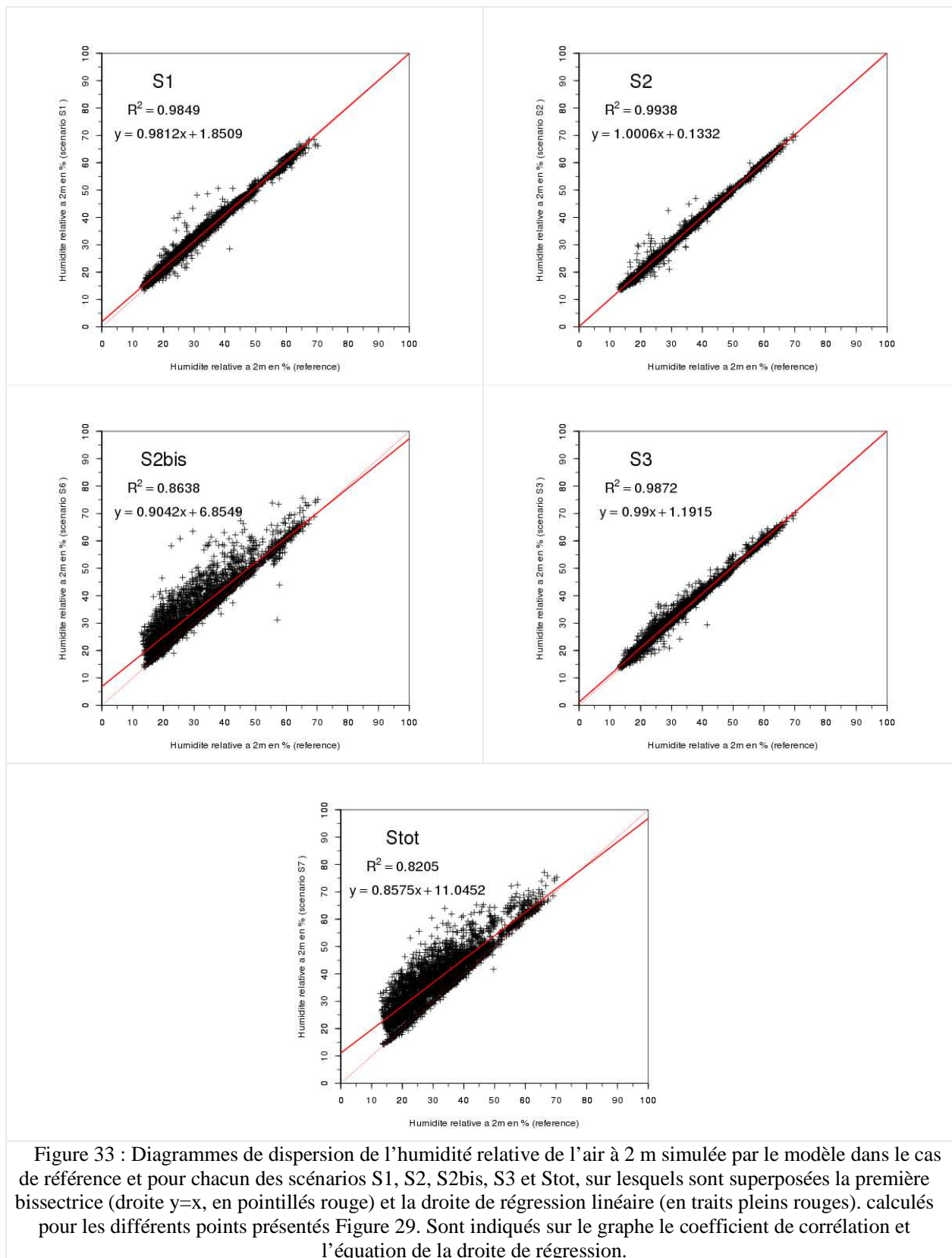


Figure 32 : Température de l'air à 2 m en °C pour la simulation de référence (pointillés) et l'ensemble des scénarios S, S2, S2bis, S3 et Stot (traits pleins sauf S2, pointillés) pour l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) sur différents points situés dans Paris *intra muros* : 7^{ème} arrondissement (arr7), 9^{ème} arrondissement (arr9) et 13^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29).

4.3 Impacts sur l'humidité relative

Les scénarios S1, S2 et S3 ne modifient quasiment pas l'humidité relative (Figure 33). Le scénario S2bis par contre conduit à une hausse globale des valeurs d'humidité relative. De la même manière, le scénario Stot présente une augmentation importante des humidités relatives, particulièrement les valeurs faibles et intermédiaires. A nouveau, comme dans le cas des températures à 2 m, on remarque sur ce dernier diagramme une absence de modifications sur un certain nombre de points qui correspondent aux différentes stations non situées dans Paris *intra muros* (Courbevoie, Saint-Denis, Saint-Maur et Villacoublay), illustrant le fait que les modifications effectuées dans Paris *intra muros* affectent principalement Paris *intra muros*.



La Figure 34 présente le cycle quotidien moyen d'humidité relative en différents points du domaine.

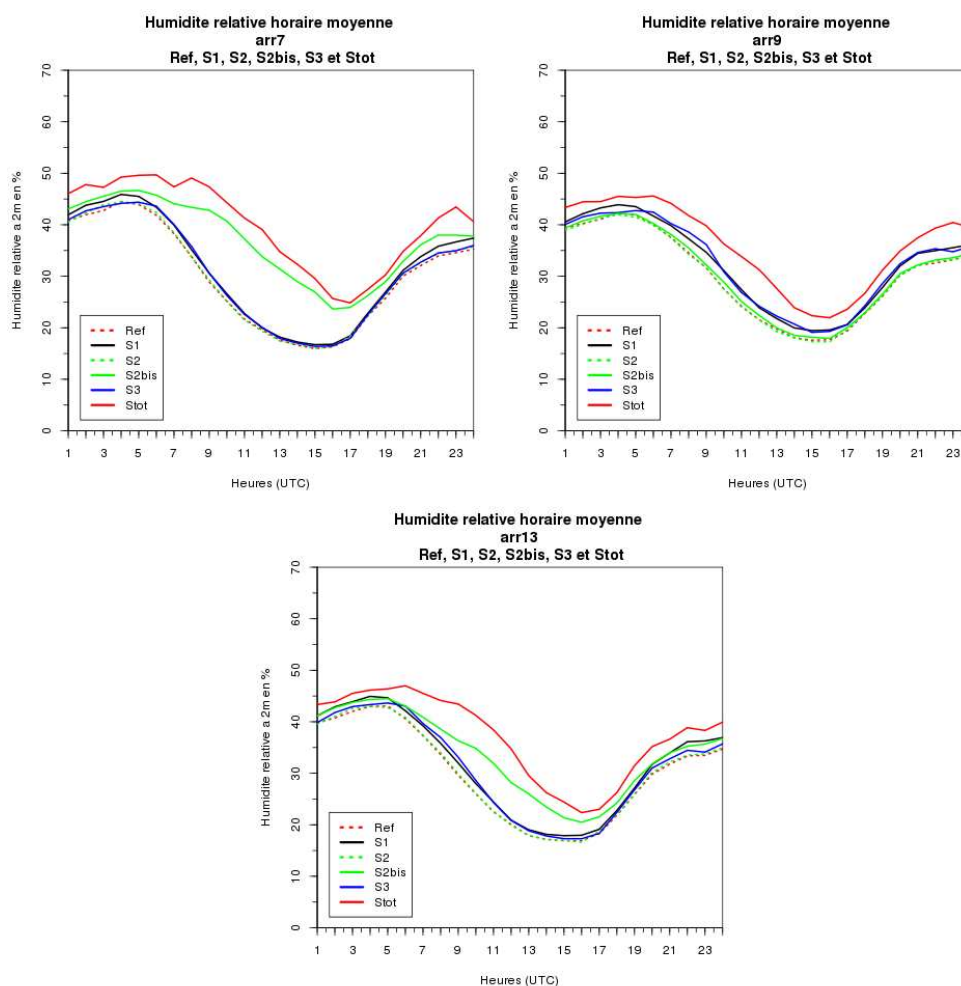


Figure 34 : Cycle quotidien moyen de l'humidité relative de l'air à 2 m (en %) (moyenne des humidités relatives horaires sur les 6 jours de simulation) pour la simulation de référence (pointillés) et l'ensemble des scénarios S1, S2, S2bis, S3 et Stot (traits pleins sauf S2, pointillés) sur différents points situés dans Paris *intra muros* : 7^{ème} arrondissement (arr7), 9^{ème} arrondissement (arr9) et 13^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29).

Sur le point arr7, les scénarios S1, S2 et S3 n'ont que très peu d'impact sur l'humidité relative. Le scénario S2bis y a lui un impact important en terme d'humidité relative avec une forte hausse en journée liée à l'activité de la végétation, mais peu d'impact la nuit en l'absence d'activité photosynthétique. On remarque que le scénario Stot a un impact plus important que S2bis à la fois le jour et la nuit, montrant par là-même l'influence des scénarios S1 et S3 qui s'ajoutent (5 à 15 % de hausse).

Sur le point arr9, les scénarios S2 et S2bis n'ont quasiment pas d'impact en raison de l'absence de végétation. Les scénarios S1 et S3 ont un impact identique relativement faible de l'ordre de quelques % de hausse de l'humidité relative. On atteint une hausse à peu près constante de 5 % en cumulant les effets dans le scénario Stot.

Sur le point arr13, on retrouve un comportement semblable au point arr7 mais avec une hausse moindre dans le cas du scénario S2bis qui se retranscrit donc également dans les résultats issus du scénario Stot (avec à nouveau une hausse plus importante la jour que la nuit pour Stot en raison de la présence de végétation).

Sur les séries temporelles d'humidité relative à 2 m couvrant l'ensemble de la période pour ces trois mêmes points (Figure 35), on voit à nouveau, comme pour les températures à 2 m, que l'impact des différents scénarios varie d'un jour à l'autre. L'impact est généralement plus visible le jour que la nuit.

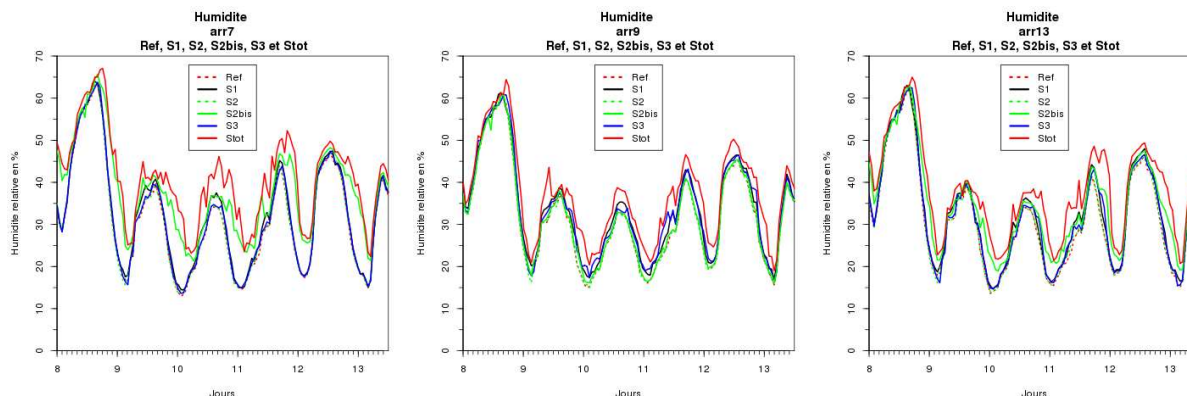


Figure 35 : Humidité relative de l'air à 2 m (%) pour la simulation de référence (pointillés) et l'ensemble des scénarios S, S2, S2bis, S3 et Stot (traits pleins sauf S2, pointillés) pour l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) sur différents points situés dans Paris *intra muros* : 7^{ème} arrondissement (arr7), 9^{ème} arrondissement (arr9) et 13^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29).

4.4 Impact sur la vitesse du vent

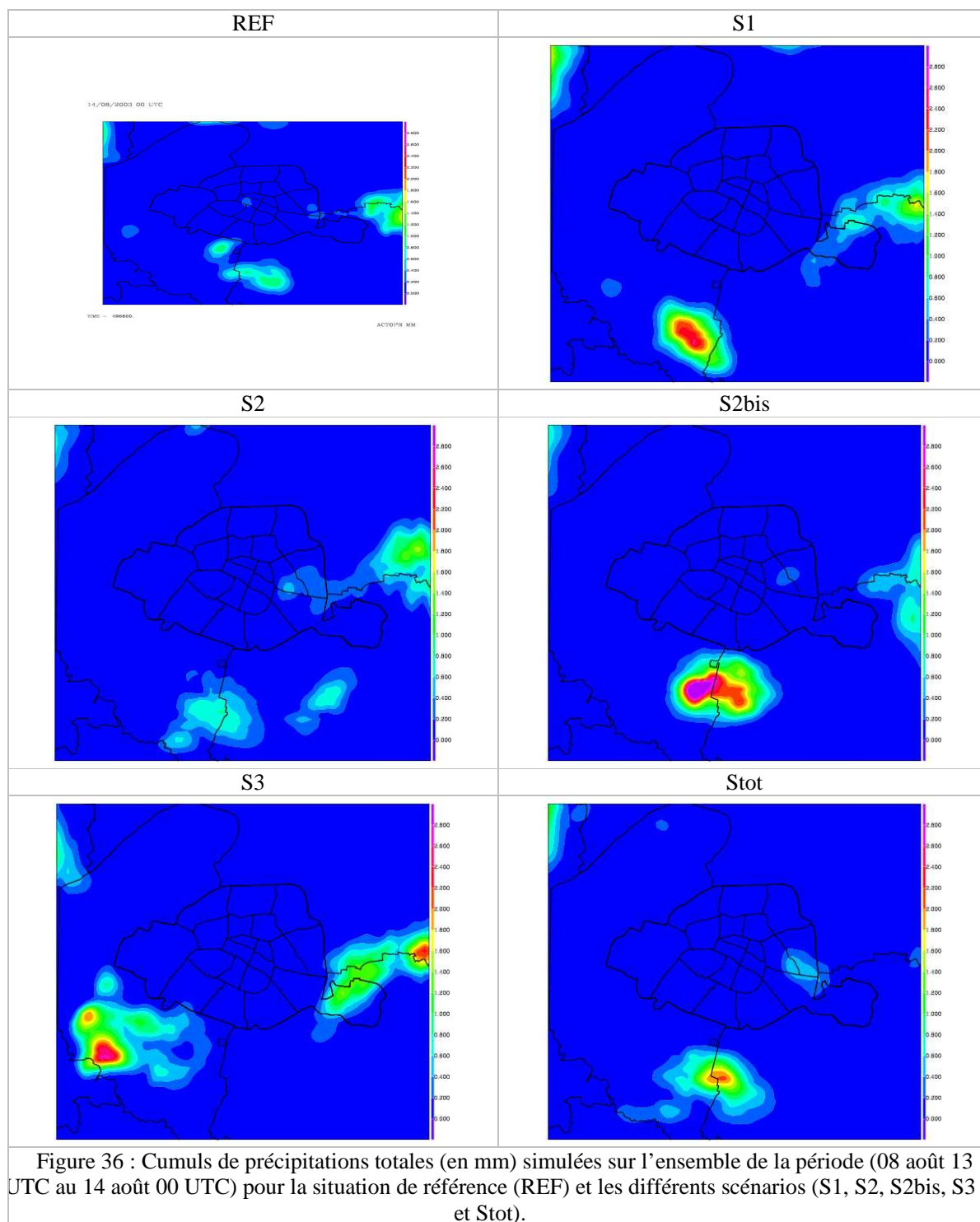
La vitesse du vent n'est pas modifiée au regard de la variabilité du paramètre. Celle-ci reste par ailleurs très faible sur la période de simulation.

4.5 Impact sur les précipitations

On rappelle que 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. Dans la simulation de référence (Figure 36), il est vu par le modèle avec un décalage temporel de quelques heures, dans l'après-midi du 11 août.

Dans le scénario S1, cet orage est également correctement simulé, avec un noyau principal de précipitations situé au sud de Paris légèrement décalé vers l'ouest par rapport à la référence et avec un cumul plus important (cumul maximum qui avoisine les 3 mm pour S1 contre moins de 1 mm pour la référence). Dans le scénario S2, cet orage est simulé de manière quasi identique à la référence. Dans le scénario S2bis par contre, l'orage est localisé à la même place mais présente un cumul de pluie plus important, là encore avoisinant les 3 mm au maximum. Les modifications sont sensibles dans le scénario S3, avec un orage décalé vers l'ouest sur les Hauts-de-Seine au sud-ouest de Paris. En terme d'intensité, les cumuls sont toujours plus élevés que dans la référence avec des valeurs de cumul maximum qui atteignent 2 à 2.5 mm. Dans le scénario Stot, cet orage est localisé sensiblement au même endroit que dans la référence, juste au sud de Paris. Le cumul maximum atteint 2 mm. Au

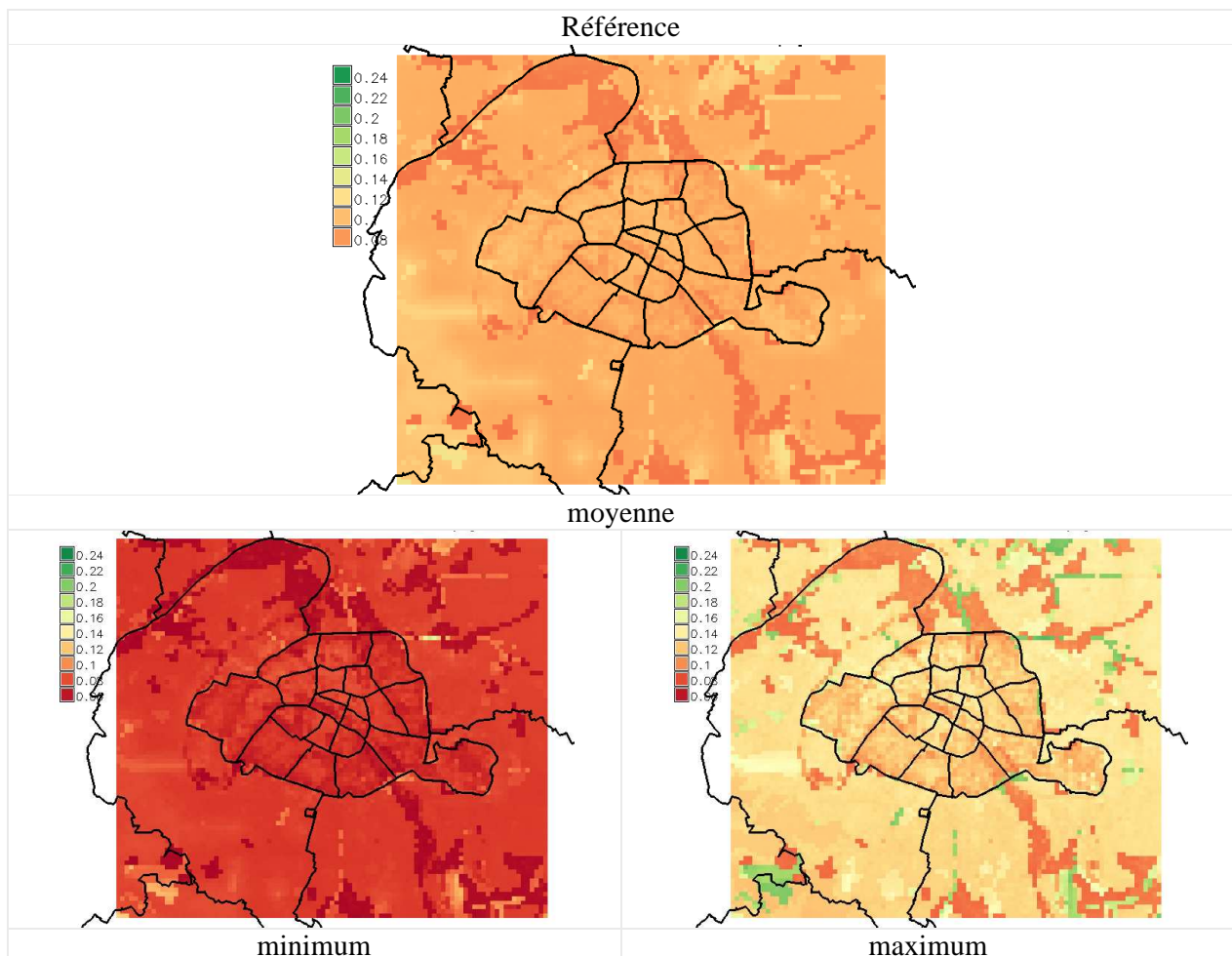
niveau de la temporalité, l'ensemble des scénarios ainsi que le scénario de référence simulent cet orage dans l'après-midi du 11 août.

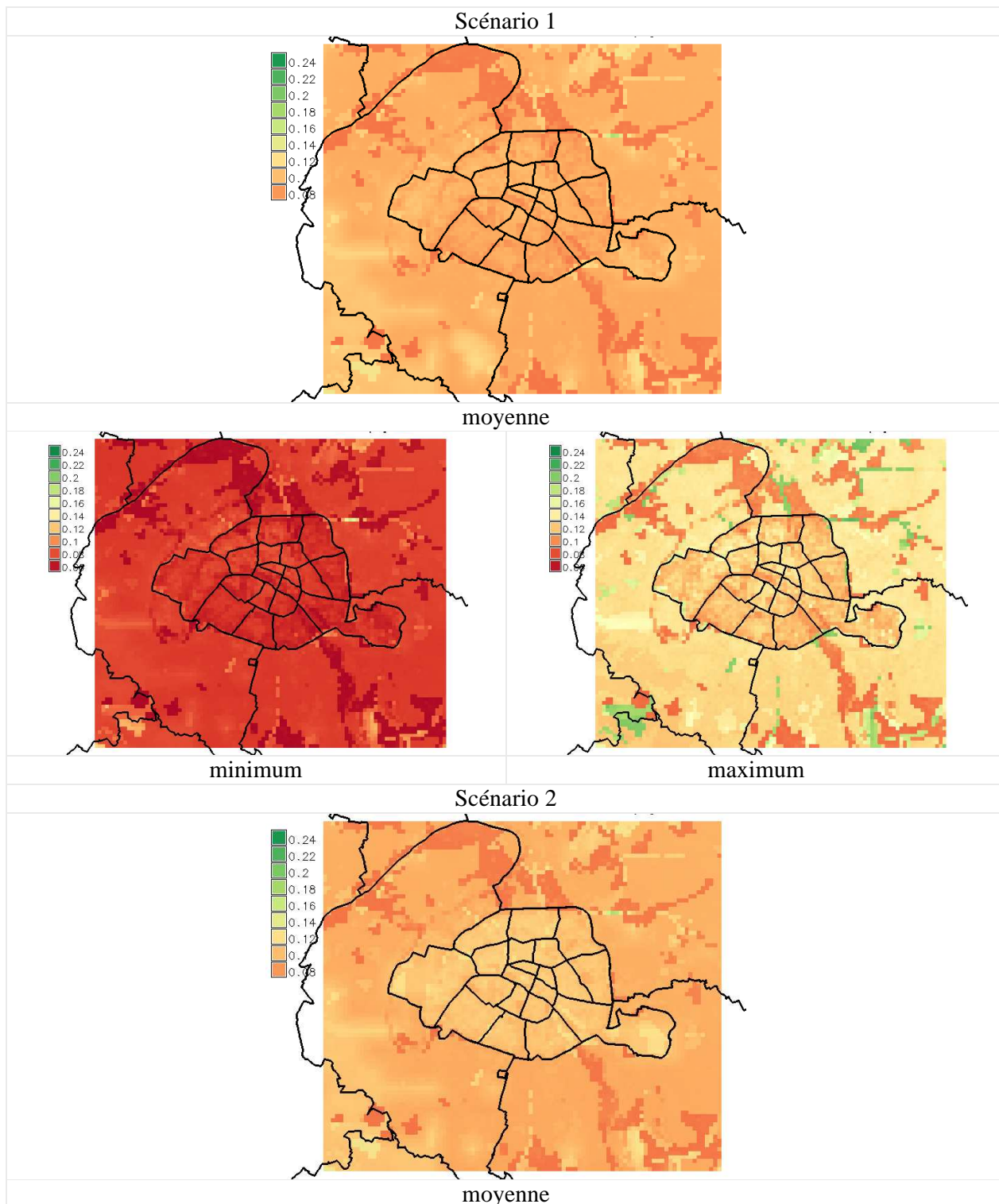


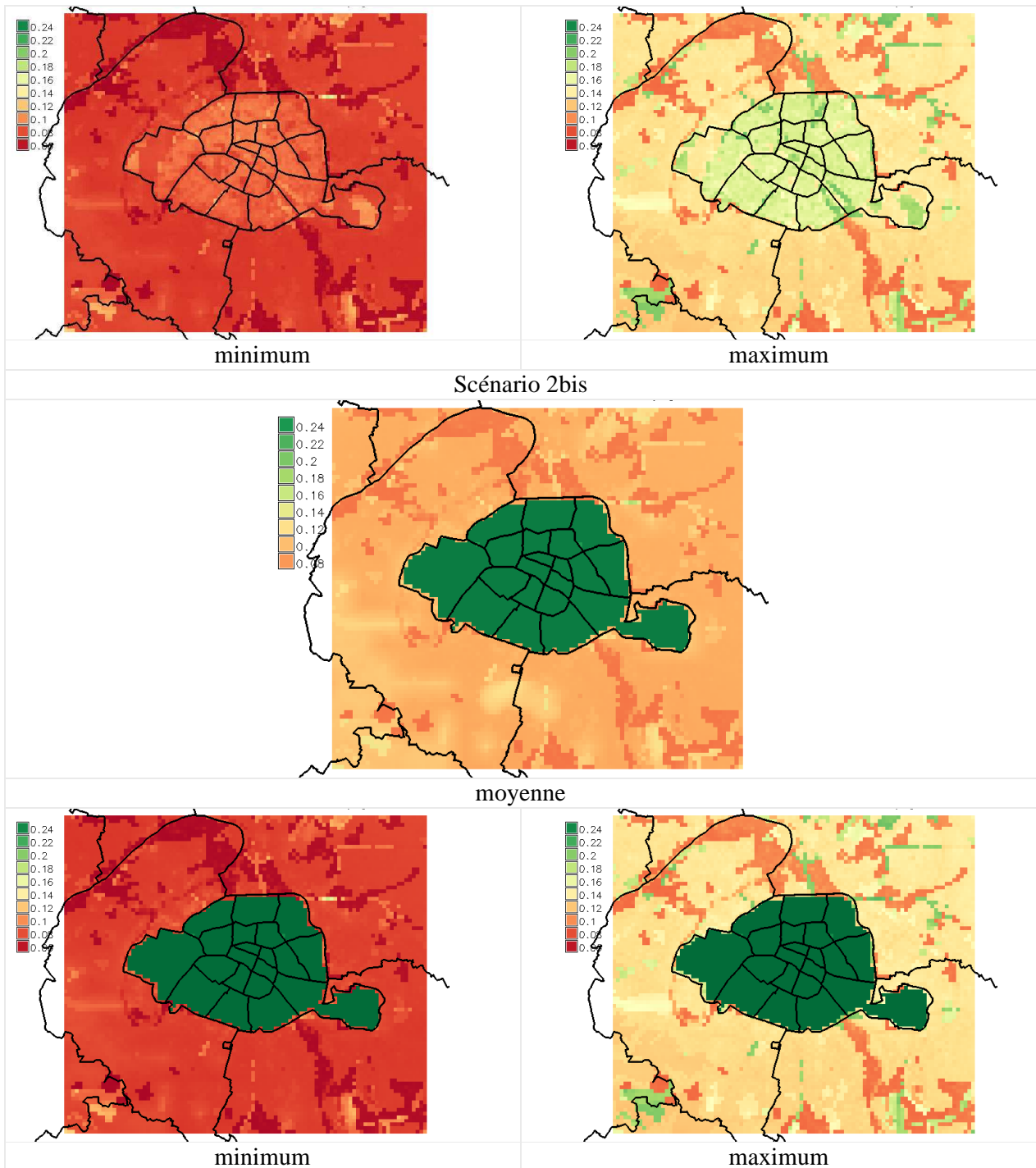
Il est intéressant de constater par l'analyse des précipitations que des modifications de la surface à petite échelle dans Paris *intra muros* entraînent des modifications dans la circulation de moyenne échelle occasionnant ainsi des changements dans le régime orageux et de précipitations.

