

**CNRM-GAME
CNAM-LGP2ES (EA21)
Climespace**

**Projet CLIM²
Climat urbain et climatisation**

**RAPPORT FINAL DU PROJET
Rapport scientifique**

Novembre 2010



Contributions et remerciements

Ce projet a été réalisé conjointement par le laboratoire CNRM-GAME (CNRS/Météo France), le laboratoire LGP2ES (EA21) du CNAM et la société Climespace.

Ce rapport a été co-écrit par C. de Munck, G. Pigeon, F-E. Meunier, B. Tréméac, P. Bousquet, M. Merchat, P. Poeuf et C. Marchadier.

Ce projet a bénéficié de l'expertise développée dans le cadre du projet EPICEA (Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne); EPICEA est financé par la Ville de Paris dans le cadre de son Plan Climat et réalisé conjointement par la Direction Interrégionale Île-de-France/Centre de Météo-France (DIRIC), le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) et le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). L'étude CLIM² s'est basée sur des données fournies par l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR) et le CSTB dans le cadre du projet EPICEA.

Nous tenons particulièrement à remercier Aude Lemonsu (CNRM-GAME), Raphaëlle Kounkou-Arnaud et Julien Desplat (DIRIC – Météo-France), Julien Bigorgne (Atelier Parisien d'Urbanisme), ainsi que Jean-Luc Salagnac et Morgane Colombert (CSTB).

Le projet CLIM² a bénéficié d'une aide financière de la société Climespace.

Table des matières

Acronymes.....	5
Liste des tableaux.....	6
Liste des figures	7
Résumé	10
Introduction	12
Méthodologie	13
1. Description générale de la méthode.....	13
2. Les conditions météorologiques.....	14
3. Description des modèles.....	16
3.1. Description générale	16
3.2. Le modèle TEB	20
4. Tests initiaux pour paramétrer la simulation sur le domaine « France étendue »	22
5. Prise en compte de la climatisation dans les simulations	25
5.1. Fonctionnement de la climatisation dans TEB et calcul de la demande frigorifique.....	25
5.2. Mise en cohérence des données de climatisation pour TEB.....	27
6. Données d'entrée	33
6.1. Paramètres d'entrée pour la surface.....	33
6.2. Collecte des données de climatisation pour le cas réel	35
7. Traitement des sorties de simulation.....	38
Simulation de référence	42
1. Introduction.....	42
2. Comparaison des simulations avec les observations sur les domaines Paris et Île-de-France	42
3. Analyse de l'îlot de chaleur urbain.....	44
Simulation du cas climatisé « réel »	46
1. Caractéristiques du cas climatisé « REEL »	46
2. Impacts sur la température dans les rues	47
3. Impacts sur la température au niveau des toits	49
4. Impacts sur l'îlot de chaleur urbain.....	50
Simulation de 3 scénarios de climatisation	52
1. Choix des scénarios.....	52
2. Préparation des données	52
2.1. Scénario SEC : répartition des rejets humides en secs	52
2.2. Scénario 2SEC: répartition de la puissance doublée	53
2.3. Scénario CLIMOR: climatisation sans rejets dans l'air.....	53
3. Caractéristiques des scénarios simulés	53
4. Impacts sur la température dans les rues du scénario SEC	56
5. Impacts sur la température dans les rues du scénario 2SEC	57
6. Impacts sur la température dans les rues du scénario CLIMOR	60
7. Impacts sur les températures au niveau des toits.....	62
8. Impacts sur l'îlot de chaleur urbain.....	63
Analyse des bilans d'énergie des bâtiments	67
1. Bilan d'énergie de la simulation de référence.....	67
2. Étude comparée des rejets de chaleur prescrits et diagnostiqués pour 3 cas	68
3. Comparaison de l'énergie frigorifique diagnostiquée entre différents scénarios de climatisation.....	74
3.1. Comparaison de l'énergie frigorifique générée pour les scénarios SEC et 2SEC ...	74
3.2. Comparaison de l'énergie frigorifique diagnostiquée pour les scénarios 2SEC et CLIMOR.....	77
Conclusions sur les simulations et perspectives	79
1. Conclusions sur la comparaison des différents systèmes de refroidissement	79
2. Conclusions sur le modèle actuel.....	81

3. Perspectives : Développement du module de climatisation.....	81
Références	83
Annexes	85
A1. Tests de configuration/paramétrisation de MESO-NH sur le domaine « France étendue » pour la canicule d'août 2003	85
A2. Note sur la préparation des données physiographiques en entrée de SURFEX pour l'agglomération parisienne	85
A3. Namelists Fortran pour les données d'entrée physiographiques.....	85
A4. Caractéristiques des stations horaires du domaine de simulation « Île-de-France » ...	85

Acronymes

2SEC	Scénario de climatisation avec doublement des rejets de chaleur par rapport au scénario SEC
APUR	Atelier Parisien d'Urbanisme
AROME	Application de la Recherche à l'Opérationnel à Méso-Echelle
CLIM0R	Scénario de CLIMatisation avec 0 Rejet de chaleur
CSTB	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
EPICEA	Étude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne
ICU	Îlot de Chaleur Urbain
ISBA	Interaction between Soil Biosphere and Atmosphere
MESO-NH	Modèle atmosphérique MESO-échelle Non-Hydrostatique
REEL	Scénario réel de climatisation
REF	Simulation de REFérence
SEC	Scénario de climatisation SEC
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SURFEX	SURFace EXternalisée
T2m	Température de l'air à 2m
TAR	Tour A Refroidissement par voie humide
TEB	Town Energy Balance
TU	Temps Universel

Liste des tableaux

Tableau 1. Résolutions spatiales et temporelles des 3 modèles utilisés	17
Tableau 2. Caractéristiques spatiales des 3 domaines de simulation	20
Tableau 3. Erreur quadratique moyenne sur la température à 2m (T2m) pour les 63 stations d'Ile-de-France par le modèle « France étendue »	23
Tableau 4. Étapes de traitement des puissances de rejets brutes fournies par le CNAM	29
Tableau 5. Coefficients d'appel horaire de puissance normalisée de climatisation en fonction du type de jour de la semaine	32
Tableau 6. Données topographiques prescrites à chaque domaine.....	33
Tableau 7. Données prescrites en entrée de TEB.....	34
Tableau 8. Ratios « rejet thermique / nombre de ventilateurs »	35
Tableau 9. Caractéristiques des 5 zones représentatives de la diversité habitation /commerce et du parc immobilier dans Paris.....	36
Tableau 10. Bilan des rejets de chaleur totaux estimés pour Paris intra-muros et hors Paris.....	38
Tableau 11. Erreur quadratique moyenne sur la température à 2m pour les 28 stations du domaine Île-de-France	42
Tableau 12. Erreur quadratique moyenne sur la température à 2m pour le domaine Paris.....	42
Tableau 13. Présentation des 3 scénarios testés par rapport aux simulations de la référence et du cas climatisé « réel »	53

Liste des figures

Figure 1. Vue d'ensemble de la méthodologie mise en place pour CLIM ²	13
Figure 2. Températures estivales moyennes en France 1900-2100.....	14
Figure 3. Températures maximales (en haut) et minimales (en bas) observées sur la France entre le 9 et le 13 août 2003	15
Figure 4. Évolution des températures à la station Paris-Montsouris du 9 au 13 août 2003.....	16
Figure 5. Structure de SURFEX.....	17
Figure 6. Domaine « France étendue » (altitude, en m). Le carré centré sur Paris représente l'emprise du domaine « Île-de-France »	18
Figure 7. Altitude (en m) pour les domaines « Île-de-France » et « Paris ».....	19
Figure 8. Fraction de ville dans le domaine « Paris ».....	20
Figure 9. Représentation schématique de la rue canyon générique dans TEB.....	21
Figure 10. Comparaison du cumul quotidien de précipitation entre les observations (à gauche) et les simulations (à droite) les 9 et 11 août 2003.....	23
Figure 11. Variations de la température à 2m entre le 8 et le 13 août 2003 pour les stations de Montsouris, Villacoublay et Saclay-CEN. En noir les observations, en rouge le modèle.	24
Figure 12. Représentation du schéma TEB et des échanges au niveau des parois du bâtiment générique.....	25
Figure 13. Évolution en un point de la simulation des températures des faces internes du toit (noir) et du mur (gris) ainsi que de la température de l'air interne pour le bâtiment non climatisé (rouge) et le bâtiment climatisé (bleu).....	26
Figure 14. Évolution en un point de la simulation de la production frigorifique à chaque pas de temps (noir) et en moyenne journalière (rouge).....	27
Figure 15. Les différents domaines de données de surface et leurs résolutions respectives.....	28
Figure 16. Courbes d'appel horaire de puissances (normalisées) de climatisation par type de jour (1 : lundi à vendredi, 2 : samedi, 3 : dimanche).....	31
Figure 17. Courbe d'appel horaire « lissée » de puissances normalisées de climatisation pour les jours du vendredi 8 au mercredi 13 août 2003.....	32
Figure 18. Exemple de la répercussion d'un événement orageux sur la température pour une même échéance horaire (11 août 2003 à 19h locale) dans 2 simulations (cas réel à gauche, cas de référence à droite – présence d'un orage)	39
Figure 19. Exemple d'une maille pour laquelle l'anomalie de température a été filtrée (seuls les points en rouge sont conservés).....	40
Figure 20: Traitement statistique des anomalies de température nocturnes filtrées..	41
Figure 21. Variations de la température à 2m entre le 8 août midi TU et le 13 août 2003 pour les stations de Montsouris (haut) et Villacoublay (bas).....	43
Figure 22. Variations de la température observée entre le 8 août midi TU et le 12 août 2003 pour les stations de Montsouris (en noir) et Opéra (en bleu-gris)	44
Figure 23. Îlot de chaleur urbain pour la simulation de référence	44
Figure 24. Coupe transversale (traversant les 8°, 9°, et 10° arrondissements d'ouest en est) de la température moyenne nocturne à 2m pour la situation de référence	45
Figure 25. Fraction de bâtiments climatisés pour le cas climatisé REEL.....	46

Figure 26. Flux de rejets de chaleur sensible (à gauche) et latente (à droite) prescrits en entrée de TEB pour le cas climatisé REEL (en $W.m^{-2}$ de ville)	46
Figure 27. Anomalies de température à 2m entre le cas climatisé réel et la référence en journée	48
Figure 28. Anomalies de température à 2m entre le cas climatisé réel et la référence la nuit	48
Figure 29. Anomalies de température à 15m au-dessus des toits de jour (à gauche) et de nuit (à droite)	49
Figure 30. A gauche: températures calculées au niveau des toits (H_{BLD} représente la hauteur moyenne des bâtiments dans la maille considérée, T_{maille} la température moyenne dans la maille à 15m au-dessus des toits – c'est donc une hauteur qui est variable d'une maille à l'autre). A droite: profils verticaux théoriques de température nocturne dans les cas de référence (REF) et de cas climatisé réel (REEL)	50
Figure 31. Comparaison des îlots de chaleur de la référence (à gauche) et du cas climatisé REEL (à droite).....	50
Figure 32. Coupe transversale (traversant les 8°, 9°, et 10° arrondissements d'ouest en est) de la température moyenne nocturne à 2m pour la situation de référence et le cas climatisé REEL.....	51
Figure 33. Fraction de bâtiments climatisés pour les scénarios climatisés SEC (à gauche) et DOUBLESEC (à droite).....	55
Figure 34. Flux de rejets de chaleur sensible (en $W.m^{-2}$ de ville) prescrits en entrée de TEB pour les scénarios climatisés SEC (à gauche) et DOUBLESEC (à droite).....	55
Figure 35. Anomalies de température à 2m entre le scénario climatisé SEC et la référence en journée	56
Figure 36. Anomalies de température à 2m entre le scénario climatisé SEC et la référence la nuit	57
Figure 37. Anomalies de température à 2m entre le scénario climatisé DOUBLESEC et la référence en journée	58
Figure 38. Anomalies de température à 2m entre le scénario climatisé DOUBLESEC et la référence la nuit.....	58
Figure 39. Anomalies de température dans les rues estimées par rapport à la référence de jour (en haut) et de nuit (en bas) pour les scénarios REEL (à gauche), SEC (au centre) et 2SEC (à droite)	59
Figure 40. Échelle utilisée pour les anomalies de température estimées pour le scénario CLIM0R	60
Figure 41. Anomalies de température à 2m entre le scénario climatisé CLIM0R et la référence en journée	61
Figure 42. Anomalies de température à 2m entre le scénario climatisé CLIM0R et la référence de nuit.....	61
Figure 43. Anomalies de température à 15m au-dessus des toits estimées de jour (en haut) et de nuit (en bas) pour les scénarios SEC (à gauche) et 2SEC (à droite) par rapport à la référence.....	62
Figure 44. Comparaison des îlots de chaleur de la situation de référence (en haut à gauche), du cas climatisé REEL (en haut à droite) et des scénarios climatisés SEC (en bas à gauche) et DOUBLESEC (en bas à droite).....	63
Figure 45. Coupe transversale (traversant les 8°, 9°, et 10° arrondissements d'ouest en est) de la température moyenne nocturne à 2m pour la situation de référence et les cas de scénarios climatisés (REEL, SEC et 2SEC).....	64

Figure 46. Comparaison des îlots de chaleur de la référence (en haut) et des scénarios climatisés DOUBLESEC (en bas à gauche) et CLIM0R (en bas à droite).....	65
Figure 47. Coupe transversale (traversant les 8°, 9°, et 10° arrondissements d'ouest en est) de la température moyenne nocturne à 2m pour la situation de référence et les scénarios climatisés SEC et 2SEC	66
Figure 48. Énergie frigorifique journalière moyenne diagnostiquée par le modèle entre le 9 et le 13 août 2003 dans le cas de référence (non climatisé)	68
Figure 49. Rejets de chaleur prescrits(à gauche) et diagnostiqués par le modèle (à droite) pour le cas climatisé REEL entre le 9 et le 13 août 2003.....	71
Figure 50. Rejets de chaleur prescrits(en haut) et diagnostiqués par le modèle (en bas) pour le scénario climatisé SEC pour le 12 août 2003.....	72
Figure 51. Rejets de chaleur prescrits(en haut) et diagnostiqués par le modèle (en bas) pour le scénario climatisé DOUBLESEC pour le 12 août 2003	73
Figure 52. Représentation schématique de l'impact des charges internes et externes sur les paramètres de climatisation	73
Figure 53. Énergie frigorifique moyenne journalière pour les 9, 10, 11, 12 et 13 août 2003 (de haut en bas) pour les scénarios SEC (à gauche) et DOUBLESEC (à droite).....	75
Figure 54. Différences absolue (à gauche) et relative (à droite) entre les énergies frigorifiques moyennes journalières des scénarios DOUBLESEC et SEC entre le 9 et le 13 août 2003 (de haut en bas)	76
Figure 55. Anomalies de température à 2m entre les scénarios climatisés 2SEC et CLIM0R, en journée (haut) et de nuit (bas).....	77
Figure 56. Différences absolue (à gauche) et relative (à droite) entre les énergies frigorifiques moyennes journalières des scénarios 2SEC et CLIM0R entre le 9 et le 13 août 2003 (de haut en bas).....	78
Figure 57. Schématisation de la représentation du bâtiment dans la nouvelle version du modèle TEB	82

Quel est l'effet des systèmes de refroidissement urbains sur le climat de la ville ? Cet effet est-il sensible pour les habitants ? Plutôt le jour ou la nuit ? Est-il dépendant de la densité des équipements ? Localisé ou bien étendu ? Certains équipements affectent-ils plus le climat urbain ?

Ces questions sont légitimes, compte tenu de l'augmentation de la population urbaine, du climat particulier des villes (phénomène d'« îlot de chaleur », [Oke, 1987 ; Pigeon et al., 2008]), et du réchauffement climatique : lors de la canicule 2003, qui pourrait être représentative d'un été normal à la fin du siècle, l'îlot de chaleur urbain observé en 2003 à Paris fut particulièrement intense, avec des températures jusqu'à 8°C plus élevées dans le centre que dans les alentours.

Face à ces épisodes de fortes chaleurs estivales, les besoins en froid augmentent pour refroidir ou maintenir à température constante les biens et les personnes pour raisons sanitaires, commerciales, industrielles ou de confort. Les installations de refroidissement actuelles sont des systèmes individuels « secs » qui rejettent de l'air chaud dans la rue, ou bien des systèmes « humides » qui rejettent la chaleur sous forme de vapeur d'eau dans l'air ou directement dans l'eau. C'est le cas du réseau urbain de froid à Paris qui distribue l'eau glacée produite par des centrales frigorifiques à près de 500 immeubles neufs ou rénovés de la capitale.

Ainsi, en période de canicule, il apparaît important d'évaluer les impacts des différents systèmes de refroidissement sur le climat de Paris lors d'un épisode de canicule similaire à celui de août 2003 : c'est l'objectif du projet de recherche CLIM2, réalisé par le Laboratoire de Génie des Procédés pour l'Energie, l'Environnement et la Santé (CNAM), le Groupe d'Etudes de l'Atmosphère Météorologique (CNRS-Météo France), et la société Climespace.

La méthode numérique mise en œuvre, basée sur l'utilisation d'un jeu de modèles reproduisant l'écoulement atmosphérique, permet de simuler et comparer plusieurs situations.

Nous avons reproduit, avec des données réelles d'occupation du sol et de caractéristiques de bâti, la canicule 2003 avec le modèle atmosphérique MESO-NH [Lafore et al. 1998; Stein et al. 2000]. Le processus de climatisation pour le bâtiment dans les zones urbaines a été implémenté dans SURFEX, qui s'appuie sur le modèle de « canopée » urbaine TEB (Town Energy Balance) [Masson 2000]. Le type, le nombre, la localisation et la puissance des installations de climatisation de Paris et sa région ont été estimés : recensement de la préfecture pour les installations classées, centrales de production des réseaux de froid, et estimation à partir de visualisation aériennes pour les installations sèches en toiture et façade. Ces estimations, basses car le recensement ne peut être exhaustif, ont permis d'établir les cadastres d'émission de chaleur des systèmes de climatisation prescrits au modèle. Des cadastres correspondant à des situations différentes ont également été établis : cas « sans climatisation », remplacement des systèmes humides par des systèmes secs, doublement de la puissance de rejets. En sortie des modèles numériques, les résultats ont été traités statistiquement pour en déduire deux indicateurs : les anomalies de températures dans les rues et les caractéristiques de

l'îlot de chaleur parisien.

Les résultats montrent que les rejets du parc actuel de systèmes de refroidissement (secs et humides) provoquent une augmentation faible et locale de la température nocturne dans les rues (0.25 à 1°C par rapport à un cas de référence sans climatisation). Si l'ensemble des rejets est uniquement sous forme sèche, cette augmentation de température nocturne est alors de l'ordre de 0.5 à 2°C, plus étalée et modifiant légèrement la structure et l'amplitude de l'îlot de chaleur urbain nocturne (+0.75°C).

Dans une situation future où la puissance globale de climatisation est doublée et l'ensemble des rejets sous forme sèche, l'intensité et l'emprise spatiale des impacts augmentent fortement, même en journée, et au-delà des zones où les rejets sont prescrits : l'augmentation de la température nocturne est de l'ordre de 0,5°C à 3°C, l'îlot de chaleur nocturne est nettement plus étalé et plus intense (+1.75°C), toujours par rapport à un cas de référence sans climatisation.

Les résultats montrent en outre que pour un refroidissement à rejets sous forme sèche, la climatisation augmente la température des rues et appelle donc plus de climatisation pour combattre l'îlot de chaleur renforcé. En revanche, pour un refroidissement sans rejet de chaleur dans l'air, l'appel de climatisation sera réduit et sans influence néfaste sur l'îlot de chaleur.

Cette étude montre bien que les moyens mis en œuvre pour satisfaire les besoins en froid des bâtiments parisiens lors d'une canicule ont un impact sur la température des rues et l'îlot de chaleur : la réflexion sur ces moyens est donc nécessaire pour gérer au mieux la climatisation future et limiter les impacts sur le climat urbain.

INTRODUCTION

La tendance à la concentration urbaine, est observée depuis le début du siècle dernier. L'activité humaine, plus intense et concentrée dans les villes, rend plus prégnantes les conséquences du réchauffement climatique et la nécessité de se « rafraîchir ».

Les villes sont soumises à un climat particulier dénommé « îlot de chaleur, ICU » (Oke, 1987 ; Pigeon et al., 2008), dû principalement au remplacement de sols végétalisés par des bâtiments et revêtements urbains imperméables. Ce micro-climat urbain se traduit par un excès des températures de l'air près du sol, dans les zones urbaines, en comparaison avec les zones rurales qui les entourent. En période de canicule, ce phénomène est particulièrement intense et les températures nocturnes pour une ville comme Paris sont jusqu'à 8°C plus élevées dans le centre ville que dans les alentours.

Face aux épisodes de fortes chaleurs estivales, certains bâtiments recourent nécessairement à la climatisation des locaux pour rafraîchir des personnes ou du matériel. C'est le cas notamment d'établissements de soins ou paramédicaux qui prennent en charge les personnes âgées plus fragiles à ces conditions extérieures difficiles. C'est aussi le cas de nombreux locaux qui abritent des équipements ou des activités génératrices de chaleur (bâtiments recevant du public, data center, ...), ou qui nécessitent une température constante (musées ou les chambres froides).

Différents types d'installations de refroidissement, réparties dans la ville, permettent de satisfaire ces besoins en froid. Or, le développement en ville, avec une densité spatiale importante, de systèmes de refroidissement individuels secs qui rejettent de l'air chaud dans la rue n'apparaît pas sans effet. C'est ce qu'ont recherché Ohashi et al. (2007) pour deux quartiers de bureaux de Tokyo avec une méthode numérique. Ils ont conclu à des augmentations localisées de température de 1 à 2°C lorsqu'un usage normal de la climatisation était relevé. Cependant, il existe des systèmes humides qui rejettent la chaleur sous forme de vapeur d'eau dans l'air ou directement dans l'eau. C'est le cas du réseau urbain de froid à Paris qui distribue l'eau glacée produite par des centrales frigorifiques, à près de 500 immeubles neufs ou rénovés de la capitale au travers plus de 70 km de tuyaux .

Ainsi, en période de canicule, il apparaît important d'évaluer les impacts de ces différents systèmes de refroidissement sur le climat de Paris.

L'objectif de cette étude est de quantifier l'impact sur la température de l'air dans les rues de l'agglomération parisienne de différents scénarios d'expansion de la climatisation lors d'un épisode de canicule similaire à celui de août 2003.

Ce rapport présente la méthodologie et les résultats de cette étude. Il débute par une description de la méthodologie générale employée; le deuxième chapitre est consacré aux données utilisées pour décrire l'agglomération parisienne et les rejets de chaleur par les systèmes de refroidissement; ensuite, une simulation « de référence » et sa vérification avec les observations sont présentées avant un chapitre qui décrit les résultats pour la situation actuelle des équipements de climatisation. Un autre chapitre est consacré aux 3 scénarios retenus autour de cette situation réelle, et enfin, le dernier chapitre porte sur l'analyse des bilans d'énergie dans les bâtiments.

METHODOLOGIE

1. Description générale de la méthode

La méthodologie mise en place dans le cadre du projet CLIM² (Figure 1) est une méthode numérique basée sur l'utilisation d'un jeu de modèles reproduisant l'écoulement atmosphérique. En s'appuyant sur une telle méthode, on peut simuler et comparer plusieurs situations.

Dans notre cas, nous avons choisi les conditions **météorologiques** de la canicule 2003, et des cadastres d'émission de chaleur des systèmes de **climatisation**, observés ou projetés sous la forme de 3 scénarios, dans l'agglomération parisienne. Les caractéristiques urbaines et du bâti ont été prescrites à partir des données de surface détaillées.

Toutes ces situations ont été converties en données d'entrée pour les **modèles numériques** d'échanges de chaleur entre la **surface** (zones urbanisées, végétalisées, étendues d'eau) et l'**atmosphère**, et le processus de climatisation pour le bâtiment dans les zones urbaines a été implémenté.

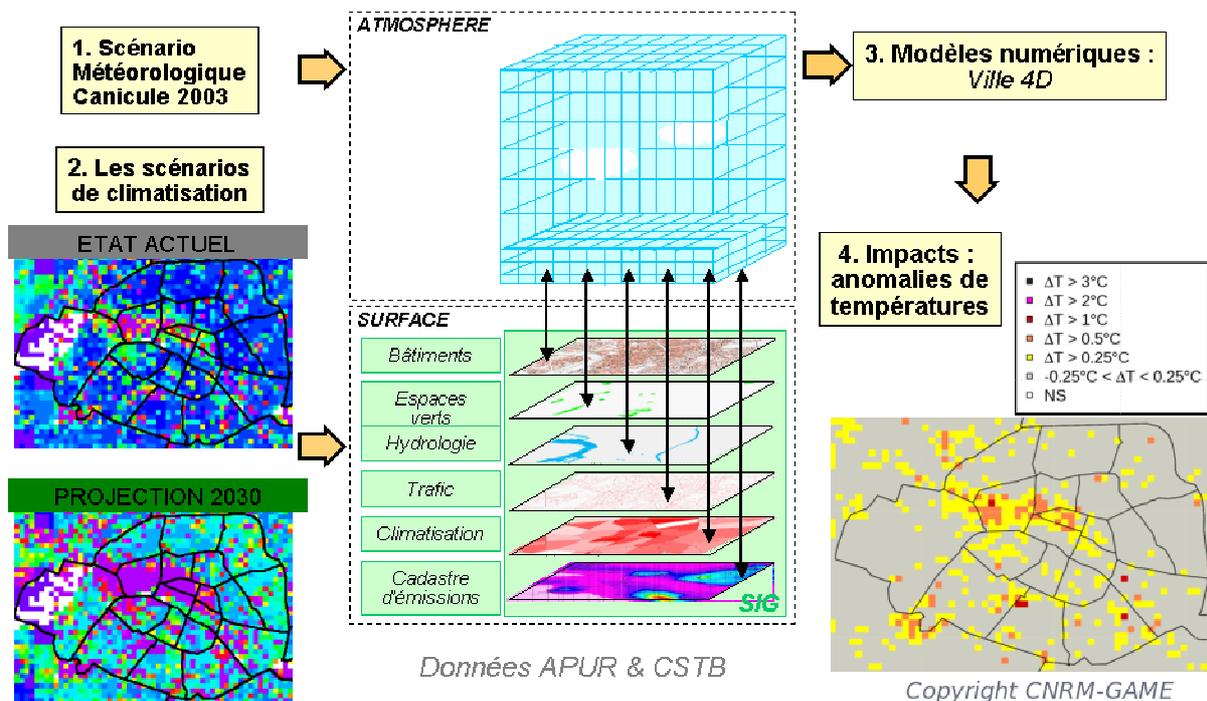


Figure 1. Vue d'ensemble de la méthodologie mise en place pour CLIM²

En sortie des modèles numériques, les résultats ont été traités statistiquement pour en déduire deux indicateurs : les anomalies de températures dans les rues et les caractéristiques de l'îlot de chaleur parisien.

2. Les conditions météorologiques

La situation météorologique de la canicule 2003 (fenêtre de simulation du 8 au 13 août) a été retenue dans ce projet car elle est estimée représentative en intensité et en durée des projections de températures estivales pour la deuxième moitié du 21^{ème} siècle selon le scénario A2 (intensification des émissions de gaz à effet de serre) et le modèle du CNRM (Figure 2). Voyons quelles sont les conditions météorologiques observées sur cette période.