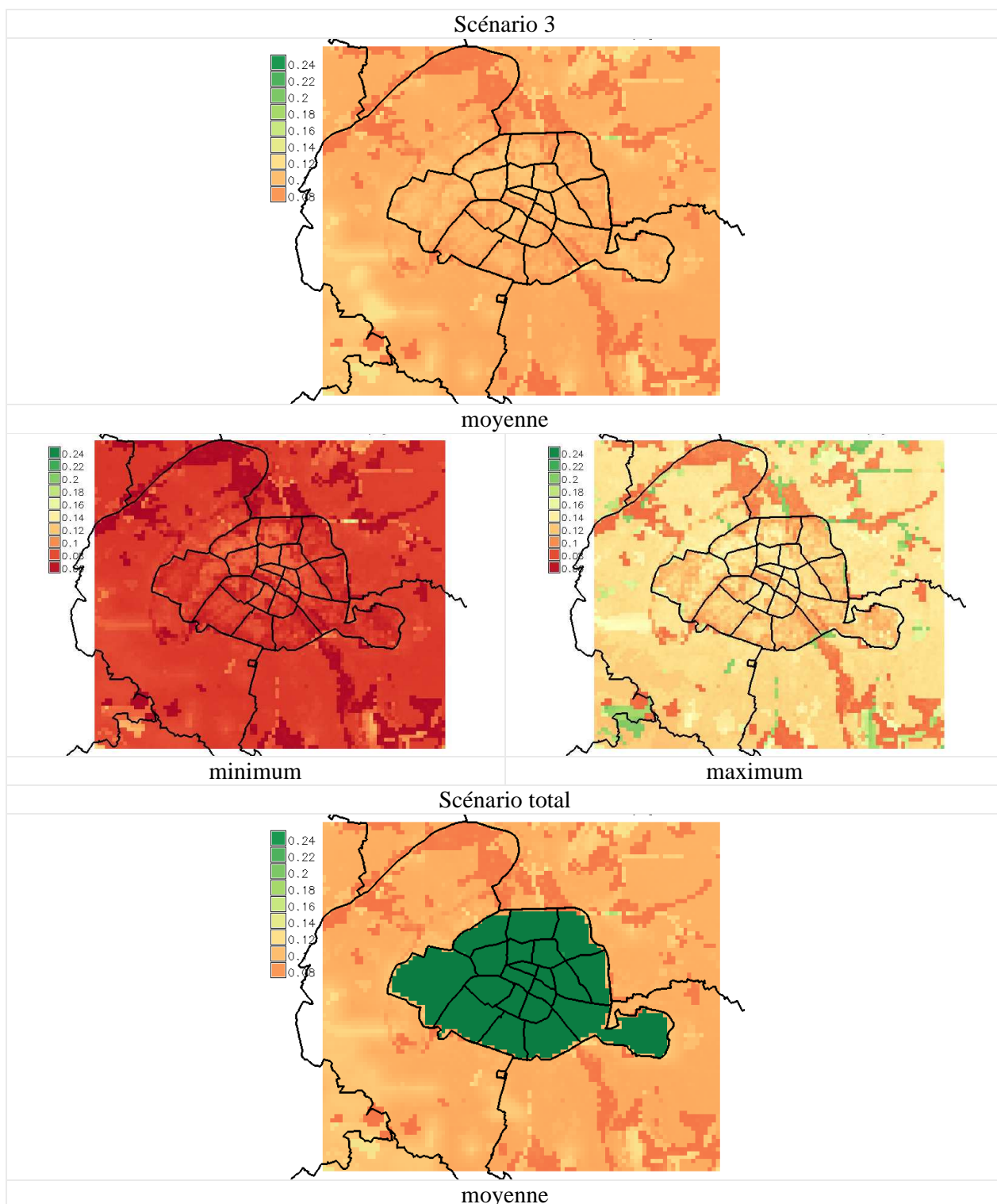
4.6 Impacts sur l'humidité des sols

La Figure 37 présente les contenus en eau du réservoir superficiel du sol moyens, minimum et maximum pour la simulation de référence et les différents scénarios envisagés. L'impact sur le contenu en eau des sols est nul dans le cas des scénarios S1 et S3. Le scénario S2 a lui un impact visible : même en l'absence d'irrigation, l'ajout de végétation permet de limiter légèrement l'assèchement des sols. Ainsi, le réservoir superficiel du sol dans le scénario S2 part d'un maximum de 0.16 à 0.2 mm le 08 août 2003 à 13 UTC contre un maximum de 0.12 à 0.14 mm dans la référence et atteint un minimum de 0.1 à 0.12 mm le 10 août 2003 à 15 UTC alors que ce minimum était de 0.5 à 0.8 mm dans la référence. Dans les scénarios S2bis et Stot, on procède à une irrigation de la végétation située dans Paris : le contenu en eau du sol pour Paris *intra muros* est forcé à 50 % de sorte que la végétation ne soit jamais en situation de stress hydrique. On observe donc sur les graphiques un contenu en eau du réservoir superficiel du sol à peu près constant et maximal de l'ordre de 0.25 mm sur Paris *intra muros*, tandis que les contenus en eau du réservoir superficiel du sol sont inchangés sur la banlieue.









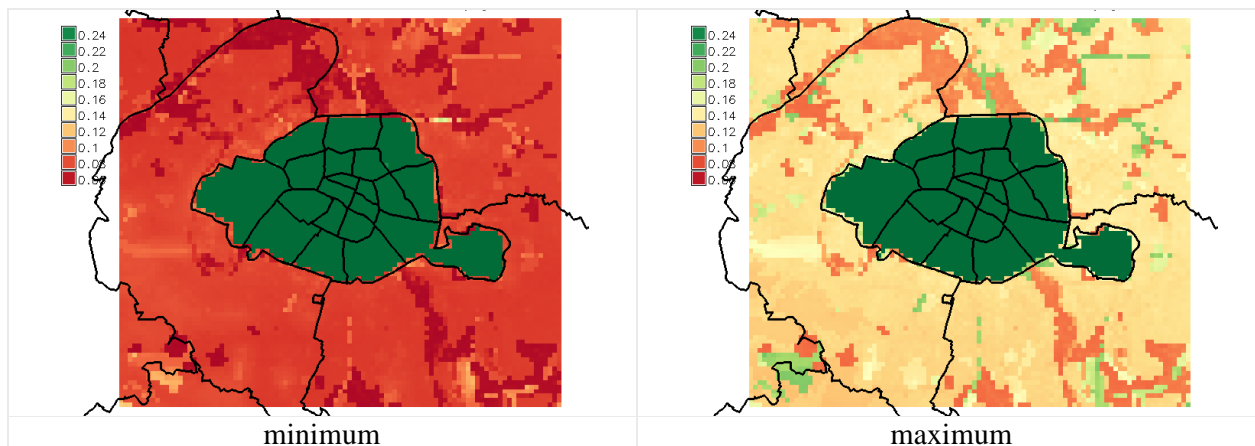
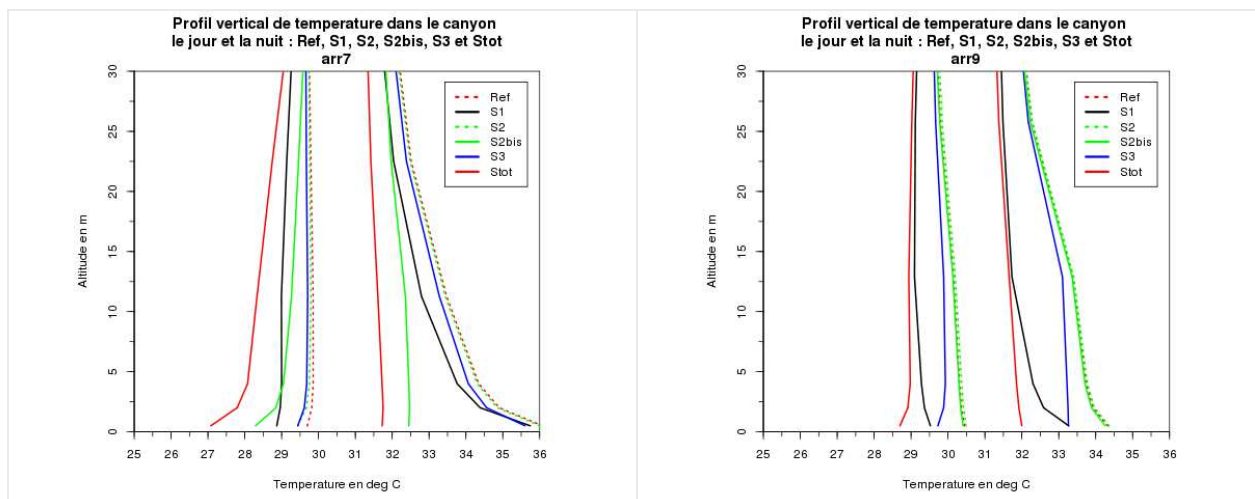


Figure 37 : Contenus en eau moyens du réservoir superficiel du sol du réservoir superficiel du sol et contenus en eau minimum (le 10/08/2003 à 15 UTC) et maximum (le 08/08/2003 à 13 UTC en tout début de période) simulés par le modèle (en mm) pour la référence et chacun des scénarios (S1, S2 ; S2bis, S3 et Stot).

4.7 Analyse verticale

Des moyennes temporelles des données de températures, d'humidité spécifique et de vent sur la verticale sont réalisées à l'intérieur de la canopée urbaine ainsi qu'au-dessus de la canopée, dans la couche limite, pour la température.

4.7.1 Température



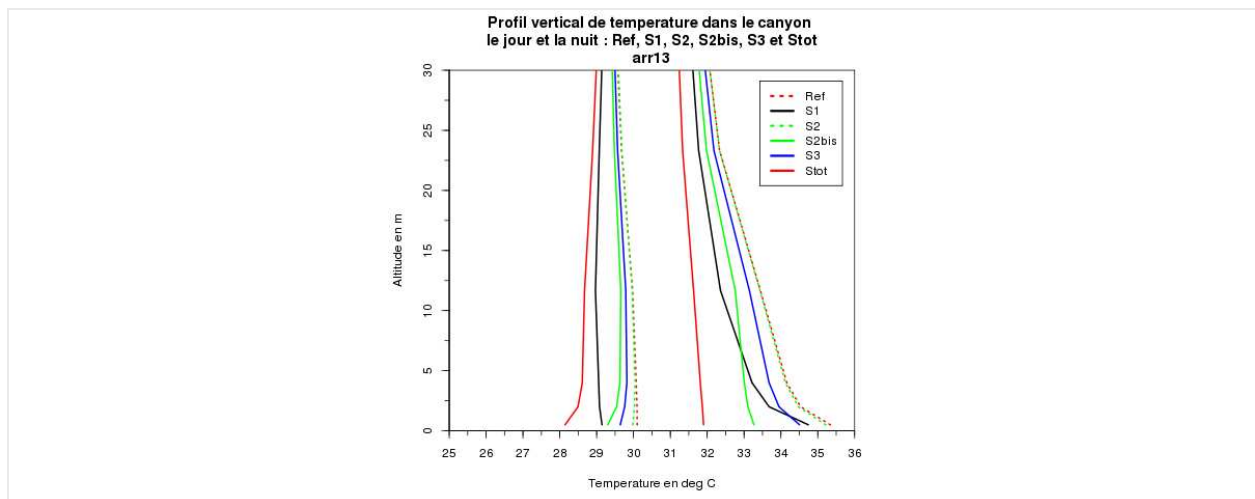


Figure 38 : Profil vertical de température de l'air (en °C) moyennée sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) le jour (groupe de courbes à droite sur chaque figure) et la nuit (groupe de courbes à gauche sur chaque figure) pour la simulation de référence (en pointillés) et l'ensemble des scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot en traits pleins sauf S2 en pointillés) sur différents points situés dans Paris *intra muros* : 7^{ème} arrondissement (arr7), 9^{ème} arrondissement (arr9) et 13^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29).

Sur le point arr7 (Figure 38), l'impact du scénario S1 est faible sur la température moyenne de jour (baisse quasi nulle en surface et maximum de 0.5 °C entre 10 et 15 m d'altitude) et plus important la nuit (baisse de 0.5 °C sur toute la verticale) en raison de la part réduite de bâtiments. Au contraire, le scénario S2bis a un impact très fort le jour suite à l'ajout notable de végétation (baisse de 3.5 °C) qui diminue en altitude (la couche est bien brassée en journée suite aux échanges de chaleur par l'intermédiaire du flux de chaleur latente alors qu'elle était bien stratifiée dans la situation de référence avec une température décroissante sur la verticale). La nuit, le scénario S2bis a un impact résiduel plus faible que le jour (baisse de 1.5 °C en très basses couches) et qui diminue plus rapidement avec l'altitude. L'impact du scénario S3 reste très limité de jour comme de nuit sur ce point (surface de chaussées arrosées peu importante). Le scénario Stot additionne tous les effets pour donner une baisse de plus de 4 °C en surface le jour avec une température quasi constante sur l'altitude et donc une baisse par rapport à la référence qui décroît avec l'altitude (baisse de 2 °C à 10 m et 1 °C à 20 m). La nuit, la température simulée par le scénario Stot présente une inversion thermique plus marquée que la référence, avec une température au sol de 27 °C qui augmente rapidement à 28 °C à 2 m puis d'une manière plus lente jusqu'à près de 29 °C à 30 m. La baisse correspondante de température par rapport à la situation de référence est de 2.5 °C au sol puis 2 °C entre 2 et 10 m environ et entre 1 et 0.5 °C entre 15 et 30 m d'altitude.

Sur le point arr9, c'est le scénario S1 qui pilote la baisse de température en raison de l'importante part de bâti (55 %). En journée, cette diminution est de 1.5 °C du sol jusqu'à 15 m d'altitude, puis de 1 °C au-dessus. La nuit elle est un peu plus faible et se limite à 1 °C à peu près constant sur la verticale. Le scénario S2bis n'a pas d'impact en l'absence de végétation. Le scénario S3 a un impact relatif : baisse de l'ordre de 1 °C en surface le jour et la nuit, mais qui s'estompe très rapidement avec l'altitude et a totalement disparu au-dessus de 20 m. En cumulant les effets via le scénario Stot, on obtient une baisse de l'ordre de 2.5 °C en surface, 2 °C à 10 m et 1 °C à 15 m et au-delà la journée, avec une couche ici aussi plus brassée verticalement que dans la situation de référence. La nuit, la diminution de température est de 2 °C en surface et 1.5 °C entre 2 et 15 m d'altitude, 1 °C au-delà.

Sur le point arr13, les différents scénarios ont des résultats moins tranchés. S1 et S3 (part de bâti et de rues comparables, 39.6 % et 32.6 % respectivement) entraînent en journée une baisse similaire de 1 °C en surface, mais l'impact de S3 diminue beaucoup plus rapidement avec l'altitude que S1 qui présente toujours une baisse de 1 °C aux alentours de 10 m d'altitude (suite aux modifications des propriétés des murs et des toitures qui se font sur la verticale). S2bis (du fait de l'ajout conséquent de végétation) conduit à une baisse plus forte en surface (plus de 2 °C) mais qui s'estompe également plus rapidement en altitude (0.7 °C vers 10 m). A nouveau, le scénario Stot présente une couche bien homogène sur la verticale en terme de température avec une baisse de 3.5 °C en surface à 1 °C vers 25 m d'altitude. La nuit, S3 et S2bis ont un comportement similaire avec une diminution qui reste faible malgré une baisse un peu marquée en très basses couches pour S2bis, tandis que S1 conduit à une baisse plus forte de l'ordre de 1 °C sur quasiment toute la hauteur de la canopée urbaine. Avec Stot, la baisse est maximale en surface (2 °C) puis diminue progressivement avec l'altitude.

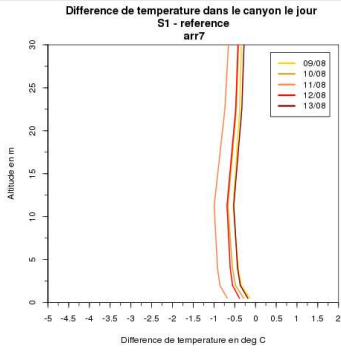
Ces différences s'expliquent par l'environnement différent de ces divers points (voir Tableau 5), ainsi que par les caractéristiques de chaque simulation :

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

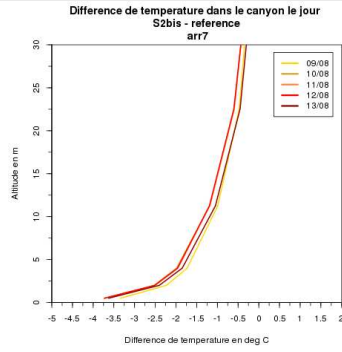
Les figures suivantes détaillent les impacts jour par jour (Figure 39) et nuit par nuit (Figure 40) pour les divers scénarios sur ces trois mêmes points. Il en ressort que tous les scénarios conduisent à une baisse de température tous les jours et toutes les nuits, ou au pire à l'absence d'impact, mais en aucun cas à une hausse de température. Pour tous les scénarios, l'impact maximal a lieu dans la journée et dans la nuit du 11/08. Le scénario S1 a un impact relativement constant sur la verticale avec toutefois un pic aux alentours de 12 m d'altitude où la diminution de température est maximale, de jour comme de nuit, altitude à laquelle doivent se combiner de manière optimale les effets liés aux modifications des propriétés radiatives à la fois des murs et des toits. Le scénario S2 (non montré) n'a pas d'impact. Le scénario S2bis a un impact d'autant plus grand que la proportion de végétation est importante (point arr7 où la baisse de température atteint, voire dépasse les 3.5 °C en journée et 2.5 °C la nuit alors que l'impact est nul sur le point arr9), son impact est maximal en basses couches pour décroître ensuite sur la verticale, maximal le jour avec l'activité végétale d'évapotranspiration et minimal à nul la nuit en l'absence du soleil. Le scénario S3 a un impact localisé en très basses couches (on n'agit qu'en surface en humidifiant les routes), relativement faible (diminution de 0.5 à 1 °C en surface) et peu variable d'un jour à l'autre. Le scénario Stot cumule à nouveau les impacts des divers scénarios et peut conduire à des baisses de température très importantes, jusqu'à 5 °C le jour et 4.5 °C en la nuit en surface le 11/08 sur le point arr7 par exemple.

Arrondissement 7

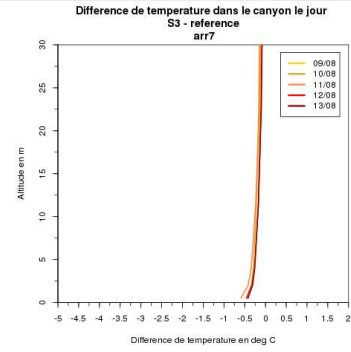
S1



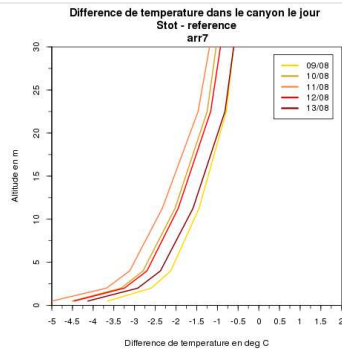
S2bis



S3

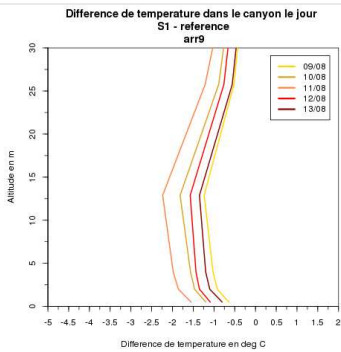


Stot

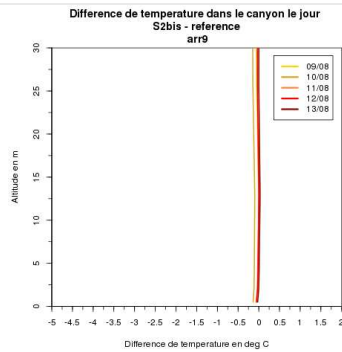


Arrondissement 9

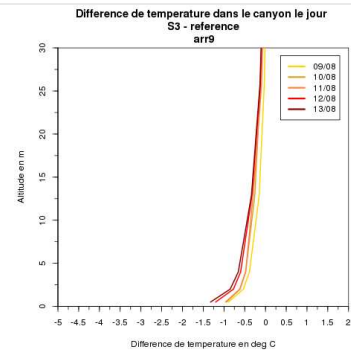
S1



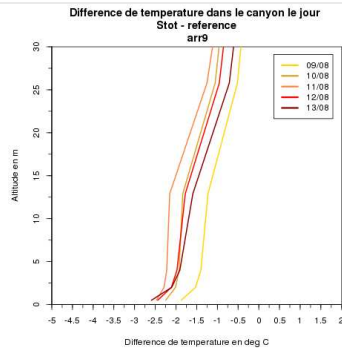
S2bis



S3



Stot



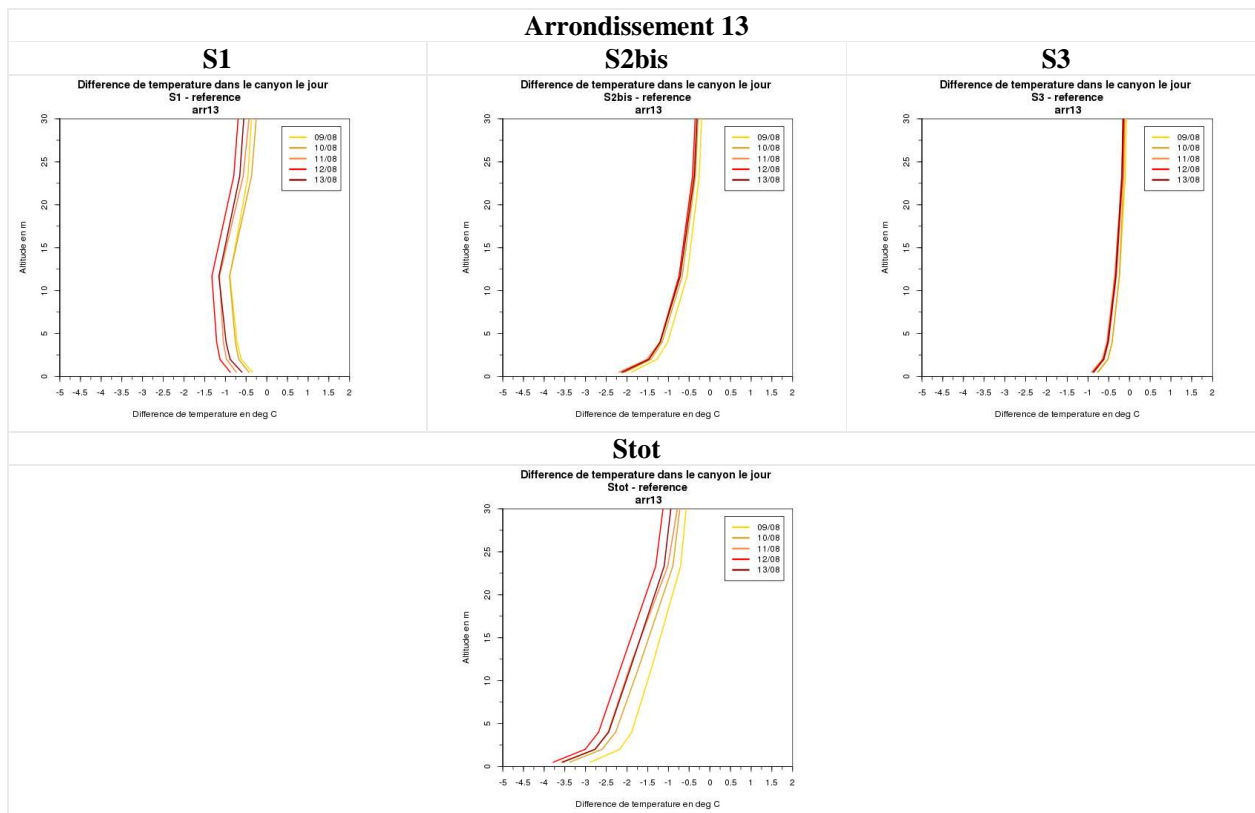
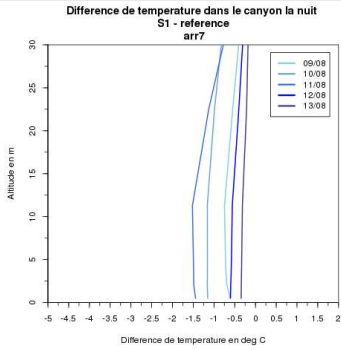


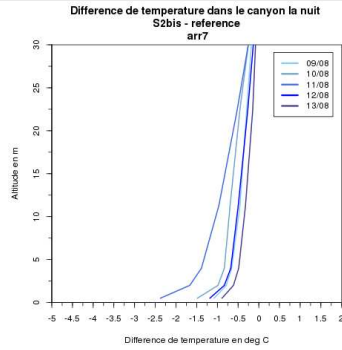
Figure 39 : Profil vertical de différence de température de l'air (en °C) moyennée jour par jour sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) entre chacun des scénarios (S1, S2bis, S3 et Stot) et la simulation de référence sur différents points situés dans Paris *intra muros* : 7^{ème} arrondissement (arr7), 9^{ème} arrondissement (arr9) et 13^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29).

Arrondissement 7

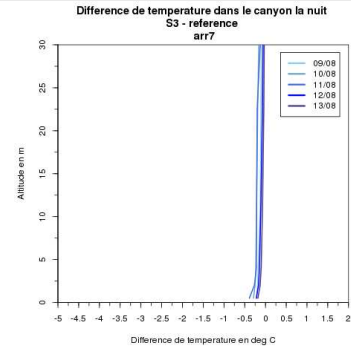
S1



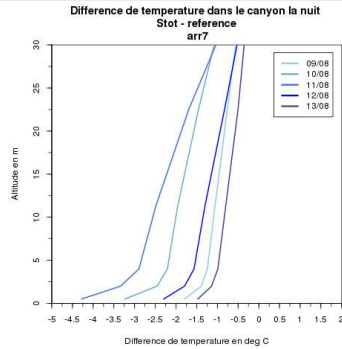
S2bis



S3

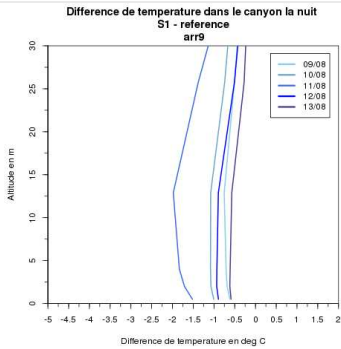


Stot

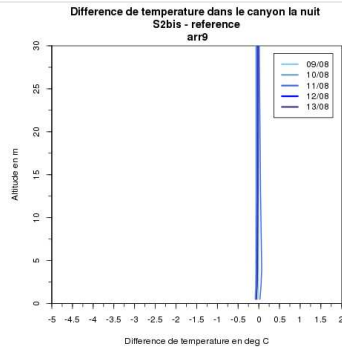


Arrondissement 9

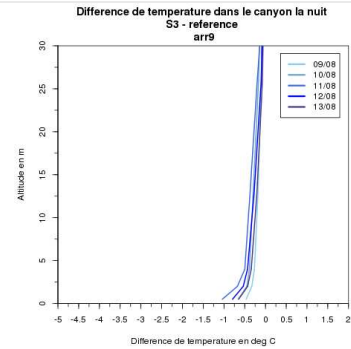
S1



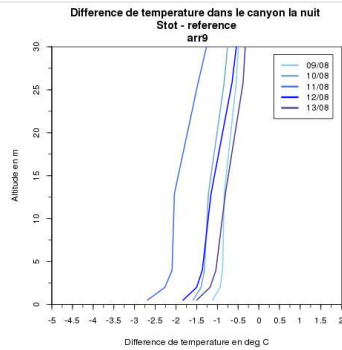
S2bis



S3



Stot



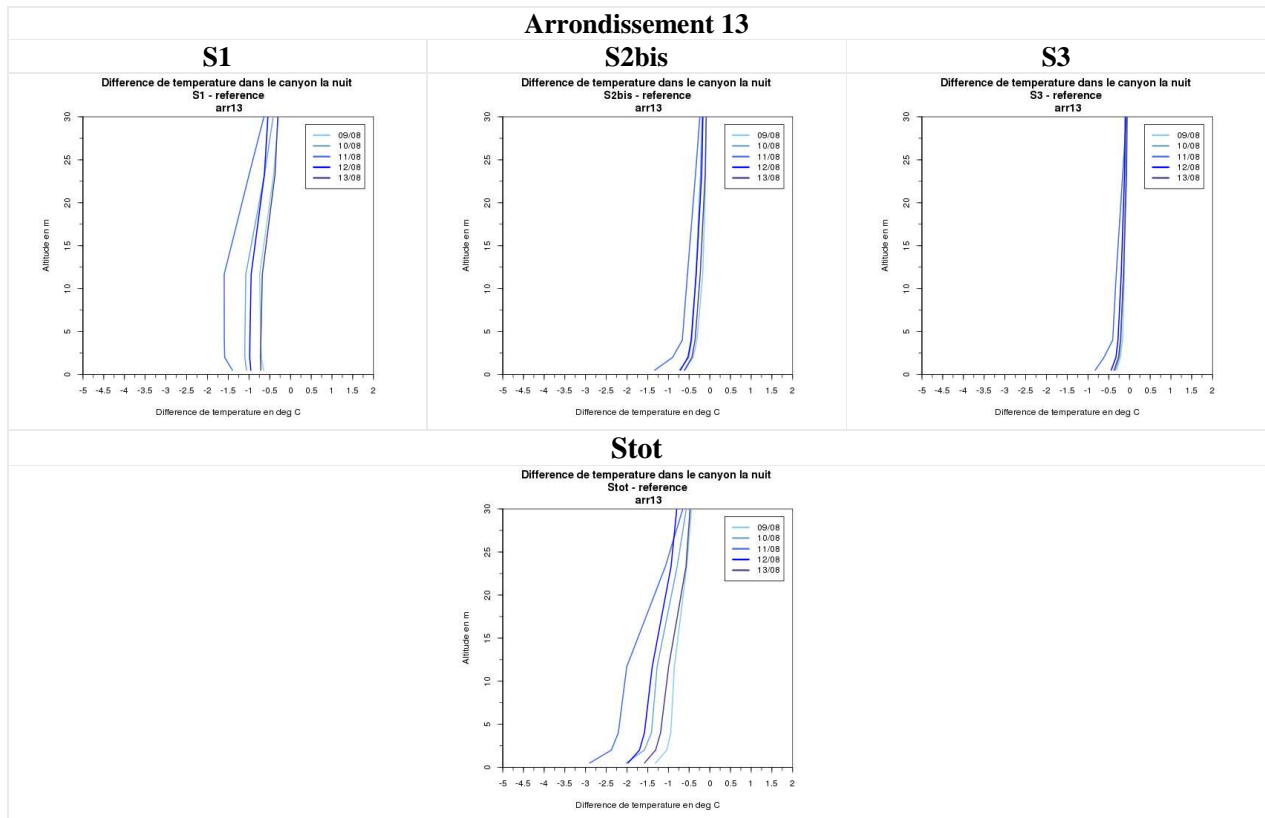


Figure 40 : Profil vertical de différence de température de l'air (en °C) moyennée nuit par nuit sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) entre chacun des scénarios (S1, S2bis, S3 et Stot) et la simulation de référence sur différents points situés dans Paris *intra muros* : 7^{ème} arrondissement (arr7), 9^{ème} arrondissement (arr9) et 13^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29).

En synthétisant les données pour chaque point, on obtient le tableau suivant (Tableau 7).

Hauteur	Arr7							
	Jour (moyenne diurne)				Nuit (moyenne nocturne)			
	S1	S2bis	S3	S7	S1	S2bis	S3	S7
32.5 m	-0.40	-0.34	-0.11	-0.80	-0.44	-0.13	-0.09	-0.60
22.5 m	-0.48	-0.54	-0.13	-1.09	-0.65	-0.33	-0.12	-1.05
11.3 m	-0.68	-1.12	-0.20	-1.87	-0.86	-0.59	-0.15	-1.52
4 m	-0.59	-1.90	-0.28	-2.62	-0.86	-0.81	-0.17	-1.78
2 m	-0.52	-2.43	-0.34	-3.15	-0.85	-0.98	-0.20	-2.02
0.5 m	-0.33	-3.63	-0.48	-4.35	-0.83	-1.40	-0.26	-2.62

Hauteur	Arr9							
	Jour (moyenne diurne)				Nuit (moyenne nocturne)			
	S1	S2bis	S3	S7	S1	S2bis	S3	S7
35.7 m	-0.51	-0.05	-0.04	-0.65	-0.45	-0.02	-0.07	-0.54
25.8 m	-0.79	-0.04	-0.10	-0.90	-0.68	-0.02	-0.13	-0.78
12.9 m	-1.64	-0.01	-0.27	-1.72	-1.05	-0.02	-0.27	-1.21
4 m	-1.44	-0.03	-0.52	-1.89	-1.03	-0.02	-0.38	-1.34
2 m	-1.34	-0.04	-0.68	-2.01	-1.00	-0.02	-0.48	-1.45
0.5 m	-1.06	-0.07	-1.06	-2.32	-0.92	-0.04	-0.72	-1.75

Hauteur	Arr13							
	Jour (moyenne diurne)				Nuit (moyenne nocturne)			
	S1	S2bis	S3	S7	S1	S2bis	S3	S7
33.3 m	-0.41	-0.26	-0.11	-0.74	-0.36	-0.13	-0.06	-4.88
23.3 m	-0.57	-0.35	-0.15	-1.00	-0.60	-0.19	-0.11	-0.78
11.7 m	-1.08	-0.68	-0.30	-1.81	-1.01	-0.32	-0.19	-1.30
4 m	-0.94	-1.15	-0.48	-2.35	-1.02	-0.44	-0.25	-1.46
2 m	-0.86	-1.43	-0.59	-2.67	-1.02	-0.55	-0.33	-1.60
0.5 m	-0.60	-2.07	-0.84	-3.44	-0.95	-0.80	-0.46	-1.96

Tableau 7 : Différence de température (en °C) à différentes hauteurs sur la verticale, moyennée sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) le jour (entre 05 et 19 UTC, soit entre 7h et 21h locales) et la nuit (entre 20 UTC et 04 UTC, soit entre 22h et 6h locales) entre les différents scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot) et la référence sur différents points situés dans Paris *intra muros* : 7^{ème} arrondissement (arr7), 9^{ème} arrondissement (arr9) et 13^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29).

4.7.2 Température au-dessus de la canopée urbaine

L'impact des différents scénarios dans la couche limite au-dessus de la canopée urbaine est visible jusqu'à environ 400 m le jour et 200 m la nuit (Figure 41). En altitude, seuls les scénarios S1 et Stot ont un impact notable : pour le scénario Stot, la baisse de température va jusqu'à 1 °C le jour et jusqu'à 0.5 °C la nuit, fluctuant selon les jours et selon les points considérés. Plus haut dans la couche limite, on remarque par ailleurs des fluctuations des températures dans les différents scénarios par rapport à la situation de référence. Ces légères instabilités sont plus importantes le jour que la nuit et sont variables selon les jours. Elles traduisent le fait que le brassage vertical dans la couche limite est impacté par les différents scénarios, même si les modifications ne se font qu'au niveau de la surface.

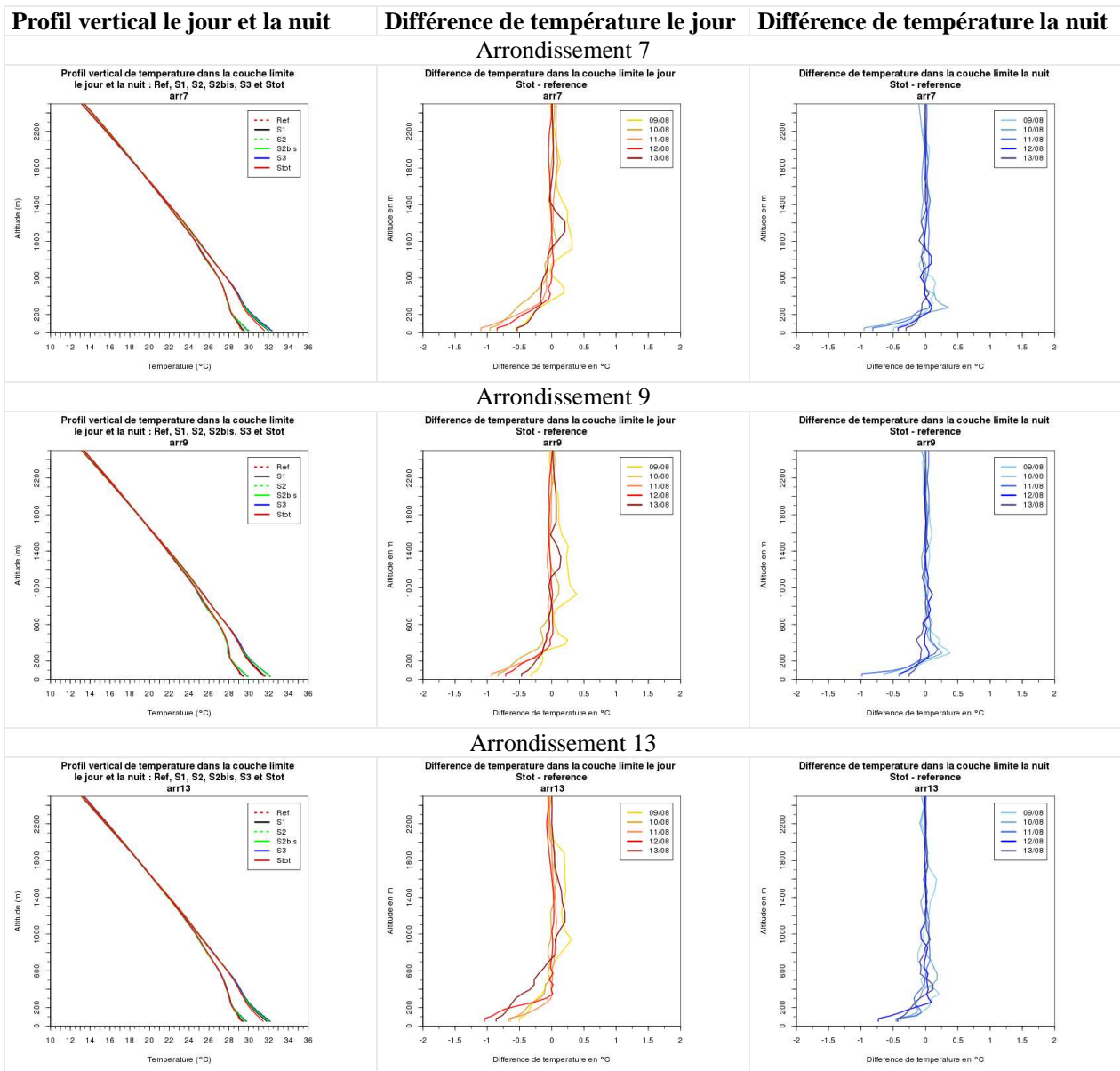


Figure 41 : Profil vertical de température de l'air (en °C) moyennée sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) le jour (groupe de courbes à droite sur chaque figure) et la nuit (groupe de courbes à gauche sur chaque figure) pour la simulation de référence (en pointillés) et l'ensemble des scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot en traits pleins sauf S2 en pointillés) à gauche ; profil vertical de différence de température de l'air (en °C) moyennée jour par jour sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) entre chacun des scénarios (S1, S2bis, S3 et Stot) et la simulation de référence au centre ; Profil vertical de différence de température de l'air (en °C) moyennée nuit par nuit sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) entre chacun des scénarios (S1, S2bis, S3 et Stot) et la simulation de référence à droite sur différents points situés dans Paris *intra muros* : 7^{ème} arrondissement (arr7), 9^{ème} arrondissement (arr9) et 13^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29).

4.7.3 Humidité spécifique

L'impact sur l'humidité spécifique est très limité (Figure 42). Sur le point arr7, il n'est visible que sur les scénarios S2bis et Stot en très basses couches, avec une hausse de l'ordre de 0.1 à 0.2 g.m^{-3} . Il est de même sur le point arr13 avec une hausse limitée à 0.1 g.m^{-3} . Sur le point arr9, une très légère hausse de l'humidité spécifique (0.05 à 0.1 g.m^{-3}) est visible avec les scénarios S3 et Stot. Sur tous ces points, cette hausse est plus importante le jour que la nuit. La hausse d'humidité spécifique est liée à l'évapotranspiration de la végétation arrosée pendant la journée (S2bis et Stot) et à l'évaporation de l'eau aspergée sur les routes pendant la journée (S3 et Stot).

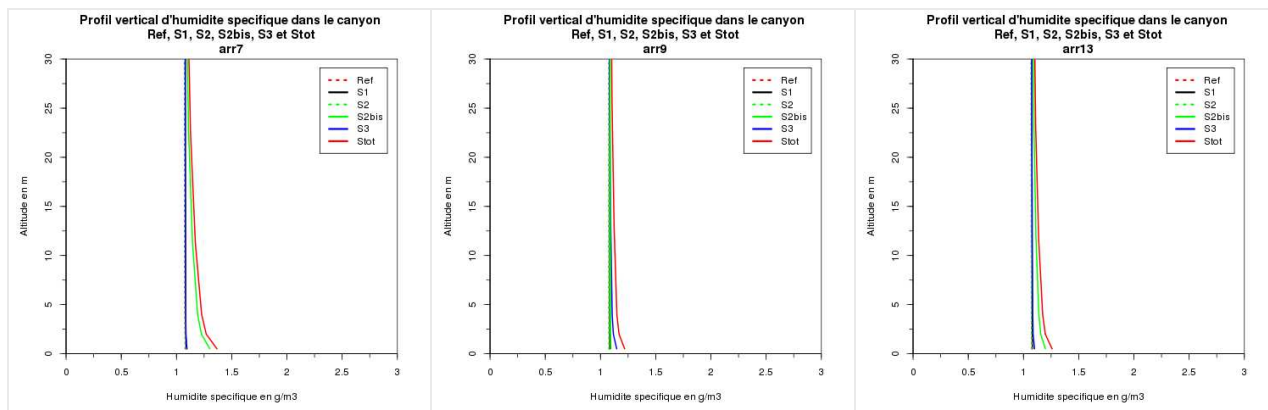


Figure 42 : Profil vertical d'humidité spécifique (en g.m^{-3}) moyennée sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) pour la simulation de référence (en pointillés) et l'ensemble des scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot, en traits pleins sauf S2, en pointillés) sur différents points situés dans Paris *intra muros* : 7^{ème} arrondissement (arr7), 9^{ème} arrondissement (arr9) et 13^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29).

4.7.4 Vent

Sur le point situé au niveau du parc Montsouris (Figure 43), le vent est très peu modifié à proximité de la surface et sa valeur, en hausse avec l'altitude, est légèrement diminuée avec les modifications liées aux différents scénarios. Cette baisse varie autour de 1 à 2 m.s^{-1} .

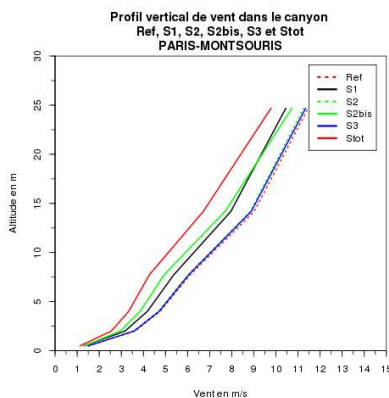


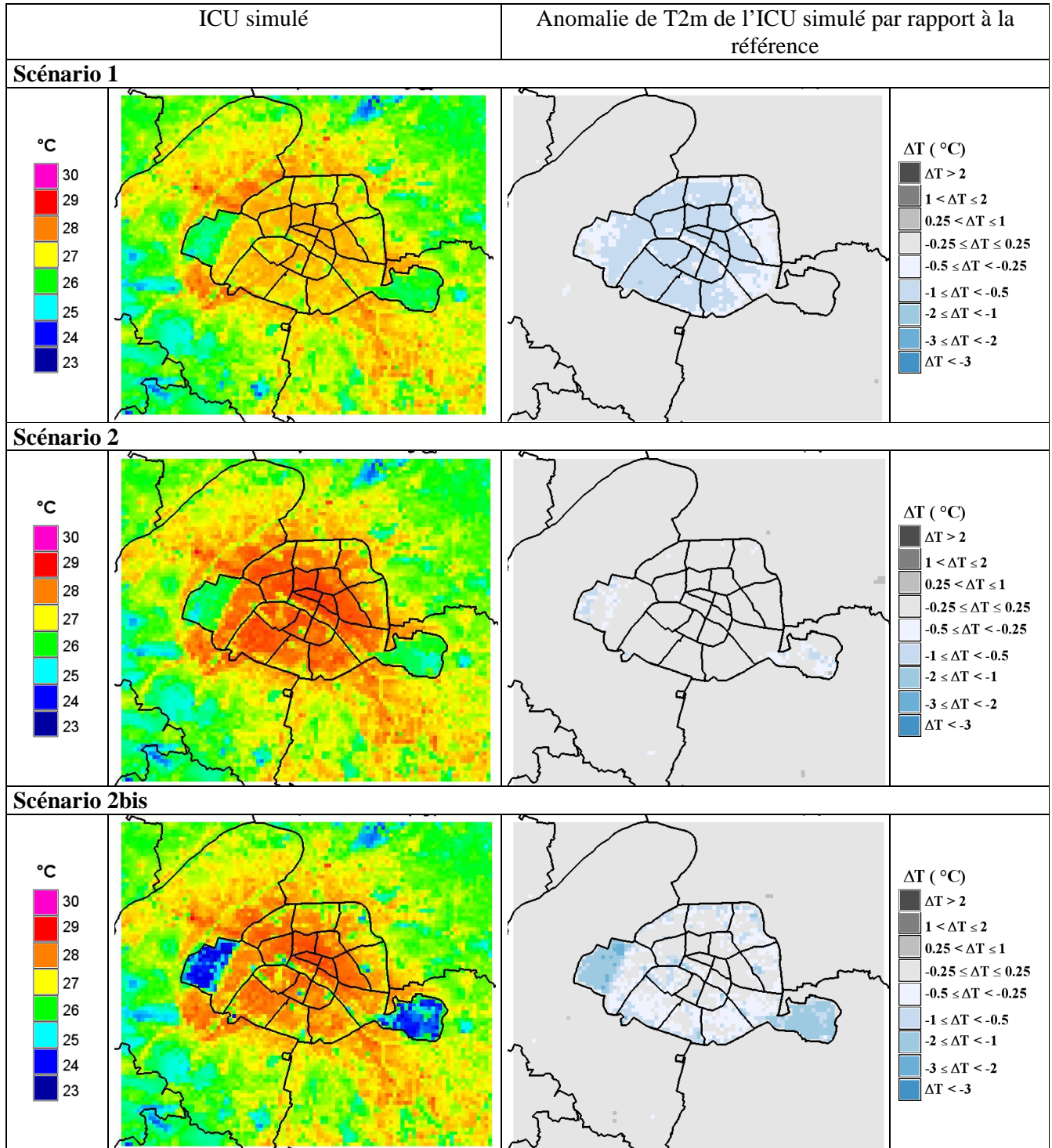
Figure 43 : Profil vertical du vent moyenné (en m.s^{-1}) sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) pour la simulation de référence et l'ensemble des scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot) au niveau du parc Montsouris.

4.8 Analyse de l'ICU

4.8.1 Impacts sur l'ICU calculé à partir des températures à 2 m

La Figure 44 illustre les différences spatiales et d'intensité des ICU moyens calculés pour les différents scénarios ainsi que leurs anomalies de températures à 2 m calculées par rapport à l'ICU simulé dans la référence.

Dans le cas du scénario S1, la structure spatiale de l'ICU sur Paris *intra muros* reste similaire à celle de l'ICU dans la simulation de référence. Cependant, en terme d'intensité, une diminution globale allant jusqu'à 1 °C est visible sur l'ensemble de Paris *intra muros*. Comme déjà vu précédemment, on n'obtient pour le scénario S2 quasiment aucune modification de l'ICU, ni en terme de structure, ni en terme d'intensité, excepté très localement au niveau des deux bois. Dans le cas du scénario S2bis, l'organisation spatiale est modifiée. Les températures les plus élevées sont toujours situées sur les arrondissements centraux, sans grande modification sur ces valeurs de températures à 2 m (arrondissements densément construits sans grande possibilité de végétalisation par manque de surface disponible et présence de rues relativement étroites). En revanche, sur toutes les zones végétalisées et encore plus là où l'on ajoute de la végétation (Figure 19), on observe une diminution de l'ICU de l'ordre de 0.5 °C mais qui localement atteint les 2 °C voire même 3 °C sur les deux bois. En ce qui concerne le scénario S3, l'impact en terme d'ICU est très limité (baisse entre 0.25 et 0.5 °C) et restreint surtout aux arrondissements centraux (proportion importante des rues). Par contre, avec le scénario Stot qui synthétise toutes les modifications testées, les températures à 2 m dans Paris *intra muros* connaissent une forte diminution (entre 1 et 2 °C, localement jusqu'à 3 °C sur les bois) et la structure de l'ICU s'en trouve modifiée puisque les températures les plus élevées sont à présent situées sur les communes limitrophes à Paris. En effet, la répartition des températures à 2 m n'est pas modifiée à l'extérieur de Paris.