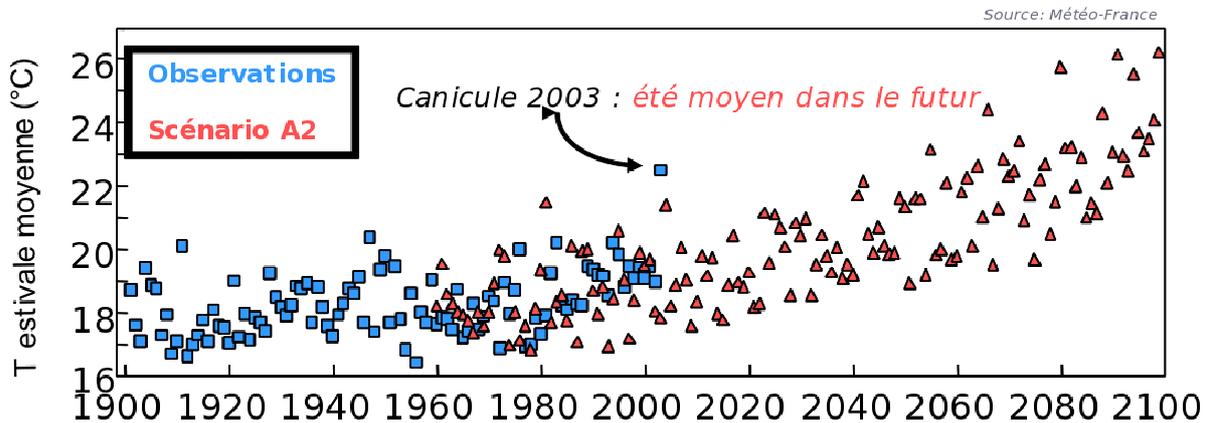


Figure 2. Températures estivales moyennes en France 1900-2100

L'été 2003 a été l'été le plus chaud depuis 1951 (Figure 2), année qui marque le début de la mise en place d'un réseau d'observation en France. Il s'est caractérisé non seulement par des températures maximales plus élevées (de 1,7 à 2,7°C de plus que les 3 précédents étés les plus chauds – 1976, 1983 et 1994) mais aussi et surtout par des températures minimales plus élevées (3,5°C au dessus de la moyenne de la période 1950-1980) que la normale [Bessemoulin et al. 2004, Météo France 2004].

Sur le plan synoptique, cette vague de chaleur s'explique par une situation anticyclonique estivale classique (hautes pressions sur l'Europe de l'Ouest qui font obstacle aux perturbations) mais cette situation a été accentuée par la présence d'air très chaud et très sec (en provenance de la Méditerranée) au sol comme en altitude et par une durée de blocage anticyclonique plus longue que d'habitude.

Les plus fortes chaleurs de cette canicule ont été enregistrées pendant la première quinzaine du mois d'août. On a observé une montée progressive des températures entre le 1^{er} et le 5 août (avec les premiers records de température dans le Sud-Ouest les 3 et 4 août) suivie d'une période de forte chaleur jusqu'au 13 août, date de l'amorce de la baisse progressive des températures [Bessemoulin et al. 2004]. La Figure 3 présente l'évolution des températures observées sur la France du 9 au 13 août 2003 (Climascope). On peut commencer à voir une légère baisse des températures maximales le 13 août, plus marquée sur le Nord que le Sud de la France.

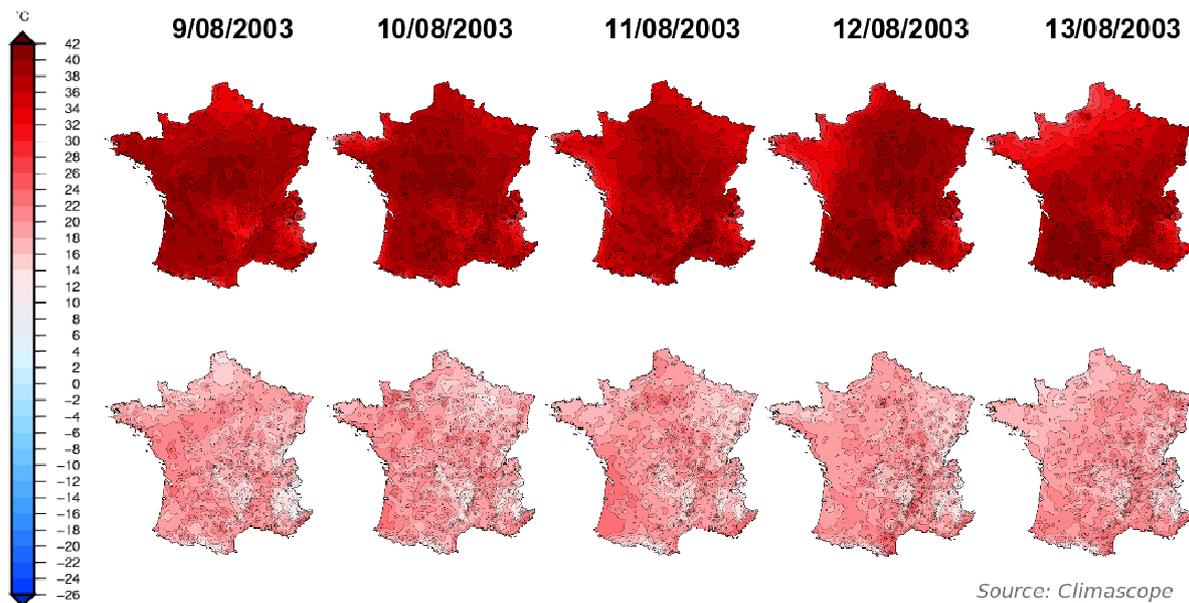


Figure 3. Températures maximales (en haut) et minimales (en bas) observées sur la France entre le 9 et le 13 août 2003

Cette vague de chaleur a été remarquable non seulement par l'amplitude de ses températures maximales mais surtout par ses records de températures nocturnes (dépassant les 25°C comme les 11 et 12 août à Paris -Montsouris, voir Figure 4) et sa durée (environ 2 semaines).

En effet, les effets de la canicule sont aggravés sur la capitale du fait de la moindre baisse en ville, des températures la nuit par rapport à ces alentours (îlot de chaleur urbain). Sur Paris, Bessemoulin et al. [2004] font remarquer que les records de température des 11 et 12 août ont été aggravés par la présence d'un vent très faible, ce qui a eu des conséquences non seulement dans le domaine de la pollution (non-dispersion des polluants accentuée) mais aussi dans le domaine de la santé (risque plus élevé de non-refroidissement du corps humain). L'humidité relative, qui est aussi reconnue comme un facteur aggravant des canicules, n'a pas joué un rôle déterminant car elle est restée généralement faible [Bessemoulin et al. 2004].

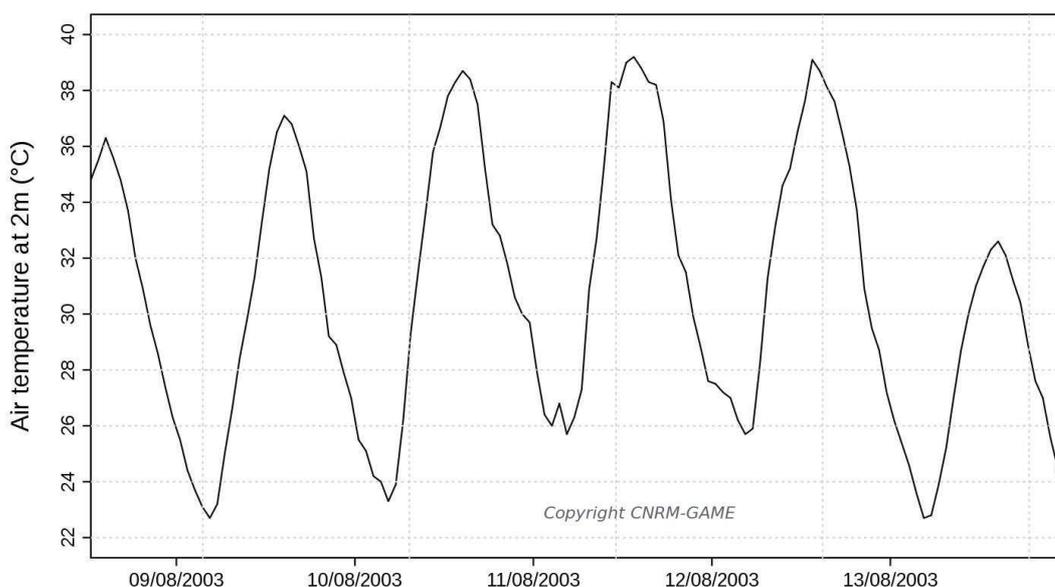


Figure 4. Évolution des températures à la station Paris-Montsouris du 9 au 13 août 2003

3. Description des modèles

3.1. Description générale

Les simulations ont été réalisées avec le modèle atmosphérique méso-échelle non-hydrostatique [MESO-NH] [Lafore et al. 1998; Stein et al. 2000]. Les conditions à la limite à la surface sont calculées au travers de l'outil SURFEX (« SURFace EXTERNALisée ») développé par le laboratoire CNRM-GAME (Météo France, CNRS). SURFEX est un outil de calcul qui permet de décrire les caractéristiques des points de maille en fonction du type d'occupation du sol (urbain, nature, eau douce, mers et océans) et de calculer les échanges de chaleur (rayonnement, conduction, convection), d'eau, de quantité de mouvement, et de dioxyde de carbone entre la surface de la terre et l'atmosphère. Pour décrire les caractéristiques de la surface, SURFEX utilise 4 modules ou « schémas de surface » (Figure 5) :

- * le schéma TEB (Town Energy Balance) [Masson 2000] pour les surfaces urbaines;
- * le schéma ISBA (Interaction between Soil Biosphere and Atmosphere) [Noilhan & Mahfouf 1996] pour les surfaces agricoles et naturelles ;
- * le schéma WATFLX pour les surfaces d'eau douce (lacs et rivières) ;
- * SEAFLX pour les surfaces occupées par les mers et les océans.

SURFEX: surface-atmosphere exchanges module

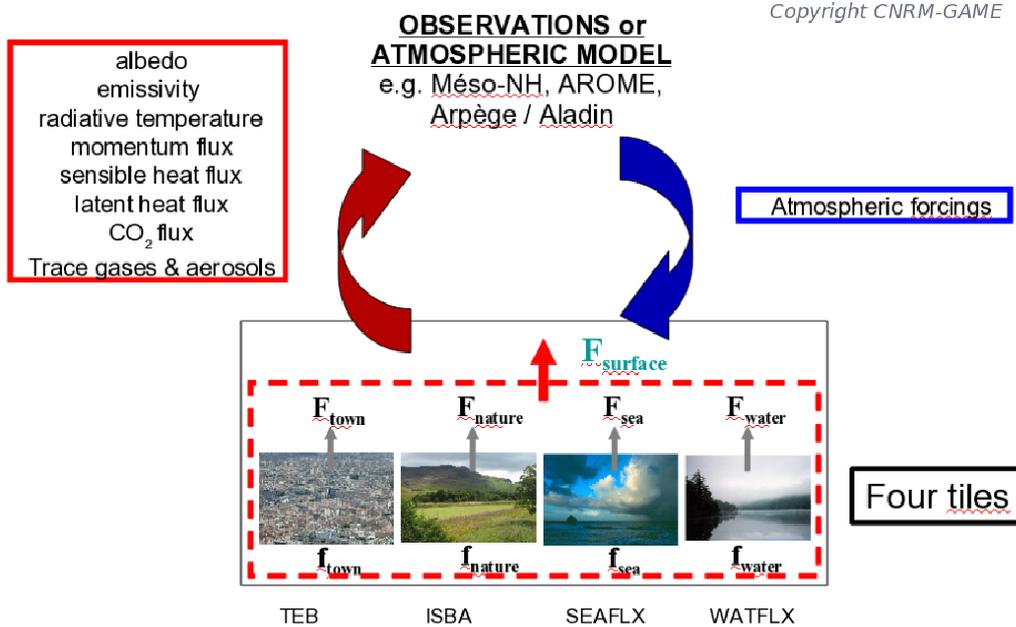


Figure 5. Structure de SURFEX

Les simulations utilisent 3 modèles numériques imbriqués de résolutions spatiales et temporelles différentes (Tableau 1), ce qui permet de descendre en échelle spatiale sur le domaine d'étude final à 250m de résolution (Stein et al., 2000).

Le domaine du modèle 1 a les mêmes dimensions et résolutions que le modèle de prévision météorologique AROME (Application de la Recherche à l'Opérationnel à MésoEchelle).

Tableau 1. Résolutions spatiales et temporelles des 3 modèles utilisés

Modèle	Domaine de simulation	Résolution spatiale	Pas de temps
1	France étendue	2,5 km	4 s
2	Île-de-France	1,25 km	4 s
3	Paris	250 m	1 s

Dans cette configuration en modèles imbriqués, chaque modèle « père » fournit à son modèle « fils » les conditions météorologiques aux limites latérales de son domaine par interpolation. Ainsi, pour le domaine 1, les analyses des prévisions météorologiques du modèle du Centre Européen de Prévision (CEP) sont prises par le modèle 1 (Figure 6) (i) comme conditions initiales, et (ii) toutes les 6 heures comme conditions aux limites de son domaine (limites horizontales et dernier niveau vertical). Pour les modèles 2 et 3, une interaction se fait aussi du modèle « fils » (2) vers le modèle « père » (3) : les champs météorologiques du modèle 2 sont rappelés à chaque pas de temps vers la moyenne des champs du domaine 3 (couplage dans les 2 sens).

Les cartes suivantes (Figure 6 et Figure 7) illustrent l'emprise de chaque domaine « fils » dans son domaine « père » respectif.

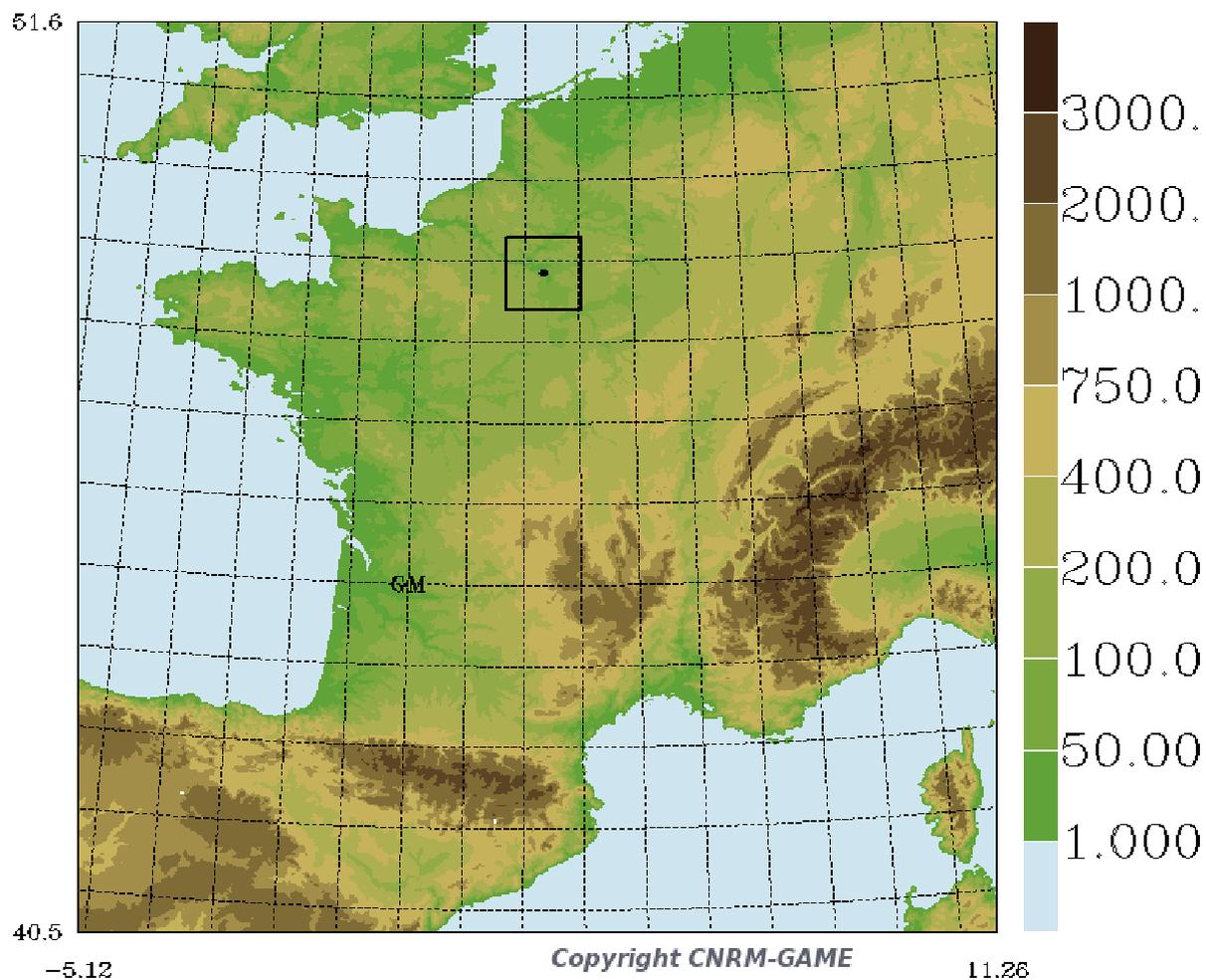


Figure 6. Domaine « France étendue » (altitude, en m). Le carré centré sur Paris représente l'emprise du domaine « Île-de-France »

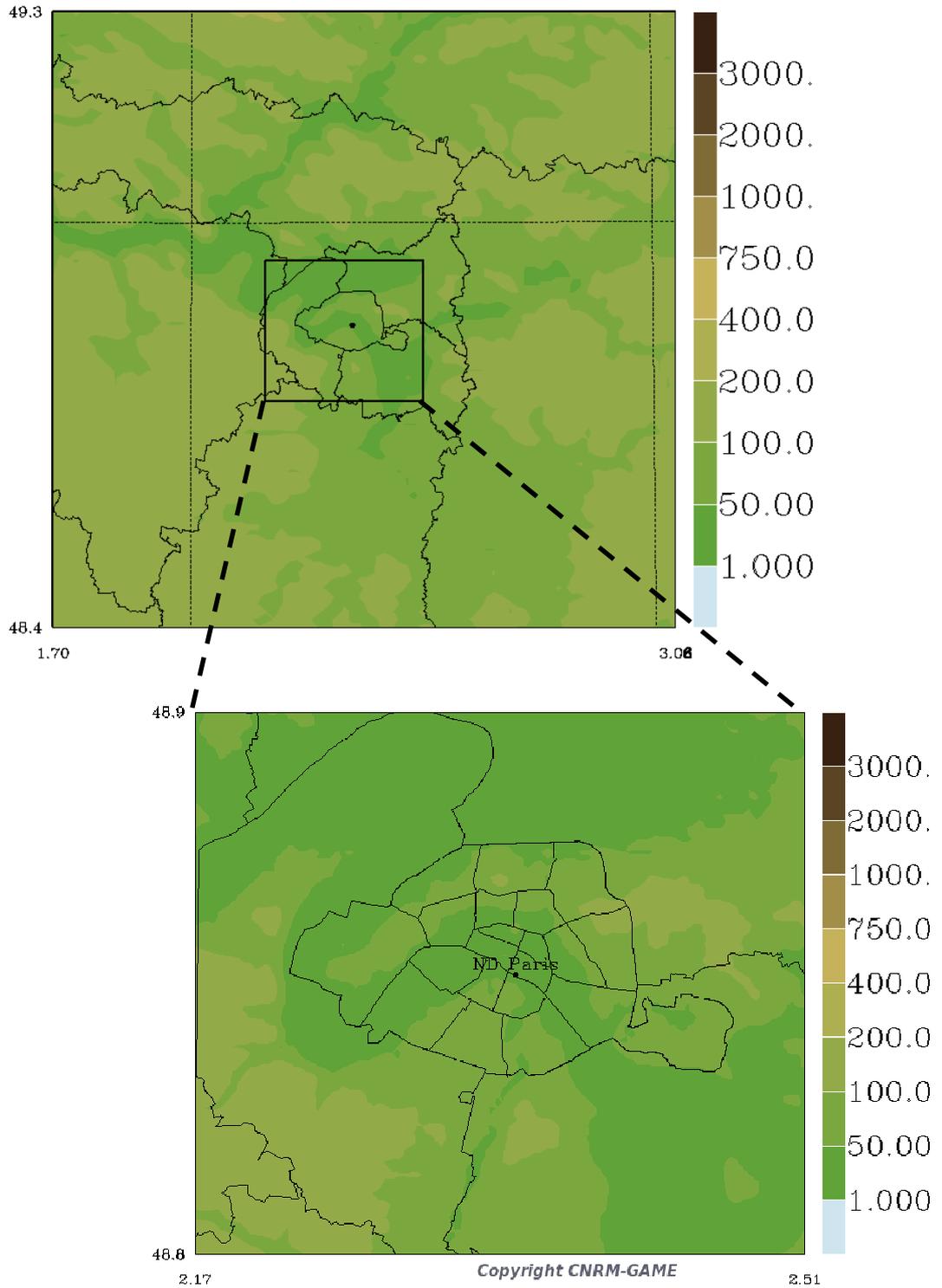


Figure 7. Altitude (en m) pour les domaines « Île-de-France » et « Paris »

L'étendue spatiale des 3 domaines de simulation varie de 1250 à environ 25 km (Tableau 2).

Tableau 2. Caractéristiques spatiales des 3 domaines de simulation

Domaine de simulation	Taille	Bornes en latitude (°N)	Bornes en longitude (°E)
France étendue	1250 km x 1250 km	40,48 – 51,63	-5,12 – 11,26
Île-de-France	100 km x 100 km	48,41 – 49,31	1,70 – 3,06
Paris	25 km x 22,5 km	48,74 – 48,95	2,17 – 2,51

La paramétrisation des données de surface a été réalisée à partir de données réelles issues du projet EPICEA (Étude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne), provenant de l'Atelier Parisien d'Urbanisme (APUR) et du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB). La Figure 8 illustre avec quelle finesse une variable qui décrit la surface urbaine (ici la fraction de ville dans le domaine d'étude Paris) peut être décrite dans le modèle.

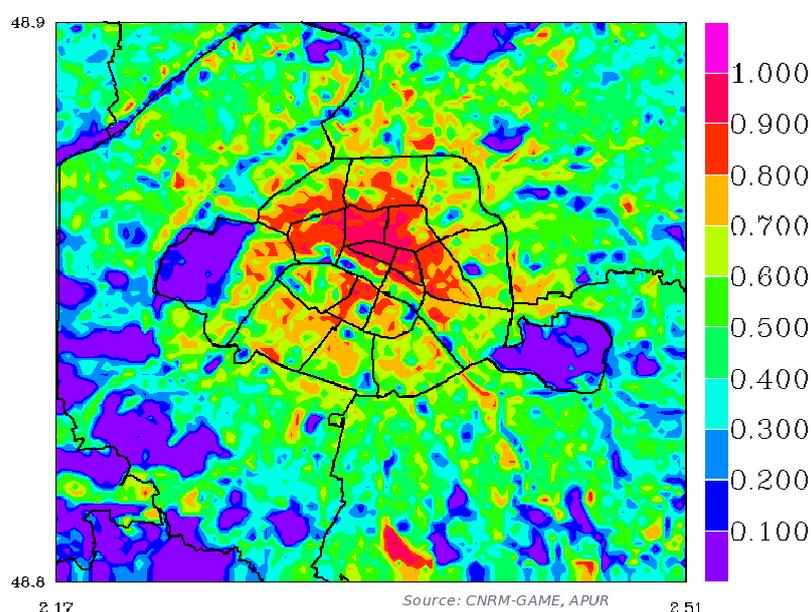


Figure 8. Fraction de ville dans le domaine « Paris »

Les données de surface nécessaires à la paramétrisation des modèles sont décrites dans le paragraphe [6. Données d'entrée](#) de cette section. La préparation des données de surface est décrite dans l'Annexe A2 de ce document.

3.2. Le modèle TEB

Comme indiqué précédemment, dans les zones urbaines, SURFEX s'appuie sur le modèle de « canopée » urbaine TEB. Dans TEB, le paysage urbain est simplifié sous la forme d'un réseau de rues « canyon » de longueur infinie et dont les directions sont représentées avec la même probabilité (Figure 9). TEB simule les échanges de chaleur et d'eau pour trois surfaces génériques (toit, mur, et la route). Les rejets de chaleur et de vapeur d'eau de la circulation automobile et des industries peuvent également être ajoutés. TEB est configuré par des paramètres de surface standards ou observés comme ceux collectés par l'APUR et le CSTB.

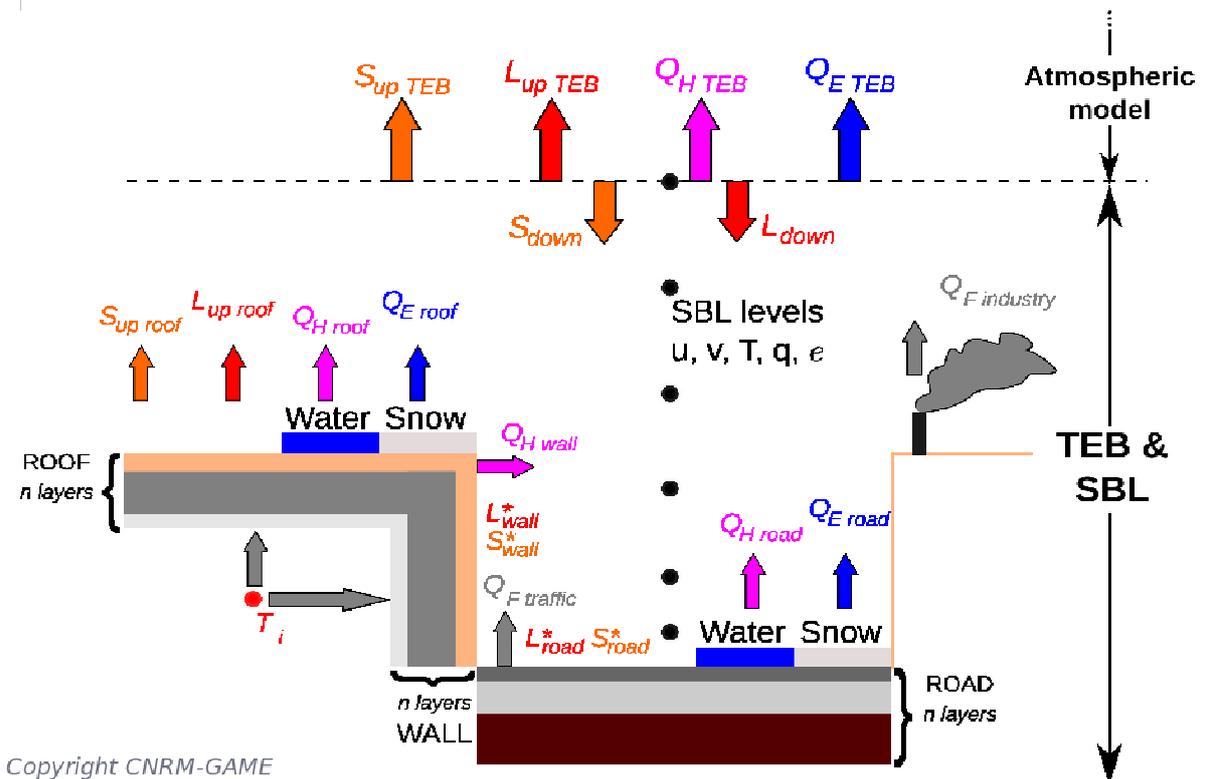


Figure 9. Représentation schématique de la rue canyon générique dans TEB

Un effort constant a été fait sur l'évaluation du modèle TEB. Des simulations en mode autonome de TEB ont montré qu'il reproduisait avec précision le bilan énergétique de la surface urbaine, la température de l'air dans les rues, la consommation d'énergie et les températures de surface observées dans les zones urbaines pour les différentes saisons et un grand nombre de villes à travers le monde: Vancouver [Masson et al. 2002], Mexico [Masson et al. 2002], Marseille [Lemonsu et al. 2004], Basel [Hamdi and Masson 2008], Lodz [Offerle et al. 2005], Toulouse [Pigeon et al. 2008] et Montréal [Lemonsu et al. 2005].

4. Tests initiaux pour paramétrer la simulation sur le domaine « France étendue »

Bien que la canicule d'août 2003 ait déjà été simulée avec MESO-NH sur la ville de Paris dans le cadre de projets précédents, le projet CLIM2 est, avec le projet EPICEA, la première occasion de simuler cette canicule avec des données réelles d'occupation du sol et de caractéristiques de bâti (données issues de collectes réalisées par l'APUR et le CSTB, voir paragraphe [6. Données d'entrée](#) de cette section), données qui servent à renseigner les paramètres d'entrée du modèle TEB.