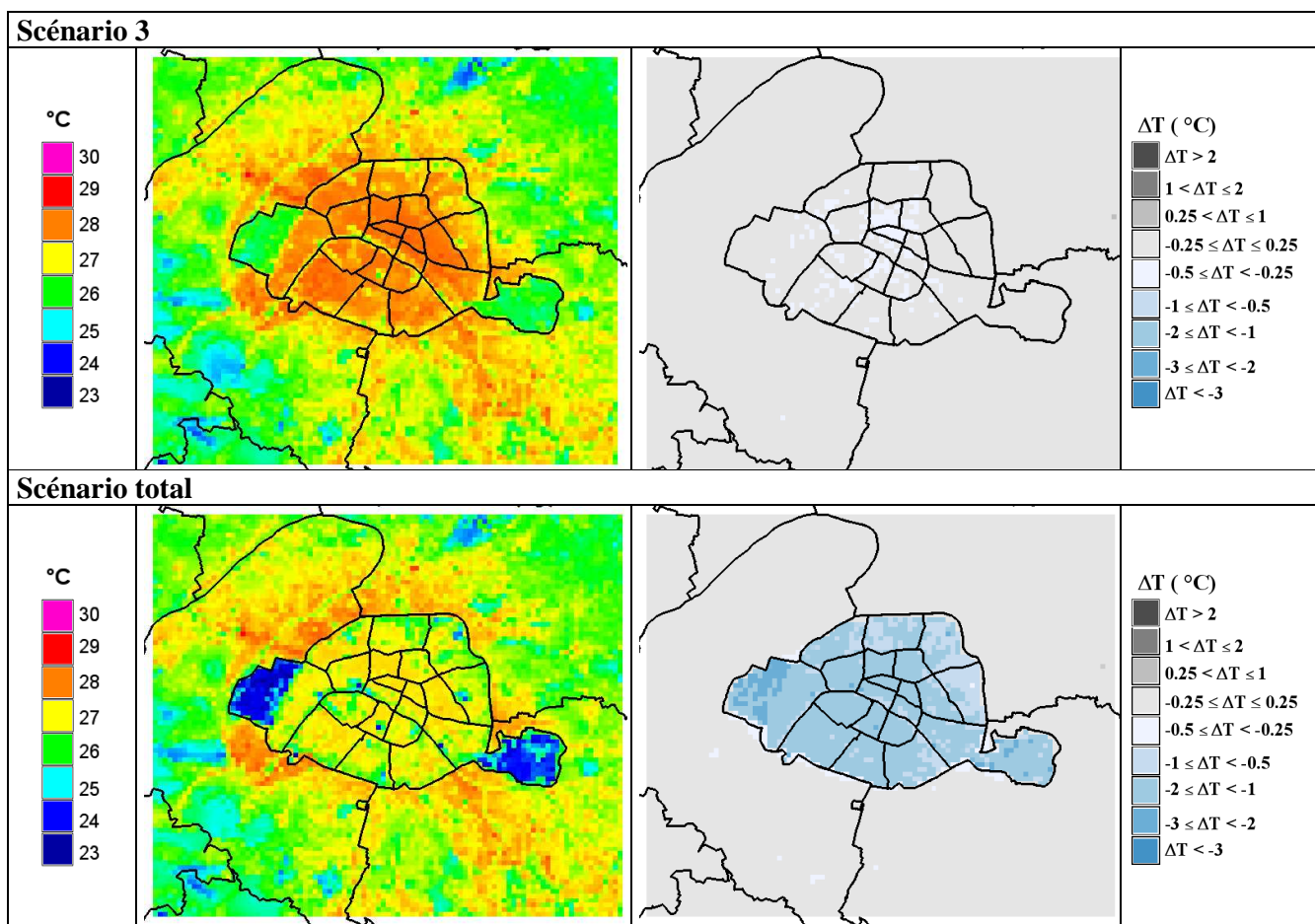


Figure 44 : Comparaison des ICU des différents scénarios (S1, S2, Sbis, S3 et Stot par rapport à la situation de référence (intensité de l'ICU calculé sur les températures à 2 m simulées dans les différents scénarios (à gauche) et anomalies de températures à 2 m calculées sur l'ICU entre chacun des scénarios et la référence (à droite). L'ICU est calculé dans chaque cas comme la moyenne des températures de l'air à 2 m à 02, 03 et 04 UTC les 5 nuits de la simulation).

La coupe présentée Figure 45 montre dans la direction considérée une diminution de l'ICU moyen dans ces quatre scénarios (S1, S2bis, S3 et Stot) liée à la baisse de température sur Paris *intra muros*. Dans le scénario S1, la température au niveau de Paris diminue d'environ 0.75 °C d'où un ICU dont l'amplitude est abaissée à 2.75 °C entre Paris et la banlieue.

Dans le scénario S2bis, la température au niveau de Paris diminue peu (0.25 °C) voire pas du tout au niveau du cœur densément construit où il n'y a pas de place pour intégrer de la végétation comme simulé dans ce scénario S2bis. On remarque cependant l'importante chute de température au niveau du Bois de Boulogne (2 °C) suite à la prise en compte de l'arrosage des zones végétalisées.

Dans le scénario S3, la température au niveau de Paris diminue assez peu (0.25 °C), ce qui modifie faiblement l'ICU (amplitude de l'ordre de 3.25 °C).

Au contraire, dans le scénario Stot, les différents effets s'ajoutent et la baisse de température au niveau de Paris est maximale (de l'ordre de 1.25 °C), d'où un ICU en baisse également, d'amplitude réduite à 2.25 °C. Là aussi, la température au niveau du Bois de Boulogne se réduit fortement suite à la prise en compte de l'arrosage des zones végétalisées ; elle devient plus basse que la température au niveau de la banlieue alentour.

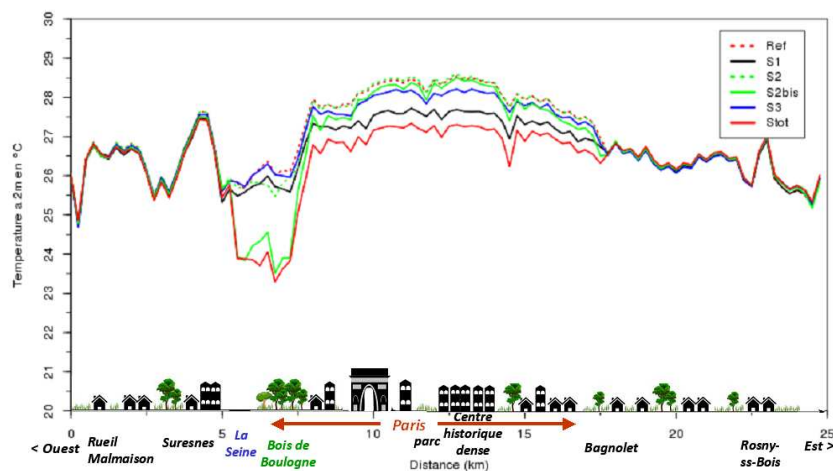


Figure 45 : Coupe transversale (traversant les 16^{ème}, 8^{ème}, 9^{ème}, 10^{ème} et 20^{ème} arrondissements d'ouest en est) de la moyenne des températures de l'air à 2 m à 02, 03 et 04 UTC les 5 nuits de la simulation pour la situation de référence et les différents scénarios (S1, S2,S2bis, S3 et Stot).

Lorsqu'on s'intéresse à l'évolution des anomalies de températures à 2 m sur l'ICU nuit par nuit (Figure 46), on constate que la diminution des températures à 2 m est variable d'une nuit à l'autre et maximale les nuits du 11/08 et du 12/08, et ce dans tous les scénarios. L'intensité maximale de la baisse de température se retrouve avec le scénario Stot comme attendu (baisse supérieure à 3 °C localement). Cette diminution des températures à 2 m est la plus étendue spatialement avec les scénarios S1 et Stot. On retrouve également pour ces deux scénarios une diminution des températures à 2 m dans le panache urbain pour les deux nuits où la baisse est la plus forte (qui correspondent par ailleurs aux maxima de températures), à l'ouest la nuit du 11/08 et au sud-est de Paris la nuit du 12/08. Pour le scénario S2bis, la baisse de température est fortement corrélée aux zones de fort taux de végétation et d'ajout de végétation, comme vu ci-dessus. Pour le scénario S3, la diminution de température reste cantonnée au centre de Paris et relativement faible.

A noter que, la nuit du 12/08 et ce pour l'ensemble des scénarios, un dipôle (baisse/hausse de température) apparaît à l'extérieur de Paris, au sud, voire sud-ouest de Paris (S3). Il est lié à la présence d'un orage qui éclate cette nuit là dans toutes les simulations mais qui est légèrement déplacé dans les simulations issues des différents scénarios par rapport à la simulation de référence (voir 4.5 Impact sur les précipitations).

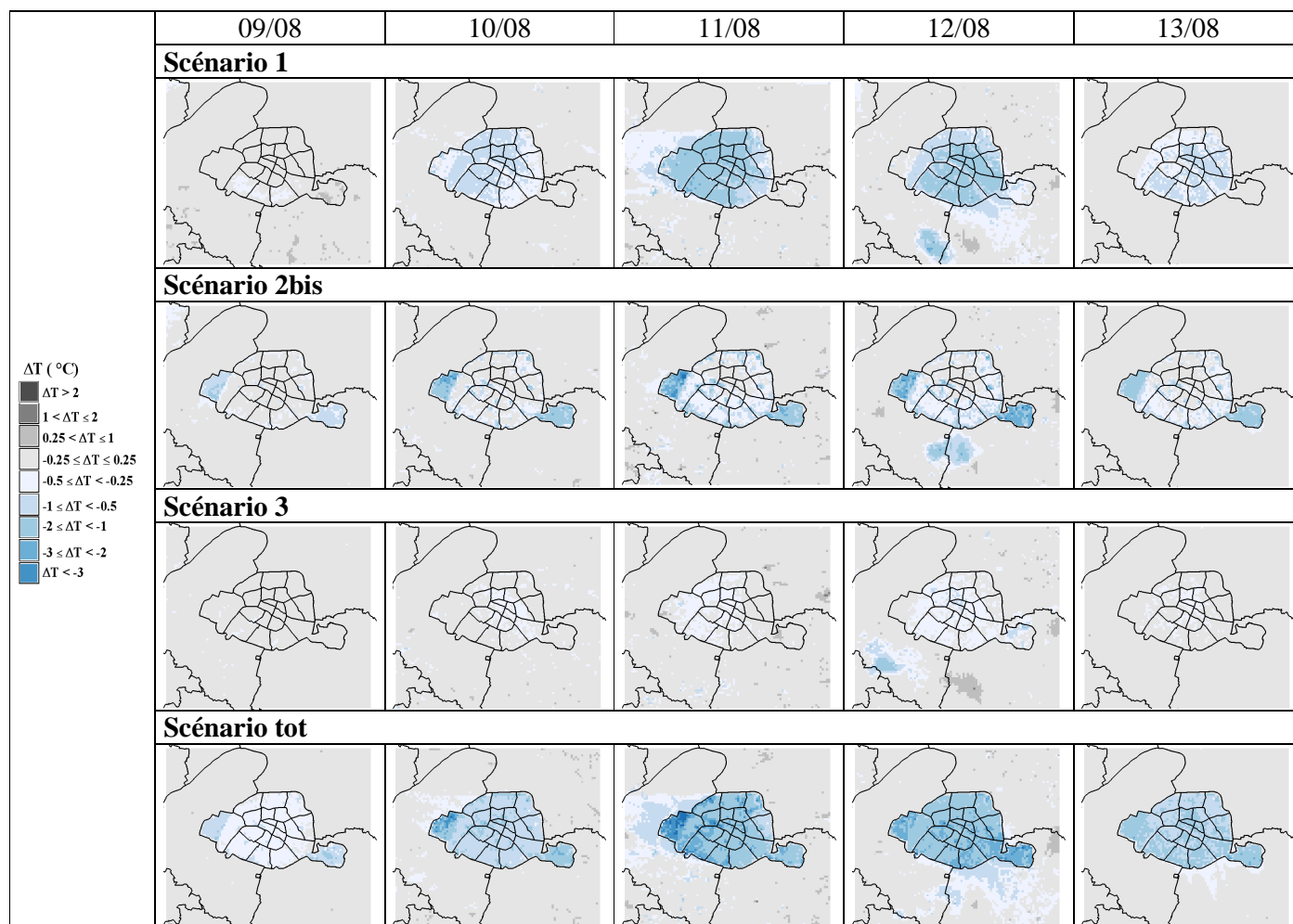
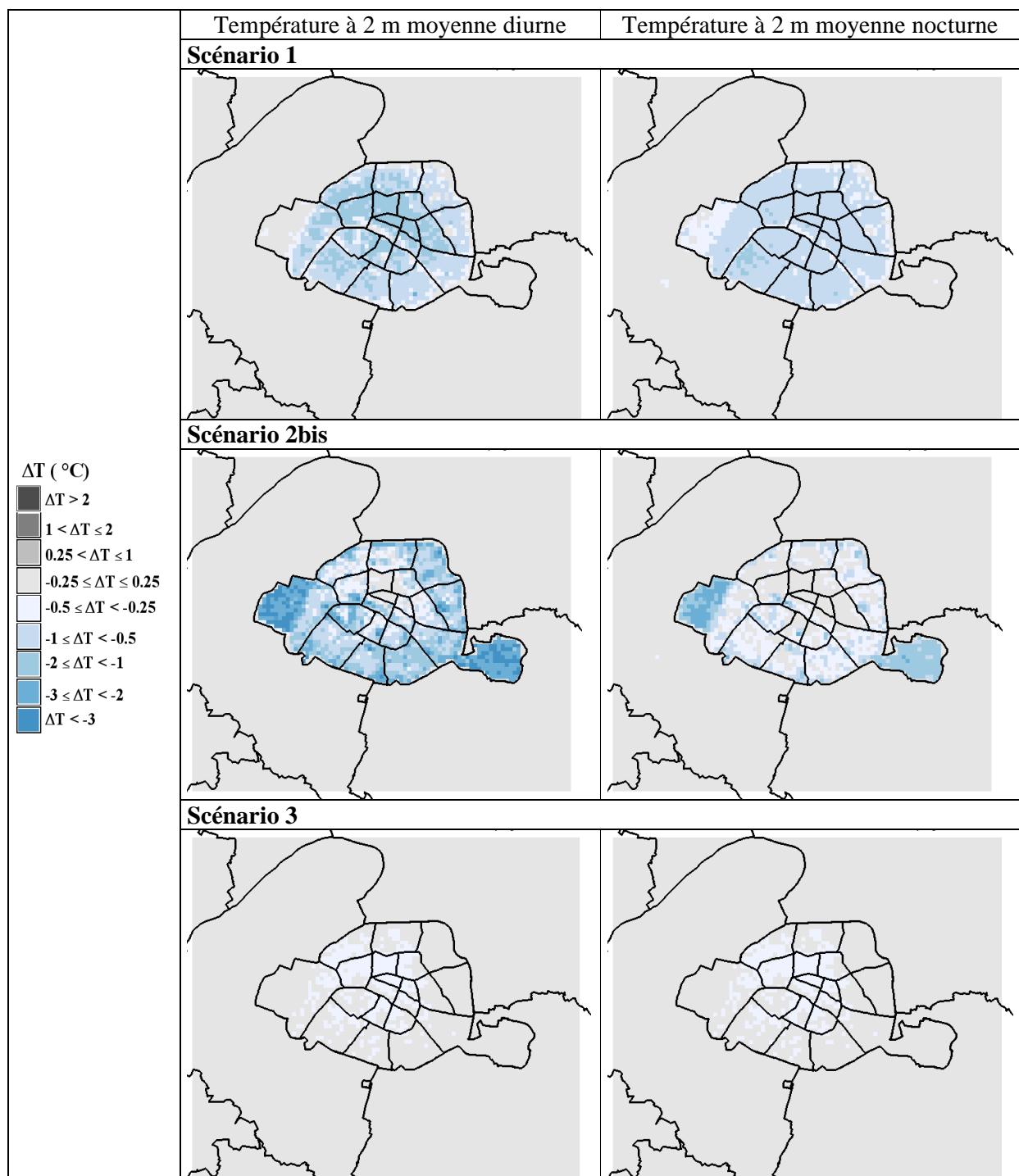


Figure 46 : Anomalies de températures à 2 m calculées sur l'ICU entre chacun des scénarios et la référence pour les scénarios S1, S2bis, S3 et Stot nuit par nuit. L'ICU est calculé dans chaque cas comme la moyenne des températures de l'air à 2 m à 02, 03 et 04 UTC les 5 nuits de la simulation.

Par ailleurs, les résultats moyennés en journée (entre 05 et 19 UTC, soit entre 7h et 21 locales) et la nuit (entre 20 et 04 UTC, soit entre 22h et 6h locales) sur la température à 2 m (Figure 47) montrent une diminution systématiquement plus forte en journée de la température à 2 m, et ce pour tous les scénarios : jusqu'à 2 °C dans le cas du scénario S1, plus de 3 °C dans le cas du scénario S2bis, jusqu'à 1 °C dans le cas du scénario S3 et autour de 3 °C généralisés et plus dans le cas du scénario Stot en journée. La nuit, la diminution est de moindre ampleur (entre 0.5 et 3 °C selon les scénarios) mais atteint 1 à 2 °C généralisés dans le cas du scénario Stot.



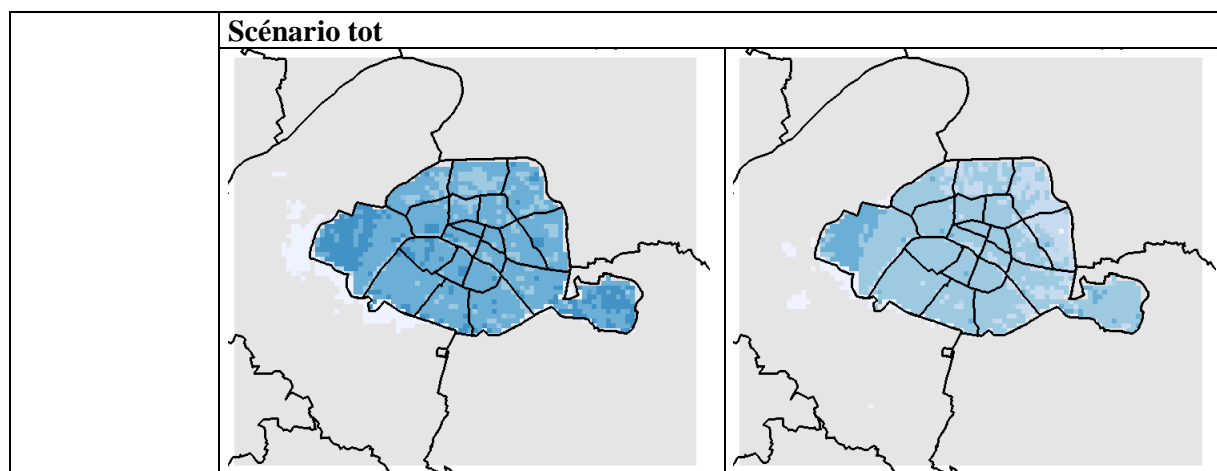


Figure 47 : Anomalies de températures à 2 m calculées la journée (entre 05 et 19 UTC, soit entre 7h et 21 locales) et la nuit (entre 20 et 04 UTC, soit entre 22h et 6h locales) entre chacun des scénarios et la référence pour les scénarios S1, S2bis, S3 et Stot.

Les intensités maximales globales des anomalies de températures à 2 m horaires entre les différents scénarios et la référence ainsi que les champs de température à 2 m correspondants sont présentés sur la Figure 48. Ces anomalies sont maximales le 12 août 2003 aux alentours de 11 UTC. Elles correspondent donc à la journée la plus chaude de la période, mais pas tout à fait aux heures les plus chaudes de la période, qui se situent entre 13 et 15 UTC le 12 août 2003. Elles varient entre -1 et -6 °C sur Paris *intra muros* selon le scénario.

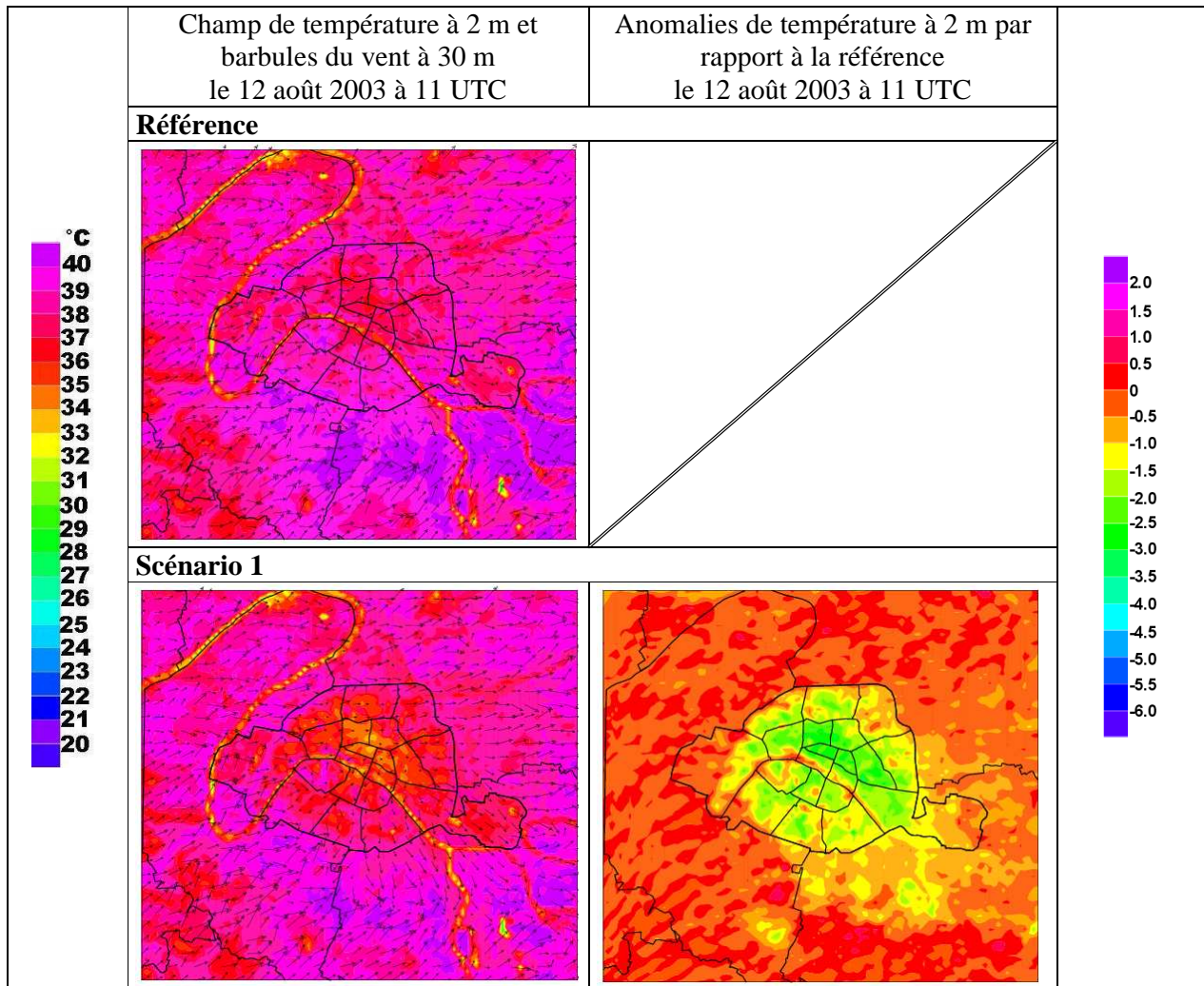
Dans le scénario S1, le 12 août 2003 à 11 UTC, la diminution de température à 2 m est de 2 à 2.5 voire 3 °C sur la majeure partie du territoire parisien. Les arrondissements périphériques, un peu moins denses en terme de bâti, ont une baisse de température à 2 m plus faible, de l'ordre de 0.5 à 1 °C. Ainsi, la température sur Paris, qui avoisine dans la référence les 37 – 38 °C par endroits (2^{ème} arrondissement notamment), descend à 34 – 35 °C sur ces mêmes endroits. On remarque par ailleurs la diminution de température à 2 m notable dans le panache urbain visible à cette heure là sur le sud-ouest de Paris, en raison des vents de nord-est. La diminution de température à 2 m dans ce panache est de 0.5 à 1 °C, localement un peu plus importante (jusqu'à 2 °C), passant de 39 – 40 °C à 38 – 39 °C, localement 37 °C. Ailleurs, les différences de température à 2 m sont quasi nulles.

Dans le scénario S2bis, le 12 août 2003 à 11 UTC, la réduction de température à 2 m est plus importante qu'avec S1, jusqu'à 5 °C dans les bois de Boulogne et Vincennes où la température décroît de 37 – 38 °C à 32 – 33 °C, et plus généralement autour de 3 °C, passant ainsi de l'ordre de 38 – 39 °C à 35 – 36 °C. Le centre de Paris, densément construit et avec peu de rues larges, laisse peu de place à la végétalisation et connaît donc un refroidissement nettement moindre, voire nul (2^{ème} et 9^{ème} arrondissements). Une légère diminution de température à 2 m se fait sentir dans le panache urbain au sud-ouest de Paris (de 0.5 à 1 °C).

L'impact du scénario S3 le 12 août 2003 à 11 UTC est plus faible et entraîne un abaissement des températures à 2 m compris entre 0.5 et 1 °C, très localement jusqu'à 2 °C. Les températures à 2 m avoisinent les 36 – 37 °C. Il n'y a pas d'effet à l'extérieur de Paris.

Les effets s'additionnent dans le scénario Stot le 12 août 2003 à 11 UTC, où l'on constate une chute des températures à 2 m de 3 à 5 °C dans Paris *intra muros* et entre 1 et 2 °C dans le panache urbain au sud-ouest de Paris. Les températures à 2 m décroissent ainsi à 32 – 33 °C sur Paris *intra muros* et 37 – 38 °C dans le panache urbain. A noter que l'intensité maximale des anomalies à cette échéance se situe sur les arrondissements périphériques et principalement sur un grand quart sud-ouest (20^{ème} et 12^{ème} à 15^{ème} arrondissements), en lien avec le régime des vents (essentiellement de nord-est) à cette échéance et aux échéances précédentes.

Les vents peuvent se trouver légèrement modifiés sur Paris *intra muros* selon les scénarios, mais cela ne modifie pas l'organisation globale du champ sur le domaine.



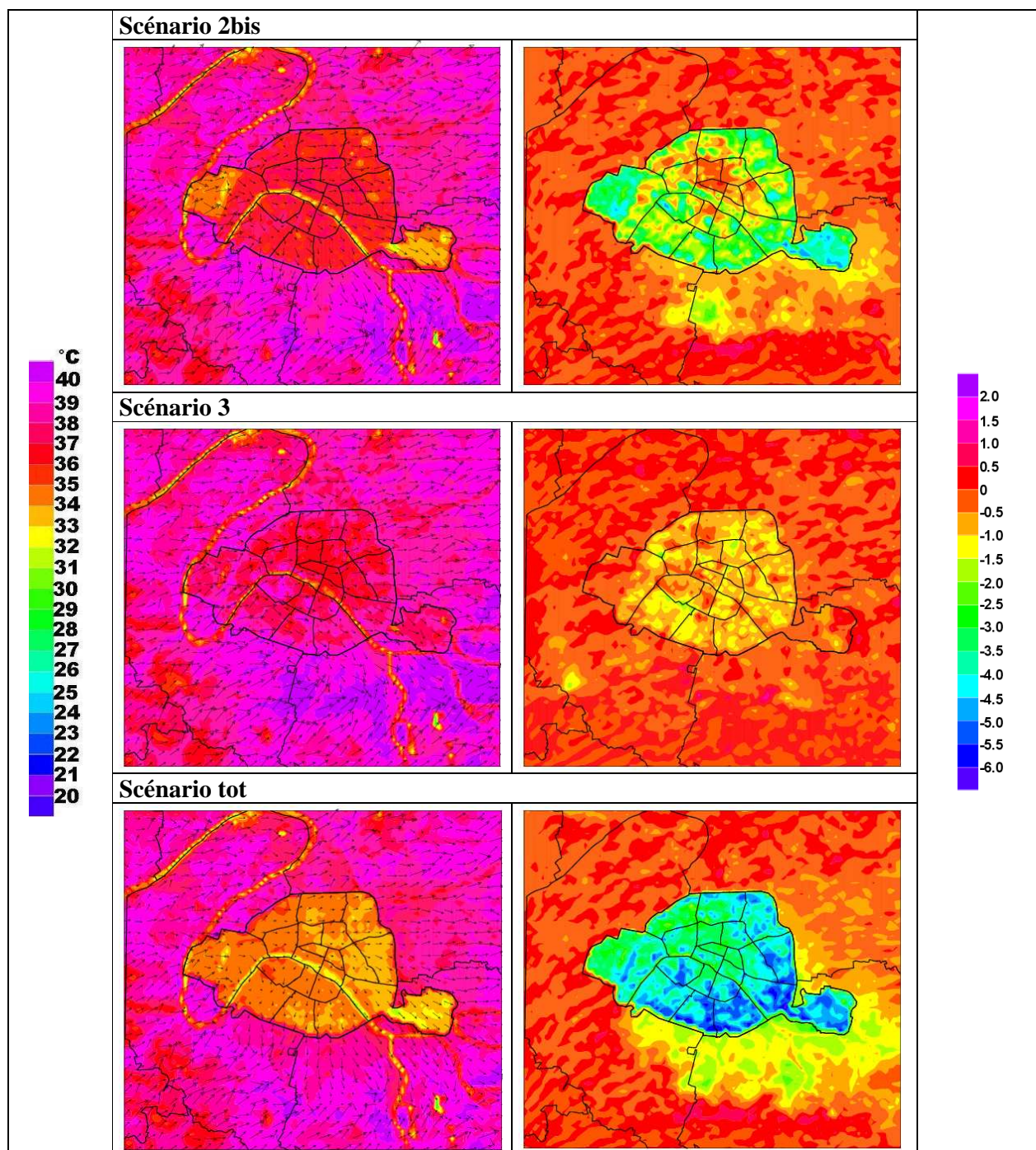
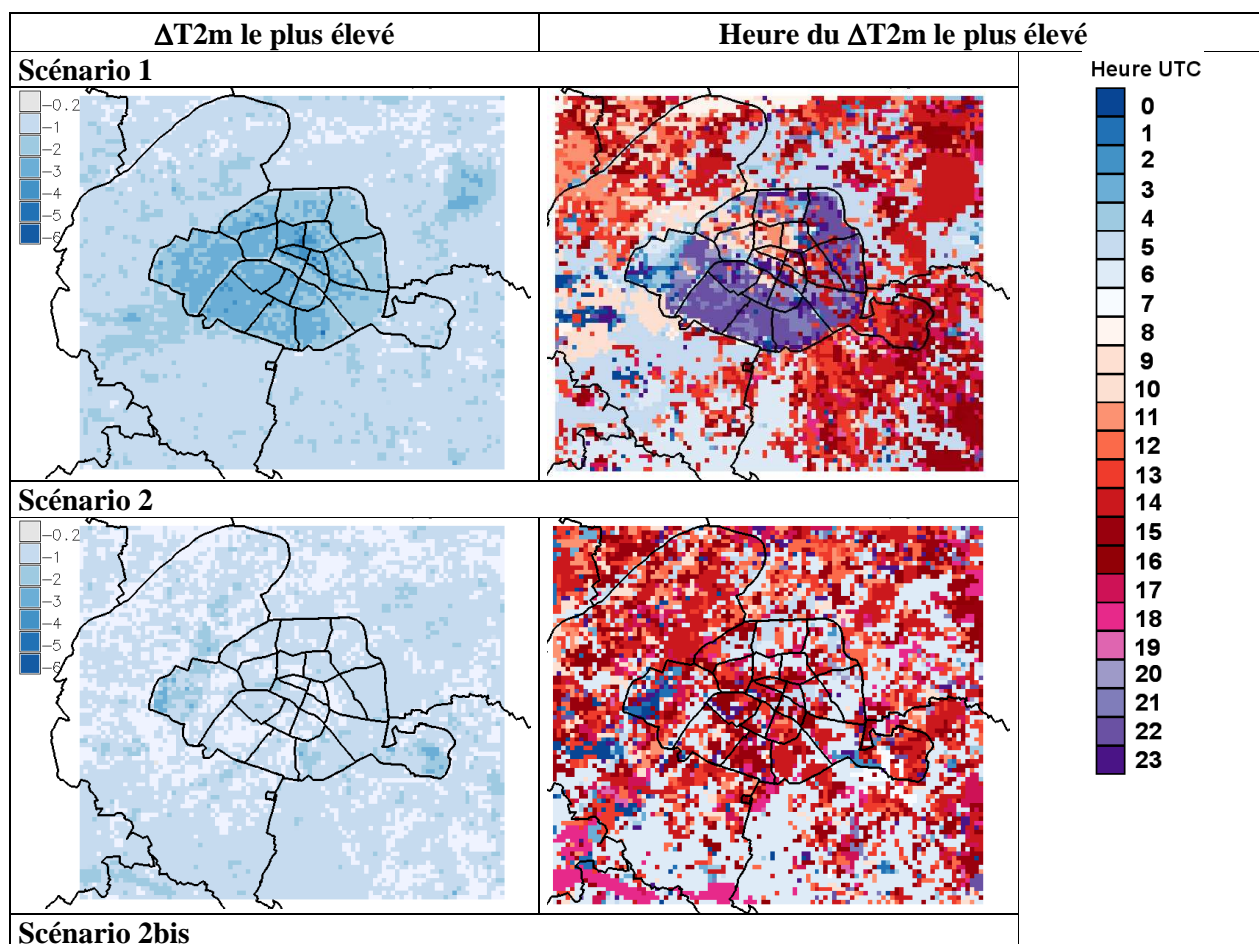


Figure 48 : Champ de température à 2 m auquel sont superposées les barbules de vent à 30 m (à gauche) et anomalies de températures à 2 m calculées entre chacun des scénarios et la référence (à droite) pour les scénarios S1, S2bis, S3 et Stot le 12 août 2003 à 11 UTC.

On s'intéresse maintenant plus précisément aux anomalies horaires de température à 2 m. La Figure 49 montre les valeurs les plus importantes de ces anomalies horaires, ainsi que l'heure de la journée à laquelle se produisent ces anomalies horaires les plus élevées, toutes journées confondues. Dans le scénario 1, les anomalies maximales horaires se produisent sur Paris *intra muros*, plus précisément sur

le centre densément construit ainsi que la moitié ouest de Paris (-2 à -4 °C) et plutôt en début de nuit sur Paris excepté sur le quart nord-ouest de la ville (matinée). Dans le scénario 2, elles restent assez faibles (-1 à -2 °C) et sont maximales sur les bois. Dans le scénario 2bis, ces anomalies sont maximales sur les 2 bois de Paris ainsi que les espaces verts parisiens (-4 à -5 °C). Elles se produisent plutôt en milieu de journée – après-midi. Dans le scénario 3, ces anomalies horaires sont moins importantes que pour les autres scénarios. Elles sont maximales sur Paris *intra muros* (-1 à -2 °C) et se produisent plutôt en milieu de journée. Enfin, c’est comme attendu dans le scénario total que l’on trouve les anomalies horaires de température à 2 m les plus importantes. Elles sont localisées sur Paris *intra muros* (-5 à -6 °C) et se produisent en fin de matinée et fin d’après-midi.



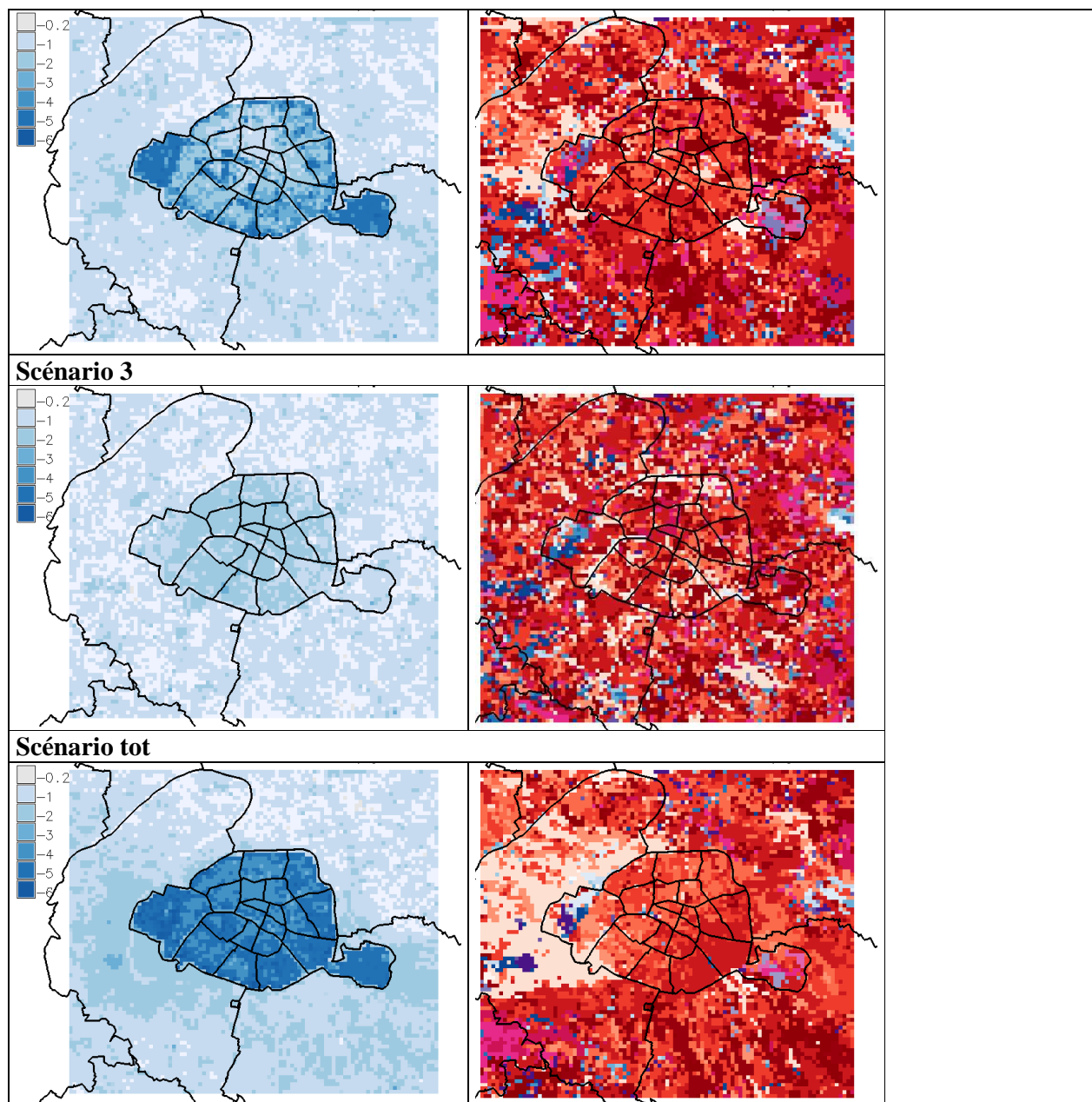
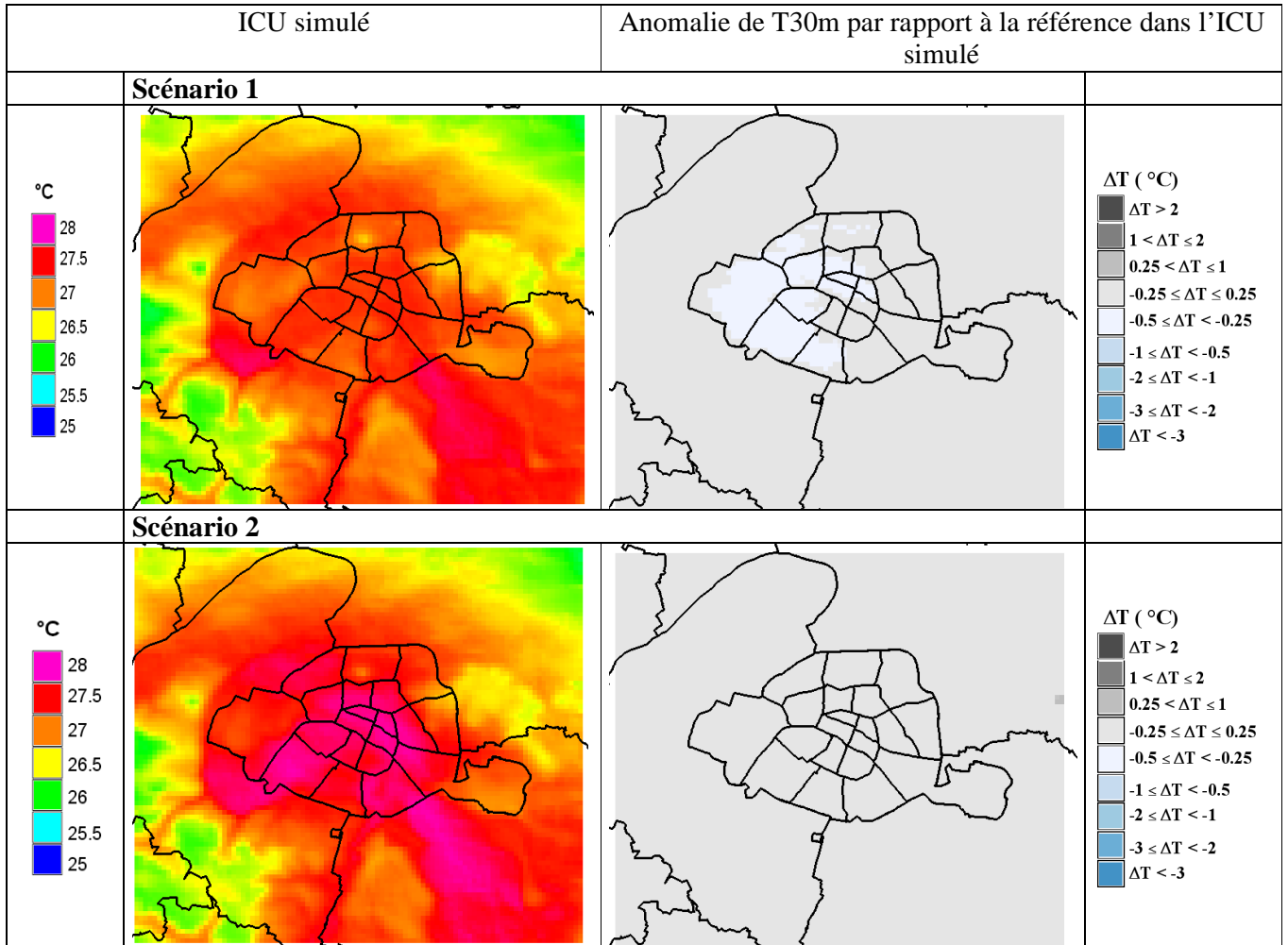


Figure 49 : Anomalies horaires de température à 2 m (en °C) les plus importantes pour chaque point de grille du domaine (à gauche) et heures de la journée auxquelles se produisent ces anomalies horaires les plus importantes pour chaque point de grille, toute journées confondues (à droite) pour les différents scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot).

4.8.2 Impacts sur l'ICU calculé à partir des températures à 30 m

Les impacts des différents scénarios sur les températures à 30 m sont moindres (Figure 50). Comme vu plus haut (4.7.1), ce n'est que dans les scénarios S1 et Stot que l'on retrouve un impact en altitude, lié aux modifications au niveau des toits et des murs (donc sur la verticale et pas uniquement en surface). Dans le scénario S1, la structure de l'ICU est légèrement modifiée par une diminution de la température à 30 m entre 0.25 et 0.5 °C principalement localisée sur la moitié ouest de Paris. Par

contre, dans le scénario Stot, le signal sur les températures à 30 m s'avère bien plus fort que dans le seul scénario S1 alors qu'il n'y a pas d'impact dans les autres scénarios. L'effet cumulatif induit par conséquent un impact plus fort et la diminution de température à 30 m peut atteindre 1 °C.



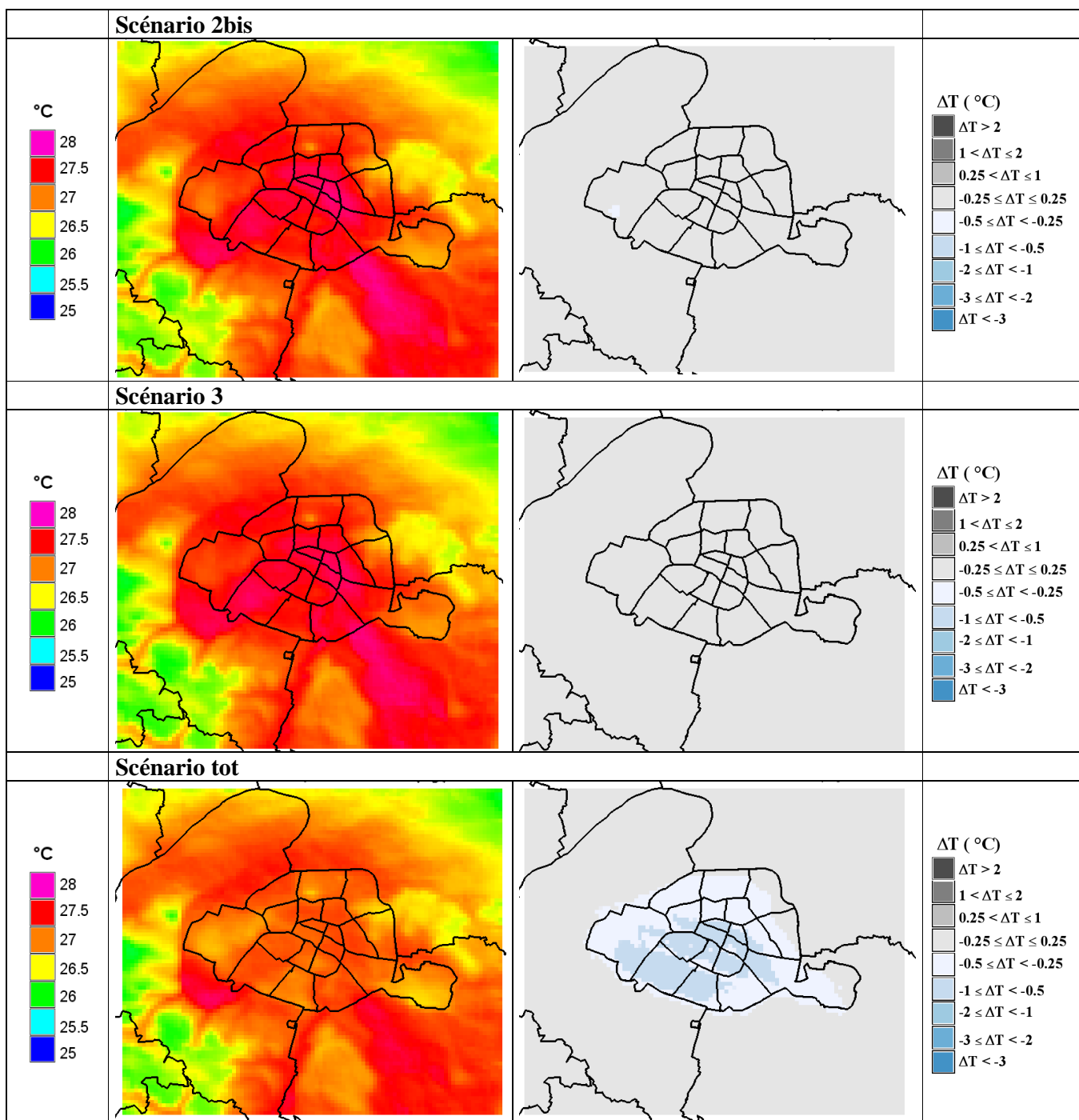


Figure 50 : Comparaison des ICU des différents scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot) par rapport à la situation de référence (intensité de l'ICU calculé sur les températures à 30 m simulées dans les scénarios (à gauche) et anomalies de températures à 30 m entre chacun des scénarios et la référence (à droite). L'ICU est calculé dans chaque cas comme la moyenne des températures de l'air à 2 m à 02, 03 et 04 UTC les 5 nuits de la simulation).

La coupe transversale effectuée sur la moyenne des températures de l'air à 30 m (Figure 51) montre une diminution relative de l'ICU moyen pour deux des cinq scénarios testés (S1 et Stot).

Dans le scénario S1, la température à 30 m au dessus de Paris diminue d'environ 0.3 °C, ce qui réduit l'ICU à 30 m entre 1 et 1.2 °C entre Paris et la banlieue.

Les modifications liées aux scénarios S2, S2bis (ajout de végétation arrosée ou non) et S3 (humidification des chaussées) n'ont que très peu, voire pas d'impact à cette altitude. Il n'y a donc pas de modification notable de l'amplitude de l'ICU à 30 m dans cette direction avec ces trois scénarios.

Dans le scénario Stot par contre, on retrouve le même impact qu'avec le scénario S1 qui est même légèrement renforcé par le très faible impact des scénarios S2bis et S3 (baisse de 0.1 °C chacun au dessus du centre de Paris) : la diminution de température moyenne à 30 m atteint 0.5 °C. Ainsi, l'amplitude de l'ICU à 30 m est réduite à 0.8 à 1.2 °C entre Paris et la banlieue.

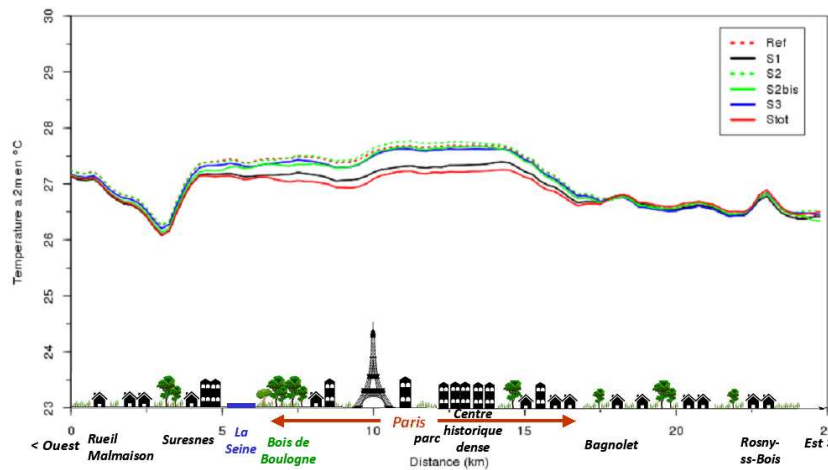
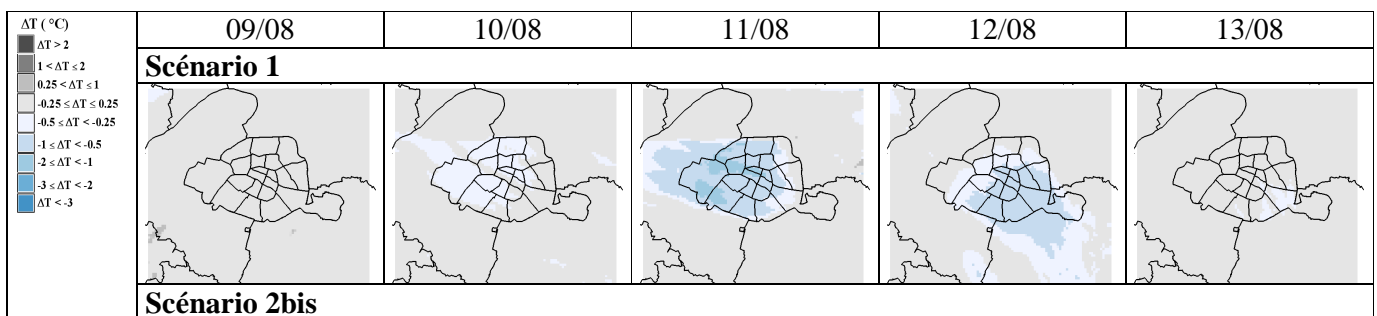


Figure 51 : Coupe transversale (traversant les 16^{ème}, 8^{ème}, 9^{ème}, 10^{ème} et 20^{ème} arrondissements d'ouest en est) de la moyenne des températures de l'air à 30 m à 02, 03 et 04 UTC les 5 nuits de la simulation pour la situation de référence et les différents scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot).

Si l'on s'intéresse à la variation nuit par nuit du signal sur les températures à 30 m (Figure 52), on constate à nouveau la variabilité de ce signal et son intensité maximale les nuits des 11/08 et 12/08 où la baisse de température, globalement comprise entre 0.5 °C et 1 °C dans les scénarios S1 et Stot, atteint 2 °C localement (S1) ou d'une manière plus généralisée (Stot). Par ailleurs, la nuit du 11/08 principalement, une diminution de la température à 30 m de l'ordre de 0.25 et 0.5 °C est visible dans le cas du scénario S2bis.