La configuration de simulation initiale qui prévoyait 4 modèles imbriqués (de résolution spatiale 6 km, 2 km, 1 km et 250m) a mis en évidence des problèmes dus à l'utilisation du schéma de convection profonde dans le domaine 1 (celui à 6km) : des précipitations qui se déclenchaient trop facilement et de façon trop violente. Il a donc fallu tester plusieurs options de configuration de modèles imbriqués (notamment des options qui permettrait de s'affranchir du schéma de convection profonde dans le domaine 1) et de paramétrisation du modèle 1 pour améliorer à l'échelle de toute la France (i) tout d'abord la simulation des précipitations (localisation et cumul quotidien, principalement d'évènements orageux), et (ii) celle des températures à 2m pour la période du 8 au 13 août 2003. Les observations utilisées pour confronter les sorties de simulation sur cette période étaient respectivement les cartes de cumuls quotidiens de précipitation pour la France entière (Climascope) et les séries temporelles de température à 2m pour un ensemble de 63 stations d'Ile-de-France.

Les tests et leurs résultats sont décrits dans la note « Tests de configuration paramétrisation de MESO-NH pour la canicule d'août 2003 en cas réel » ([Annexe A1](#)). En résumé, ces tests ont abouti à 2 conclusions/nécessités:

- * **celle d'augmenter la résolution spatiale du modèle 1** pour s'affranchir du schéma de convection profonde (tout en conservant le schéma de convection peu profonde pour les évènements convectifs sous-maille). Ceci a eu des répercussions sur le nombre et la résolution spatiale des modèles imbriqués. La configuration de simulation est passée de 4 modèles imbriqués de résolution spatiale 6 km, 2 km, 1 km et 250m, à une configuration optimale à 3 modèles imbriqués, de résolution spatiale 2,5 km (France étendue), 1,25 km (Île-de-France) et 250 m (Paris),
- * **celle de corriger les conditions initiales et conditions aux bords d'humidité des sols pour le domaine 1**, en accord avec les observations disponibles (une valeur uniforme d'index d'humidité du sol de 0,2 a été retenue).

La figure suivante (Figure 10) montre comment le paramétrage du modèle 1 sur le domaine « France étendue » permet de bien représenter la localisation et le cumul des évènements orageux sur le domaine.

Quant aux températures, bien que les résultats montrent que le modèle est généralement trop chaud la nuit (tendance à surestimer les minima de température), la configuration retenue (notamment l'initialisation de l'humidité du sol) montre un

accord acceptable avec les observations (Tableau 3 et Figure 11), avec une erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error) entre les températures simulées et les observations d'environ 3°C. Le Tableau 3 liste les erreurs quadratiques moyennes entre les simulations et les observations pour les températures à 2m, leurs minima et leurs maxima (pour la configuration du modèle retenue et les 63 stations de mesure d'Ile-de-France). La tendance du modèle 1 à sur-estimer les minima journaliers est bien illustrée par le cas de la station de Saclay-CEN (latitude = 48.7199°N, longitude = 2.13888°E, altitude = 155m, planche du bas de la Figure 11).

Tableau 3. Erreur quadratique moyenne sur la température à 2m (T2m) pour les 63 stations d'Ile-de-France par le modèle « France étendue »

Statistique évaluée	Erreur sur la T2m (°C)	Erreur sur le minimum de T2m (°C)	Erreur sur le maximum de T2m (°C)
Moyenne	2.949	3.754	2.0649

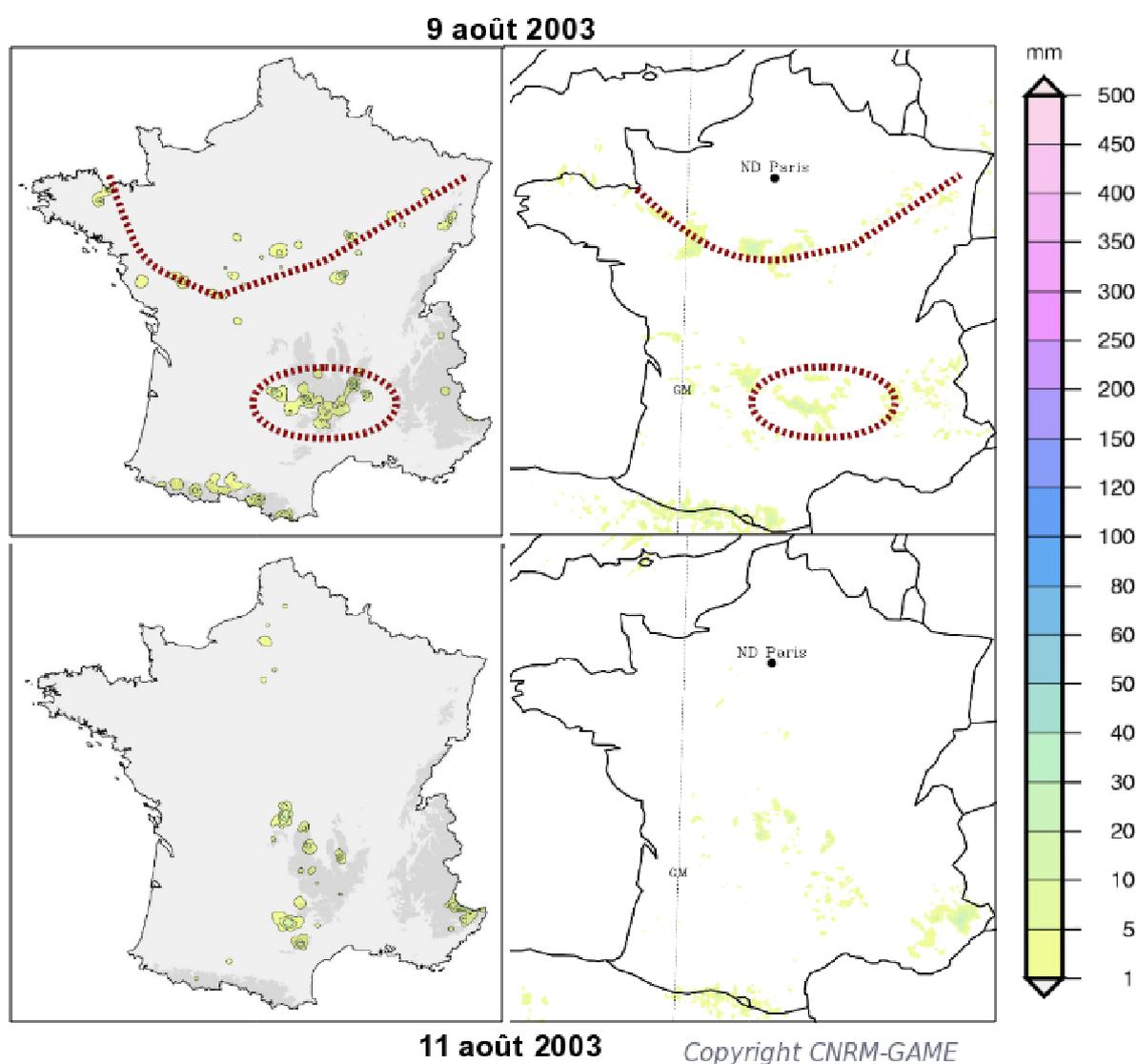


Figure 10. Comparaison du cumul quotidien de précipitation entre les observations (à gauche) et les simulations (à droite) les 9 et 11 août 2003

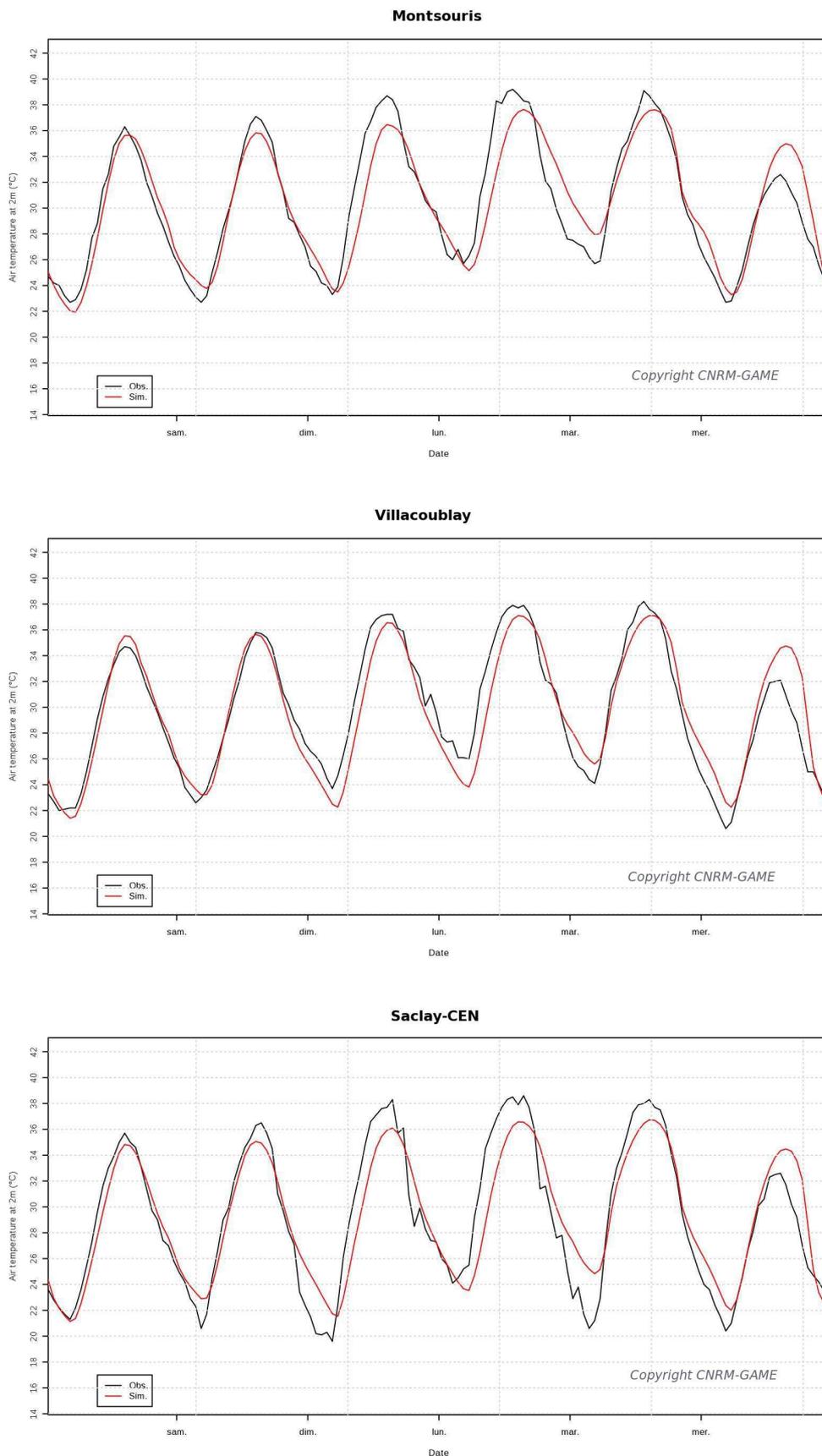


Figure 11. Variations de la température à 2m entre le 8 et le 13 août 2003 pour les stations de Montsouris, Villacoublay et Saclay-CEN. En noir les observations, en rouge le modèle.

5. Prise en compte de la climatisation dans les simulations

5.1. Fonctionnement de la climatisation dans TEB et calcul de la demande frigorifique

Au sein du modèle TEB le fonctionnement thermique d'un bâtiment générique est représenté (Figure 12). Un bilan d'énergie est établi sur les faces extérieures des deux parois—mur et toit—en tenant compte du rayonnement solaire et infrarouge (Q^* sur la Figure 12), des flux convectifs de chaleur (Q_H sur la Figure 12) et d'évaporation d'eau (Q_E sur la Figure 12) le cas échéant (uniquement sur le toit pour ce dernier terme). L'évolution des températures internes (T_k sur la Figure 12) des parois par conduction de chaleur est alors résolue à chaque pas de temps du modèle. Enfin sur la face interne, les échanges avec l'air intérieur du bâtiment (F_{IN} sur la Figure 12) sont calculés à partir de la température interne du bâtiment.

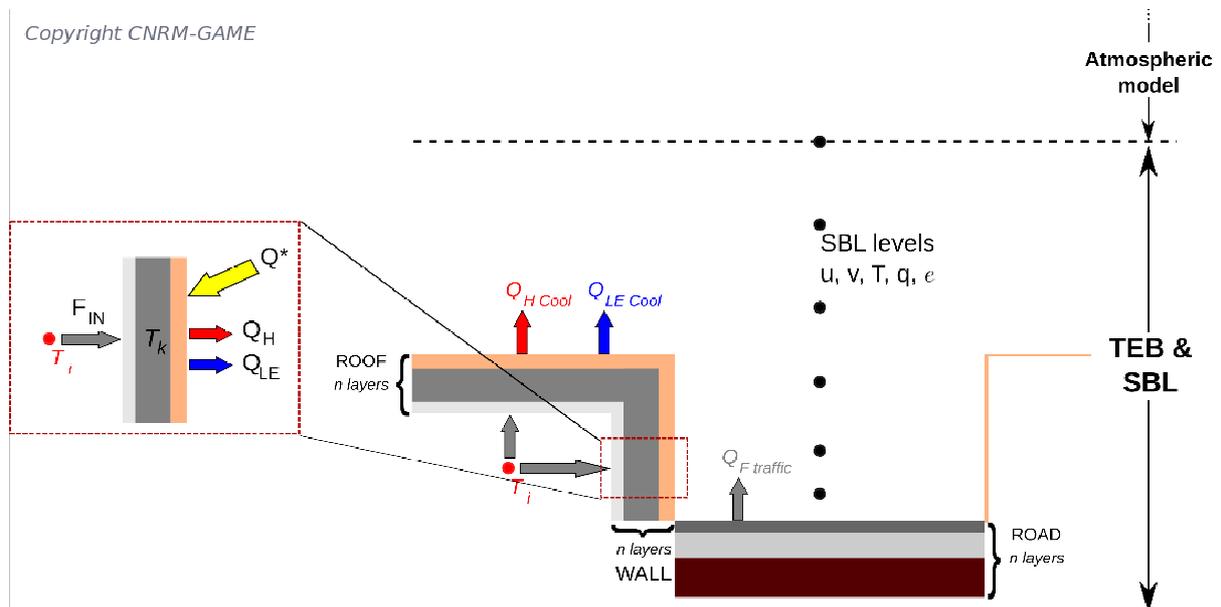


Figure 12. Représentation du schéma TEB et des échanges au niveau des parois du bâtiment générique

Cette dernière évolue de manière simplifiée pour tenir compte de l'inertie du bâtiment et des températures des faces internes des parois. Son équation s'écrit de la manière suivante :

$$T_i(t + \delta t) = \alpha T_i(t) + (1 - \alpha) \frac{T_T(t) + T_M(t) + T_P}{3} \quad (1)$$

où $T_i(t + \delta t)$ est la température du pas de temps futur, $T_i(t)$ celle du pas de temps présent, α est une constante qui représente l'inertie du bâtiment (elle vaut environ 0,98 pour une simulation avec un pas de temps de 30 minutes, et tend vers 1 lorsque le pas de temps diminue), $T_T(t)$, $T_M(t)$, T_P sont respectivement les températures des faces internes du toit (au pas de temps présent), du mur (au pas de temps présent), et du plancher (température fixe de 25°C dans le cas de nos simulations). Afin de représenter le fonctionnement de la climatisation, la température de l'air du bâtiment est bornée à 26°C et conditionne les échanges avec le mur et le toit au pas de temps futur de la simulation.

Afin d'évaluer la quantité d'énergie qui est retirée par cette modélisation du fonctionnement de la climatisation (i.e. l'énergie frigorifique Q_{frigo}), on calcule à

chaque pas de temps les flux de chaleur entre l'air du bâtiment et la face interne du mur et du toit (F_{IN} sur la Figure 12). Ceux-ci sont pondérés par leur surface respective pour avoir le flux global depuis l'air du bâtiment vers les parois. Ensuite les flux de chaleur correspondants se déduisent de l'équation 2:

$$Q_{rejets} = \left(\frac{COP + 1}{COP} \right) \times |Q_{frigo}| \quad (2)$$

où Q_{rejets} correspond aux rejets de chaleur ($W.m^{-2}$) associés à l'énergie extraite des bâtiments du fait de l'activation de la climatisation ($|Q_{frigo}|$ en $W.m^{-2}$), et COP le coefficient de performance du climatiseur. Un COP de 2,5 a été retenu pour cette étude. Q_{frigo} :

Les Figure 13 et Figure 14 illustrent le comportement des différentes températures nécessaires à ces calculs et celui de la demande de froid du bâtiment. On remarque la forte amplitude d'évolution de la température du toit (en noir sur la Figure 13) par rapport à celle du mur (en gris). Ces températures sont la plupart du temps au-dessus de la température de consigne de climatisation. Ainsi, le rappel de la température de l'air dans le bâtiment climatisé vers la température de consigne est constant (courbe bleue). Même lorsque la température du toit descend en dessous de la température de consigne, sa contribution par rapport à celle du mur n'est pas suffisante pour entraîner une baisse de la température de l'air. La courbe rouge représente l'évolution de la température interne dans un bâtiment qui ne serait pas climatisé. Celle-ci oscille autour de 28°C.

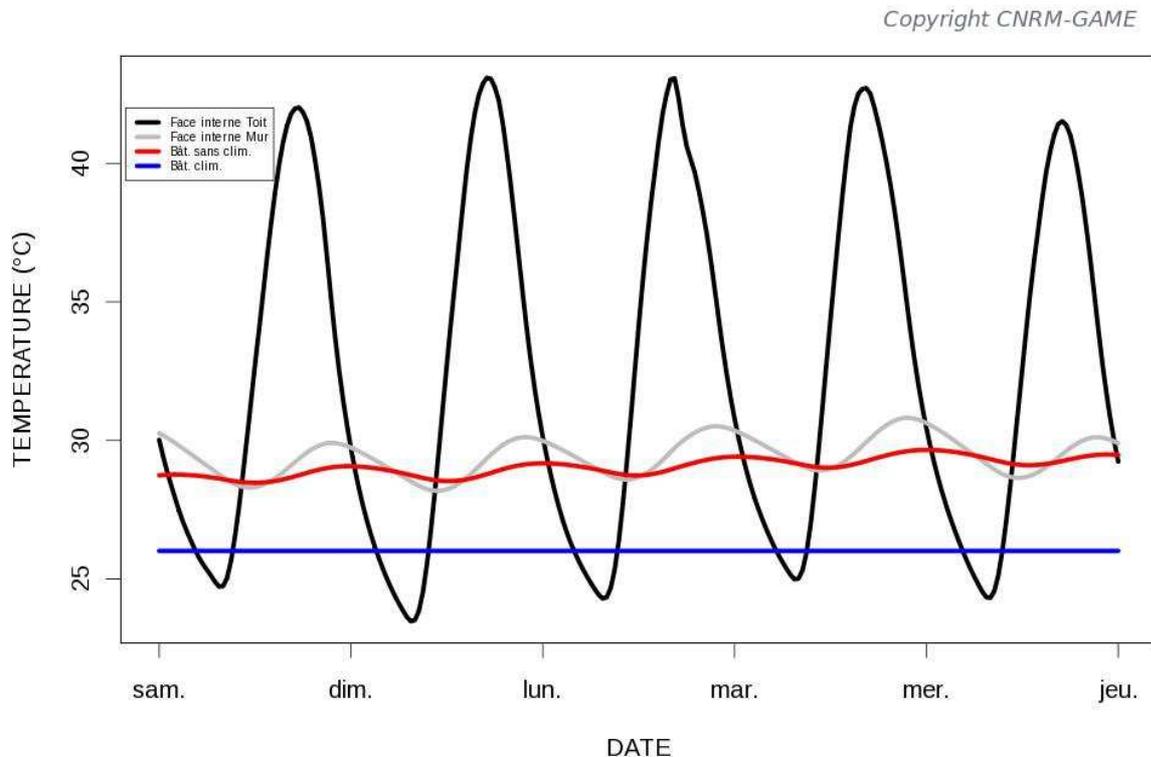


Figure 13. Évolution en un point de la simulation des températures des faces internes du toit (noir) et du mur (gris) ainsi que de la température de l'air interne pour le bâtiment non climatisé (rouge) et le bâtiment climatisé (bleu)

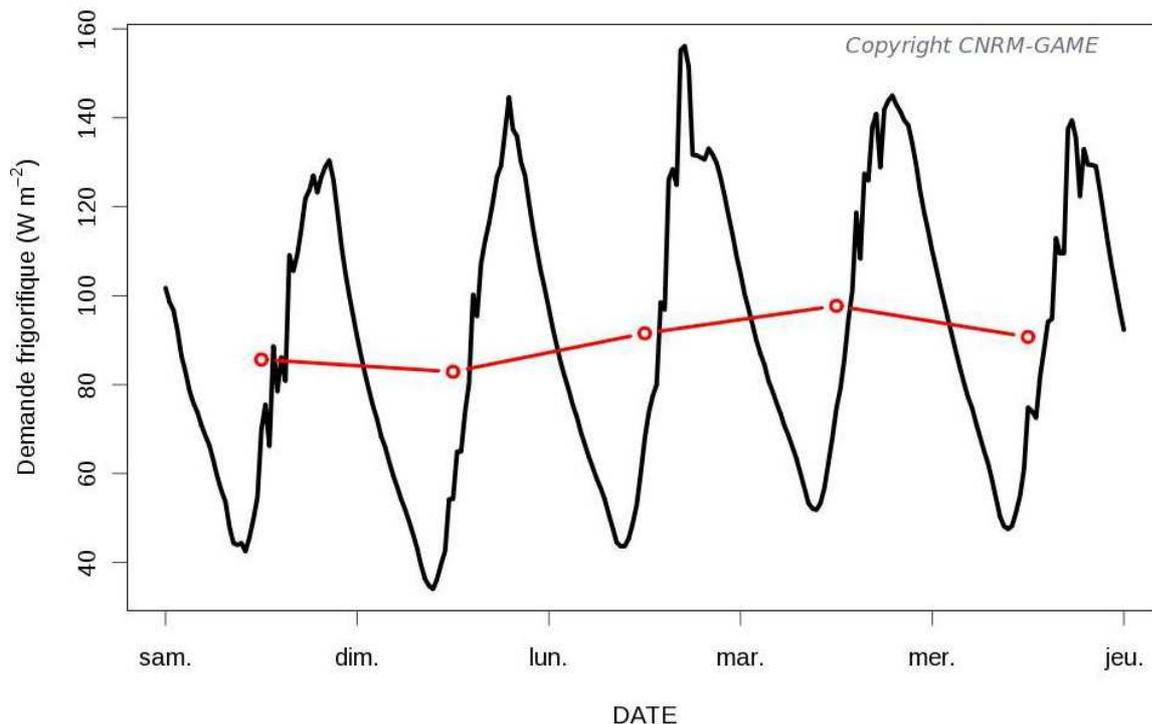


Figure 14. Évolution en un point de la simulation de la production frigorifique à chaque pas de temps (noir) et en moyenne journalière (rouge)

Enfin sur la Figure 14, la demande de froid dans le bâtiment avec cette version simplifiée de la représentation du bâtiment oscille entre 50 et 160 W m^{-2} avec des minima en fin de matinée et des maxima en soirée et début de nuit. Ce cycle n'est pas en correspondance avec celui relevé par Climespace qui montre plutôt des valeurs maximales en milieu d'après midi. Dans sa version actuelle, le modèle est certainement limité dans la représentation du cycle par l'absence de gain solaire direct par les fenêtres et de charges internes dans le bâtiment. Cependant, l'ordre de grandeur de la valeur moyenne journalière (en rouge sur la Figure 14) autour de 100 W m^{-2} (la surface fait référence à l'emprise au sol du bâtiment) est en accord avec les observations, ce qui permet d'avoir une représentation satisfaisante pour l'étude de la production de froid à l'intérieur du bâtiment.

Dans le modèle, les rejets de chaleur par les condensateurs des machines thermiques sont pris en compte et se font au niveau des toits des bâtiments. On prend en compte à la fois les flux de chaleur sec - terme $Q_{H \text{ Cool}}$ sur la Figure 12 - et les flux de chaleur latente - $Q_{LE \text{ Cool}}$ sur la Figure 12 - résultant de l'évaporation d'eau à la surface. Ces termes viennent ensuite impacter l'équation d'évolution de la température pour le premier niveau au dessus du toit.

5.2. Mise en cohérence des données de climatisation pour TEB

Les données de puissance de climatisation fournies par le CNAM ont été retravaillées (voir étapes Tableau 4) dans le but :

- * de décrire spatialement le même domaine spatial que les données « ville » - domaine APUR (limites et résolution de 250m) en noir sur la Figure 15;
- * de calculer les variables nécessaires au fonctionnement du modèle TEB (flux

de chaleur sec ou latent par maille de ville et fraction de bâti climatisé).

Ce travail a été effectué dans le logiciel SIG GRASS (Version 6.2.3).

Dans tous les scénarios de climatisation, les données brutes ont été fournies par le CNAM à 2 résolutions : à 250m sur le domaine « Paris CNAM » (en rouge sur la Figure 15) et à 1000m sur le domaine « Extérieur de Paris CNAM » (en bleu sur la Figure 15). La Figure 15 illustre les limites relatives à chaque domaine et complète les explications du Tableau 4.

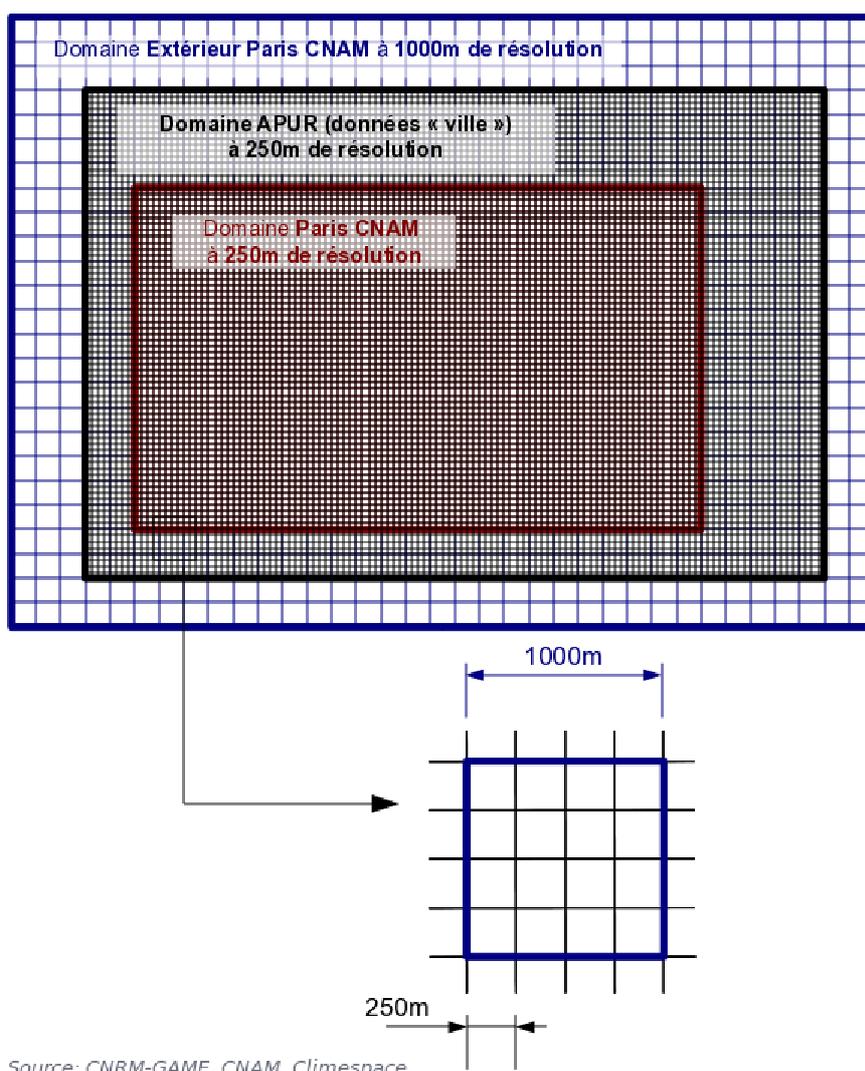


Figure 15. Les différents domaines de données de surface et leurs résolutions respectives

Tableau 4. Étapes de traitement des puissances de rejets brutes fournies par le CNAM

Étape	Description
1	<p>A l'extérieur de Paris (domaine en bleu sur la Figure 15), les puissances de rejets de chaleur (secs et humides) à 1000m ($P_{cool_{1000}}^{ExtParis}$) sont ré-échantillonnées à 250m ($P_{cool_{250}}^{ExtParis}$), en pondérant par la fraction de surface de plancher de la maille à 250m correspondante ($S_{floor_{250}}$) par rapport à la surface de plancher totale de la maille à 1000m ($Sum_{floor_{1000}}$) :</p> $P_{cool_{250}}^{ExtParis} = P_{cool_{1000}}^{ExtParis} \times \frac{S_{floor_{250}}}{Sum_{floor_{1000}}} \quad (3)$ <p>Ensuite, les flux de chaleur (secs et humides) à 250m correspondant aux puissances de rejets de chaleur extrapolées à 250m sont calculés selon :</p> $Q_{cool_{250}}^{ExtParis} = \frac{P_{cool_{250}}^{ExtParis}}{62500} \quad (4)$
2	<p>Pour le domaine « Paris CNAM » (en rouge sur la figure Figure 15), calcul des flux de chaleur (secs et humides) à 250m ($Q_{cool_{250}}^{Paris}$), suivant l'Equation 4.</p>
3	<p>Pour chaque type de rejets (secs et humides), les flux de chaleur des 2 domaines « Extérieur de Paris CNAM » ($Q_{cool_{250}}^{ExtParis}$) et « Paris CNAM » ($Q_{cool_{250}}^{Paris}$) sont regroupés et seules les données de flux de chaleur correspondant au domaine APUR (en noir sur la figure Figure 15) sont conservés : $Q_{cool_{250}}^{sec}$ et $Q_{cool_{250}}^{hum}$. Le domaine de données « APUR » correspond au domaine de simulation « Paris ».</p>
4	<p>Calcul de la fraction de bâtiments climatisés (F_{cool}) comme suit :</p> $F_{cool} = \min\left(\frac{Q_{cool_{250}}^{sec} \cdot floor_{250}^{sec} + Q_{cool_{250}}^{hum} \cdot floor_{250}^{hum}}{126}, 1\right) \quad (5)$ <p>à partir des flux de chaleur exprimés en $W \cdot m^{-2}$ de plancher ($Q_{cool_{250}}^{sec} \cdot floor_{250}^{sec}$ et $Q_{cool_{250}}^{hum} \cdot floor_{250}^{hum}$) et du seuil de $126 W \cdot m^{-2}$ de plancher (voir complément d'information pour cette étape en-dessous de ce tableau).</p>
5	<p>Calcul des flux de rejets secs en $W \cdot m^{-2}$ de ville comme suit, pour être en cohérence avec le fonctionnement de TEB :</p> $Q_{cool_{250}}^{sec}(W / m^2 ville) = \frac{Q_{cool_{250}}^{sec}(W / m^2 maille)}{FRAC_{town}} \quad (6)$ <p>$FRAC_{town}$ représente la fraction de maille urbanisée (et traitée par TEB). Le calcul des flux de rejets humides en $W \cdot m^{-2}$ de ville est traité de manière similaire.</p>
6	<p>Calcul comme suit des flux de rejets de chaleur sensible et latente (H_{cool} et LE_{cool}) :</p> $H_{cool} = Q_{cool_{250}}^{sec}(W / m^2 ville) + 0.05 \times Q_{cool_{250}}^{hum}(W / m^2 ville) \quad (7)$ $LE_{cool} = 0.95 \times Q_{cool_{250}}^{hum}(W / m^2 ville) \quad (8)$
7	<p>Calcul de courbes d'appel horaire de puissance de climatisation en fonction du type de jour de la semaine :</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ type de jour 1 = lundi, mardi, mercredi, jeudi, vendredi ○ type de jour 2 = samedi ○ type de jour 3 = dimanche

L'étape 4 présentée dans le Tableau 4 fait intervenir un seuil de rejets de chaleur de 126W.m^{-2} de plancher qui représente un seuil arbitraire choisi par l'ensemble des partenaires du projet comme étant représentatif d'un bâtiment totalement climatisé (100% de la surface de plancher est climatisée). Ce seuil correspond à une puissance de climatisation de 90W.m^{-2} de plancher. Ce choix a été effectué à partir de puissances de climatisation disponibles pour des bâtiments types (bureaux seuls au centre de Paris, bureaux avec « data center » ou service informatique développé, magasins et centre commerciaux, etc.).

L'étape 7 du Tableau 4 fait intervenir des données d'appel de puissances horaires normalisées fournies par le CNAM (Figure 16) – voir section [2. Collecte des données de climatisation pour le cas réel \(CNAM\)](#). Quelques puissances d'appel horaire ont été recalculées au changement de type de jour pour éviter les sauts d'appel horaire entre 2 types de jours consécutifs. Le résultat de ce travail est une courbe d'appel horaire « lissée » visible sur la Figure 17 ; les coefficients correspondant sont présentés Tableau 5.

Enfin, une température de consigne de 26°C a été retenue comme étant cohérente avec la température cible généralement conseillée dans les locaux climatisés.

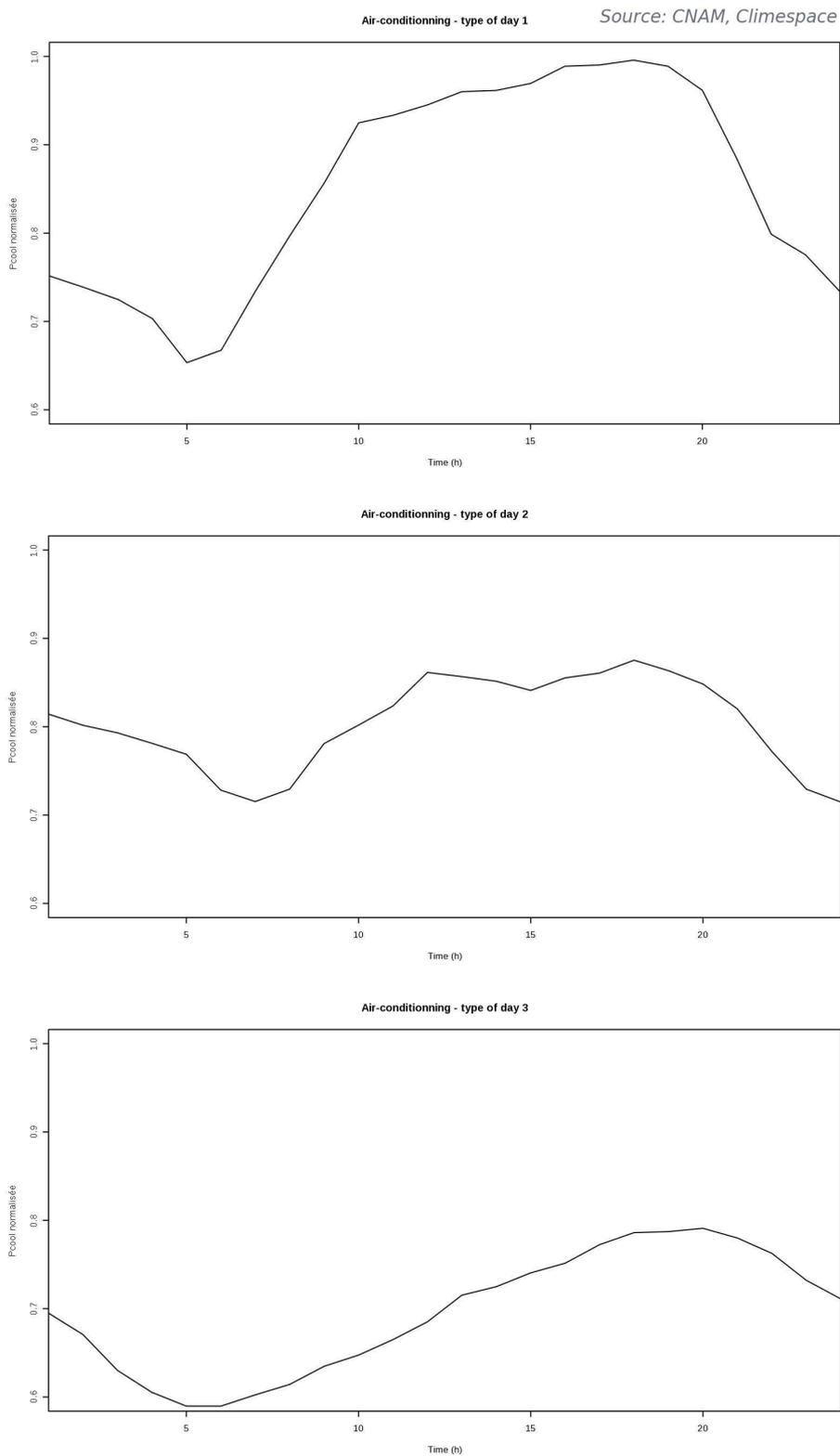


Figure 16. Courbes d'appel horaire de puissances (normalisées) de climatisation par type de jour (1 : lundi à vendredi, 2 : samedi, 3 : dimanche)

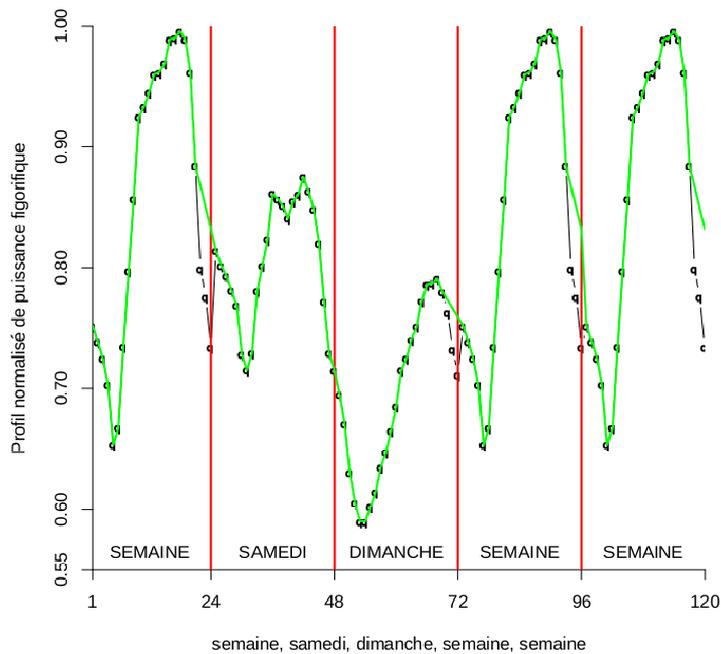


Figure 17. Courbe d'appel horaire « lissée » de puissances normalisées de climatisation pour les jours du vendredi 8 au mercredi 13 août 2003

Tableau 5. Coefficients d'appel horaire de puissance normalisée de climatisation en fonction du type de jour de la semaine

Heure	Semaine	Samedi	Dimanche
1	0.752	0.814	0.695
2	0.739	0.802	0.671
3	0.725	0.793	0.63
4	0.703	0.781	0.605
5	0.653	0.769	0.59
6	0.667	0.728	0.59
7	0.735	0.715	0.602
8	0.797	0.729	0.614
9	0.857	0.781	0.635
10	0.925	0.802	0.647
11	0.933	0.823	0.665
12	0.945	0.861	0.685
13	0.96	0.857	0.715
14	0.962	0.851	0.725
15	0.969	0.841	0.741
16	0.989	0.855	0.751
17	0.99	0.861	0.773
18	0.996	0.875	0.786
19	0.989	0.863	0.787
20	0.962	0.848	0.791
21	0.884	0.82	0.78
22	0.867	0.772	0.773
23	0.849	0.729	0.766
24	0.832	0.715	0.759
Moyenne	0.862	0.804	0.699

6. Données d'entrée

6.1. Paramètres d'entrée pour la surface

Les données d'entrée physiographiques comprennent des données générales (types d'occupation du sol, topographie) ainsi que les données propres à chaque schéma de surface.

Tout d'abord, le relief de chaque domaine est décrit par des données topographiques SRTM [Shuttle Radar Topography Mission] de résolution spatiale plus fine que celle du domaine en question (Tableau 6).

Tableau 6. Données topographiques prescrites à chaque domaine

Domaine de simulation	Résolution spatiale du domaine	Résolution spatiale des données
France étendue	2,5km	Environ 500m
Île-de-France	1,25km	90m
Paris	250m	

Le type d'occupation du sol (fraction urbanisée, fraction de nature, fraction d'eau douce et fraction d'océan) est décrit par la base de données Ecoclimap [Masson et al. 2003] pour les domaines « France étendue » et « Île-de-France ». Pour le domaine « Paris », les données d'entrée sont basées sur des inventaires établis par l'APUR. Pour les 3 domaines de simulation, la texture du sol est décrite par les fractions d'argile et de sable de la Food and Agriculture Organization [FAO].

En ce qui concerne le schéma de surface TEB, des données par défaut sont utilisées quand la base de données Ecoclimap est utilisée (domaine France et Île-de-France).

Pour le domaine « Paris », les données d'entrée pour TEB sont des données qui proviennent de l'APUR (variables dans l'espace) et du CSTB (variables en fonction des types de matériaux) et sont mises en cohérence entre elles et avec le fonctionnement de TEB avant d'être prescrite au modèle. Elles sont décrites Tableau 7.

Les données provenant de l'APUR et du CSTB ont été obtenues par le biais d'un projet tiers dans lequel le laboratoire est impliqué (EPICEA). La préparation de ces données pour leur utilisation par les modules TEB et ISBA de SURFEX est décrite dans le document « Note sur la préparation des données physiographiques en entrée de SURFEX pour l'agglomération parisienne » placé en annexe ([Annexe A2](#)).

Dans le cadre du présent projet, une première estimation des flux de chaleur liés au trafic routier dans le domaine « Paris » a été réalisée et intégré à la paramétrisation de la surface. Ce travail est décrit à la fin du document précédemment cité ([Annexe A2](#)).

Finalement, les fichiers d'entrée contenant les données d'entrée physiographiques pour les 3 domaines (namelists Fortran) sont présentées en annexe ([Annexe A3](#)).

Tableau 7. Données prescrites en entrée de TEB

Paramètre	Unité	Description	Source
Caractéristiques radiatives et thermiques pour les toits, les murs et les routes			
N_LAYER	-	Nombre de couches des toits	[APUR 2007]
ALB	-	Albédo des toits	[APUR 2007]
EMIS	-	Emissivité des toits	[APUR 2007]
HC(n)	MJ.m ⁻³ .K ⁻¹	Capacité calorifique de la nième couche de toit	[APUR 2007]
TC(n)	W.m ⁻¹ .K ⁻¹	Conductivité thermique de la nième couche de toit	[APUR 2007]
D(n)	m	Épaisseur de la nième couche de toit	[APUR 2007]
Paramètres généraux			
Z0_TOWN	m	Longueur de rugosité pour le système bâtiment/rue canyon	GAME
BLD	m ² de bâti / m ² de ville	Rapport entre l'emprise au sol des bâtiments et la surface de ville	APUR
BLD_HEIGHT	m	Hauteur des bâtiments	APUR
WALL_O_HOR	m ² de murs/ m ² de ville	Rapport entre la surface des murs et la surface de ville	APUR
H_TRAFFIC	W.m ⁻²	Flux de chaleur sensible généré par le trafic routier	[Pigeon et al. 2007; Colombert 2008]
LE_TRAFFIC	W.m ⁻²	Flux de chaleur latente généré par le trafic routier	[Pigeon et al. 2007; Colombert 2008]
H et LE INDUSTRY	W.m ⁻²	Flux de chaleur sensible et latent d'origine anthropogénique industrielle	[Colombert 2008]
Paramètres liés à la climatisation des bâtiments			
H_COOL	W.m ⁻² de ville	Flux de chaleur sensible dû à la climatisation des bâtiments	Climespace, CNAM, GAME
LE_COOL	W.m ⁻² de ville	Flux de chaleur latente dû à la climatisation des bâtiments	Climespace, CNAM, GAME
F_COOL	-	Fraction de bâtiments climatisés	Climespace, CNAM, GAME
TIME_COOL(j,h)	-	Coefficient d'appel horaire de la puissance nominale de climatisation en fonction du type de jour de la semaine (j) et de l'heure du jour (h)	CNAM, GAME
TCOOL_TARGET	°C	Température interne cible pour les bâtiments climatisés	Climespace, CNAM, GAME

6.2. Collecte des données de climatisation pour le cas réel

Ce paragraphe décrit la collecte des données de climatisation pour le cas climatisé réel.

Pour tenir compte de l'impact de l'utilisation de la climatisation sur la température des rues de Paris et région, il a fallu procéder à une phase d'estimation des installations de climatisation.

Les installations sont classées en trois grandes catégories : les tours humides (TAR), les installations refroidies à l'eau de Seine et les installations dites sèches. Concernant la première catégorie, les tours sont soumises à une autorisation préfectorale. Nous utiliserons alors, autant que possible, les recensements de la préfecture.

L'estimation des installations sèches a été faite par visualisation dont la méthodologie est expliquée par la suite.

Une première partie a été de définir 5 zones représentatives à la fois de la diversité de densité d'habitations/commerces sur Paris, mais également de la diversité du parc immobilier parisien (voir Tableau 9 pour la surface de chaque zone).

Au sein de chaque zone définie, la démarche suivante a été appliquée:

- * Une visualisation satellite via des sites type Google. Un recensement des condenseurs visibles en toiture, a alors été effectué.
- * Une visualisation via « Google street » a permis de relever les condenseurs en façade des bâtiments.
- * A partir, du nombre de condenseur et du type, un ratio « rejet thermique /nombre de ventilateurs » a été appliqué.

En fonction du type d'installation, on utilise les ratios suivants (Tableau 8) :

Tableau 8. Ratios « rejet thermique / nombre de ventilateurs »

Type de condenseur	Ratio « rejet thermique/nbre de ventilateurs »	Unité
Split	6	kW/ventilateur
GRL et condenseur	70	kW/ventilateur
VRV	30	kW/ventilateur
CTA	60	kW/ventilateur

Connaissant la surface de chaque zone, on récupère ainsi un ratio « rejet thermique/m² au sol ».

On a alors les valeurs présentées dans le Tableau 9 :

Tableau 9. Caractéristiques des 5 zones représentatives de la diversité habitation /commerce et du parc immobilier dans Paris

	Arrondissement	Surface [m²]	Puissance [kW]	Ratio [W/m²]
I	18	660000	4408	6.68
II	1	742000	24988	33.68
III	14	260000	2016	7.75
IV	16	610000	4522	7.41
V	11	631000	7076	11.21

A la vue des résultats obtenus, nous avons regroupé les ratios en 2 catégories: un ratio fort (33,68 W/m²) et un ratio faible, qui correspond à la moyenne des 4 autres (8,26 W/m²).

Déploiement sur tout Paris :

La deuxième étape a été d'attribuer un ratio à chaque maille sur Paris.

Par visualisation satellite, chaque maille a été associée à un des deux ratios de base ci dessus.

A cela il faut rajouter, pour chaque maille :

- * Cas particulier : grosses infrastructures (type gymnase, data center, centre commerciaux, grosse structures, ...)
- * Installations classées : tours humides

La CNAM a fourni un fichier Excel faisant apparaître pour chaque centre de maille différentes valeurs : la coordonnée GPS de chaque centre de maille , le ratio de base appliqué, les « grosses infrastructures » et les installations de type « tour humide » classées.

Cette estimation ne prend pas en compte :

- * la climatisation à eau perdue (qui n'entre pas dans le cadre de cette étude des rejets dans l'air). On peut noter que dans le 16^e arrondissement, l'un des arrondissements dont l'habitat est considéré comme le plus climatisé sur Paris, le ratio obtenu est le plus faible. Ce résultat est vraisemblablement lié à la forte utilisation de l'eau perdue dans la climatisation de cet arrondissement ainsi qu'une faible densité d'habitants.
- * la climatisation « cachée » : à savoir, les condenseurs qui sont dans les combles, ou dans une pièce en sous sol, non visibles sur les prises de vue. Idem pour les condenseurs qui sont situés dans les cours intérieures d'immeuble.

Incertitudes de la méthode

- * Cette méthode nous permet d'avoir une valeur basse de la climatisation dans Paris. En effet, concernant les petits commerces qui sont en rez-de-chaussée des immeubles, nous ne pouvons pas recenser l'utilisation de climatisation individuelle. Lors de fortes chaleurs, les commerçants utilisent une climatisation mobile dont les condenseurs sont sortis dans la rue. A cela on peut rajouter les climatisations « cachées » citées plus haut.
- * Le positionnement des tours humides a été fait avec les adresses postales et non avec les coordonnées GPS de la tour. En effet, sur le fichier fourni seul les adresses postales étaient disponibles pour les 450 tours humides. Dans certains cas, il peut y avoir décalage entre les coordonnées GPS équivalentes à l'adresse postale et le positionnement réel de la tour elle-même.
- * Certaines valeurs de rejet thermique ne sont pas indiquées sur le fichier des installations classées. Ces valeurs concernent des sites du type ambassade, ministère ...

Récolte des données hors Paris

Un relevé visuel des différentes installations a été effectué à partir de Google. Le ratio de puissance par ventilateur appliqué est le même que dans le cas de Paris intra muros.

Estimation de l'incertitude de la méthode

Sur une dizaine de cas, nous avons récupéré des valeurs de puissance frigorifique réelles installées sur des hôtels parisiens. Les valeurs ont été converties en puissance thermique de rejet sec.

Deux cas se présentent alors :

- * Sur le bâtiment, nous avons visualisé des condenseurs. Dans ce cas l'incertitude de notre méthode est de l'ordre de 15 % (nous sous estimons la valeur réelle)
- * Sur le bâtiment, aucune installation n'est visible (installation en façade intérieure, cachée par des caissons etc...) . Dans ce cas, notre méthode estime à 0 la valeur de la puissance rejetée.

Additionnant les 2 cas , la méthode utilisée sous estime d'un facteur pouvant atteindre de l'ordre 2 la puissance réellement rejetée. Toutefois ce facteur est à pondérer avec notre échantillon faible.

Tour humide

Un bilan a été fait à partir des documents fournis par Climespace. La répartition du rejet thermique est de l'ordre de : 95% de chaleur latente et 5% de chaleur sensible, en conditions nominales.

Variation temporelle

Une étude temporelle a été faite sur les 5 installations de Climespace, pour la

période étudiée dans le projet. On peut en sortir 3 cycles journaliers de variations types : samedi, dimanche et semaine.

Afin de déployer sur toutes les installations de rejets thermiques, les puissances ont été normalisées par rapport à la puissance maximale de toute la période (à savoir vendredi vers 17h00).

Prise en compte du réseau électrique

Pour prendre en compte les rejets thermiques des transformateurs électriques alimentant la climatisation, on considère que 3% de la puissance électrique est transformée en chaleur que l'on rajoute aux rejets des condenseurs.

Un COP constant de 2 a été utilisé dans les calculs et les rejets thermiques ont été distribués sur toutes les mailles.

Bilan total des résultats

On obtient alors les valeurs présentées Tableau 10 :

Tableau 10. Bilan des rejets de chaleur totaux estimés pour Paris intra-muros et hors Paris

	Surface	Puissance sèche	Puissance humide	Puissance poste EDF	Bilan sec*	Ratio moyen**	Ratio max**	Ratio min**
	[km ²]	[MW]	[MW]	[MW]	[MW]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]
Paris	120	2409	858	31	2484	20.70	329.84	8.35
Hors Paris	2380	1892	1201	32	1984	0.83	96.07	0.00

*Bilan sec = Puissance sèche + 5% de Puissance humide + Poste EDF

**Les ratios sont calculés à partir du Bilan « sec » et les m² sont des m² au sol. Les ratios (moyen, max et min) sont estimés pour des mailles de 250m× 250m pour Paris et pour des mailles de 1km×1km hors Paris.

7. Traitement des sorties de simulation

Tout d'abord, étant donné que la climatisation des bâtiments n'est prise en compte que dans le domaine Paris, l'impact de la climatisation sur la température de l'air n'a été étudié que dans le domaine Paris. Quand le nom du domaine n'est pas spécifié, référence est faite au domaine Paris à 250m de résolution spatiale.

Pour comparer les températures dans la rue à 2m entre le cas climatisé réel et la simulation de référence, en chaque point de maille, nous avons travaillé sur la différence de température entre les 2 simulations (« anomalie de température »).

En chaque point de maille, un traitement statistique des séries brutes d'anomalies de température a été effectué afin de :

- × filtrer les séries temporelles d'anomalies,
- × ré-échantillonner les anomalies filtrées,
- × et finalement caractériser les anomalies filtrées par série « jour » et « nuit ».

Le filtrage des séries temporelles d'anomalies permet de retirer des évènements indépendants de la paramétrisation de la climatisation qui ne se produiraient pas de façon identique dans le temps et l'espace dans 2 simulations (par exemple, événement de type orageux qui ne se développe pas à la même échéance horaire dans les 2 simulations et/ou dont la localisation serait différente, ce qui a des conséquences sur la température de l'air qui ne sont pas en relation directe avec la présence ou non de climatisation ; voir Figure 18).

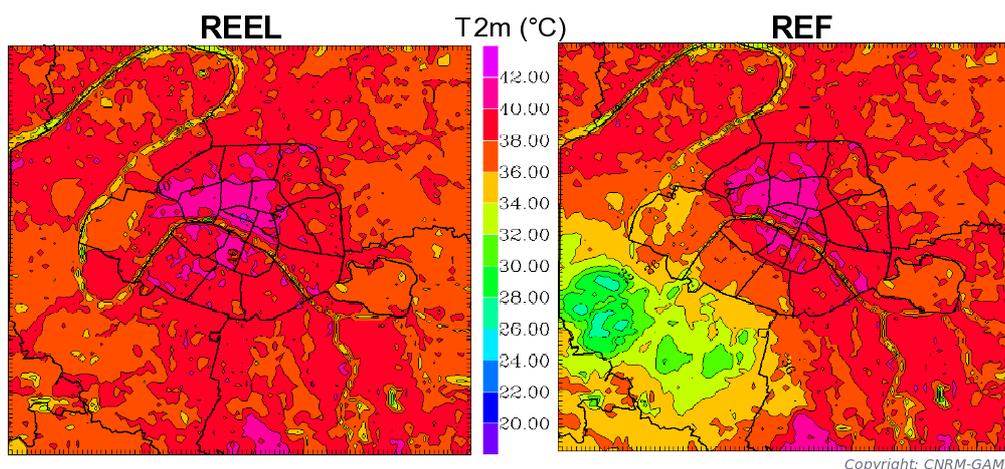


Figure 18. Exemple de la répercussion d'un événement orageux sur la température pour une même échéance horaire (11 août 2003 à 19h locale) dans 2 simulations (cas réel à gauche, cas de référence à droite – présence d'un orage)

Concrètement, en chaque point de maille, le filtrage des données a consisté à (voir Figure 19):

1. repérer les évènements d'anomalie de température anormalement forts, c'est-à-dire ceux qui présentaient des valeurs supérieures à 4 fois l'écart-type (calculé sur les 64 premières échéances horaires de la série temporelle avant un événement orageux qui se produit dans la simulation de référence le 11/08/2003 à 17h TU). Les lignes horizontales continues vertes de la Figure 19 correspondent à 4 fois l'écart-type.
2. à retirer de part et d'autres de ces évènements de température anormalement forts toutes les valeurs de température supérieures en amplitude à 2 fois l'écart-type calculé précédemment (lignes horizontales vertes en pointillé sur la Figure 19). Ainsi sur l'exemple de la Figure 19, on ne conserve que les points en rouge.