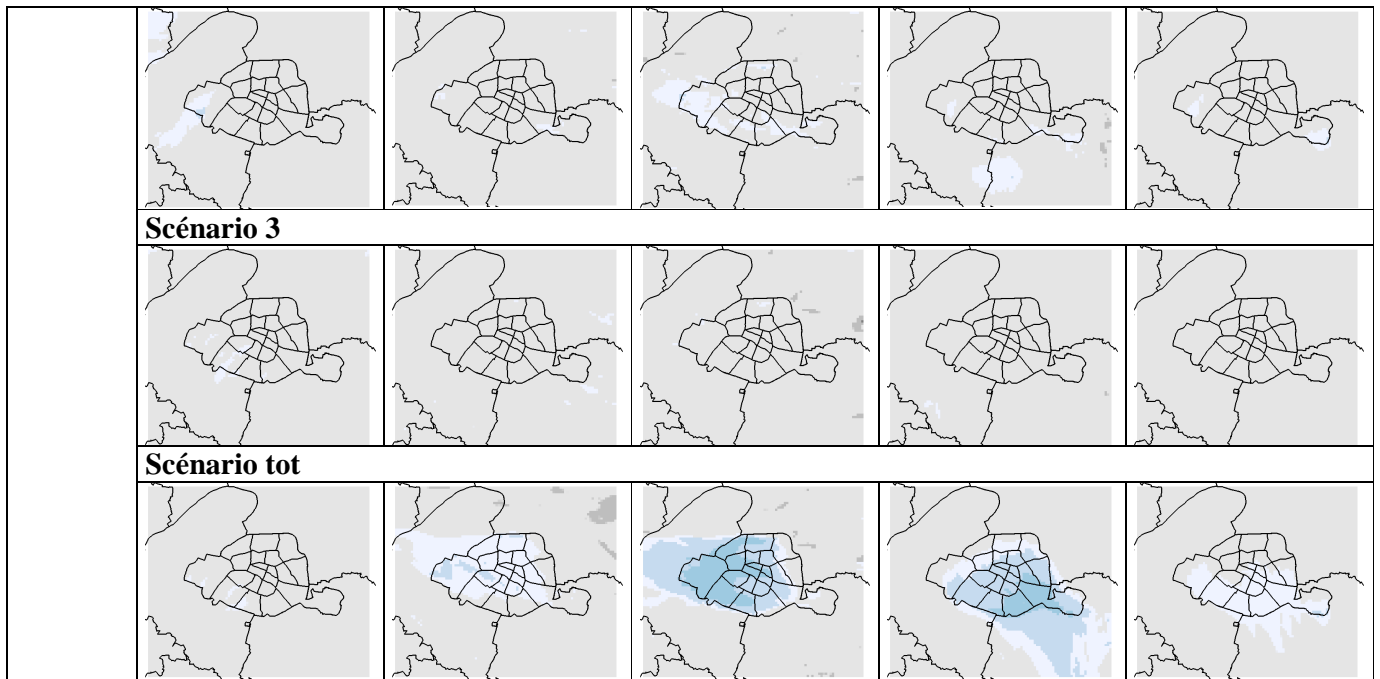
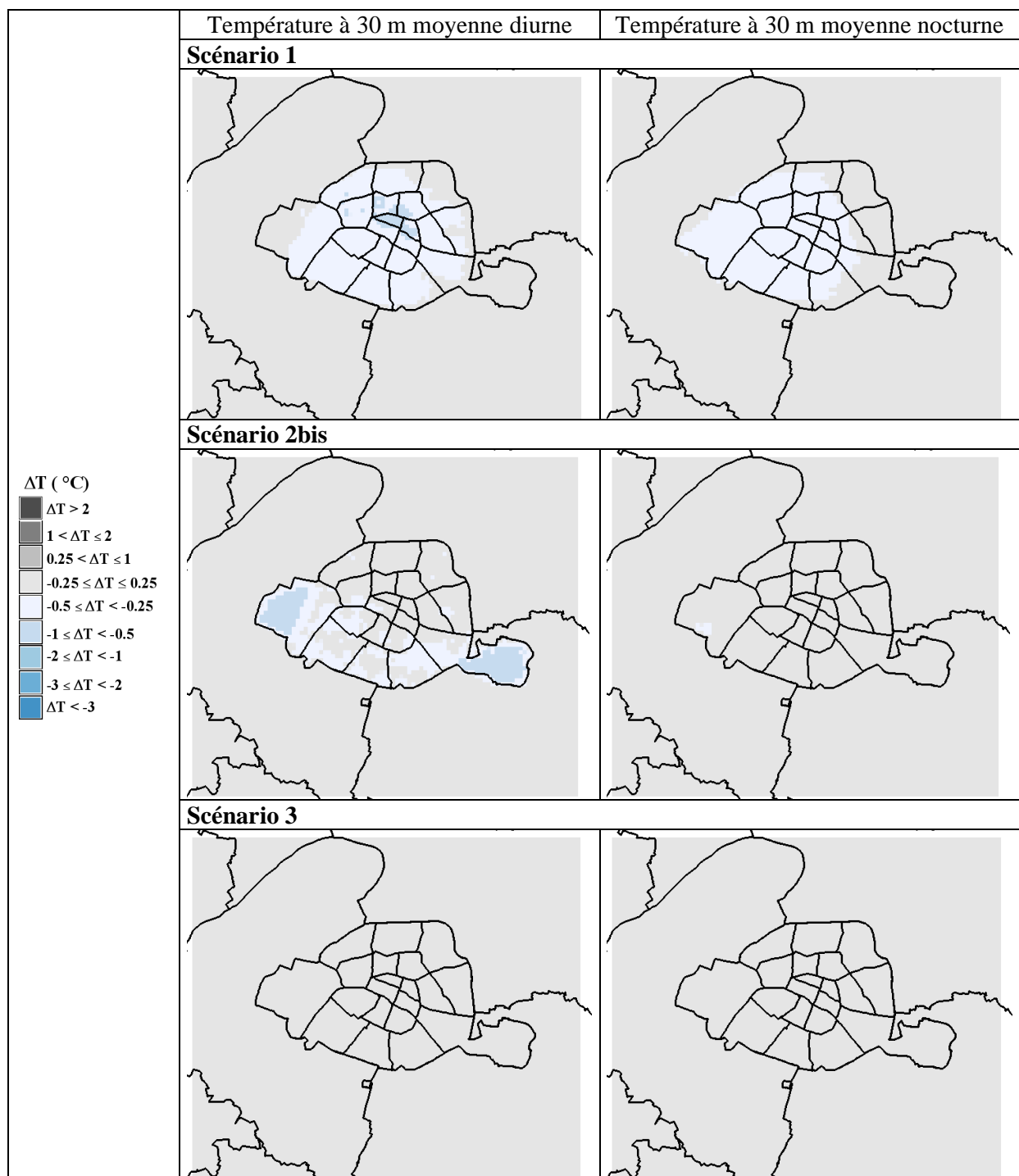


Figure 52 : Anomalies de températures à 30 m calculées sur l'ICU entre chacun des scénarios et la référence pour les scénarios S1, S2bis, S3 et Stot nuit par nuit. L'ICU est calculé dans chaque cas comme la moyenne des températures de l'air à 2 m à 02, 03 et 04 UTC chaque nuit).

En moyennant les températures à 30 m en journée et la nuit (Figure 53), on retrouve :

- un signal plus fort en journée, et ce pour tous les scénarios ;
- l'apparition d'un signal en journée sur le scénario S2bis par rapport aux calculs précédents uniquement basés sur l'ICU, avec une légère diminution de température (entre 0.25 et 0.5 °C), un peu plus intense sur les bois (où la végétation, plus haute, peut avoir un impact également en altitude) ;
- un signal toujours absent en altitude sur le scénario S3 ;
- un signal maximal dans le cas du scénario Stot.



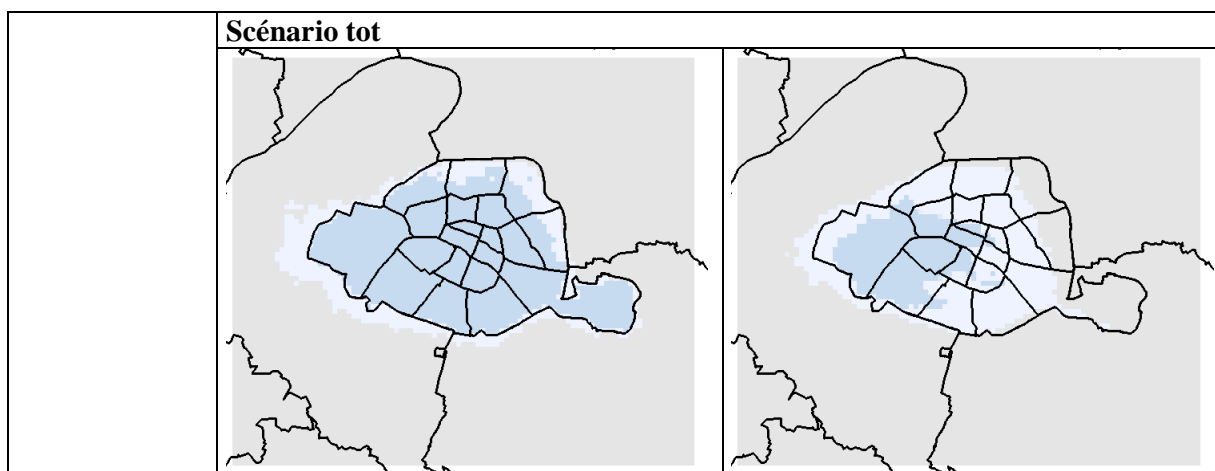


Figure 53 : Anomalies de températures à 30 m calculées la journée (entre 05 et 19 UTC, soit entre 7h et 21 locales) et la nuit (entre 20 et 04 UTC, soit entre 22h et 6h locales) entre chacun des scénarios et la référence pour les scénarios S1, S2bis, S3 et Stot nuit par nuit.

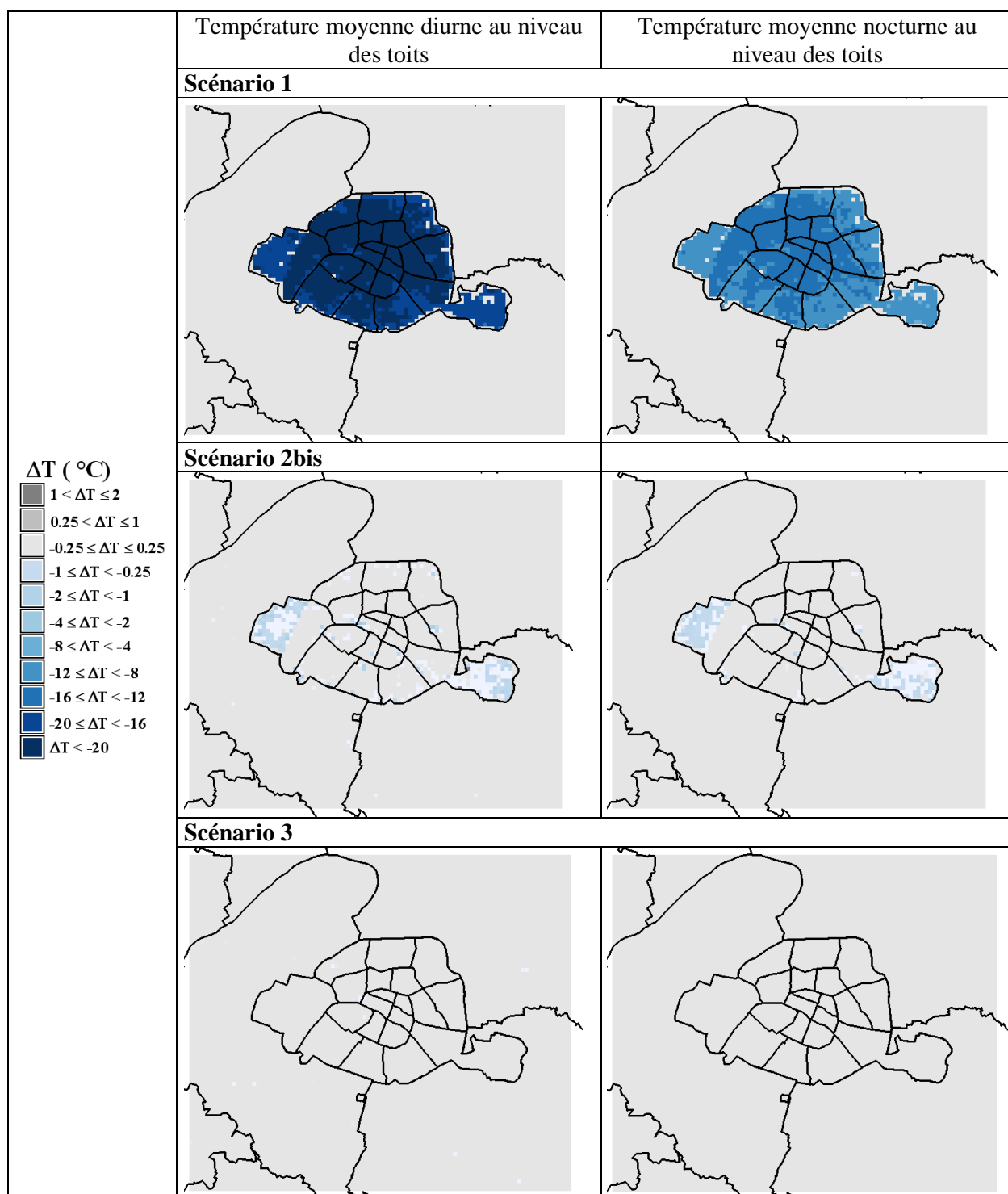
4.9 Analyse des températures spécifiques à la zone urbaine

4.9.1 Températures au niveau des toits

La température au niveau des toits (couche extérieure de l'ouvrage correspondant au revêtement d'étanchéité) n'est principalement modifiée que si l'on touche aux toitures, à savoir dans le scénario S1 et dans le scénario récapitulatif Stot (Figure 54). Les résultats sont quasi identiques pour les scénarios S1 et Stot puisque les modifications au niveau des toitures sont les mêmes (modification des albédos et émissivités) et que les autres paramètres modifiés dans le scénario Stot n'ont pas ou très peu d'effet sur les toitures. En moyenne diurne, on a ainsi une chute maximale des températures au niveau des toits qui dépasse quasiment partout les 20 °C. Dans la référence, la température au niveau des toits en moyenne diurne avoisinait les 40 à 44 °C ; on a ainsi une division presque par 2 des températures au niveau des toits dans ces deux scénarios. La nuit, l'abaissement des températures au niveau des toits est compris entre 8 et 16 °C, ce qui représente par rapport aux valeurs de la simulation de référence (30 à 33 °C) une baisse comprise entre le quart et la moitié. Ces différences se font sentir exclusivement sur Paris *intra muros*, où l'on modifie les propriétés radiatives des toits, et pas du tout sur la banlieue, où l'on n'effectue aucune modification.

Dans le scénario S2bis, de très faibles baisses de températures au niveau des toits sont visibles en moyenne diurne et nocturne, de 1 à 2 °C sur les zones les plus végétalisées.

Dans le scénario S3, on constate quelques rares diminutions de température au niveau des toits en moyenne diurne, très localisées et limitées à 1 à 2 °C.



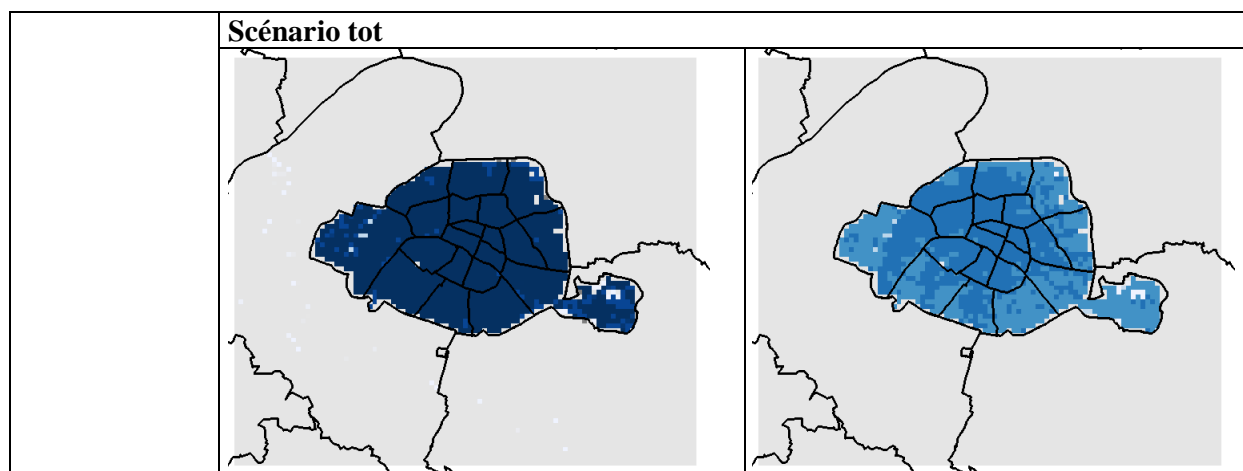


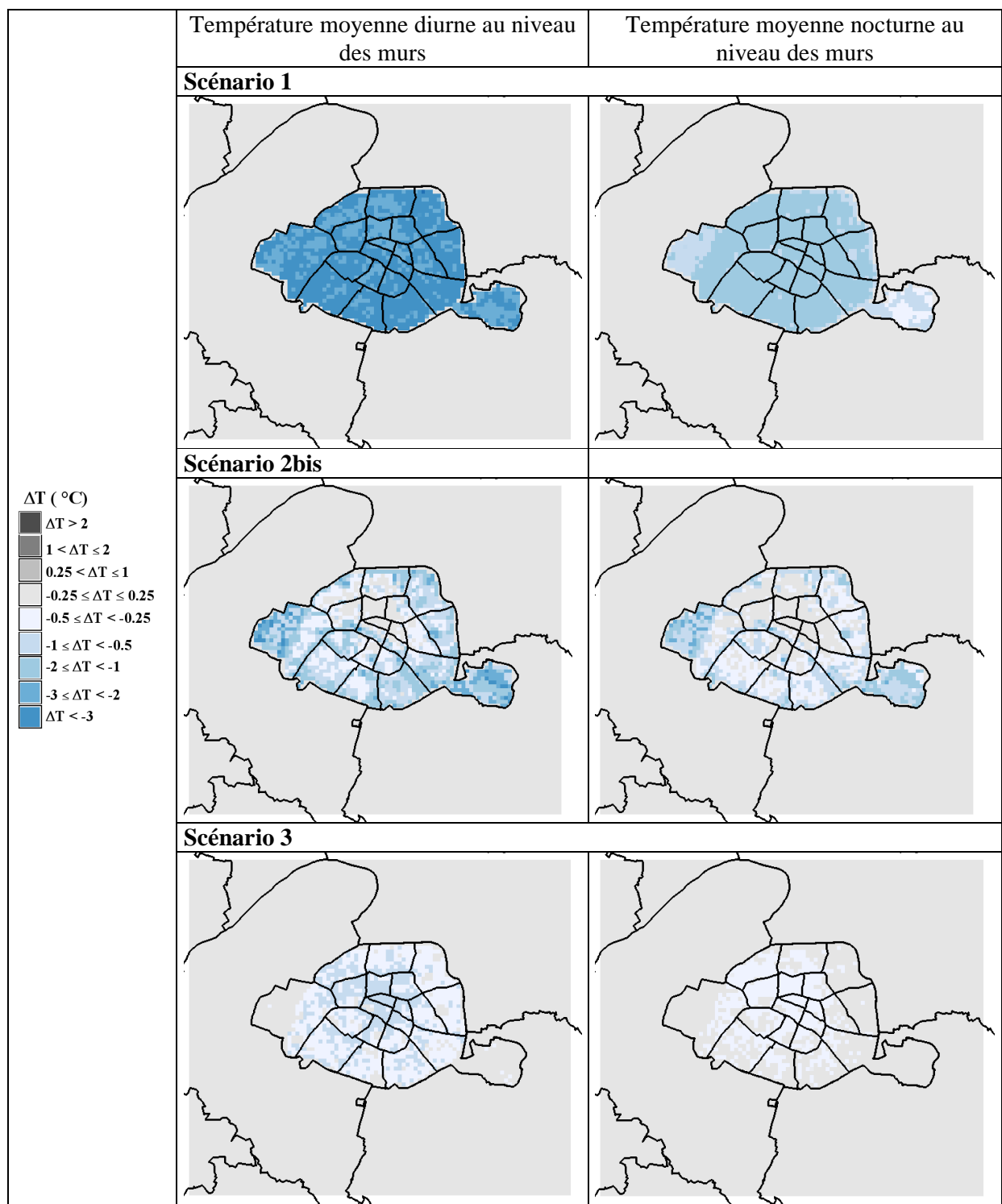
Figure 54 : Anomalies de températures moyennes au niveau des toits calculées la journée (entre 05 et 19 UTC, soit entre 7h et 21 locales) et la nuit (entre 20 et 04 UTC, soit entre 22h et 6h locales) entre chacun des scénarios et la référence pour les scénarios S1, S2bis, S3 et Stot.

4.9.2 Températures au niveau des murs

La température au niveau des murs n'est modifiée que sur Paris *intra muros* (Figure 55). La baisse de température au niveau des murs est maximale lorsque l'on ne modifie que les propriétés radiatives des murs : dans le scénario S1, diminution de 2 à plus de 3 °C en moyenne diurne et de 1 à 2 °C en moyenne nocturne. La hausse de l'albédo des murs conduit à une réflexion plus importante du rayonnement visible incident et par conséquent à une moindre élévation de la température des murs.

Cependant, un abaissement de température au niveau des murs est également sensible avec les scénarios S2bis et S3 : de 0.25 à 3 °C en moyenne diurne avec S2bis, un peu plus faible en moyenne nocturne, et de 0.25 à 1 °C en moyenne diurne avec S3, mais très limité en moyenne nocturne (de l'ordre de 0.5 °C). Ceci s'explique par une modification des échanges de chaleur en lien avec les flux de chaleur latente qui sont modifiés dans le canyon pour ces deux scénarios (évapotranspiration de la végétation pour le scénario S2bis et évaporation de l'eau aspergée sur les routes pour le scénario S3).

La baisse de température le jour est paradoxalement moindre dans le scénario Stot que dans le scénario S1, de l'ordre de 1 à 3 °C en moyenne diurne, mettant ainsi en lumière la complexité des échanges énergétiques au sein du canyon. La nuit par contre, cette diminution est maximale pour le scénario Stot qui cumule tous les effets (autour de 1 à 2 °C en moyenne nocturne, localement 2 à 3 °C).



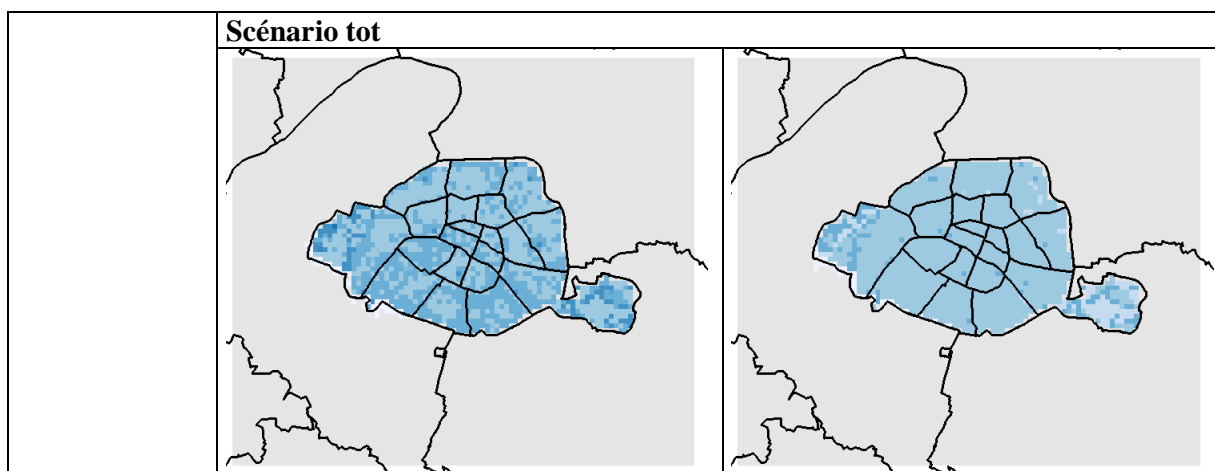


Figure 55 : Anomalies de températures au niveau des murs calculées la journée (entre 05 et 19 UTC, soit entre 7h et 21 locales) et la nuit (entre 20 et 04 UTC, soit entre 22h et 6h locales) entre chacun des scénarios et la référence pour les scénarios S1, S2bis, S3 et Stot.