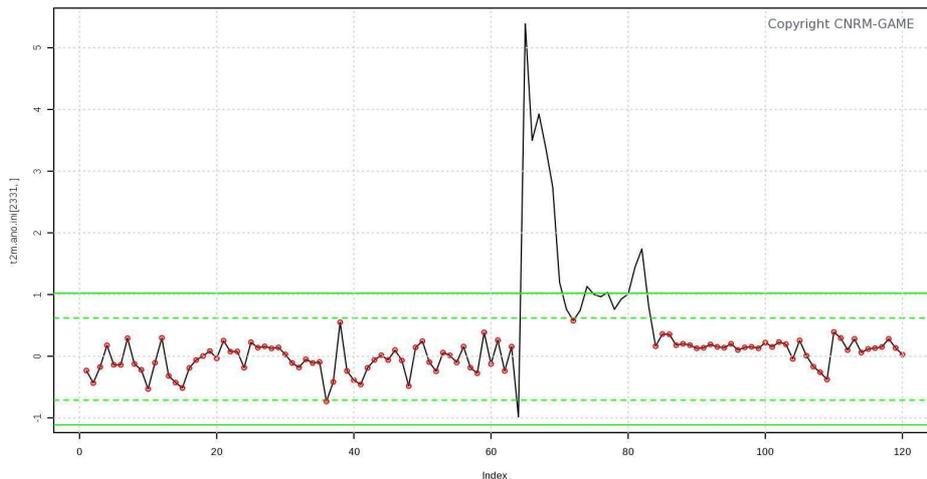
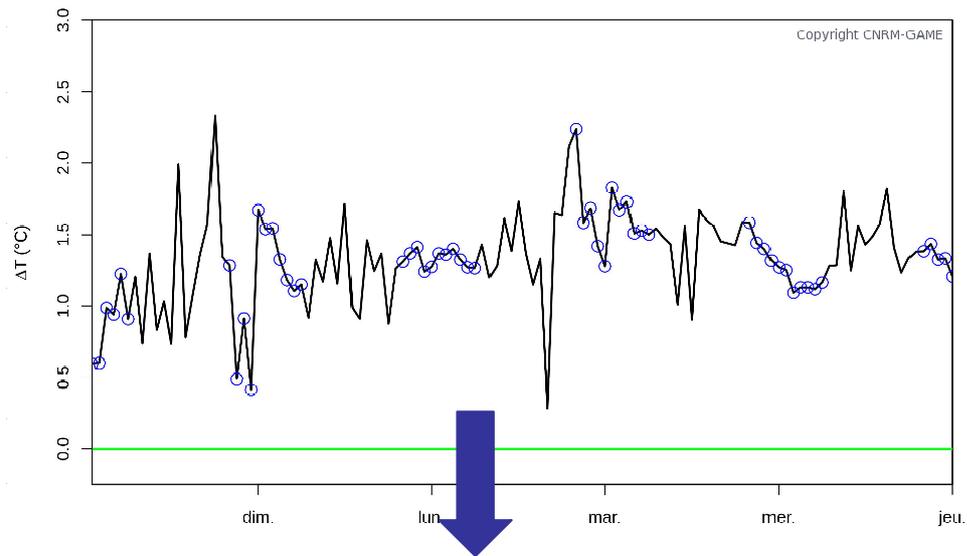


Figure 19. Exemple d'une maille pour laquelle l'anomalie de température a été filtrée (seuls les points en rouge sont conservés)

Ensuite, un **ré-échantillonnage aléatoire des anomalies filtrées, par série « jour » (9h-19h) et « nuit » (20h-6h)** est effectué de façon à (i) décorrélérer les données entre elles et (ii) générer un échantillon de taille plus importante pour pouvoir procéder au test de caractérisation des anomalies. Le ré-échantillonnage est effectué selon la méthode dite « bootstrapping » (dans notre cas, 1000 tirages avec remise). Cette étape permet d'obtenir une distribution quasi-normale des données ré-échantillonnées.

Cette étape est illustrée Figure 20 pour les anomalies de nuit d'un point de maille dont l'anomalie nocturne de température est élevée. Les cercles bleus sur la planche du haut de la Figure 20 représentent les anomalies nocturnes filtrées à partir desquelles le ré-échantillonnage est effectué. Ce ré-échantillonnage génère une « densité de probabilité » pour l'anomalie de température nocturne du point de maille considéré (planche du milieu de la Figure 20).

Finalement, la **caractérisation des anomalies par série « jour » et « nuit »** consiste à réaliser, par série « jour » et « nuit », un test statistique unilatéral à 95% sur la moyenne des anomalies de température ré-échantillonnées pour les classer par rapport à des seuils de température fixes (-0,25 ; 0,25 ; 0,5 ; 1 ; 2 ; 3 °C). Les planches du milieu et du bas de la Figure 20 illustrent le résultat de ce traitement (lignes rouges) pour un point de maille dont l'anomalie de température nocturne est élevée (caractérisée « supérieure à 1°C »).



Densité de probabilité de l'anomalie de température de nuit

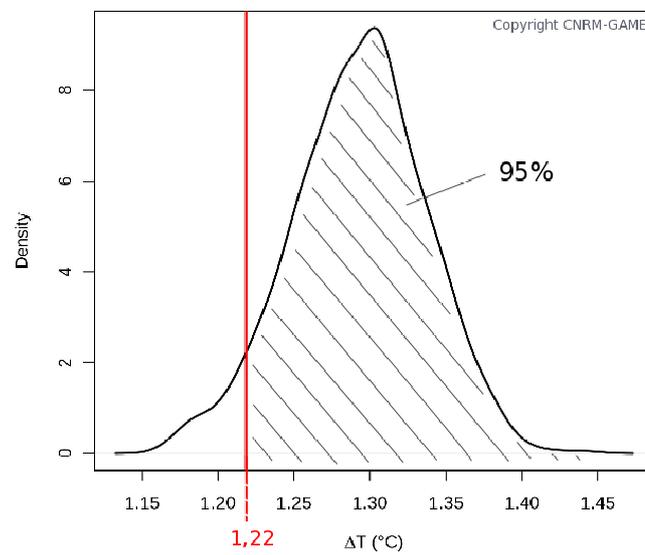


Figure 20: Traitement statistique des anomalies de température nocturnes filtrées

SIMULATION DE REFERENCE

1. Introduction

Une simulation de référence (sans climatisation), que l'on pourrait aussi appeler « de contrôle » a été réalisée pour permettre par la suite de comparer les impacts de la climatisation dans son état réel ou bien sous divers scénarios climatisés avec une situation qui ne prendrait pas en compte les processus mis en jeu quand les bâtiments sont climatisés.

2. Comparaison des simulations avec les observations sur les domaines Paris et Île-de-France

Les températures à 2m simulées sur les domaines « Île-de France » et « Paris » ont été comparées aux observations disponibles (28 stations horaires pour le domaine Île-de France et 2 pour le domaine Paris). Les caractéristiques de ces 28 stations sont présentées en annexe ([Annexe A4](#)). La Figure 21 montre l'évolution de cette température au cours de la canicule pour les 2 stations au pas horaire du domaine Paris. Les Tableau 11 et Tableau 12 mettent en évidence l'amélioration de la corrélation des températures simulées par les modèles et les observations quand la résolution spatiale augmente (au passage du domaine « Île-de France » à 1,25km au domaine « Paris » à 250m). Cette amélioration se caractérise par une erreur quadratique moyenne sur la température à 2m de 2,6°C pour le modèle 2 (Ile-de-France) et d'environ 2°C pour le modèle 3 (Paris), contre 3°C pour le modèle 1 sur le domaine France étendue.

Tableau 11. Erreur quadratique moyenne sur la température à 2m pour les 28 stations du domaine Île-de-France

Statistique évaluée	Erreur sur la T2m (°C)	Erreur sur le minimum de T2m (°C)	Erreur sur le maximum de T2m (°C)
Moyenne	2.608	3.442	1.852

Tableau 12. Erreur quadratique moyenne sur la température à 2m pour le domaine Paris

Station	Erreur sur la T2m (°C)	Erreur sur le minimum de T2m (°C)	Erreur sur le maximum de T2m (°C)
Paris Montsouris	1.694	1.881	1.81
Villacoublay	2.165	1.627	2.991
<i>Moyenne</i>	<i>1,93</i>	<i>1,754</i>	<i>2,401</i>

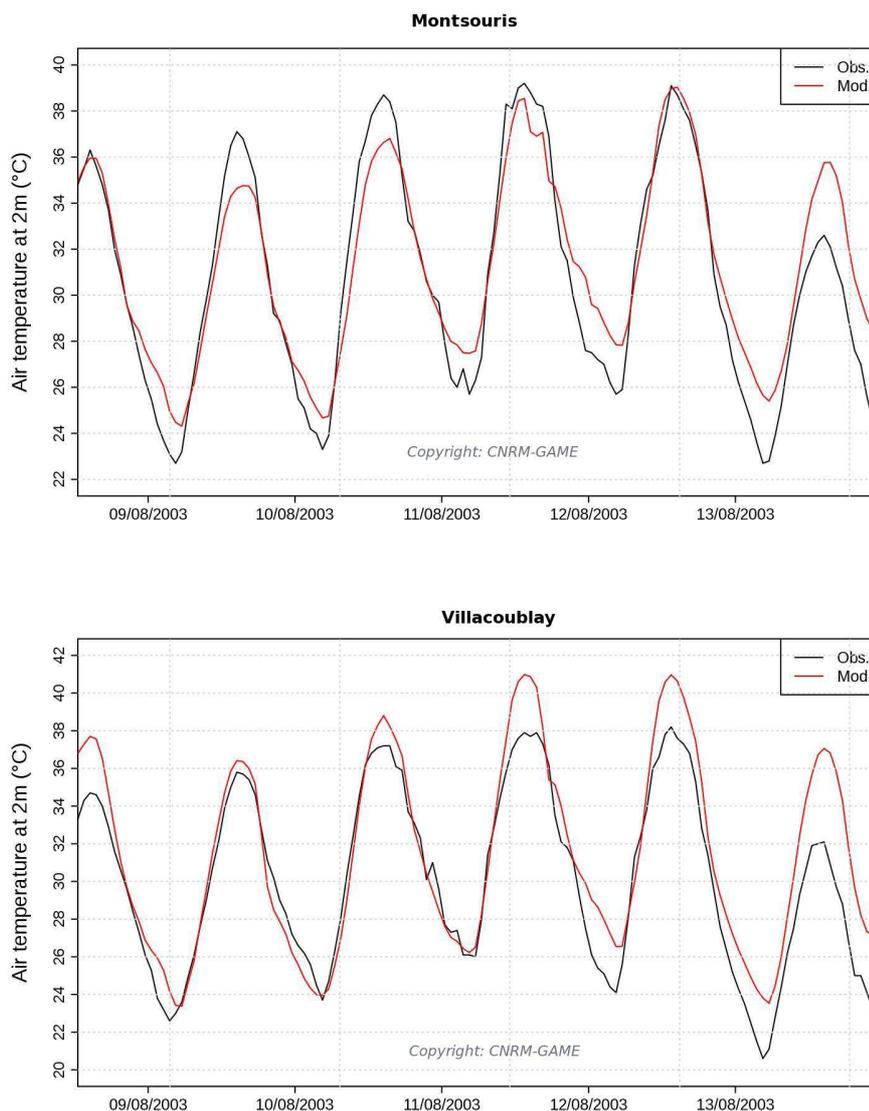


Figure 21. Variations de la température à 2m entre le 8 août midi TU et le 13 août 2003 pour les stations de Montsouris (haut) et Villacoublay (bas)

De plus, la société Climespace dispose d'une station de mesure urbaine, au site de leur centrale de production de froid « Opéra ». Elle se situe sur le toit des Galeries Lafayette, 40 boulevard Haussmann dans le 9^{ème} arrondissement (latitude = 48,8736°N, longitude = 2,33167°E, altitude du bâtiment = 34m). Compte tenu du nombre limité de postes météorologiques fournissant des relevés horaires dans Paris intramuros, il semblait intéressant de comparer les relevés de température de la station Climespace Opéra à ceux de Montsouris.

La Figure 22 qui représente l'évolution temporelle de la température de l'air observée à 2m à Paris-Montsouris et à 34m à la station Opéra met en évidence un décalage des minima et maxima de température entre Montsouris et Opéra, à partir du 10 août.

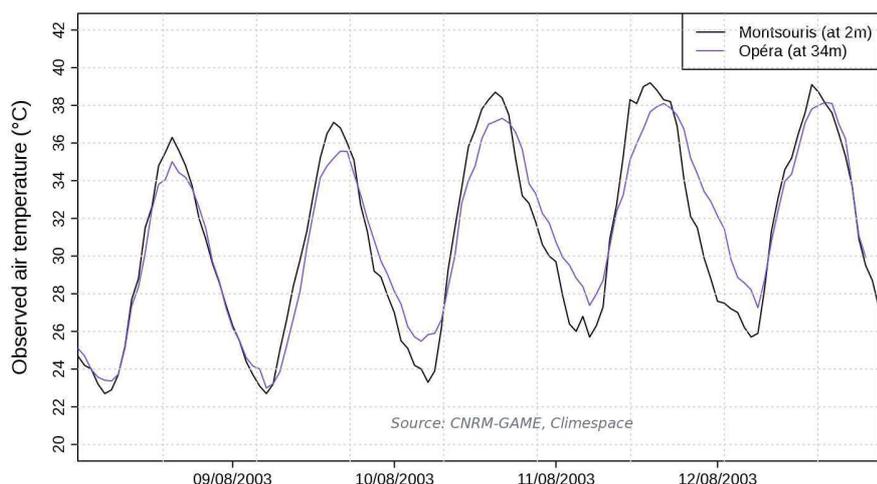


Figure 22. Variations de la température observée entre le 8 août midi TU et le 12 août 2003 pour les stations de Montsouris (en noir) et Opéra (en bleu-gris)

3. Analyse de l'îlot de chaleur urbain

Pour analyser l'îlot de chaleur urbain (ICU) moyen pour la simulation de référence (Figure 23), les températures à 2m des échéances nocturnes horaires de 2h, 3h et 4h TU des 4 dernières nuits de la simulation (10, 11, 12, et 13 août) ont été retenues et moyennées. L'ICU présente entre les arrondissements les plus chauds (2^e, 3^e, 9^e et 10^e) et les zones les moins urbanisées au sud-ouest de Paris une amplitude maximale comprise entre 4 et 8°C.

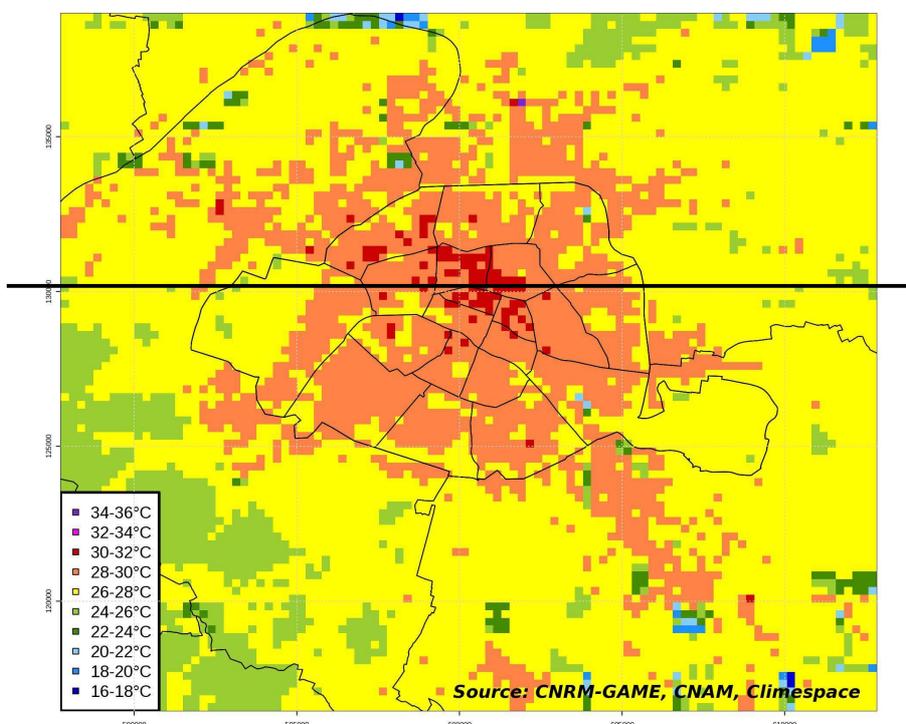


Figure 23. Îlot de chaleur urbain pour la simulation de référence

La coupe transversale (Figure 24) indiquée sur la Figure 23 permet de raffiner

l'amplitude de l'îlot de chaleur dans la direction ouest-est indiquée et de visualiser la structure de l'îlot de chaleur présentée Figure 23. La Figure 24 présente 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 - kilomètres 8 à 15 du domaine, du bois de Boulogne entre les kilomètres 6 et 8, et de la Seine aux alentours du kilomètre 3,5).

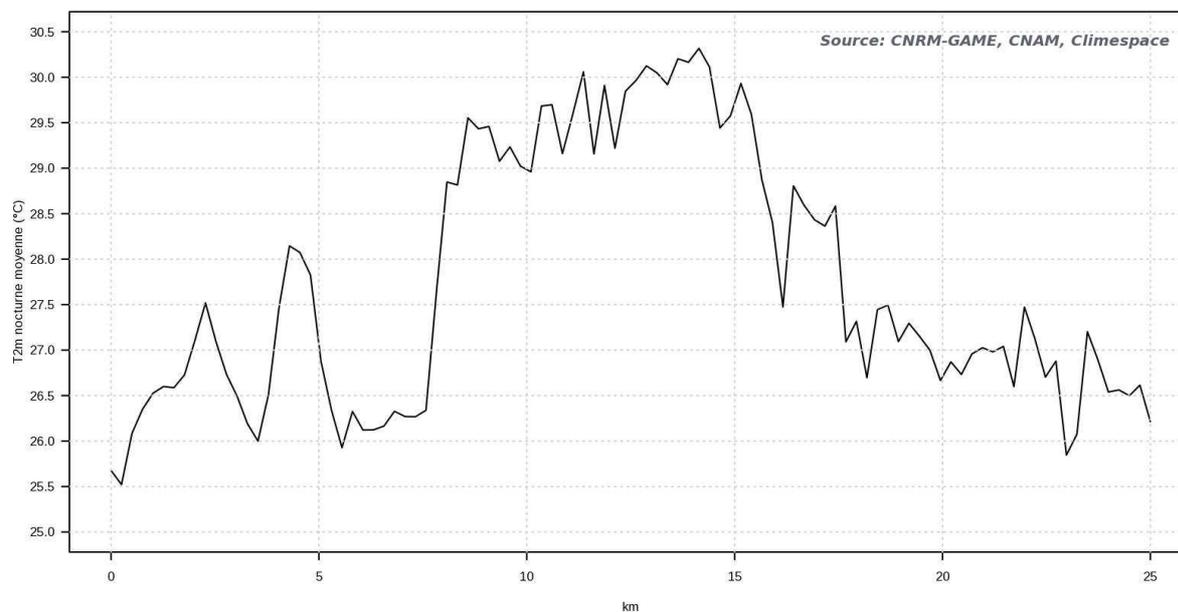


Figure 24. Coupe transversale (traversant les 8^e, 9^e, et 10^e arrondissements d'ouest en est) de la température moyenne nocturne à 2m pour la situation de référence

Cette coupe met en évidence une amplitude d'ICU dans cette direction d'environ 3.5°C, amplitude qui pourra être comparée avec celle des scénarios climatisés dans les sections qui suivent.

SIMULATION DU CAS CLIMATISE « REEL »

1. Caractéristiques du cas climatisé « REEL »

Cette simulation prend en compte les rejets issus de la climatisation dans leur forme actuelle (rejets humides et secs). Les figures suivantes présentent la fraction de bâtiments climatisés (Figure 25), ainsi que les flux de chaleur sensible et latente correspondant aux rejets de chaleur issus de la climatisation qui sont prescrits en entrée du modèle TEB (Figure 26). Le travail de collecte des données qui décrivent ce cas climatisé réel est présenté dans la section [Méthodologie](#) au paragraphe [6.2. Collecte des données de climatisation pour le cas réel](#) de ce document.

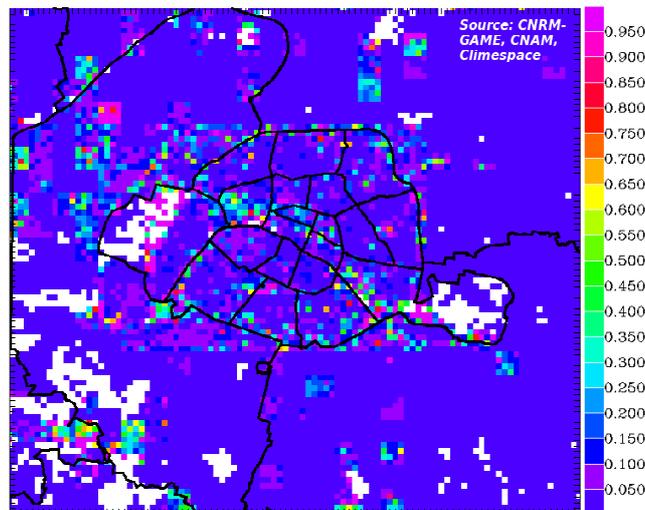


Figure 25. Fraction de bâtiments climatisés pour le cas climatisé REEL

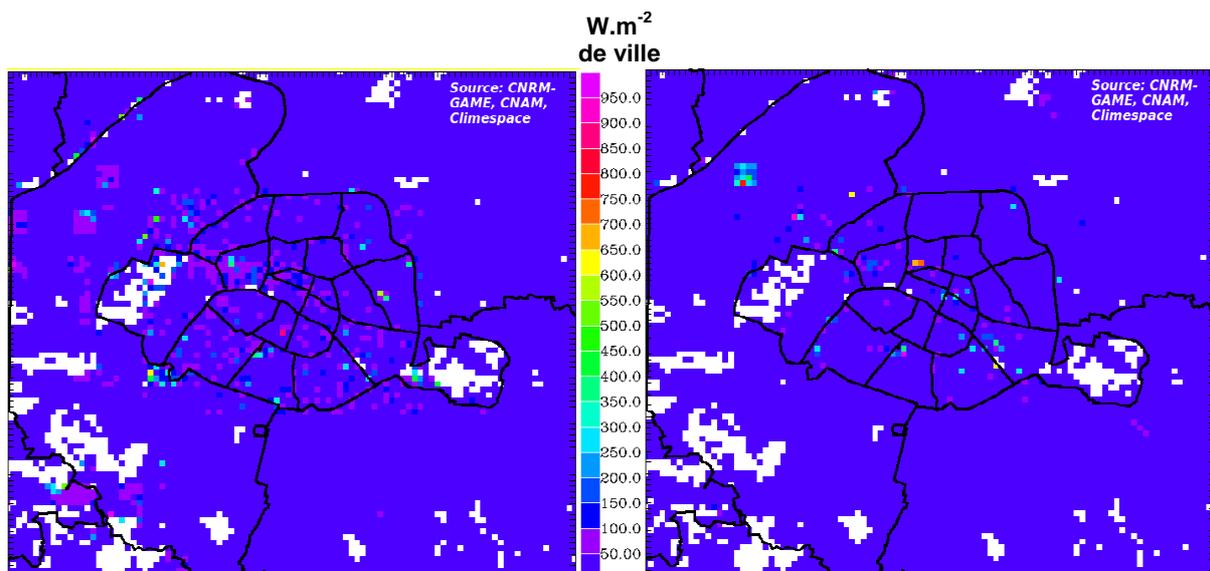


Figure 26. Flux de rejets de chaleur sensible (à gauche) et latente (à droite) prescrits en entrée de TEB pour le cas climatisé REEL (en $W.m^{-2}$ de ville)

2. Impacts sur la température dans les rues

Les impacts du scénario climatisé dit REEL sur les températures dans les rues sont présentés par séries « jour » et « nuit » (respectivement Figure 27 et Figure 28).

La Figure 27 montre la localisation et l'amplitude des anomalies moyennes de température observées en journée entre le cas climatisé réel et la référence. Les anomalies observées de jour vont de 0,25°C à 1°C sur l'ensemble du domaine Paris. Ces anomalies sont toutefois spatialement peu étendues. Elles sont localisées au niveau des zones les plus climatisées, avec seulement 3 points du domaine présentant une anomalie de température dont on peut être sûr à 95% qu'elle est supérieure à 1°C (et inférieure à 2°C). Il s'agit de points très fortement climatisés – Étoile dans le 8^e arrondissement et Montparnasse dans le 14^e (indiqués sur la Figure 27).

La situation est différente de nuit où les impacts sont spatialement plus étendus que pendant le journée (voir Figure 28). Les zones présentant des anomalies supérieures à 0.25°C sont spatialement plus étendues qu'en journée et on observe pour les zones les plus climatisées des anomalies supérieures à 0.5°C et 1°C (on voit entre autres apparaître de nuit les impacts des zones climatisées d'Opéra et de la Défense).

Finalement, la prise en compte des rejets « réels » issus de la climatisation ne génère dans le modèle que des impacts relativement limités en journée. Le fort mélange turbulent pendant la journée (sur une grande épaisseur de couche limite, de l'ordre de 2000m environ) explique la faible amplitude observée en journée. De nuit, du fait de la faible épaisseur de la couche limite (~100m) et du mélange turbulent beaucoup plus faible, les impacts sont supérieurs à ceux observés pendant la journée.

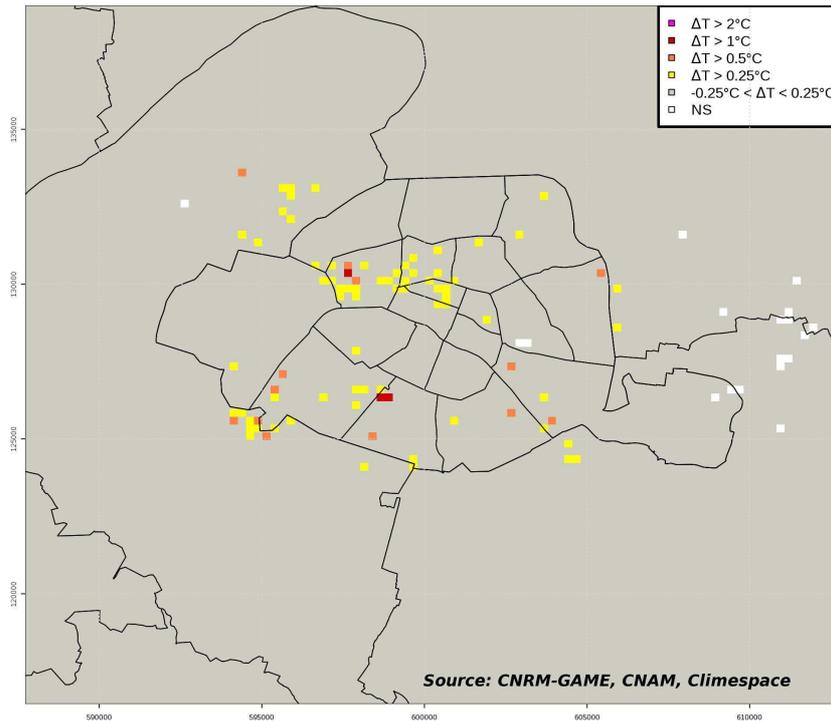


Figure 27. Anomalies de température à 2m entre le cas climatisé réel et la référence en journée

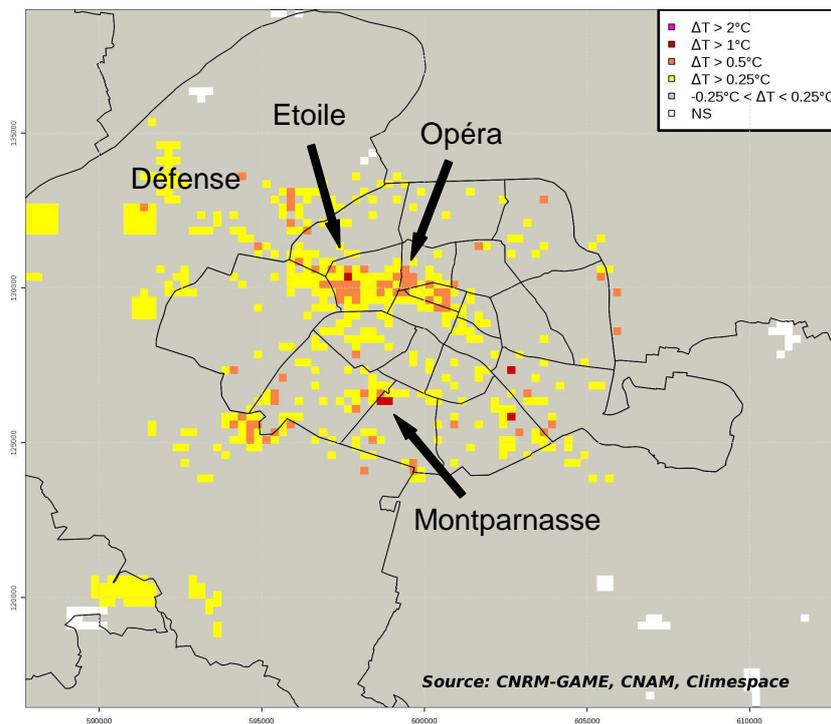


Figure 28. Anomalies de température à 2m entre le cas climatisé réel et la référence la nuit

3. Impacts sur la température au niveau des toits

Étant donné que les rejets de chaleur anthropiques générés par la climatisation sont effectués au niveau des toits, il était logique de vérifier les impacts des rejets sur la température au niveau des toits. Cependant, on ne dispose pour l'instant que de la température à 15m au-dessus des toits (point en bleu sur la Figure 30 à gauche). C'est donc à ce niveau que les anomalies de température sont étudiées.