4.9.3 Températures au niveau des routes

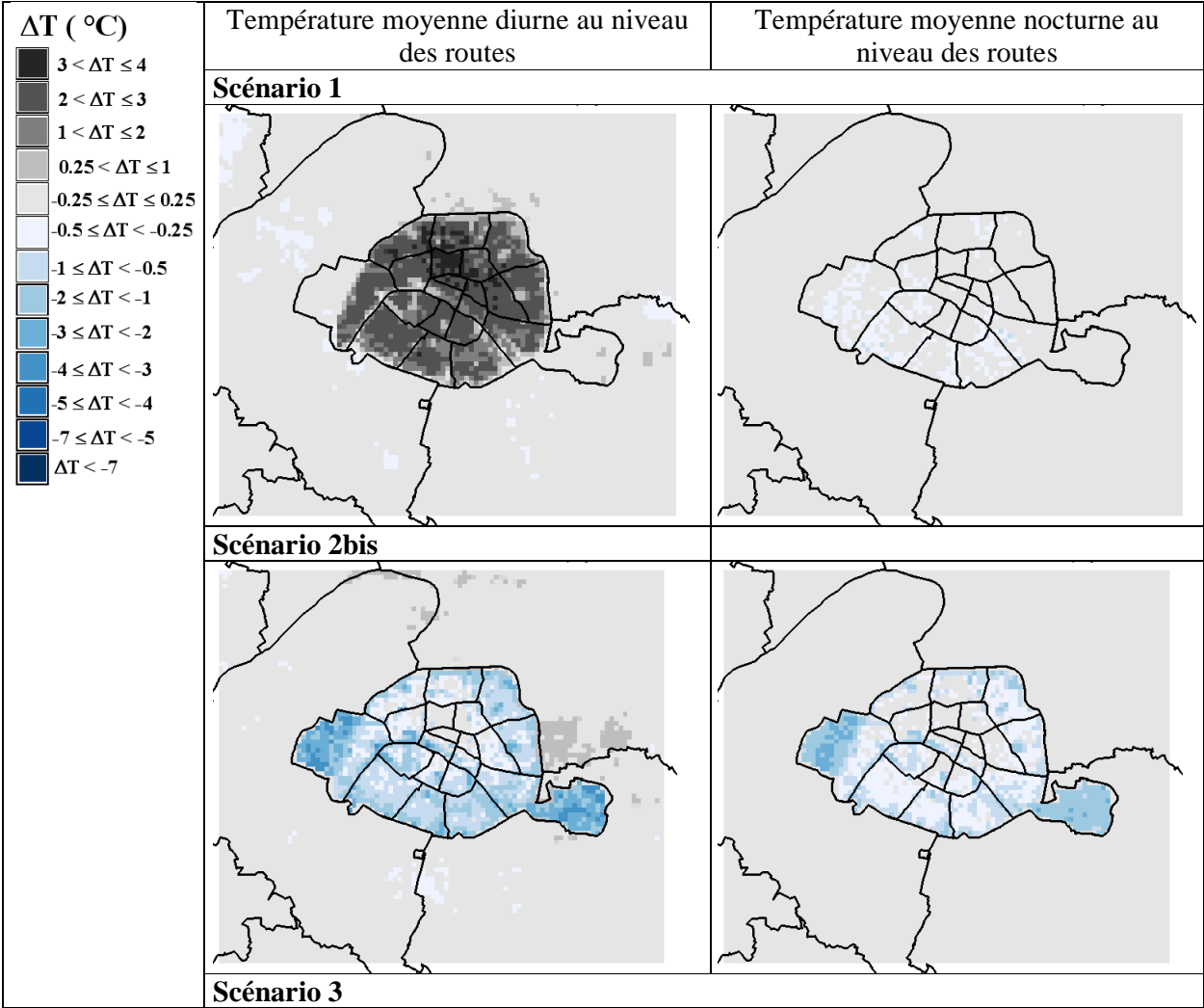
La température au niveau des routes n'est modifiée que sur Paris *intra muros* (Figure 56). En moyenne diurne dans le cas du scénario S1, la température au niveau des routes augmente (jusqu'à +4 °C). En moyenne nocturne, elle est légèrement plus faible dans le cas du scénario S1 que dans la référence (jusqu'à -0.5 °C). En effet, l'augmentation de l'albédo des murs entraîne une majoration des phénomènes de réflexion du rayonnement au sein du canyon et donc une éventuelle plus grande disponibilité de rayonnement incident pour la route. Ceci est bien visible sur la Figure 57 : le fort albédo des murs (qui passe de 0.4 dans la référence à 0.8 dans le scénario S1 pour l'ensemble des murs des bâtiments situés dans Paris *intra muros*) conduit à une réflexion importante du rayonnement visible en journée dans Paris *intra muros*. Une partie de ce rayonnement réfléchi va donc désormais atteindre la route, d'où une anomalie de flux incident visible fortement positive (jusqu'à 80 W.m⁻² supplémentaires). Au contraire, l'anomalie de flux incident infrarouge est négative. Cette anomalie du flux incident infrarouge au niveau des routes est cependant moins importante en valeur absolue que l'anomalie du flux incident visible au niveau des routes et la résultante est donc positive, avec un rayonnement total supplémentaire entre 0 et 40 W.m⁻² au niveau des routes dans Paris *intra muros*. La nuit, il n'y a pas de flux incident visible mais du flux incident infrarouge uniquement qui, pour les mêmes raisons qu'en journée, va légèrement diminuer au niveau des routes (jusqu'à -7 W.m⁻²), contribuant à une baisse des températures au niveau de la surface de la route.

La baisse de température au niveau des routes est importante dans le cas du scénario S2bis : 1 à 2 °C suivant la quantité de végétation ajoutée, jusqu'à 4 °C dans les Bois de Vincennes et Boulogne en moyenne diurne, jusqu'à 1 °C dans Paris *intra muros* et 2 à 3 °C dans les deux grands bois en moyenne nocturne. La chaleur utilisée pour chauffer la route dans la référence est ici utilisée par la végétation pour le phénomène d'évapotranspiration.

Dans le scénario S3, la diminution de température de surface des routes est nettement plus importante, jusqu'à 7 °C en moyenne diurne et de 2 à 3 °C en moyenne nocturne. L'arrosage des chaussées en journée permet de limiter le réchauffement de la route de manière importante puisque le rayonnement reçu est utilisé pour évaporer l'eau présente sur la chaussée au lieu d'être stocké par la chaussée. La

nuit, la libération de chaleur est moindre puisqu'une quantité moindre de chaleur a été stockée pendant la journée, d'où une baisse là encore des températures de surface de la route.

Tous ces effets s'ajoutent dans le scénario Stot pour donner une baisse de température de surface de la route maximale : plus de 7 °C sur la majeure partie de Paris *intra muros* en moyenne diurne et entre 3 et 7 °C en moyenne nocturne.



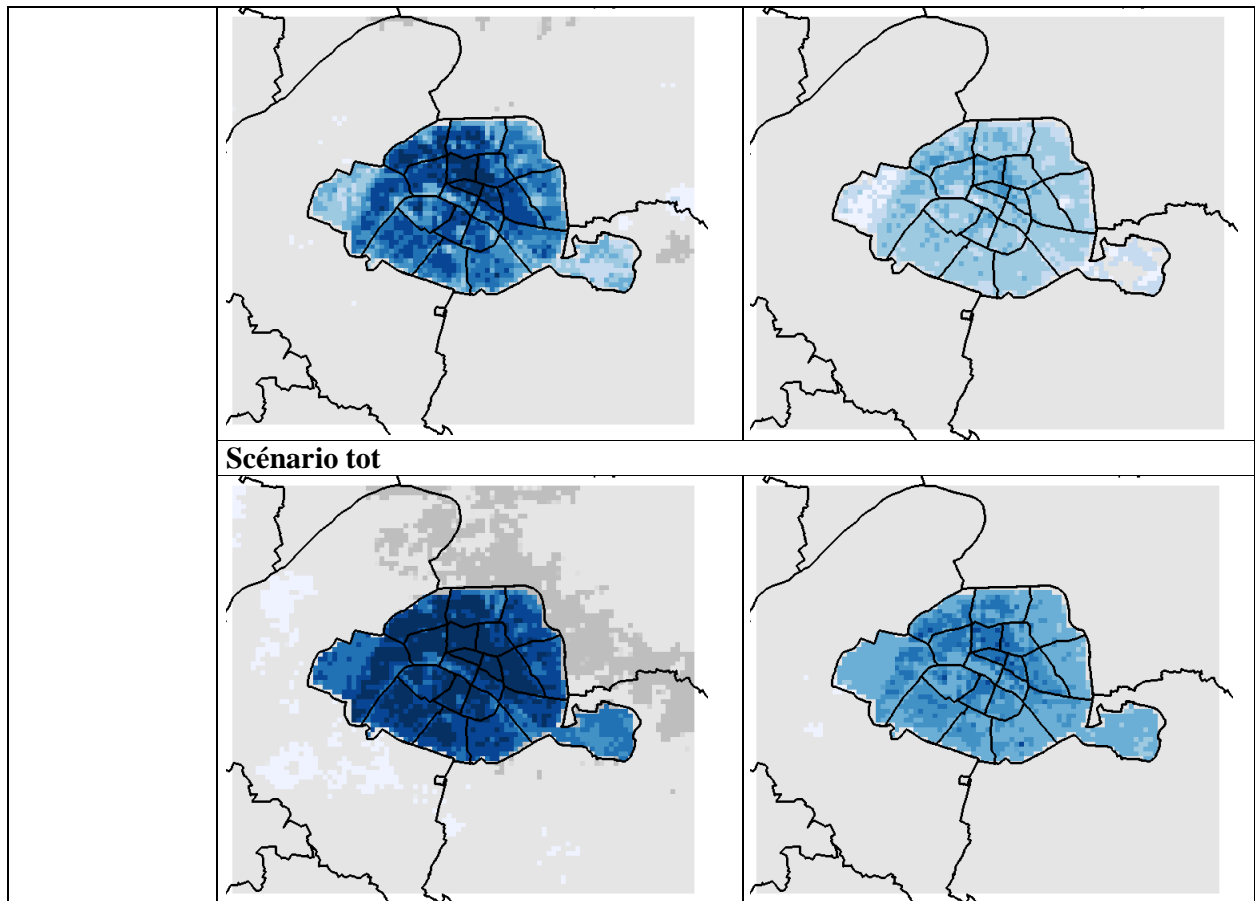


Figure 56 : Anomalies de températures au niveau des routes calculées la journée (entre 05 et 19 UTC, soit entre 7h et 21 locales) et la nuit (entre 20 et 04 UTC, soit entre 22h et 6h locales) entre chacun des scénarios et la référence pour les scénarios S1, S2bis, S3 et Stot.

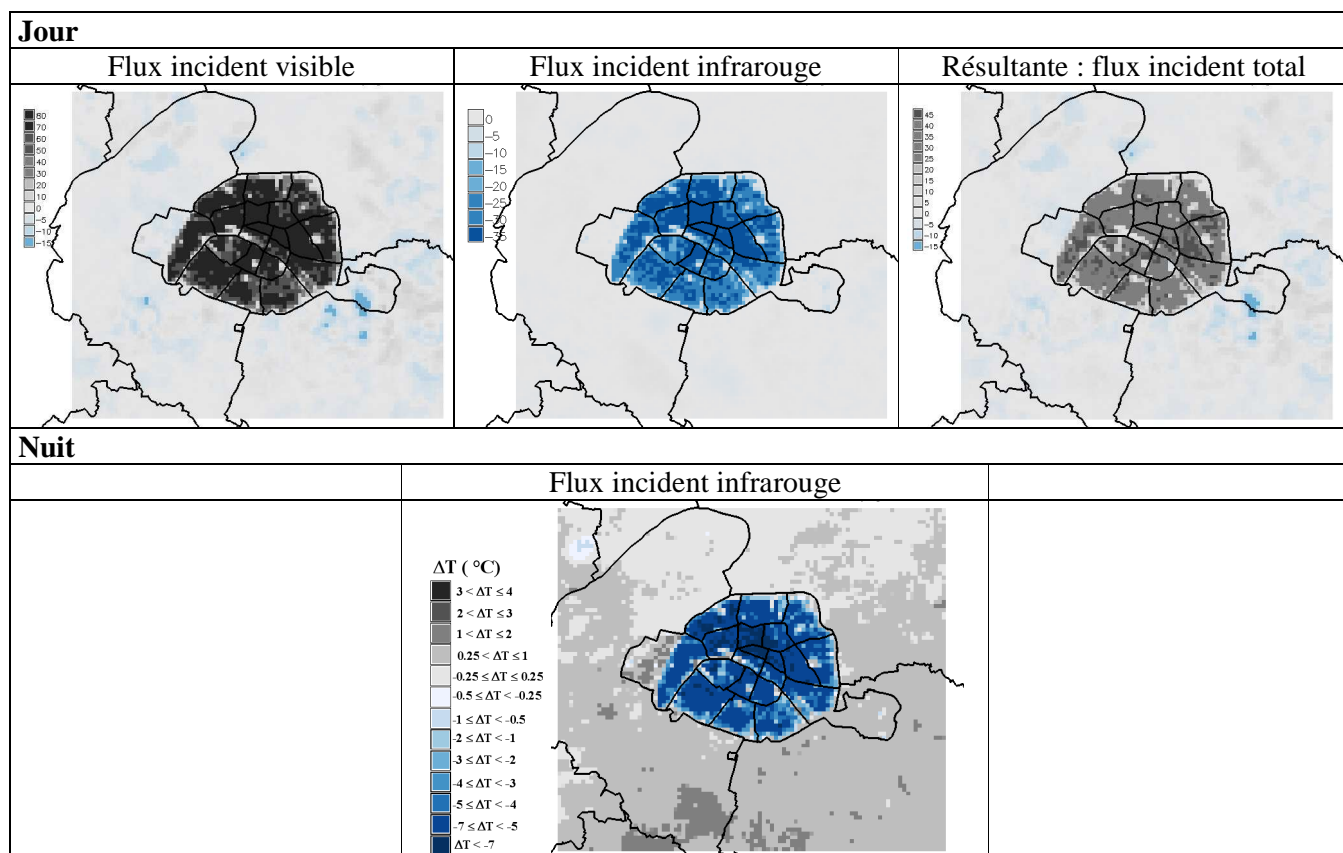


Figure 57 : Anomalies de flux incident au niveau des routes calculées la journée entre 05 et 19 UTC, soit entre 7h et 21 locales, (en haut) et la nuit entre 20 et 04 UTC, soit entre 22h et 6h locales, (en bas) entre le scénario S1 et la référence : flux incident visible (courtes longueurs d'ondes) à gauche, flux incident infrarouge (grandes longueurs d'ondes) au milieu et flux incident résultant (toutes longueurs d'ondes) à droite.

Conclusions

L'impact de différents leviers urbains sur le climat de Paris dans le contexte de la canicule de l'été 2003 est analysé via des simulations numériques à haute résolution menées selon différents scénarios. Les scénarios retenus s'appliquent à trois modalités : la modification des paramètres radiatifs des surfaces (toits et murs), l'ajout d'eau et l'ajout de végétation. A l'aide d'un système de modélisation de surface avec une résolution spatiale fine de 250 m, intégrant une paramétrisation urbaine particulière (modèle TEB), et d'une base de données spécifique du couvert urbain parisien élaborée avec l'APUR, l'accent est mis sur la modification de processus urbains tels que l'îlot de chaleur.

La variation des propriétés radiatives des parois opaques du bâti parisien (murs et toitures) dans le sens d'un Paris plus « réfléchissant » a un impact relativement important sur les températures dans Paris *intra muros* (diminution de l'intensité de l'ICU de 1 °C, diminution de la température à 2m moyenne diurne jusqu'à 2 °C et jusqu'à 3 °C de baisse de température à 2 m à un instant donné). L'impact se fait également sentir dans le panache urbain où la baisse de température induite atteint 0.5 à 1 °C en terme d'ICU, voire 2 °C à un instant donné. L'effet de ces modifications se fait sentir en surface mais également en altitude, avec un effet maximal aux alentours de 10 à 15 m d'altitude, là où les répercussions liées aux modifications des propriétés radiatives des murs et des toits se font sentir simultanément et donc s'additionnent. Les conséquences de ces changements se font encore légèrement sentir sur la température à 30 m (diminution de l'intensité de l'ICU de 0.5 °C). Les températures de surface des parois modifiées (toits et murs) subissent une forte baisse, ce qui pourrait avoir un impact non négligeable sur la température interne des bâtiments.

Le verdissement de la ville retenu dans cette étude (végétalisation des espaces de sol nu « disponibles » et de la moitié de la surface des rues dont la largeur est supérieure à 15 m) n'a un impact que si la végétation est maintenue dans un état lui permettant ses activités d'évapotranspiration. Ainsi, si la végétation est en situation de stress hydrique, elle se comportera quasiment comme du sol nu, n'occasionnant pas de transfert d'énergie par le biais du flux de chaleur latente. En imposant un arrosage suffisant dans nos simulations numériques, on obtient un impact très important (diminution de l'intensité de l'ICU de 2, voire 3 °C, diminution de la température à 2 m en moyenne diurne supérieure à 3 °C et jusqu'à 5 °C de baisse de température à 2 m à un instant donné). Cet impact est d'autant plus important que le taux de végétation est élevé. Il est plus fort en journée (évapotranspiration de la végétation) mais est visible également la nuit. Par contre, il ne se transmet que très peu sur la verticale et reste cantonné aux basses couches de l'atmosphère.

L'humidification de la ville par aspersion d'eau dans les rues conduit à une diminution de l'intensité de l'ICU assez faible de l'ordre de 0.5 °C. L'impact de cet arrosage est beaucoup plus sensible en journée (diminution de la température à 2 m de 1 °C en moyenne diurne, localement 2 °C à un instant donné). Cet effet ne se fait sentir qu'en basses couches.

La réalisation simultanée de toutes ces modifications a un effet cumulatif sur le climat urbain. L'intensité de l'ICU est diminuée de 1 à 2 °C ; la température à 2 m est abaissée de plus de 3 °C en moyenne diurne, 2 °C en moyenne nocturne et jusqu'à 5 °C à un instant donné. Les effets se font sentir sur toute la hauteur de la canopée urbaine (intensité de l'ICU diminuée de 0.5 à 1 °C à 30 m d'altitude). Par ailleurs, l'ensemble des températures spécifiques au milieu urbain (toits, murs, routes) sont fortement impactées.

Les tendances observées et prévues en matière d'exposition, de vulnérabilité et d'extrêmes climatiques telles qu'analysées dans de nombreuses études ainsi que dans le volet 1 du projet EPICEA peuvent éclairer les stratégies, politiques et mesures de gestion des risques et d'adaptation. L'intérêt que présentent ces tendances pour la prise de décision dépend de leur ampleur et de leur degré de certitude, aux échelles spatiales et temporelles du danger considéré, et de la possibilité de mettre en oeuvre des mesures de gestion du risque.

Le projet EPICEA va plus loin. Au-delà des tendances projetées sur les paramètres climatiques, il contribue en effet 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 sur un plan théorique. L'analyse de ces résultats éclaire les perspectives ouvertes par EPICEA mais reste à l'heure actuelle limitée par des considérations sur la faisabilité technique et les conditions de mise en oeuvre et d'exploitation attachées aux scénarios. Cela permet néanmoins d'apporter des éléments à un processus de décision éminemment complexe et long de ce fait.

Les simulations atmosphériques à très haute résolution réalisées dans le cadre d'EPICEA ont permis de considérer des spécificités complexes de l'occupation des sols, comme les surfaces urbaines, et ouvrent de grandes perspectives de travaux de météorologie urbaine. L'exploration d'autres tests de sensibilité modifiant la morphologie de la ville dans une optique de long terme sont à l'étude.

Par ailleurs, d'autres projets sont en cours et offrent des réflexions communes à EPICEA ou les prolongent.

Ainsi, le projet ANR-VURCA (Vulnérabilité URbaine aux épisodes Caniculaires et stratégies d'Adaptation) pour lequel se sont associés par le Météo-France (CNRM-GAME) pour les aspects climatologie, le CIRED pour les aspects socio-économiques et le CSTB pour les aspects « bâtiment ». Les objectifs de ce projet étaient d'évaluer le niveau de vulnérabilité des villes à des épisodes de canicules futures (en terme de perte de confort thermique et de demande énergétique liée à l'air conditionné) et d'évaluer l'efficacité de stratégies d'adaptation en réponse à ces vulnérabilités (par l'intermédiaire d'indicateurs (gravité d'une canicule et vulnérabilité de la ville aux canicules). L'analyse s'est attachée à différents scénarios portant sur l'expansion urbaine, le bâti, l'usage de la climatisation et l'arrosage des jardins publics avec une méthodologie proche de celle utilisée dans EPICEA.

Le projet ANR-MUSCADE (Modélisation Urbaine et Stratégies d'adaptation au Changement Climatique pour Anticiper la Demande et la production Energétique) auquel participent Météo-France (CNRM/GAME) pour les aspects liés à la climatologie, le CSTB pour les aspects liés au bâti, le LRA pour les aspects liés à l'architecture, le CIRED pour les aspects socio-économiques et le LIENS pour les aspects liés à la géographie, s'attache à étudier, de nos jours à 2100, les interactions entre extension de la ville, évolution des modes constructifs, consommation d'énergie, production d'énergie décentralisée, micro climat urbain et changement climatique.

Le projet ANR-RESILIS, fruit d'une collaboration entre Egis, l'Ecole des ingénieurs de la Ville de Paris, LEESU, Reeds, Fondaterra, Sogreah et le Cemagref, vise à développer des solutions innovantes pour l'amélioration de la résilience de la ville, grâce à trois leviers, une meilleure gouvernance multi-échelles et multi-acteurs, une action sur les populations et une gestion optimisée des réseaux techniques structurant la ville. Ainsi, au moyen du modèle tridimensionnel microclimatique ENVI-met, les conséquences d'un épisode caniculaire sur le climat urbain sont étudiées suite à une

combinaison d'aménagements (utilisations d'arbres, végétalisation des toits, augmentation de l'albédo des toits et du sol, etc.) visant à refroidir les températures dans un quartier urbain sur la ville d'Orléans, site pilote du projet.

Le projet ANR-VegDUD vise à évaluer les impacts de la végétation en lien avec ceux de la forme urbaine, sur plusieurs systèmes urbains en interaction : le climat, les ambiances, l'énergie, l'hydrologie, à différentes échelles spatiales mais aussi temporelles. Ce projet associe des équipes des domaines des sciences de l'ingénieur, des sciences de l'environnement, des sciences de l'homme et de la société, des sciences de l'information et de la communication et des sciences du vivant. Au delà de l'amélioration du cadre de vie, la végétation est au cœur des enjeux pour rendre la ville « durable ». Elle permet d'avancer des solutions diversifiées touchant soit à l'espace privé soit à l'espace collectif, pour le confort d'été dans les villes, la maîtrise de la consommation d'énergie et l'amélioration de la qualité de vie dans les villes denses. Le projet VegDUD veut apporter des moyens (connaissances, outils) d'évaluation des impacts de politiques urbaines de végétalisation des espaces privés et collectifs.

Ces différents projets, à la croisée de diverses disciplines, participent à la compréhension du climat urbain et constituent des connaissances et des savoir-faire sur l'adaptation des villes en vue d'anticiper l'impact du changement climatique lors de projets d'aménagement.

Références

- Abreu L. V., L. L. Labaki, and A. Matzarakis, 2012. *Different Trees and configuration as microclimate control strategy in Tropics*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Akbari H., P. Berdahl, R. Levinson, S. Wiel, W. Miller, and A. Desjarlais, 2006. *Cool-Color Roofing Material*. California Energy Commission, PIER Building End-Use Energy Efficiency Program, EC-500-2006-067.
- Akbari H. and R. Levinson, 2008. Evolution of Cool-Roof Standards in the US, *Advances in building energy research*, 2, 1-32.
- Balogun A. A., T. E. Morakinyo, and S. A. Balogun, 2012. *Potential of trees for mitigating outdoor high-temperatures in Akure, Nigeria*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Bastien, Y., 2002. *Taillis et taillis sous futaie*. Cours de sylviculture, Centre de Nancy, Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts ENGREF, 18 p.
- Beniston, M. and H.F. Diaz, 2004. The 2003 heat wave as an example of summers in a greenhouse climate? Observations and climate model simulations for Basel, Switzerland. *Global and Planetary Change*, **44** (1-4), 73-81.
- Bessemoulin, P., N. Bourdette, P. Courtier, and J. Manach, 2004. La canicule d'août 2003 en France et en Europe. *La Météorologie*, **46**, 25-33.
- Colombert M., 2008. *Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est, 539 pages.
- Coutts A. M., L. Gerbert, J. Beringer, and N. Tapper, 2012. *Tree Response to Urban Environmental Conditions and Water Availability*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- De Munck C., A. Lemonsu, and V. Masson, 2012. *Green roofs for cities : modelling with TEB-Veg and validation at building scale*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Desplat J., Salagnac J.-L., Kounkou-Arnaud R., Lemonsu A., Colombert M., Lauffenburger M. And Masson V., 2009 : *EPICEA project [2008-2010]: multidisciplinary study of the impacts of climate change on the scale of Paris*. 7th International Conference on Urban Climate, Yokohama, Japan.
- Dimoudi A., P. Kosmopoulos, S. Zoras, and A. Kantzioura., 2012. *The influence of urban design in microclimate inside the urban canyons*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Drach P. R. C., R. Emmanuel, and E. Krüger, 2012. *Improving pedestrian comfort in cold cities by manipulating building geometry*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Dubois C., O. Bergeron, A. Potvin, and L. Adolphe, 2012. *Adapting cities to climate change: heat and urban form*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- EPICEA Volet 1, 2010. *Evolution du climat urbain de Paris dans la perspective du changement climatique*. Rapport sur le volet 1 du projet, 49 p., disponible en ligne : <http://www.cnrm.meteo.fr/projet/epicea>
- EPICEA Volet 2, 2011. Etude particulière d'un phénomène extrême : la canicule de 2003 (simulation à 250 m). Rapport sur le volet 2 du projet, 77p., disponible en ligne :

<http://www.cnrm.meteo.fr/projet/epicea>

- Erell E. and D. Pearlmutter, 2012. *Effect of high-albedo materials on pedestrian thermal comfort in urban canyons*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Fahmy M., H. Mokhtar, and A. Gira, 2012. *Adaptive urban form design on a climate change basis. A case study in Nubia, Egypt*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Früh B., P. Becker, T. Deutschlnder, J.-D. Hessel, M. Kossmann, I. Mieskes, J. Namyslo, M. Roos, U. Sievers, T. Steigerwald, H. Turau, and U. Wienert, 2011. Estimation of climate change impacts on the urban heat load using an urban climate model and regional climate projections. *J. of Appl. Meteorol. and Climatol.*, **50**, 167-184.
- 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.
- Futcher, J. A., P. Hernandez, L. Chebel Labaki, and O. A. Fernandes, 2012. *Managing cooling loads by the appropriate application of greening facades*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Gaffin S. R., C. Rosenzweig, R. Khanbilvardi, L. Parshall, S. Mahani, H. Glickman, R. Goldberg, R. Blake, R. B. Slosberg, and D. Hillel, 2008. Variations in New York City's urban heat island strength over time and space. *Theor. Appl. Climatol.*, **94**, 1-11.
- García Cueto R. O., A. Tejada Martínez, and E. Jáuregui Ostos, 2010. Heat waves and heat days in an arid city in the northwest of Mexico: current trends and in climate change scenarios. *Int. J. Biometeorol.*, **54**(4), 335-345.
- Hamdi R. and V. Masson, 2008. Inclusion of a Drag Approach in the Town Energy Balance (TEB) Scheme: Offline 1D Evaluation in a Street Canyon, *J. of Appl. Meteorol. And Climatol.*, **47**, 2627-2644.
- Hemon D. and E. Jouglu, 2003. *Estimation de la surmortalité et principales caractéristiques épidémiologiques*. Rapport remis au Ministre de la Santé et des Affaires Sociales et de Personnes Handicapées le 25 septembre 2003, 59 p.
- Hirano Y., Y. Ohashi, T. Ihara, T. Fujita, Y. Kikegawa, and H. Kondo, 2012. *Evaluation of urban heat island mitigation and CO2 reduction effects*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Honjo T., K. Umeki, R. Hirota, and K. Toba, 2012. *Simulation of energy balance of vertical green wall*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Iizuka S., Y. Kondo, S. Ito, H. Kusaka, and M. Hara, 2012. Impacts of future urban planning/structure on thermal environment. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- IPCC, 2007. *Climate Change 2007: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and A. Reisinger, (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 p.
- IPCC, 2012 : *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 p.