L'analyse statistique des températures à 15m au-dessus des toits montre des impacts quasi-inexistants (Figure 29) avec des impacts plus « marqués » de nuit que de jour, pour les mêmes raisons que celles explicitées précédemment pour la température à 2m. Seuls les 2^e et 8^e arrondissement s montrent des zones pour lesquelles les anomalies de température nocturnes sont supérieures à 0,25°C (mais inférieures à 0,5°C).

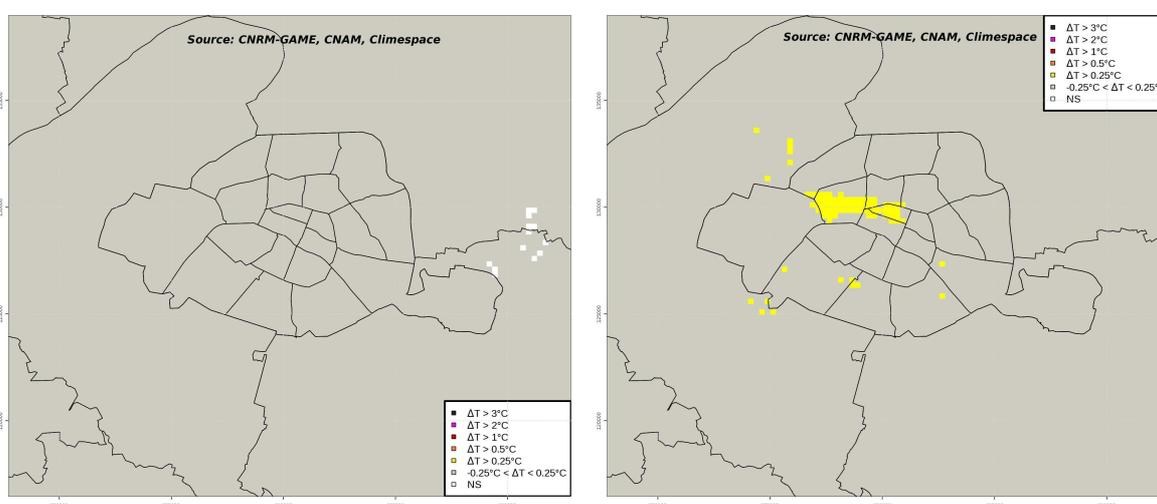


Figure 29. Anomalies de température à 15m au-dessus des toits de jour (à gauche) et de nuit (à droite)

On peut supposer que les faibles impacts observés sur la température au niveau des toits s'explique par la hauteur à laquelle nous étudions la température (15m au-dessus des toits, voir figure 23). Cette hauteur est probablement trop éloignée du niveau auquel les rejets de chaleur sont prescrits (au niveau des toits) pour observer des impacts élevés. Par exemple, de nuit, si on fait l'hypothèse que le profil vertical de température est plus instable dans le cas REEL que dans la REFERENCE à cause des rejets de chaleur (voir Figure 30 à droite), il apparaît normal d'observer des impacts plus faibles à 15m au-dessus des toits qu'à 2m dans la rue.

Pour vérifier cette dernière hypothèse, il faudrait comparer les profils verticaux de température dans la maille pour la simulation de référence et le cas climatisé réel pour un point fortement climatisé. Ceci nécessite des travaux supplémentaires au niveau du code informatique du modèle qui ne peuvent pas être finalisés dans le cadre du projet CLIM2 (notamment recombinaison la température dans chaque maille à partir des températures calculées par CANOPY par fraction de nature, ville et eau aux niveaux indiqués en rouge sur la planche de gauche de la Figure 30).

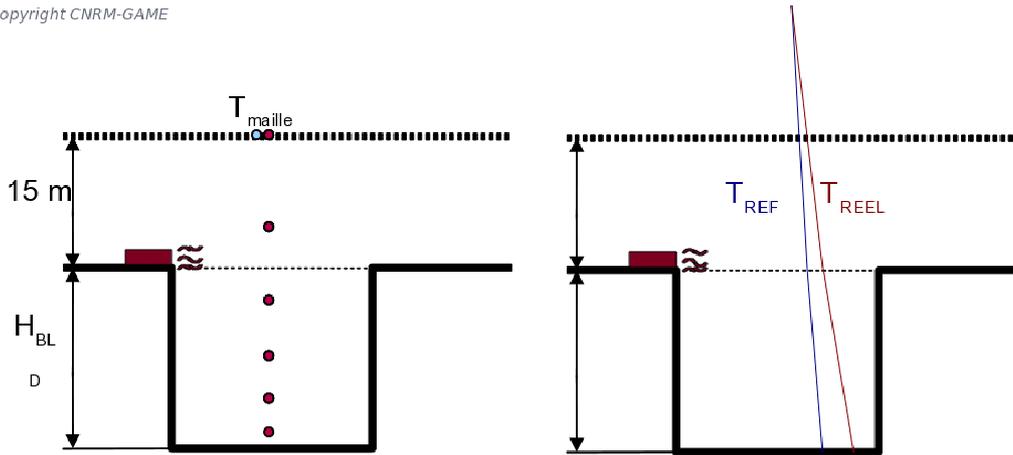


Figure 30. A gauche: températures calculées au niveau des toits (H_{BLD} représente la hauteur moyenne des bâtiments dans la maille considérée, T_{maille} la température moyenne dans la maille à 15m au-dessus des toits – c'est donc une hauteur qui est variable d'une maille à l'autre). A droite: profils verticaux théoriques de température nocturne dans les cas de référence (REF) et de cas climatisé réel (REEL)

4. Impacts sur l'îlot de chaleur urbain

L'îlot de chaleur urbain (ICU) moyen pour le cas climatisé REEL a été calculé de la même façon que pour la simulation de référence (Figure 23) de façon à être comparable. La Figure 31 illustre les différences spatiales de structure de l'îlot de chaleur entre la simulation de référence (planche de gauche) et le cas climatisé REEL (planche de droite).

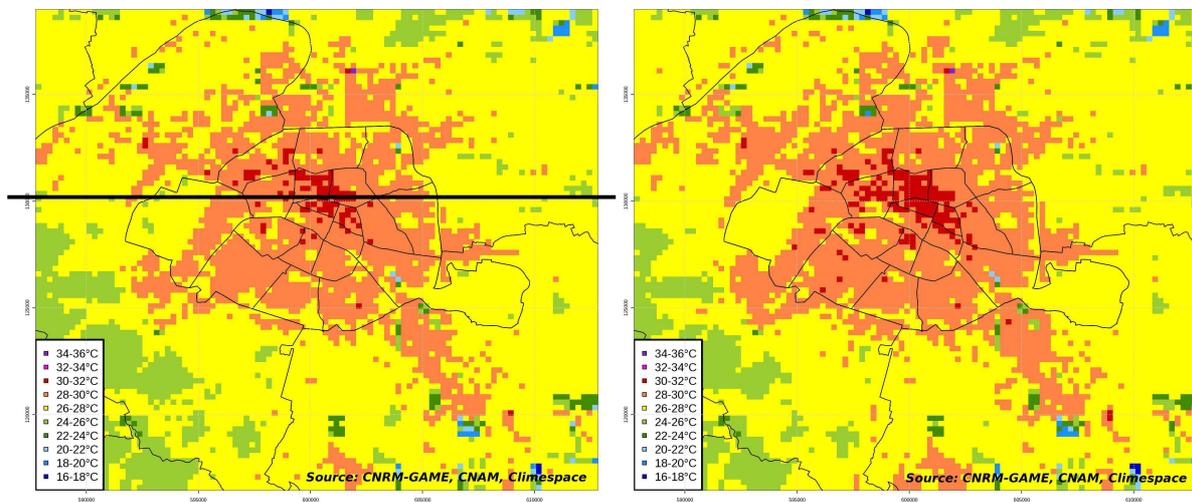


Figure 31. Comparaison des îlots de chaleur de la référence (à gauche) et du cas climatisé REEL (à droite)

Dans un scénario de climatisation REEL, l'ICU moyen diagnostiqué est relativement équivalent à celui d'une situation de référence sans climatisation (amplitude maximale comprise entre 4 et 8°C pour l'ensemble du domaine), avec un étalement légèrement supérieur des zones les plus chaudes au centre de Paris (2°, 3°, 8°, 9° et 10°) par rapport à la situation de référence. La coupe transversale ouest-est présentée (Figure 32, indiquée en noir sur la Figure 31) montre les caractéristiques spatiales de l'ICU pour la direction considérée.

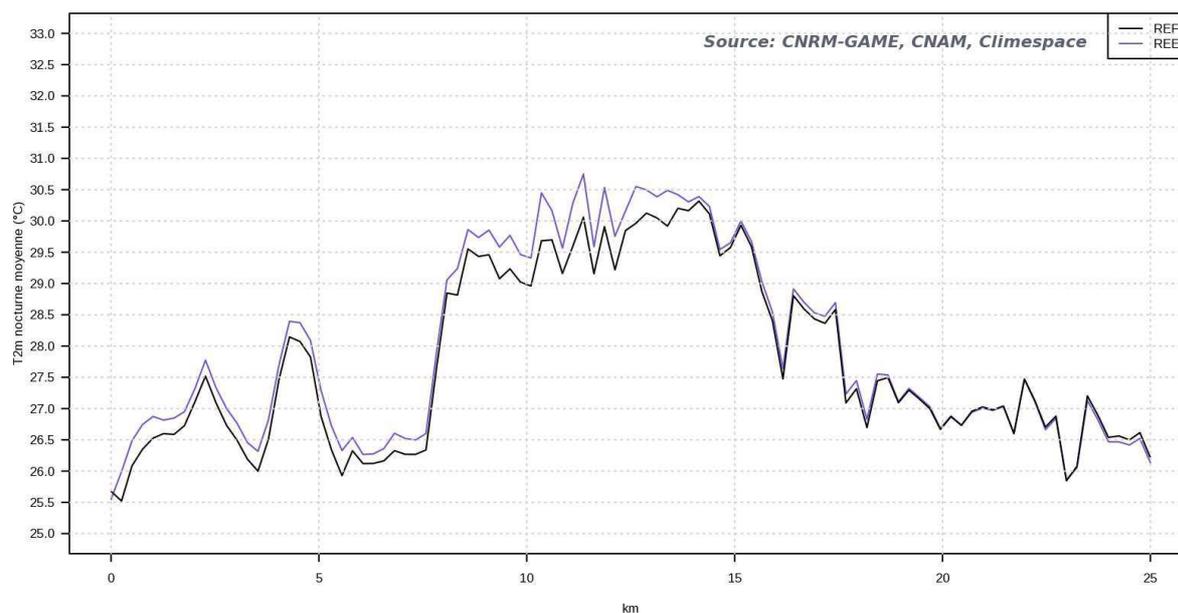


Figure 32. Coupe transversale (traversant les 8^e, 9^e, et 10^e arrondissements d'ouest en est) de la température moyenne nocturne à 2m pour la situation de référence et le cas climatisé REEL

Cette coupe présente une structure comparable à celle de la situation de référence, avec une légère augmentation des températures aux-dessus des zones densément urbanisées (un demi degré) qui est corrélée à une augmentation similaire à l'ouest de Paris, y compris au-dessus des zones du bois de Boulogne et de Seine. Par conséquent, la structure et l'amplitude de l'ICU sont globalement identiques à celles de la situation de référence dans cette direction.

SIMULATION DE 3 SCENARIOS DE CLIMATISATION

1. Choix des scénarios

L'objectif étant de comparer et d'estimer l'influence des systèmes de refroidissement secs sur l'importance de l'ICU, plusieurs configurations ont été simulées:

Scénario SEC: Cette simulation prend en compte les besoins en froids actuels estimés dans le cas REEL, mais suppose qu'ils sont tous satisfaits par des systèmes de refroidissement secs : les systèmes secs existants et identifiés dans le cadre de l'étude sont conservés, mais tous les systèmes humides (individuels et réseau de froid urbain) sont substitués par des systèmes de refroidissement secs.

Scénario 2SEC : On suppose que les besoins en froid seront doublés d'ici 2030 par rapport à l'existant, et que sont tous satisfaits par des systèmes de refroidissement secs.

Scénario CLIMOR : Dans ce scénario, les besoins en froid simulés à l'échelle 2030 sont tous satisfaits par des systèmes de refroidissement humides associés à un ou des réseaux de froid urbains, qui n'émettent aucune chaleur dans l'air dans les rues.

2. Préparation des données

2.1. Scénario SEC : répartition des rejets humides en secs

Dans ce cas, nous avons supposé que tous les rejets étaient en sec. A cette fin, le cadastre des rejets thermiques est obtenu avec les règles suivantes :

- * La décentralisation de Climespace se fait à partir de la base de données commerciale fournie, en considérant que chaque client aurait son installation autonome sèche si Climespace n'existait pas.
- * Toutes les centrales de Climespace ont donc été supprimées et distribuées.
- * La puissance frigorifique attribuée à chaque client correspond à la puissance souscrite chez Climespace. On applique ensuite un COP de 2 (installation autonome sèche) pour calculer la puissance de rejet thermique. On considère que cette puissance est la puissance maximale (à utiliser pour les courbes horaires).
- * Toutes les TAR (autres que Climespace) ont été converties en sec avec un coefficient de 1,071. Pour cela, on fait l'hypothèse que le COP d'une TAR est de l'ordre de 2,5, et convertie en sec le COP diminue à 2. On a alors le ratio :

$$\frac{1 + \frac{1}{COP_{sec}}}{1 + \frac{1}{COP_{TAR}}} = 1,071 \quad (8)$$

qui correspond à l'excès de rejet thermique d'une unité de climatisation ayant un COP de 2 au lieu de 2,5 pour les TAR.

- * On conserve la dissipation thermique des transformateurs électriques à 3% de

- la puissance électrique.
- * La liste des clients utilisée va jusqu'à octobre 2009.

2.2. Scénario 2SEC: répartition de la puissance doublée

Dans ce scénario, l'idée est d'étudier un cas extrême à savoir une forte augmentation de climatisation individuelle à Paris et alentours. Cependant compte tenu de la sous estimation vraisemblable de la puissance rejetée, il est possible que ce scénario soit proche de la réalité. A partir du cadastre des rejets thermiques tout en sec, nous avons doublé le total de la puissance thermique en attribuant 68% de cette augmentation à Paris intra-muros et 32% à l'extérieur.

Afin d'être réaliste, nous avons tenu compte de la surface habitable de chaque maille. En effet, dans chaque maille, la surface climatisée ne pouvait être supérieure à la surface construite. Si cela était le cas, le surplus de puissance était redistribué à l'ensemble des autres mailles. Un ratio de climatisation est également imposé de 90W/m² (m² habitable) , ce qui correspond à un rejet de 126 W/m².

2.3. Scénario CLIM0R: climatisation sans rejets dans l'air

Dans ce scénario, on considère que les rejets thermiques sont émis ailleurs que l'air (sous sol, Seine ...). On maintient la même surface climatisée dans les bâtiments que dans le scénario 2SEC.

3. Caractéristiques des scénarios simulés

Le Tableau 13 rappelle les différents cas et scénarios étudiés dans le cadre de CLIM2. Les paragraphes suivant font l'analyse des résultats de simulation de 3 scénarios: SEC, DOUBLESEC et CLIM0R.

Tableau 13. Présentation des 3 scénarios testés par rapport aux simulations de la référence et du cas climatisé « réel »

Simulation	Description
REF	Simulation de référence, sans prise en compte de la climatisation
REEL	Simulation avec prise en compte des rejets issus de la climatisation, dans leur forme actuelle (rejets humides et rejets secs). Les fraction de bâtiments climatisés, flux de rejets de chaleur sensible et latente générés par la climatisation utilisés pour ce cas climatisé sont présentés au paragraphe 1. Caractéristiques du cas climatisé « REEL » de la section Simulation du cas climatisé « réel » de ce document (Figure 25 et Figure 26).
SEC	Scénario avec prise en compte des rejets issus de la climatisation, avec transformation de tous les rejets humides en secs (voir paragraphe 2. Préparation des données de cette section). Puissance globale des rejets secs sur le domaine : 5,16GW. Les planches de gauche des Figure 33 et Figure 34 présentent respectivement la fraction de bâtiments climatisés et les flux de rejets de chaleur sensibles générés par la climatisation utilisés en entrée de TEB pour ce scénario.
DOUBLESEC (2SEC)	Scénario basé sur le scénario SEC avec doublement de la puissance globale des rejets sur l'ensemble du domaine. La répartition de cette puissance globale (10,32 GW) en chaque point de grille du domaine est décrite au paragraphe 2. Préparation des données de cette

	<p>section. Le doublement de puissance correspond à un scénario futuriste d'équipement de climatisation (années 2030s), avec une augmentation par rapport au scénario SEC répartie à 68% sur Paris intra-muros et 32% à l'extérieur de Paris intra-muros. Les planches de droite des Figure 33 et Figure 34 présentent respectivement la fraction de bâtiments climatisés et les flux de rejets de chaleur sensibles générés par la climatisation utilisés en entrée de TEB pour ce scénario.</p>
CLIM0R	<p>Scénario avec climatisation activée mais aucun rejet de chaleur dans l'air (méthodes alternatives supposées existantes). La fraction de bâtiments climatisés utilisée pour ce scénario est la même que celle du scénario DOUBLESEC (voir planche de droite de la Figure 33).</p>

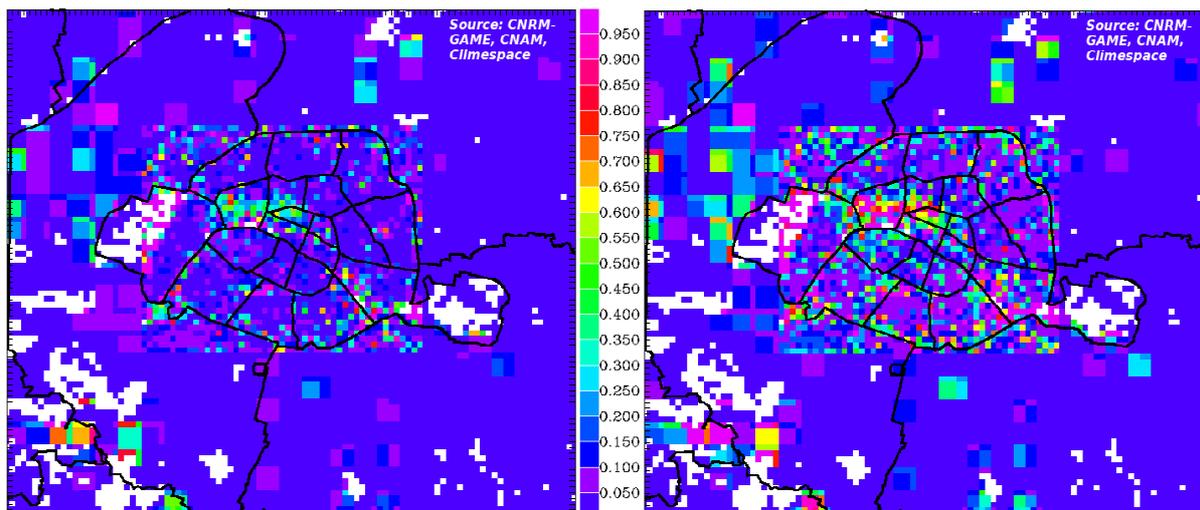


Figure 33. Fraction de bâtiments climatisés pour les scénarios climatisés SEC (à gauche) et DOUBLESEC (à droite)

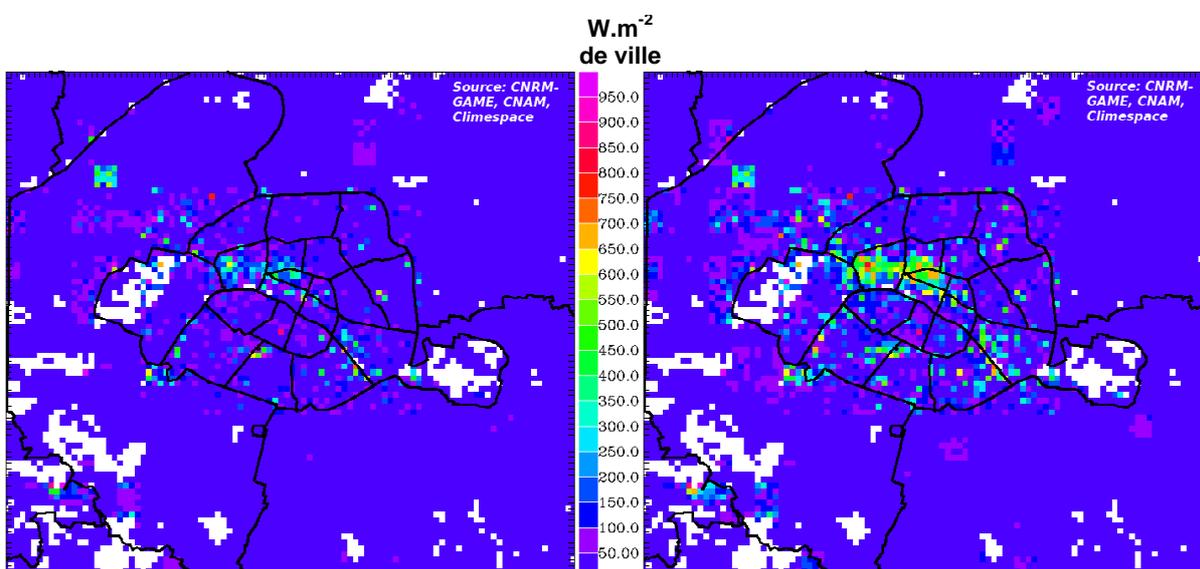


Figure 34. Flux de rejets de chaleur sensible (en $W.m^{-2}$ de ville) prescrits en entrée de TEB pour les scénarios climatisés SEC (à gauche) et DOUBLESEC (à droite)

Les résultats de simulation des scénarios de climatisation ont subi un traitement statistique identique à celui mis en place pour traiter les résultats de la référence et du cas climatisé « réel ». Pour un rappel de ce traitement, on se reportera au paragraphe « [7. Traitement des sorties de simulation](#) » de la section [Méthodologie](#).

Comme pour le cas climatisé réel, les données analysées dans cette section sont la température dans la rue à 2m et la température à 15m au-dessus des toits.

4. Impacts sur la température dans les rues du scénario SEC

Ce scénario vise à quantifier les anomalies de température imposées aux rues dans une situation où les rejets humides seraient converties en rejets secs (si il n'existait plus de tours à refroidissement humide - TAR). Les figures suivantes présentent les anomalies de température observées dans les rues (à 2m), de jour (Figure 35) et de nuit (Figure 36).

On observe en journée des anomalies de température d'au moins 0,5°C. Ces anomalies sont spatialement étendues dans les 2°, 8° et 9° arrondissements et le secteur de La Défense, et très localement des anomalies allant jusqu'à 1 voire 2°C (Montparnasse et Étoile).

La nuit, les anomalies de température sont spatialement plus étendues qu'en journée (comme observé dans le cas climatisé réel) et d'au moins 0,5°C pour les 1°, 2°, 8° et 9° arrondissements ainsi que pour le secteur de La Défense. Certaines zones (plusieurs points de grille) montrent pour ce scénario des anomalies au-delà de 1°C. Des anomalies de température supérieures à 2°C (mais inférieures à 3°C) apparaissent très localement (points de grille isolés) dans certaines des zones les plus climatisées (dans les secteurs Etoile, Montparnasse et Opéra).

Les impacts observés en terme de température pour ce scénario sont plus élevés et spatialement plus étendus que ceux du cas climatisé « réel », avec des zones continues qui présentent des anomalies au moins supérieures à 0,25°C (« bulles » d'anomalies positives sur la Figure 35).

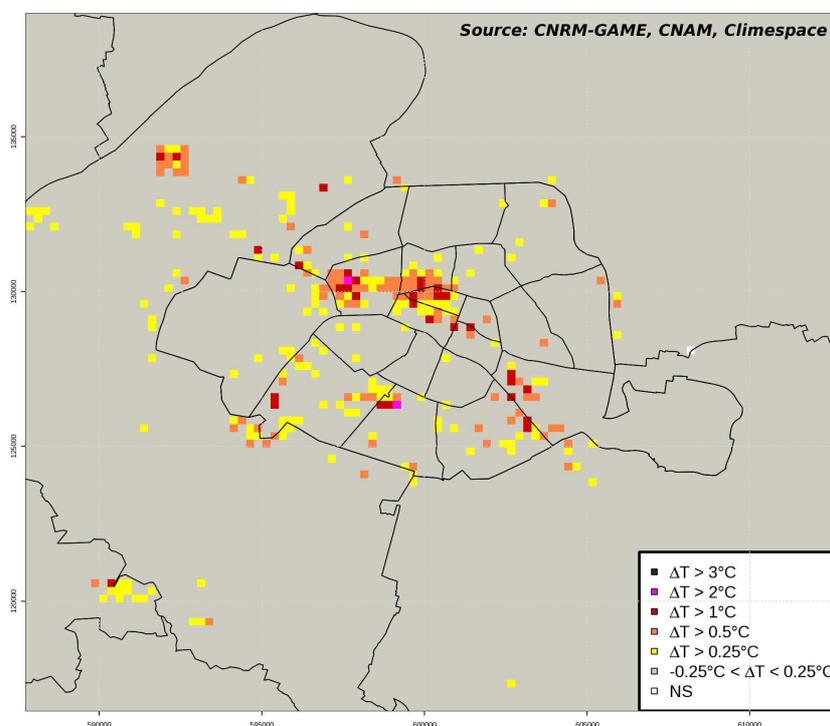


Figure 35. Anomalies de température à 2m entre le scénario climatisé SEC et la référence en journée

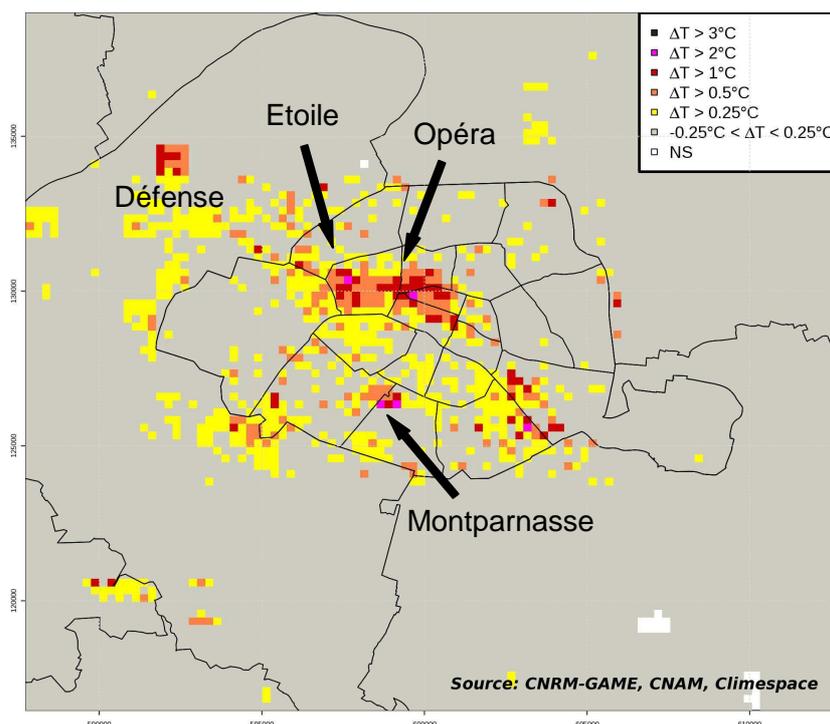


Figure 36. Anomalies de température à 2m entre le scénario climatisé SEC et la référence la nuit

5. Impacts sur la température dans les rues du scénario 2SEC

Les figures suivantes présentent les anomalies de température dans les rues (à 2m) estimées pour le jour (Figure 37) et la nuit (Figure 38) pour le scénario DOUBLESEC. La Figure 39 a été ajoutée afin de permettre de comparer les anomalies de température estimées pour le scénario 2SEC aux situations climatisées précédentes (REEL et SEC).

Les anomalies observées en journée sont équivalentes à celles observés de nuit pour le scénario SEC en terme d'extension spatiale et légèrement plus chaudes que pour le scénario SEC (voir Figure 39). Ce qui est remarquable dans ce scénario, c'est que les rejets secs prescrits ont un impact spatialement continu et élevé en journée supérieur à 1 voire 2°C dans certains arrondissements – les 2^e, 8^e et 9^e arrondissements.

La nuit, les impacts sont beaucoup plus marqués que pour le scénario SEC (voir Figure 39) et l'emprise spatiale des impacts a fortement augmenté, avec des répercussions sur la température qui s'étendent au-delà des zones où les rejets sont prescrits (Ouest de Paris, notamment bois de Boulogne).

Les 2^e, 3^e et 8^e arrondissements montrent à nouveau les impacts les plus forts (de 1 à 2°C sur la quasi-totalité des zones concernées).

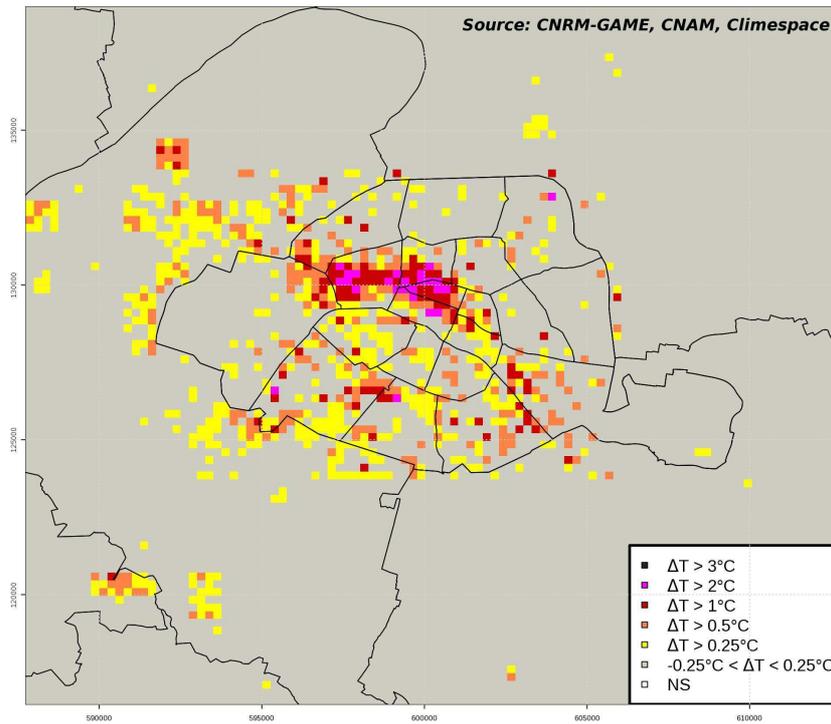


Figure 37. Anomalies de température à 2m entre le scénario climatisé DOUBLESEC et la référence en journée

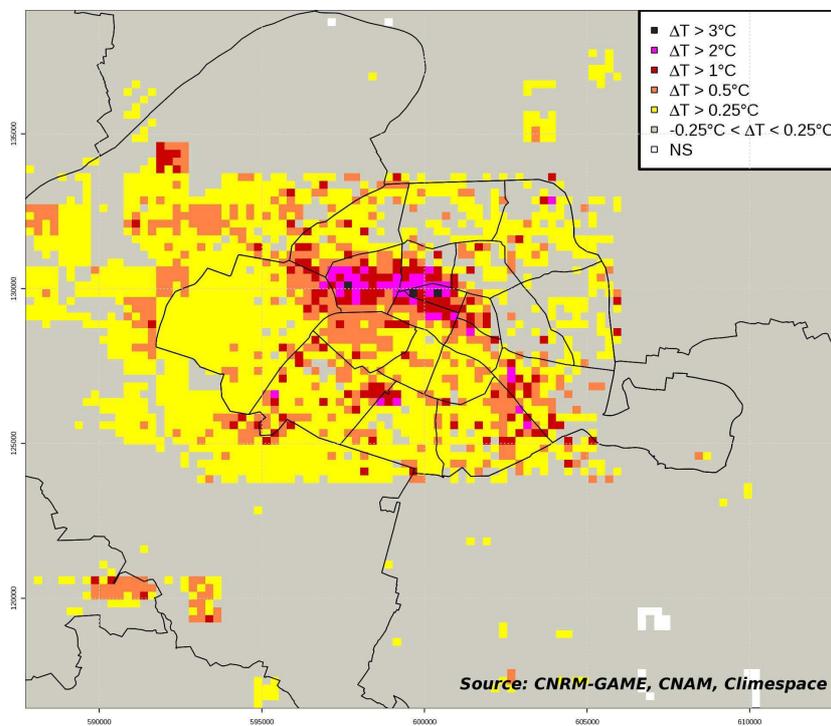


Figure 38. Anomalies de température à 2m entre le scénario climatisé DOUBLESEC et la référence la nuit

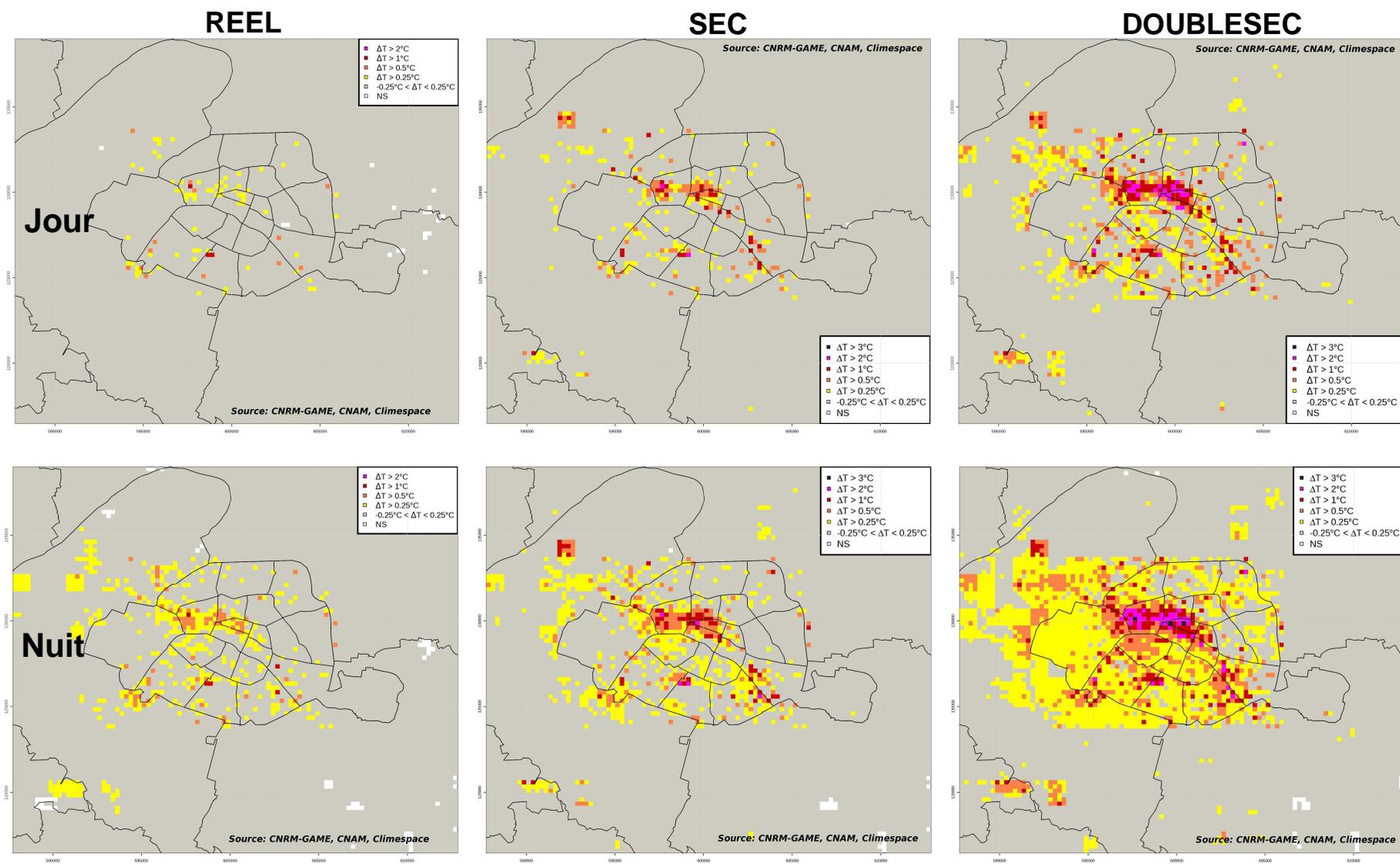


Figure 39. Anomalies de température dans les rues estimées par rapport à la référence de jour (en haut) et de nuit (en bas) pour les scénarios REEL (à gauche), SEC (au centre) et 2SEC (à droite)

6. Impacts sur la température dans les rues du scénario CLIM0R

Ce scénario consiste à estimer l'impact sur la température de l'air dans les rues dans un cas futuriste (années 2030) où la fraction de bâtiments climatisés serait identique à celle du scénario DOUBLESEC mais pour lesquels les rejets de chaleur ne seraient pas faits dans l'air (d'où 0 rejet dans l'air - « 0R »). Ce scénario sous-entend que des méthodes alternatives sont mises en place, tels rejets dans la Seine, rejets dans le sous-sol, etc...

Du fait qu'on ne prescrit aucun rejet de chaleur dans l'air quand bien même les bâtiments sont climatisés à 26°C, on s'attend à des impacts sur la température dans les rues d'amplitude très faibles et potentiellement négatifs. Par conséquent, les seuils négatifs sur lesquels le test statistique a été effectué ont été affinés et les valeurs des seuils suivants ont été utilisées: -0,5 ; -0,4 ; -0,3 ; -0,2 ; -0,1 ; 0,25 ; 0,5 ; 1 ; 2 ; 3 °C (Figure 40).

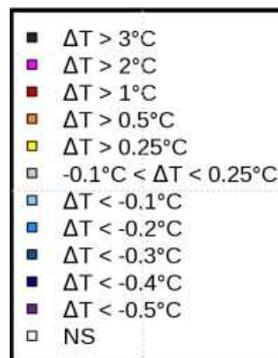


Figure 40. Échelle utilisée pour les anomalies de température estimées pour le scénario CLIM0R

En effet, l'analyse des anomalies de température générées par le modèle a montré des impacts faibles sur les températures dans la rue. Les impacts diurnes et nocturnes de ce scénario climatisé CLIM0R sur la température dans les rues à 2m sont présentés respectivement Figure 41 et Figure 42.

En journée, l'activation de la climatisation dans les bâtiments ne réduit pas la température de plus de 0,2°C (Figure 41), ce qui est assez limité et surtout peu perceptible par les habitants. La réduction de température est légèrement plus marquée de nuit que de jour (en quelques points de maille, la réduction de température s'est creusée de 0,1°C), bien que toujours inférieure à 0,5°C (Figure 42). Ces impacts sont donc marginaux et on ne peut pas conclure que ce type de gestion de la climatisation entraînerait un rafraîchissement significatif et sensible des rues.

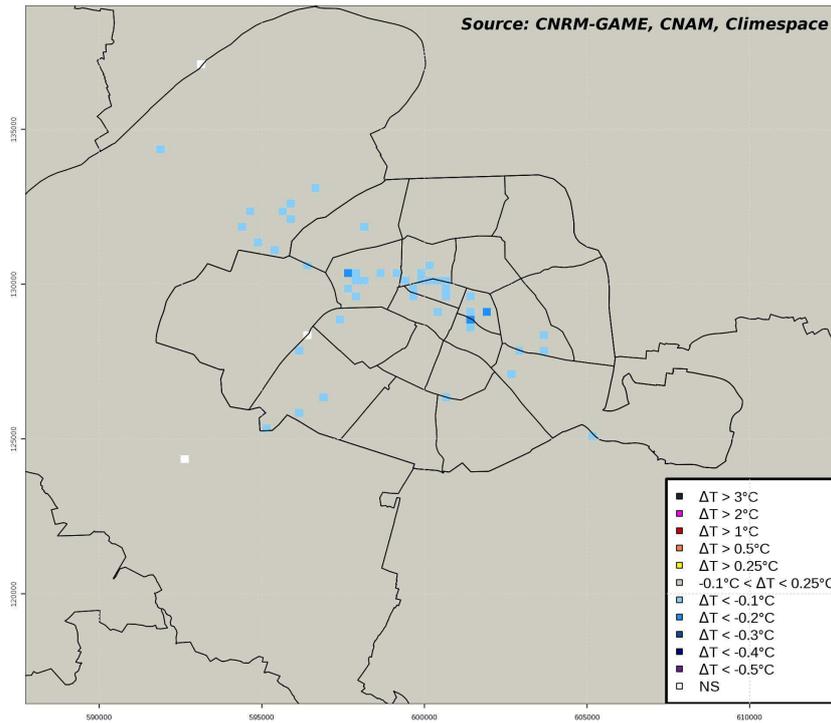


Figure 41. Anomalies de température à 2m entre le scénario climatisé CLIMOR et la référence en journée

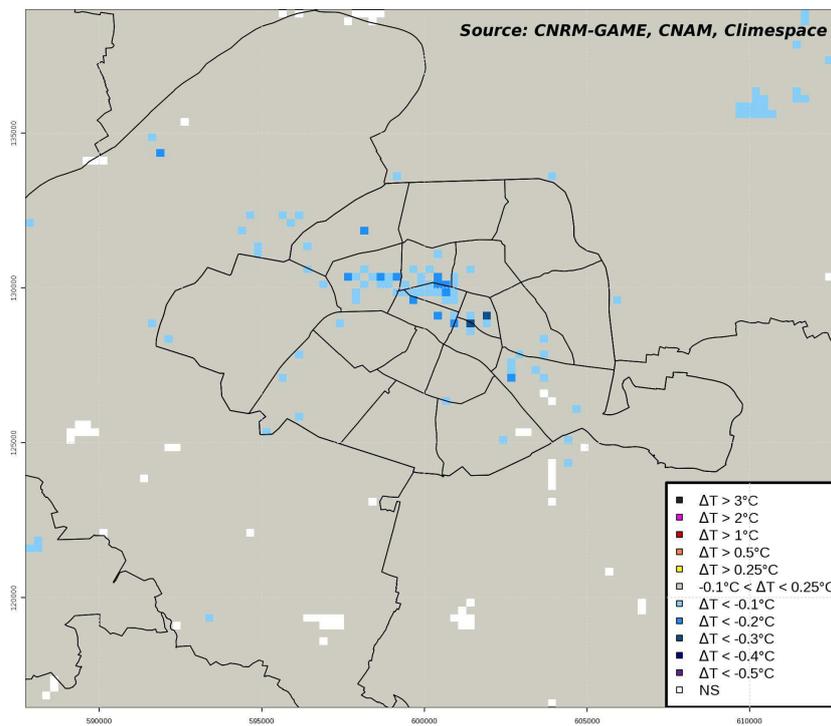


Figure 42. Anomalies de température à 2m entre le scénario climatisé CLIMOR et la référence de nuit

7. Impacts sur les températures au niveau des toits

Malgré les faibles impacts sur la température observés au niveau des toits pour la simulation du cas climatisé REEL (voir discussion et hypothèse paragraphe 3. [Impacts sur la température au niveau des toits](#)), les impacts sur les températures au niveau des toits des scénarios climatisés ont été analysés pour vérifier leur cohérence avec ceux observés dans le cas REEL.

Seuls les impacts sur les températures des scénarios pour lesquels des rejets de chaleur dans l'air ont été simulés et prescrits au niveau des toits (SEC et DOUBLESEC) ont été analysés. Ces impacts sont présentés Figure 43, à gauche pour le scénario SEC, à droite pour le scénario DOUBLESEC.

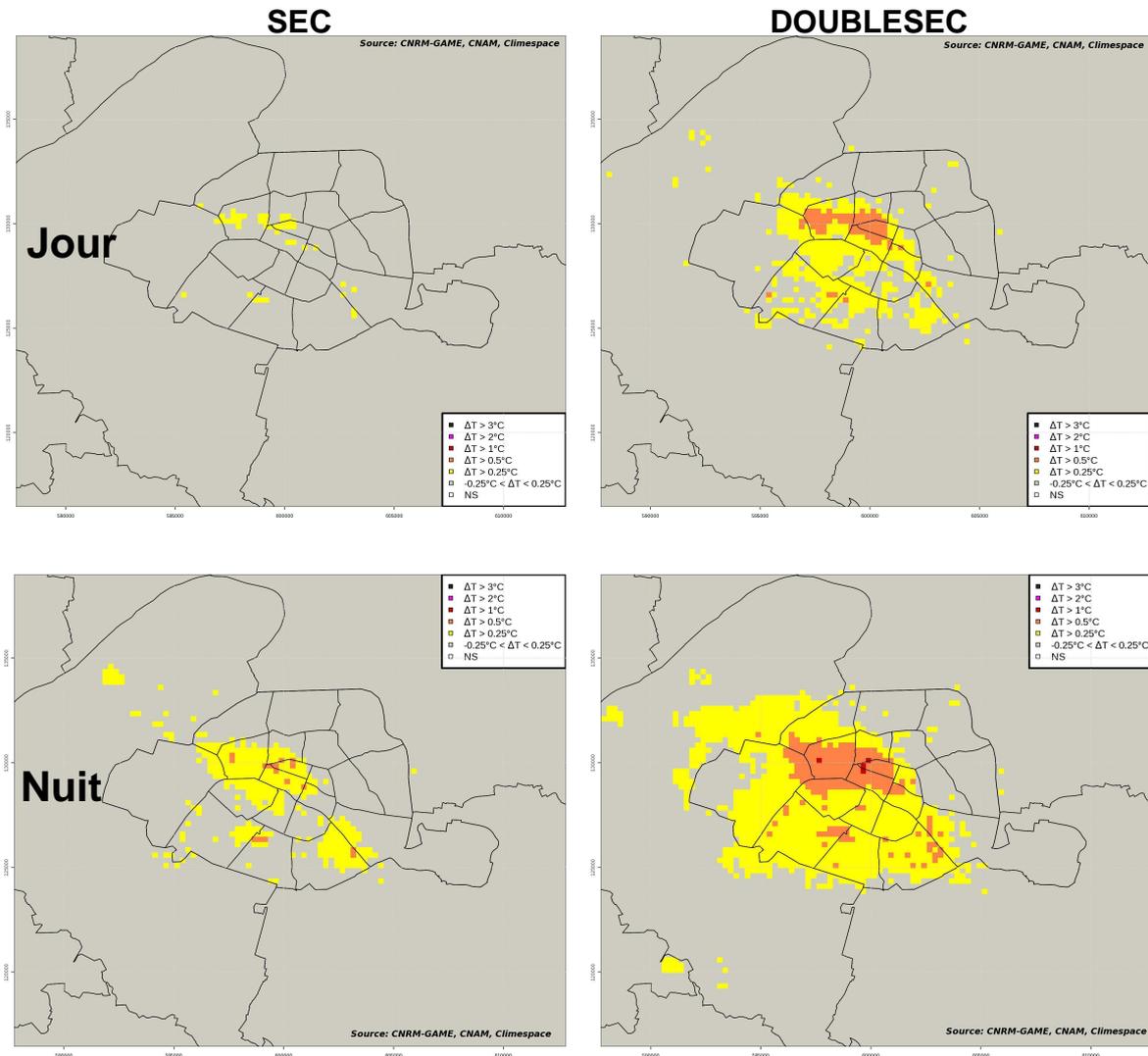


Figure 43. Anomalies de température à 15m au-dessus des toits estimées de jour (en haut) et de nuit (en bas) pour les scénarios SEC (à gauche) et 2SEC (à droite) par rapport à la référence

On peut voir sur la Figure 43 que l'amplitude et l'extension spatiale des impacts sur la température au niveau des toits sont croissantes avec l'ordre de scénario suivant: SEC(jour) < SEC(nuit) < DOUBLESEC(jour) < DOUBLESEC(nuit).

Comme pour le cas climatisé réel, on observe pour ces scénarios de rejets secs (simple et doublé) des impacts plus faibles au-niveau des toits que dans les rues à

2m (de 1 à 2°C de moins). Les arrondissements les plus touchés par l'augmentation de température (d'environ 0,5°C) au niveau des toits sont les 1^{er}, 2^{er} et 8^{er} arrondissements. On remarque aussi pour le scénario DOUBLESEC des impacts nocturnes qui ont une forme spatiale plus continue au niveau des toits qu'à 2m dans la rue.

8. Impacts sur l'îlot de chaleur urbain

Les îlots de chaleur urbains moyens (ICUs) pour les 3 scénarios climatisés ont été analysés comme dans les cas précédents (voir paragraphes correspondant des sections [Simulation de référence](#) et [Simulation du cas climatisé « réel »](#)). La Figure 44 illustre les différences spatiales de structure de l'ICU moyen entre la simulation de référence (planche en haut à gauche) et les scénarios climatisés SEC (planche en bas à gauche) et DOUBLESEC (planche en bas à droite), avec la structure d'ICU pour le cas REEL en haut à droite pour comparaison.

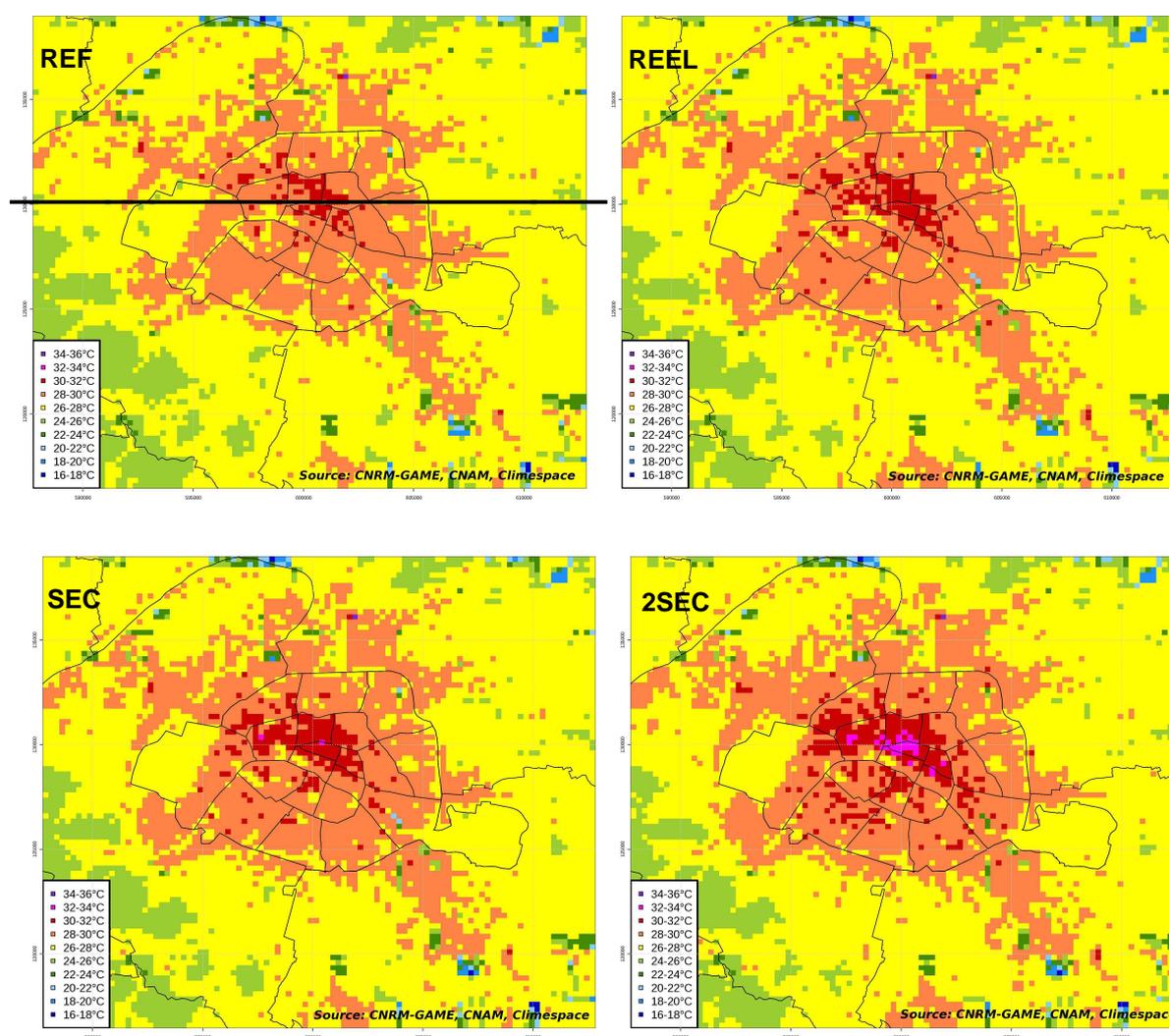


Figure 44. Comparaison des îlots de chaleur de la situation de référence (en haut à gauche), du cas climatisé REEL (en haut à droite) et des scénarios climatisés SEC (en bas à gauche) et DOUBLESEC (en bas à droite)

Dans le cas du scénario climatisé SEC, l'ICU moyen diagnostiqué reste à première vue équivalent en amplitude à celui diagnostiqué dans la situation climatisée réelle (au maximum de 4 à 8°C sur le domaine) mais l'étalement des zones les plus

chaudes au centre de Paris s'est amplifié par rapport à la situation climatisée réelle. L'amplification/creusement de l'ICU apparaît avec le scénario climatisé DOUBLESEC dont l'amplitude maximale sur le domaine peut varier de 8 à 10°C. L'évolution spatiale de la température pour les scénarios SEC et DOUBLESEC pour la coupe transversale présentée dans les autres simulations prend la forme présentée Figure 45.

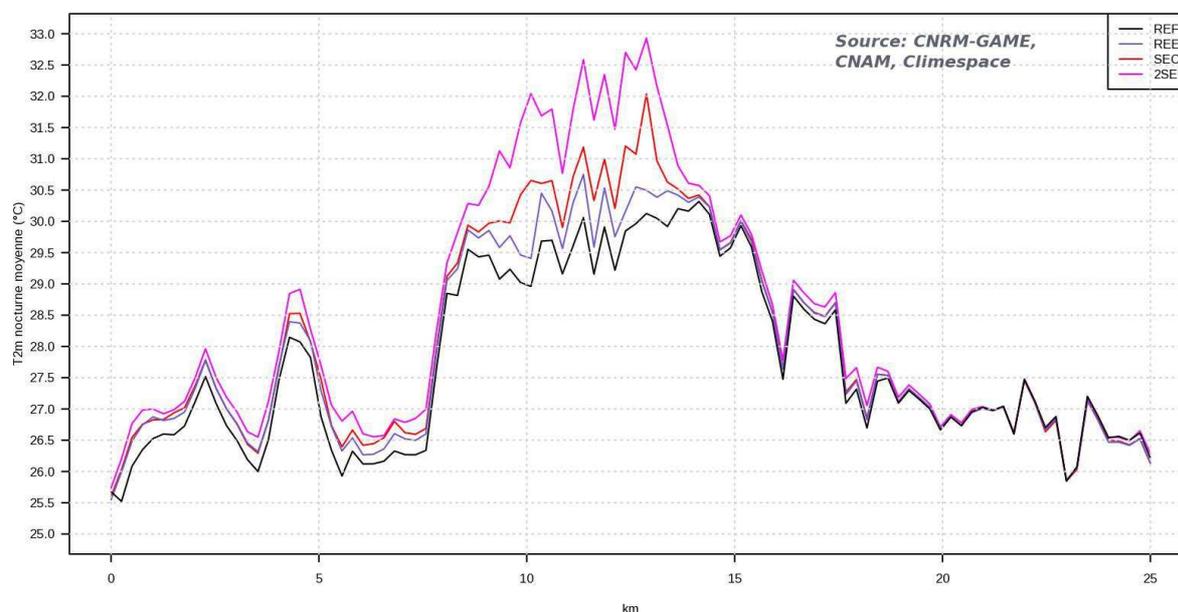


Figure 45. Coupe transversale (traversant les 8°, 9°, et 10° arrondissements d'ouest en est) de la température moyenne nocturne à 2m pour la situation de référence et les cas de scénarios climatisés (REEL, SEC et 2SEC)

Avec des structures comparables aux ICUs précédemment décrits, la coupe de la Figure 45 montre dans la direction considérée un creusement net de l'ICU moyen entre la situation de référence et chacun des scénarios avec rejets secs: l'amplitude de l'ICU est d'environ 4,5°C pour le scénario SEC, contre 5,5°C environ pour le scénario DOUBLESEC (soit respectivement 0,75°C et 1,75°C de plus que dans la situation de référence).