- Johansson E. and M. W. Yahia, 2012. *Improving outdoor thermal comfort in warm-humid Guayaquil, Ecuador through urban design*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Kakitsuba N. and S. Amagai, 2012. *Evaluation on thermal properties of the thin roofing units covered with greens*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Kikegawa Y., M. Mohan, B.R. Gurjar, and K Hokari, 2012. *Structure of air temperature distribution and urban warming alleviation potential over Delhi*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Konarska J., A. Larsson, F. Lindberg, B. Holmer, and S. Thorsson, 2012. *Transmissivity of direct solar radiation through the crowns of single urban trees*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Kossmann M., B. Früh, and G. Halbig, 2012. *Estimation of regional climate change impacts on summertime thermal conditions in Cologne – a dynamical-statistical downscaling approach*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Koukoku-Arnaud R., J. Desplat, J.-L. Salagnac, and A. Lemonsu, 2012. *Influence of built environment on the urban climate of Paris: the EPICEA project*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Kumar V., H. Guan, C. T. Simmons, J Bennett, C. Ewenz, and Z. Deng, 2012. *Influence of Parks on Urban Environment: A Case Study over Adelaide, Australia*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Lafore J.-P. et collaborateurs, 1998. The Meso-NH atmospheric simulation system. Part I: adiabatic formulation and control simulations. *Annales Geophysicae*, **16**, 90-109.
- Le Moigne P., 2009. *Surfex scientific documentation*. 211 p., disponible en ligne : <http://www.cnrm.meteo.fr/surfex/>.
- Lei L., T. Ichinose, and Y. Lin, 2012. *Impacts of shading effect from nearby buildings on heating and cooling energy consumption in hot summer and cold winter zone of China*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Lemonsu A., R. Koukoku-Arnaud, J. Desplat, J.-L. Salagnac, and V. Masson, 2012a. Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate, *Climatic change*, in press, doi: 10.1007/s10584-012-0521-6.
- Lemonsu A., V. Masson, L. Shashua-Bar, E. Erell, and D. Pearlmutter, 2012b. Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modeling urban green areas, *Geosci. Model Dev. Discuss.*, **5**, 1295–1340, doi:10.5194/gmdd-5-1295-2012.
- Masiero E. and L. C. L. Souza, 2012. *Waterbody and Microclimate in São José do Rio Preto, Brazil*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Masson V., 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Bound.-Layer Meteorol.*, **94**, 357-397.
- Masson V., J.-L. Champeaux, F. Chauvin, C. Meriguet, and R. Lacaze, 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 Y. Seity, 2009. Including atmospheric layers in vegetation and urban offline surface schemes. *J. Appl. Meteorol.*, **48**, 1377-1397, doi: 10.1175/2009JAMC1866.1.
- Météo-France/CNRM, 2010. *Climat urbain*, disponible en ligne :

<http://www.cnrm.meteo.fr/spip.php?rubrique134>

- Middel A., K. Häb, A. J. Brazel, C. Martin, and S. Guhathakurta, 2012. *Urban form, landscape design, and microclimate in Phoenix, Arizona*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Monteiro L. M. and M. P. Alucci, 2012. *Thermal comfort comparisons of different shading conditions in the Subtropics*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Müller N. and W. Kuttler, 2012. *Assessment of urban heat stress reduction strategies*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Nice K. A., A. Coutts, A. Broadbent, J. Beringer, N. Tapper, and E. S. Krayenhoff., 2012. *Evaluation of Water Sensitive Urban Design (WSUD) modelling strategies*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Noilhan J. and S. Planton, 1989. A simple parameterisation of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, **117**, 536-549.
- Noilhan J. and J.-F. Mahfouf, 1996. The ISBA land surface parameterisation scheme. *Glob. Plan. Ch.*, **13**, 145-159.
- Oke T. R., 1987. *Boundary Layer Climates*, Methuen, London and New York, 435 p.
- Pardydjak E. R., B. Addepalli, S. Halverson, D. Alexander, D. Johnson, P. Willemsen, J.R. Stoll, J. Steenburgh, A. Kochanski, and T. Harman, 2012. *Impact of Green Infrastructure on Urban Microclimate & Air Quality*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- ParisData 2011. Données issues de [Arbres d'alignement - Données géographiques](#), présentement mises à disposition aux conditions de la [licence ODbL](#) (Open Database License) : http://opendata.paris.fr/opendata/jsp/site/Portal.jsp?document_id=41&portlet_id=106
- Ptak B. and Halbigh G., 2012. *Climate-adapted metropolitan city of Cologne, Germany*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Potchter O., S. Cohen, L. Shashua-Bar, Y. Tanny, Y. Yaakov, and P. Bar-Kutiel., 2012. *Assessment cooling effect of tree species on desert urban climates*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Rosenzweig C. and W. D. Solecki, 2001. Climate change and a global city - Learning from New York. *Environment*, **43**(3), 2-12.
- Rosenzweig, C., S. Gaffin and L. Parshall (Eds.) 2006. *Green Roofs in the New York Metropolitan Region: Research Report*. Columbia University Center for Climate Systems Research and NASA Goddard Institute for Space Studies. New York. 59 pages.
- Salgado R. and P. Le Moigne, 2010 : Coupling of the FLake model to the Surfex externalized surface model, *Boreal Env. Res.*, **15**, 231-244.
- Shahmohamadi P., U. Cubasch, and S. Sodoudi, 2012. *The simulation of "Natural Ventilator of the City" model by using ENVI-met to mitigate the effect of urban heat island in Tehran metropolitan area*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Skelhorn C. P., S. J. Lindley, and G.J. Levermore, 2012. *Urban Greenspace Types and Building Energy Consumption in Manchester, UK*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.

- Speak A.F., J. J. Rothwell, S. J. Lindley, and C. L. Smith, 2012. *Spatial differences in urban particulate pollution reduction by green roof vegetation*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Sun C. Y., 2012. *The cool effect of green space in a tropical city, Taipei*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Sun C. Y. and Q.L. Meng, 2012. *Thermal comfort in a street with different landscape conditions*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Szegedi S. and E. Laszlo, 2012. *Park Cool Island Examinations in Debrecen, Hungary*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Takahashi, R., A. Asakura, K. Koike, S. Himeno, and S. Fujita, 2010. *Using snow melting pipes to verify water sprinkling's effect over a wide area*. In *Sustainable techniques and strategies in urban water management*, 7th International Conference, Lyon, France: Novatech. .
- Vautard, R., M. Beekmann, J. Desplat, A. Hodzic, and S. Morel, 2007. Air quality in Europe during the summer of 2003 as a prototype of air quality in a warmer climate. *Comptes Rendus - Geoscience*, **339** (11-12), 747-763.
- White E. C., A. M. Coutts, N. J. Tapper, and J. Beringer, 2012. *Role of urban trees in urban heat mitigation: Example from Melbourne, Australia*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Wilby R. L., 2003. Past and projected trends in London's urban heat island. *Weather*, **58**(7), 251-260.
- Wong N. H., E. Tan and S. K. Jusuf, 2012. *Influence of water body on air temperature in Singapore Climate*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Xuan Y. L., A. Mochida, Q. Li, and G. Yang., 2012. *Optimal Building Arrangement to Maximize Thermal Acceptance of Outdoors under Different Climates*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.
- Zuvela-Aloise M., J. Nemeč, and B. Früh, 2012. *Dynamical modelling of urban climate of Vienna*. 8th International Conference on Urban Climate, Dublin, Ireland.

Liste des figures

Figure 1 : Base de données du couvert urbain parisien : Répartition par maille des types de toits majoritaires, classés par matériau.....	8
Figure 2 : Base de données du couvert urbain parisien : Répartition par maille des types de murs des bâtiments majoritaires, triés par classe d'âge.	9
Figure 3 : Base de données du couvert urbain parisien : Fraction de végétation par maille....	9
Figure 4 : Base de données du couvert urbain parisien : Fraction de sol nu par maille.	10
Figure 5 : Base de données du couvert urbain parisien : Fraction de bitume (rues et surfaces bitumées) par maille.....	10
Figure 6 : Mise en évidence de l'îlot de chaleur urbain : moyenne des températures à 2 m (à gauche) et à 30 m (à droite) à 02, 03 et 04 UTC pour les 5 nuits de simulation.....	15
Figure 7 : Coupe transversale (traversant les 16 ^{ème} , 8 ^{ème} , 9 ^{ème} , 10 ^{ème} et 20 ^{ème} arrondissements d'ouest en est).....	16
Figure 8 : 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.	16
Figure 9 : Albédo des murs sur le domaine : référence à gauche, albédo uniforme sur le domaine, et scénario S1 (réfléchissant) à droite.....	17
Figure 10 : Albédo des toits sur le domaine : référence à gauche et scénario S1 (réfléchissant) à droite.	17
Figure 11 : Emissivité des toits sur le domaine : référence à gauche et scénario S1 (réfléchissant) à droite.	18
Figure 12 : Mailles pour lesquelles la fraction de bâti est inférieure à 25 %, supprimées dans le cadre du calcul de la largeur de rues.	19
Figure 13 : Surface en m ² d'arbres d'alignement par maille (surface du houppier donc « vue de haut »).....	20
Figure 14 : Histogramme des fréquences des largeurs de routes sur Paris <i>intra muros</i> obtenues par calcul en ne considérant que les mailles pour lesquelles la fraction de bâti est supérieure à 25 %.	21
Figure 15 : Surface de routes (en m ²) de largeur supérieure à 15 m par maille sur Paris <i>intra muros</i>	21
Figure 16 : Surfaces supplémentaires (en m ²) de végétation basse ajoutées pour les scénarii 2 et 2bis dans le cas de la transformation des espaces de sol nu (à gauche) et de la végétalisation partielle des rues larges (à droite).....	21
Figure 17 : Surfaces (en m ²) de végétation basse dans le cas de référence (à gauche) et dans le cas du scénario 2 (à droite).	21
Figure 18 : Fraction de végétation sur l'ensemble du domaine dans le cas de référence (à gauche) et dans le cas des scénarii 2 et 2bis (à droite).....	22
Figure 19 : Différence de surface de végétation sur Paris <i>intra muros</i> entre le cas de référence et le cas des scénarii 2 et 2bis.....	22
Figure 20 : Représentation des échanges en eau dans TEB. W_i : contenu en eau des réservoirs ; E_i : termes d'évaporation ; R_i : ruissellement ($i=t$ (toit) ou r (road)).....	23
Figure 21 : Différence en Wm^{-2} de flux de rayonnement net (RN), de flux de chaleur sensible (H), de flux de chaleur latente (LE) en moyenne quotidienne, et de flux de stockage de chaleur (GFLUX) en moyenne diurne et nocturne entre le scénario S1 et la référence, le 10 août 2003.	31

Figure 22 : Bilan d'énergie le 10 août 2003 simulé par le modèle dans le cas du scénario S1 et moyenné sur l'ensemble du domaine (a) et sur la partie bâtie (b) et la partie végétation (c) : rayonnement net RN, flux de chaleur sensible H, flux de chaleur latente LE et flux de stockage GFLUX (traits pleins : S1 ; pointillés : REF).....	32
Figure 23 : Différence en Wm^{-2} de flux de rayonnement net (RN), de flux de chaleur sensible (H), de flux de chaleur latente (LE) et de flux de stockage de chaleur (GFLUX) en moyenne quotidienne entre le scénario S2 et la référence (à gauche) et entre le scénario S2bis et la référence (à droite), le 10 août 2003.	34
Figure 24 : Bilans d'énergie le 10 août 2003 simulés par le modèle dans le cas des scénarios S2 et S2bis et moyennés sur l'ensemble du domaine (en haut) et sur la partie bâtie (en bas à gauche) et la partie végétation (en bas à droite) : rayonnement net RN, flux de chaleur sensible H, flux de chaleur latente LE et flux de stockage GFLUX (traits pleins : S2 ou S2bis ; pointillés : REF).	35
Figure 25 : Différence en Wm^{-2} de flux de rayonnement net (RN), de flux de chaleur sensible (H), de flux de chaleur latente (LE) et de flux de stockage de chaleur (GFLUX) en moyenne quotidienne entre le scénario S3 et la référence, le 10 août 2003.	36
Figure 26 : Bilans d'énergie le 10 août 2003 simulés par le modèle dans le cas du scénario S3 et moyennés sur l'ensemble du domaine (en haut) et sur la partie bâtie (en bas à gauche) et la partie végétation (en bas à droite) : rayonnement net RN, flux de chaleur sensible H, flux de chaleur latente LE et flux de stockage GFLUX (traits pleins : S3 ; pointillés : REF)..	37
Figure 27 : Différence en Wm^{-2} de flux de rayonnement net (RN), de flux de chaleur sensible (H), de flux de chaleur latente (LE) et de flux de stockage de chaleur (GFLUX) en moyenne quotidienne entre le scénario Stot et la référence, le 10 août 2003.	38
Figure 28 : Bilans d'énergie le 10 août 2003 simulés par le modèle dans le cas du scénario Stot et moyennés sur l'ensemble du domaine (en haut) et sur la partie bâtie (en bas à gauche) et la partie végétation (en bas à droite) : rayonnement net RN, flux de chaleur sensible H, flux de chaleur latente LE et flux de stockage GFLUX (traits pleins : Stot ; pointillés : REF)..	39
Figure 29 : Localisation des points où nous disposons de stations de mesure horaire (Paris-Montsouris (PM), Belleville-Parc (BP), Courbevoie (C), Saint-Denis (SD), Saint-Maur (SM) et Villacoublay (VL)) ainsi que des 22 points d'intérêt sur les 20 arrondissements (A1 à A20) et les 2 bois (Boulogne (BL) et Vincennes (VN)).	40
Figure 30 : Diagrammes de dispersion de la température de l'air à 2 m simulée par le modèle dans le cas de référence et pour chacun des scénarios S1, S2, S2bis, S3 et Stot, sur lesquels sont superposées la première bissectrice (droite $y=x$, en pointillés rouge) et la droite de régression linéaire (en traits pleins rouges). calculés pour les différents points présentés Figure 29. Sont indiqués sur le graphe le coefficient de corrélation et l'équation de la droite de régression.	41
Figure 31 : Cycle quotidien moyen de la température à 2 m (en °C) (moyenne des températures horaires sur les 6 jours de simulation) pour la simulation de référence (pointillés) et l'ensemble des scénarios S1, S2, S2bis, S3 et Stot (traits pleins sauf S2, pointillés) sur différents points situés dans Paris <i>intra muros</i> : 7 ^{ème} arrondissement (arr7), 9 ^{ème} arrondissement (arr9) et 13 ^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29).	44
Figure 32 : Température de l'air à 2 m en °C pour la simulation de référence (pointillés) et l'ensemble des scénarios S, S2, S2bis, S3 et Stot (traits pleins sauf S2, pointillés) pour l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) sur différents points situés dans Paris <i>intra muros</i> : 7 ^{ème} arrondissement (arr7), 9 ^{ème} arrondissement (arr9) et 13 ^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29).	46

- Figure 33 : Diagrammes de dispersion de l'humidité relative de l'air à 2 m simulée par le modèle dans le cas de référence et pour chacun des scénarios S1, S2, S2bis, S3 et Stot, sur lesquels sont superposées la première bissectrice (droite $y=x$, en pointillés rouge) et la droite de régression linéaire (en traits pleins rouges). calculés pour les différents points présentés Figure 29. Sont indiqués sur le graphe le coefficient de corrélation et l'équation de la droite de régression. 47
- Figure 34 : Cycle quotidien moyen de l'humidité relative de l'air à 2 m (en %) (moyenne des humidités relatives horaires sur les 6 jours de simulation) pour la simulation de référence (pointillés) et l'ensemble des scénarios S1, S2, S2bis, S3 et Stot (traits pleins sauf S2, pointillés) sur différents points situés dans Paris *intra muros* : 7^{ème} arrondissement (arr7), 9^{ème} arrondissement (arr9) et 13^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29). 48
- Figure 35 : Humidité relative de l'air à 2 m (%) pour la simulation de référence (pointillés) et l'ensemble des scénarios S, S2, S2bis, S3 et Stot (traits pleins sauf S2, pointillés) pour l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) sur différents points situés dans Paris *intra muros* : 7^{ème} arrondissement (arr7), 9^{ème} arrondissement (arr9) et 13^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29). 49
- Figure 36 : Cumuls de précipitations totales (en mm) simulées sur l'ensemble de la période (08 août 13 UTC au 14 août 00 UTC) pour la situation de référence (REF) et les différents scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot). 50
- Figure 37 : Contenus en eau moyens du réservoir superficiel du sol du réservoir superficiel du sol et 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) pour la référence et chacun des scénarios (S1, S2 ; S2bis, S3 et Stot). 55
- Figure 38 : Profil vertical de température de l'air (en °C) moyennée sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) le jour (groupe de courbes à droite sur chaque figure) et la nuit (groupe de courbes à gauche sur chaque figure) pour la simulation de référence (en pointillés) et l'ensemble des scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot en traits pleins sauf S2 en pointillés) sur différents points situés dans Paris *intra muros* : 7^{ème} arrondissement (arr7), 9^{ème} arrondissement (arr9) et 13^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29). 56
- Figure 39 : Profil vertical de différence de température de l'air (en °C) moyennée jour par jour sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) entre chacun des scénarios (S1, S2bis, S3 et Stot) et la simulation de référence sur différents points situés dans Paris *intra muros* : 7^{ème} arrondissement (arr7), 9^{ème} arrondissement (arr9) et 13^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29). 59
- Figure 40 : Profil vertical de différence de température de l'air (en °C) moyennée nuit par nuit sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) entre chacun des scénarios (S1, S2bis, S3 et Stot) et la simulation de référence sur différents points situés dans Paris *intra muros* : 7^{ème} arrondissement (arr7), 9^{ème} arrondissement (arr9) et 13^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29). 61
- Figure 41 : Profil vertical de température de l'air (en °C) moyennée sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) le jour (groupe de courbes à droite sur chaque figure) et la nuit (groupe de courbes à gauche sur chaque figure) pour la simulation de référence (en pointillés) et l'ensemble des scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot en traits pleins sauf S2 en pointillés) à gauche ; profil vertical de différence de température de l'air (en °C) moyennée jour par jour sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) entre chacun des scénarios (S1, S2bis, S3 et Stot) et la simulation de référence au centre ; Profil vertical de différence de température de l'air (en °C) moyennée nuit par nuit sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) entre chacun des scénarios (S1, S2bis, S3 et Stot) et la simulation de référence à droite sur différents points situés dans Paris

<i>intra muros</i> : 7 ^{ème} arrondissement (arr7), 9 ^{ème} arrondissement (arr9) et 13 ^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29).	63
Figure 42 : Profil vertical d'humidité spécifique (en g.m ⁻³) moyennée sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) pour la simulation de référence (en pointillés) et l'ensemble des scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot, en traits pleins sauf S2, en pointillés) sur différents points situés dans Paris <i>intra muros</i> : 7 ^{ème} arrondissement (arr7), 9 ^{ème} arrondissement (arr9) et 13 ^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29).	64
Figure 43 : Profil vertical du vent moyenné (en m.s ⁻¹) sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) pour la simulation de référence et l'ensemble des scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot) au niveau du parc Montsouris.	64
Figure 44 : Comparaison des ICU des différents scénarios (S1, S2, Sbis, S3 et Stot par rapport à la situation de référence (intensité de l'ICU calculé sur les températures à 2 m simulées dans les différents scénarios (à gauche) et anomalies de températures à 2 m calculées sur l'ICU entre chacun des scénarios et la référence (à droite). L'ICU est calculé dans chaque cas comme la moyenne des températures de l'air à 2 m à 02, 03 et 04 UTC les 5 nuits de la simulation).	67
Figure 45 : 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 et les différents scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot).	68
Figure 46 : Anomalies de températures à 2 m calculées sur l'ICU entre chacun des scénarios et la référence pour les scénarios S1, S2bis, S3 et Stot nuit par nuit. L'ICU est calculé dans chaque cas comme la moyenne des températures de l'air à 2 m à 02, 03 et 04 UTC les 5 nuits de la simulation.	69
Figure 47 : Anomalies de températures à 2 m calculées la journée (entre 05 et 19 UTC, soit entre 7h et 21 locales) et la nuit (entre 20 et 04 UTC, soit entre 22h et 6h locales) entre chacun des scénarios et la référence pour les scénarios S1, S2bis, S3 et Stot.	71
Figure 48 : Champ de température à 2 m auquel sont superposées les barbules de vent à 30 m (à gauche) et anomalies de températures à 2 m calculées entre chacun des scénarios et la référence (à droite) pour les scénarios S1, S2bis, S3 et Stot le 12 août 2003 à 11 UTC.	73
Figure 49 : Anomalies horaires de température à 2 m (en °C) les plus importantes pour chaque point de grille du domaine (à gauche) et heures de la journée auxquelles se produisent ces anomalies horaires les plus importantes pour chaque point de grille, toute journées confondues (à droite) pour les différents scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot).	75
Figure 50 : Comparaison des ICU des différents scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot) par rapport à la situation de référence (intensité de l'ICU calculé sur les températures à 30 m simulées dans les scénarios (à gauche) et anomalies de températures à 30 m entre chacun des scénarios et la référence (à droite). L'ICU est calculé dans chaque cas comme la moyenne des températures de l'air à 2 m à 02, 03 et 04 UTC les 5 nuits de la simulation).	77
Figure 51 : 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 et les différents scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot).	78
Figure 52 : Anomalies de températures à 30 m calculées sur l'ICU entre chacun des scénarios et la référence pour les scénarios S1, S2bis, S3 et Stot nuit par nuit. L'ICU est	

calculé dans chaque cas comme la moyenne des températures de l'air à 2 m à 02, 03 et 04 UTC chaque nuit).....	79
Figure 53 : Anomalies de températures à 30 m calculées la journée (entre 05 et 19 UTC, soit entre 7h et 21 locales) et la nuit (entre 20 et 04 UTC, soit entre 22h et 6h locales) entre chacun des scénarios et la référence pour les scénarios S1, S2bis, S3 et Stot nuit par nuit.	81
Figure 54 : Anomalies de températures moyennes au niveau des toits calculées la journée (entre 05 et 19 UTC, soit entre 7h et 21 locales) et la nuit (entre 20 et 04 UTC, soit entre 22h et 6h locales) entre chacun des scénarios et la référence pour les scénarios S1, S2bis, S3 et Stot.....	83
Figure 55 : Anomalies de températures au niveau des murs calculées la journée (entre 05 et 19 UTC, soit entre 7h et 21 locales) et la nuit (entre 20 et 04 UTC, soit entre 22h et 6h locales) entre chacun des scénarios et la référence pour les scénarios S1, S2bis, S3 et Stot.....	85
Figure 56 : Anomalies de températures au niveau des routes calculées la journée (entre 05 et 19 UTC, soit entre 7h et 21 locales) et la nuit (entre 20 et 04 UTC, soit entre 22h et 6h locales) entre chacun des scénarios et la référence pour les scénarios S1, S2bis, S3 et Stot.....	87
Figure 57 : Anomalies de flux incident au niveau des routes calculées la journée entre 05 et 19 UTC, soit entre 7h et 21 locales, (en haut) et la nuit entre 20 et 04 UTC, soit entre 22h et 6h locales, (en bas) entre le scénario S1 et la référence : flux incident visible (courtes longueurs d'ondes) à gauche, flux incident infrarouge (grandes longueurs d'ondes) au milieu et flux incident résultant (toutes longueurs d'ondes) à droite.	88

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des toits par type de toit pour l'ensemble du domaine.....	11
Tableau 2 : Caractéristiques des murs pour Paris <i>intra muros</i> par classe d'âge du bâtiment.	12
Tableau 3 : Caractéristiques des murs pour la Petite Couronne par type d'habitat (individuel ou collectif).	13
Tableau 4 : Synthèse des scénarios testés par rapport à la simulation de référence.	24
Tableau 5 : Synthèse des caractéristiques des trois points du domaine analysés en détail (Arr7 : 7 ^{ème} arrondissement ; Arr9 : 9 ^{ème} arrondissement ; Arr13 : 13 ^{ème} arrondissement, voir Figure 29) dans la référence et les différents scénarios. On rappelle qu'une maille est un carré de 250 m de côté et de 62500 m ² de surface.	43
Tableau 6 : Différences de température à 2 m minimale (ΔT_n) et maximale (ΔT_x) entre les différents scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot) et la référence pour chaque jour de simulation (08, 09, 10, 11, 12 et 13 août 2003) et en moyenne sur l'ensemble de la simulation sur différents points situés dans Paris <i>intra muros</i> : 7 ^{ème} arrondissement (arr7), 9 ^{ème} arrondissement (arr9) et 13 ^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29).....	45
Tableau 7 : Différence de température (en °C) à différentes hauteurs sur la verticale, moyennée sur l'ensemble de la période (08 au 13 août 2003) le jour (entre 05 et 19 UTC, soit entre 7h et 21h locales) et la nuit (entre 20 UTC et 04 UTC, soit entre 22h et 6h locales) entre les différents scénarios (S1, S2, S2bis, S3 et Stot) et la référence sur différents points situés dans Paris <i>intra muros</i> : 7 ^{ème} arrondissement (arr7), 9 ^{ème} arrondissement (arr9) et 13 ^{ème} arrondissement (arr13) (voir Figure 29).....	62