Le scénario climatisé CLIM0R, du fait de ses caractéristiques, a été comparé à la situation de référence et au scénario climatisé DOUBLESEC. Les différences spatiales de structure de l'ICU moyen entre la simulation de référence (planches du haut) et ces 2 scénarios climatisés (planches du bas) sont présentées Figure 46.

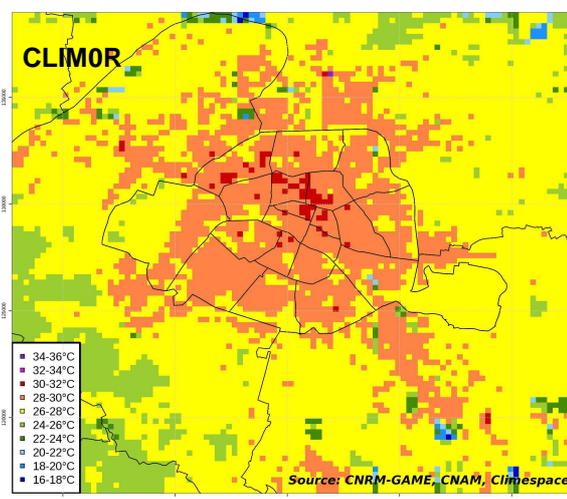
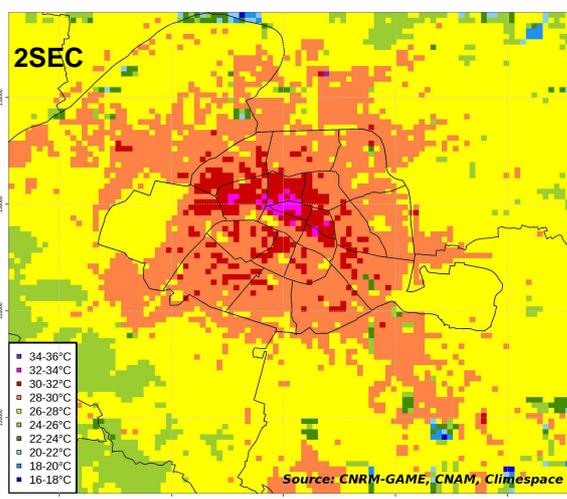
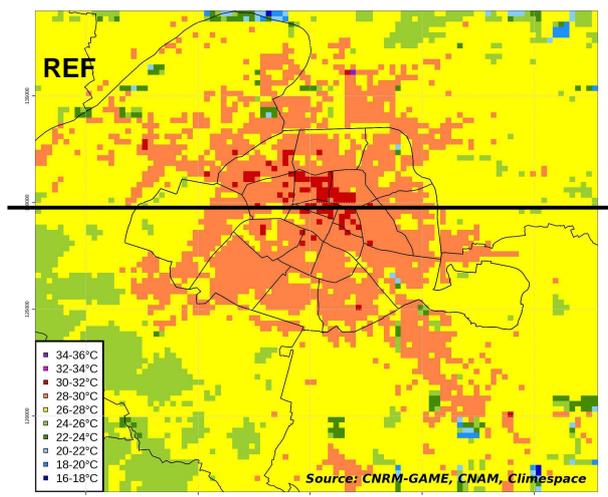


Figure 46. Comparaison des îlots de chaleur de la référence (en haut) et des scénarios climatisés DOUBLESEC (en bas à gauche) et CLIM0R (en bas à droite)

On obtient pour le scénario CLIM0R sans rejet de chaleur dans l'air une structure des températures très similaire dans l'espace et en amplitude à celle de la situation de référence. Seules certaines zones au centre de Paris (2°, 3°, 9°, et 10° arrondissements) présentent sous le scénario CLIM0R des températures légèrement plus faibles que dans la situation de référence. Mais ce "rafraîchissement des températures" par rapport à la situation de référence reste minime, comme le montre la coupe ouest-est Figure 47. Les impacts sur la température par rapport à la situation de référence (non climatisée) ne sont visibles que sur les zones densément urbanisées au centre de Paris, et leur amplitude est très limitée (entre 0 et -0.25°C, comme vu au paragraphe [6. Impacts sur la température dans les rues du scénario CLIM0R](#) de cette section).

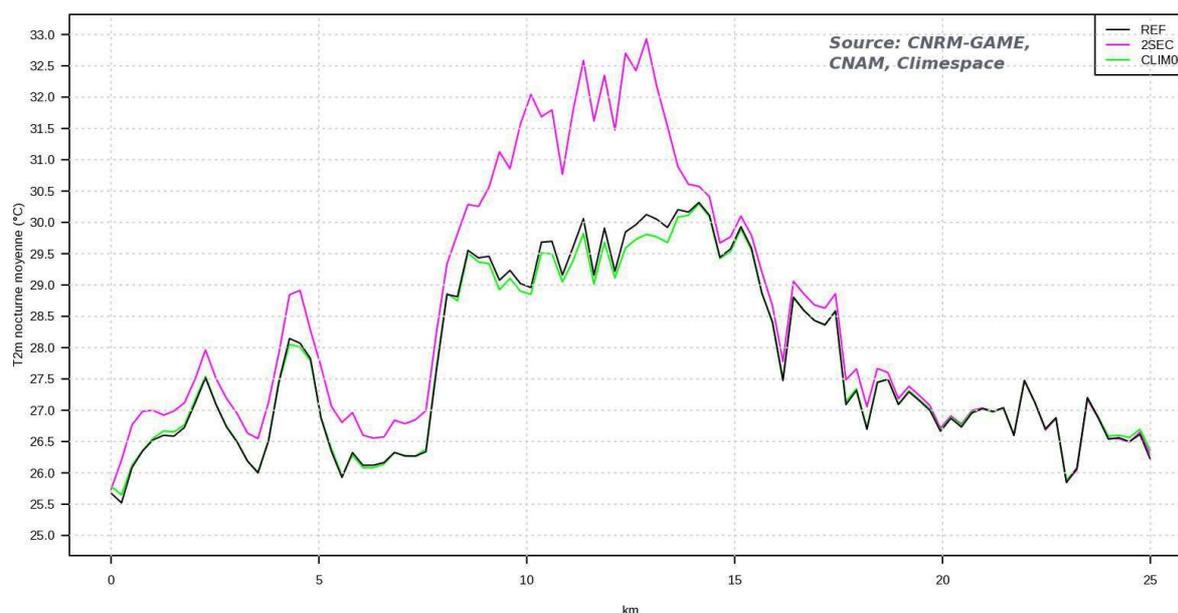


Figure 47. Coupe transversale (traversant les 8^e, 9^e, et 10^e arrondissements d'ouest en est) de la température moyenne nocturne à 2m pour la situation de référence et les scénarios climatisés SEC et 2SEC

La comparaison (Figure 47) des coupes transversales ouest-est des températures à 2m des scénarios CLIM0R et 2SEC (équivalent au CLIM0R en terme de climatisation mais pas de rejets montre dans la direction étudiée une différence en amplitude d'ICU moyen d'environ 1,75°C - différence logiquement équivalente à celle diagnostiquée précédemment entre le scénario DOUBLESEC et la situation de référence. En effet, du fait de l'absence de rejets de chaleur, on retrouve les mêmes conclusions qu'au paragraphe [6. Impacts sur la température dans les rues du scénario CLIM0R](#) : l'ICU moyen du CLIM0R dans la direction étudiée est très proche en structure et amplitude de celui observé en situation de référence; les différences, minimes, portent sur Paris intra-muros et sont comprises entre 0,1 et 0,5°C.

1. Bilan d'énergie de la simulation de référence

Afin de vérifier le bilan énergétique de la simulation de référence, nous avons calculée l'énergie échangée entre l'intérieur du bâtiment et sa paroi en moyenne journalière comme précisée au paragraphe [5. Prise en compte de la climatisation dans les simulations](#) de la section [Méthodologie](#). Pour cette simulation de référence, on s'aperçoit que ce terme est négatif et correspond à un refroidissement artificiel du bâtiment. La Figure 48 présente cette énergie, exprimée en terme d'énergie frigorifique journalière moyenne, pour chaque jour entre le 9 et le 13 août 2003.

Le bilan énergétique présenté Figure 48 met en évidence la non-fermeture en énergie du modèle de bâtiment, qui provient du fait que dans la version actuelle du modèle, la température interne des bâtiments n'est pas calculée en fermeture du bilan d'énergie mais par une équation d'évolution propre. Les diagnostics d'énergie frigorifiques des planches de la Figure 48 présentent l'ordre de grandeur de ces énergies frigorifiques « excédentaires », qui font que la simulation de référence apparaît comme « légèrement climatisée ». Au fur et à mesure des jours de canicule, l'énergie frigorifique augmente légèrement sur le domaine, en accord avec l'augmentation des températures. Sur Paris intra-muros, l'« excédent » d'énergie pour la situation de référence varie de 10 à 19 $W.m^{-2}$ de ville entre le début et la fin de la canicule. Pour connaître l'ordre de grandeur réel de cet excédent d'énergie par maille (en $W.m^{-2}$ au sol), il suffit de multiplier en chaque point du domaine l'énergie présentée Figure 48 par la fraction de ville dans la maille.

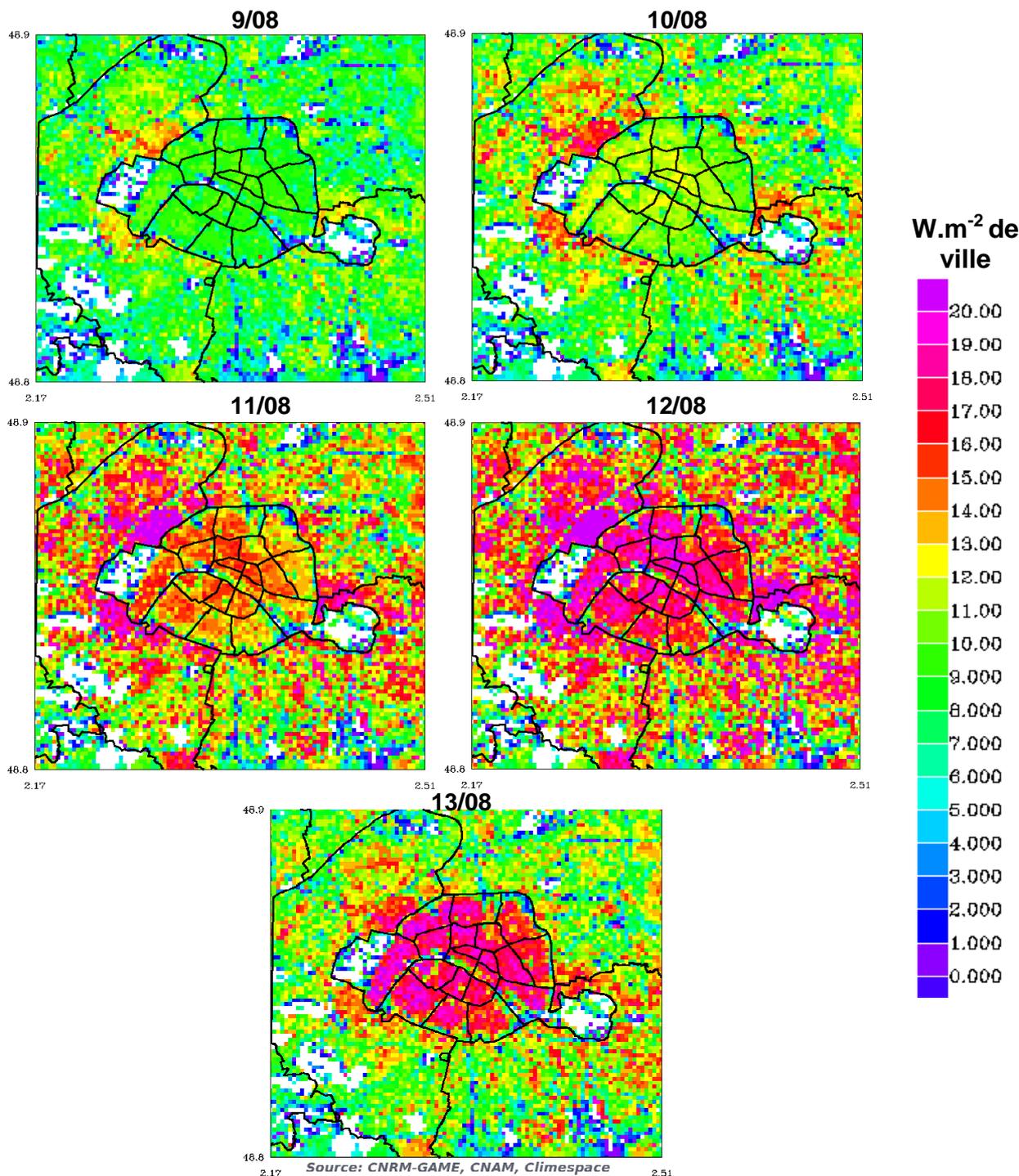


Figure 48. Énergie frigorifique journalière moyenne diagnostiquée par le modèle entre le 9 et le 13 août 2003 dans le cas de référence (non climatisé)

2. Étude comparée des rejets de chaleur prescrits et diagnostiqués pour 3 cas

Nous avons comparé pour le cas climatisé REEL et les 2 scénarios de climatisation avec rejets, les rejets que nous avons prescrits en entrée du modèle (puissances de rejets de chaleur sensible et latente pondérées par le coefficient d'appel horaire moyen du jour concerné, voir Tableau 5) avec ceux diagnostiqués par le modèle

suivant l'équation 2 (voir paragraphe [4. Prise en compte de la climatisation dans les simulations](#)).

Les différences pour le cas REEL et les scénarios climatisés SEC et DOUBLESEC sont présentées respectivement sur les Figure 49, Figure 50 et Figure 51. Les différences journalières sont présentées seulement pour le cas REEL (Figure 49). Comme la Figure 49 montre des variations inter-journalières très faibles, seules les différences observées pour le 12 août ont été retenues pour les scénarios SEC (Figure 50) et DOUBLESEC (Figure 51).

Les résultats montrent, dans les mailles climatisées, que les rejets de chaleur diagnostiqués par le modèle sont largement sous-estimés par rapport à ceux qui sont prescrits en entrée du modèle. Au centre de Paris et sur des mailles fortement climatisées, le modèle diagnostique des rejets environ 2 fois plus faibles que ceux qui ont été prescrits en entrée : dans le cas du scénario DOUBLESEC (Figure 51), les rejets diagnostiqués varient de 50 à 75 $W.m^{-2}$ de ville alors que les rejets prescrits sont de l'ordre de 120 $W.m^{-2}$ de ville ; dans le cas du scénario SEC (Figure 50), les rejets diagnostiqués sont de l'ordre de 30 à 70 $W.m^{-2}$ de ville contre 50 à 120 $W.m^{-2}$ de ville de rejets prescrits ; dans le cas REEL (Figure 49), 30 à 50 $W.m^{-2}$ de ville de rejets diagnostiqués contre 50 à 120 $W.m^{-2}$ de ville de rejets prescrits.

Dans les mailles non climatisées, les cartes des Figure 49, Figure 50 et Figure 51 font apparaître à l'extérieur de Paris dans des zones où aucun rejet n'a été prescrit en entrée du modèle des rejets diagnostiqués par le modèle non nuls et de l'ordre de 15 à 35 $W.m^{-2}$ de ville). Cet artefact provient des énergies frigorifiques excédentaires que l'on a pu observer dès la simulation de référence (de l'ordre de 10 à 19 $W.m^{-2}$ de ville) et qui provient de la non-fermeture en énergie du modèle de bâtiment (voir paragraphe précédent [1. Bilan d'énergie de la simulation de référence](#)).

Plusieurs hypothèses sont envisagées pour expliquer cette non-fermeture du bilan d'énergie à l'échelle du bâtiment.

Premièrement, par construction :

- 1) la température interne du bâtiment n'est pas calculée en bilan d'énergie mais par une équation (Equation 1, voir paragraphe [5. Prise en compte de la climatisation dans les simulations](#) de la section [Méthodologie](#)) qui dépend de la température interne du bâtiment et des températures des murs et toit au pas de temps précédent et d'une température de plancher constante, ce qui n'est pas parfaitement conservatif à l'échelle du bâtiment (voir paragraphe précédent [1. Bilan d'énergie de la simulation de référence](#)) ;
- 2) les rejets prescrits ne sont pas fonction de cette température interne donc il y a peu de chance d'être conservatif entre production de froid et rejets de chaleur.

Deuxièmement, une température de consigne unique de 26°C est prescrite à l'intérieur des bâtiments climatisés sur l'ensemble du domaine, alors qu'il est fort probable que de nombreux bâtiments appliquent des températures de consigne beaucoup plus fraîches (qui augmenteraient la demande d'énergie frigorifique dans le modèle). L'impact de la température de consigne est probablement faible.

Finalement, aucune charge interne n'est prise en compte dans la version actuelle du modèle (schéma de gauche de la Figure 52). Or les charges internes ont un impact prépondérant sur la demande de froid à l'intérieur du bâtiment. Ainsi, la demande

frigorifique diagnostiquée par le modèle correspond pour les climaticiens aux apports externes dans le bâtiment. Sur ce point, notre modèle risque de sous-estimer les apports en période estivale puisque les gains solaires par les vitrages et l'infiltration d'air ne sont pas pris en compte.

Cependant, la non-concordance entre les rejets prescrits et diagnostiqués **ne remet pas en cause les résultats** présentés **sur les températures des rues**. En effet, l'impact de la production de froid sur le climat urbain passe par la température interne du bâtiment qui, rappelée à **la température climatisée de consigne** (*Ti Cool*, dans notre cas 26°C), **est une condition aux limites pour le calcul des flux par conduction à travers la paroi** (Figure 52). Si on rajoutait la représentation des charges internes dans le bâtiment (schéma de droite de la Figure 52), on augmenterait la demande de froid diagnostiquée mais on ne changerait pas la condition limite aux parois donc il n'y aurait pas d'impact sur le calcul de la température extérieure.

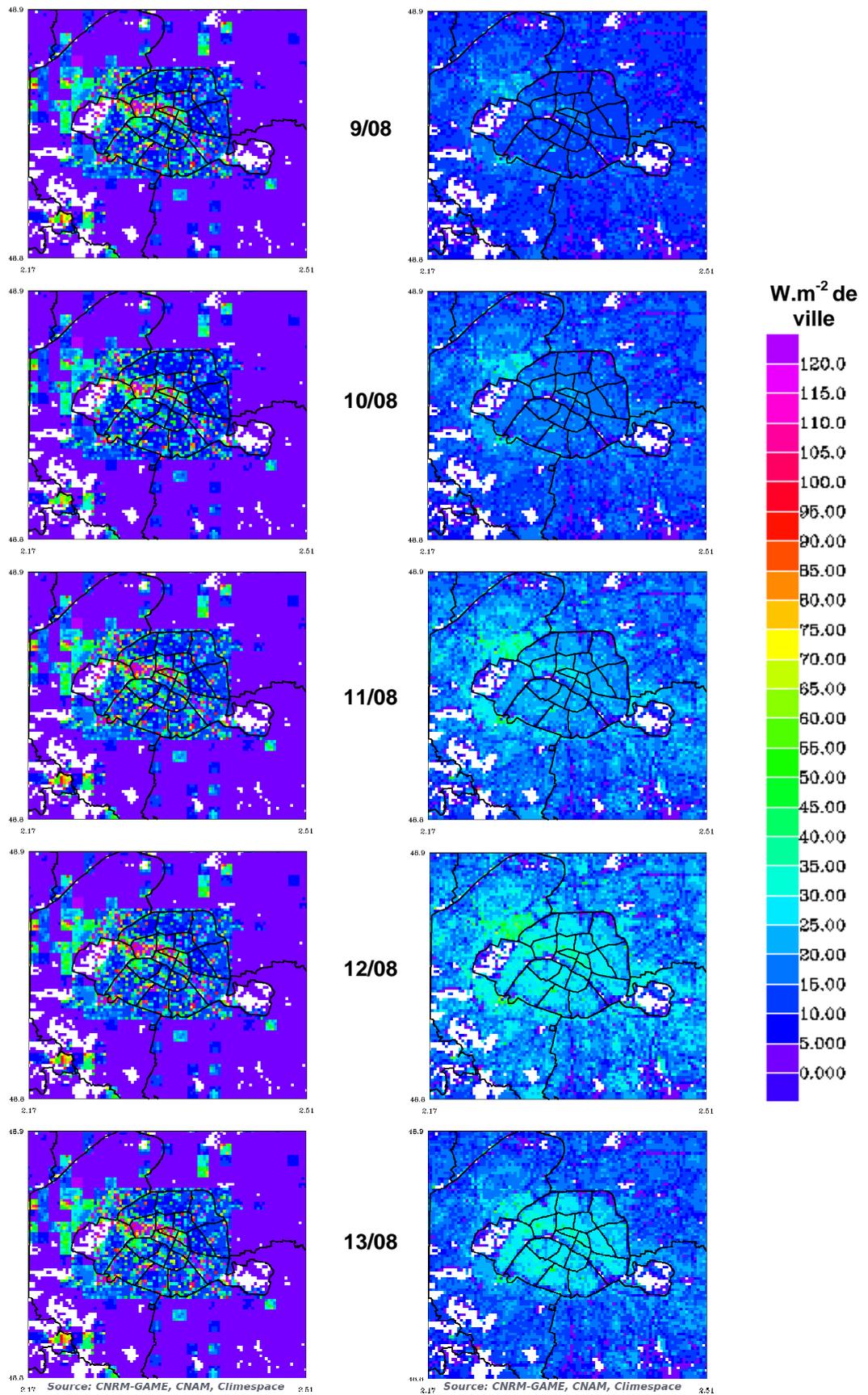


Figure 49. Rejets de chaleur prescrits (à gauche) et diagnostiqués par le modèle (à droite) pour le cas climatisé REEL entre le 9 et le 13 août 2003

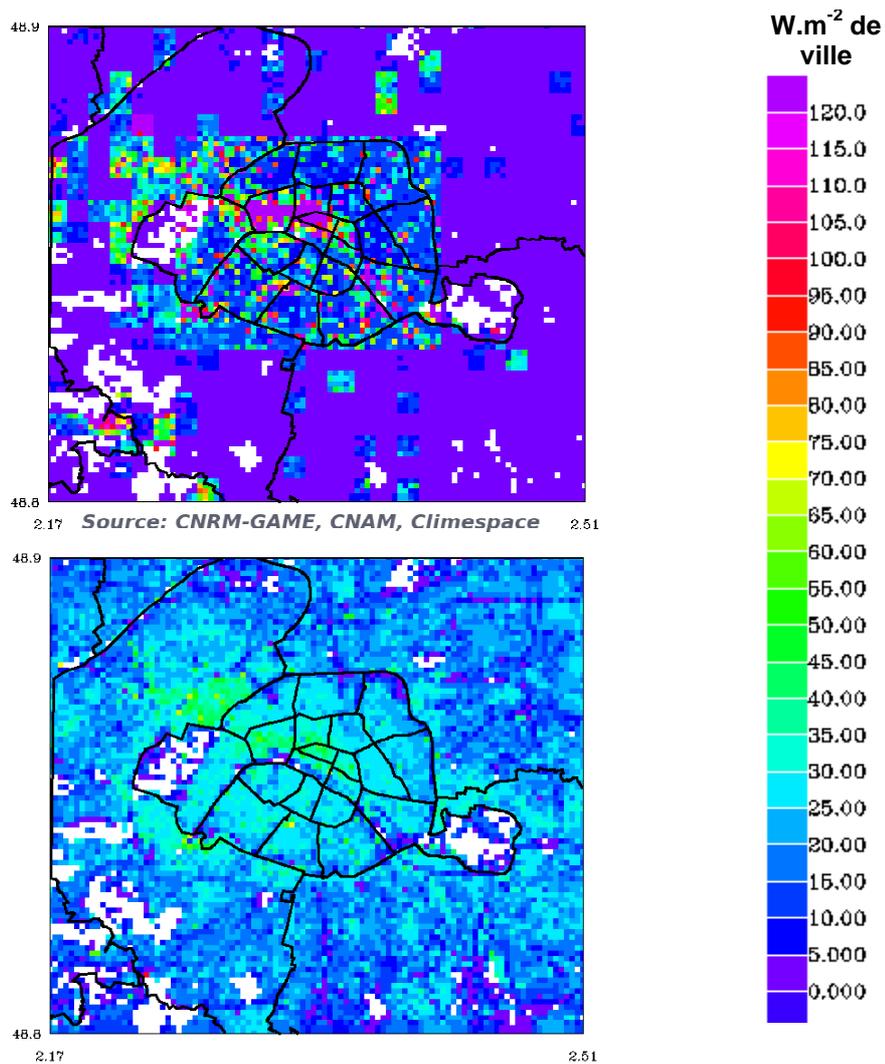


Figure 50. Rejets de chaleur prescrits(en haut) et diagnostiqués par le modèle (en bas) pour le scénario climatisé SEC pour le 12 août 2003

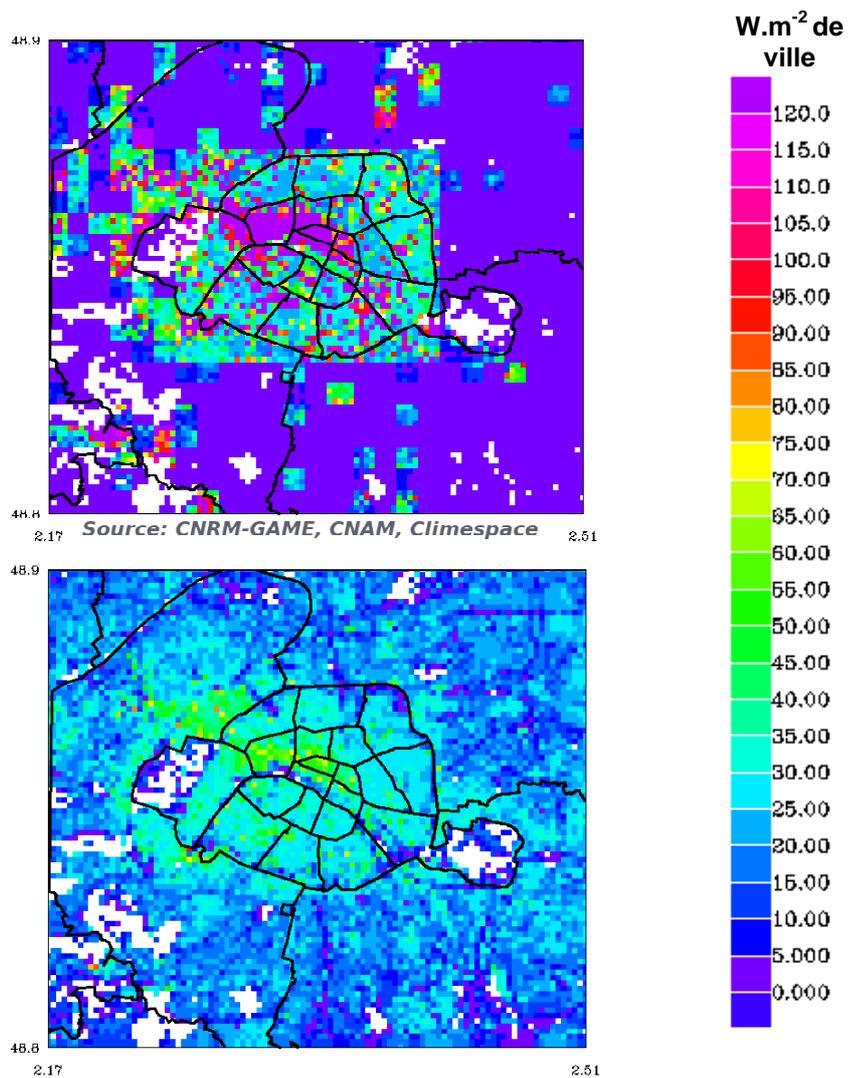


Figure 51. Rejets de chaleur prescrits(en haut) et diagnostiqués par le modèle (en bas) pour le scénario climatisé DOUBLESEC pour le 12 août 2003

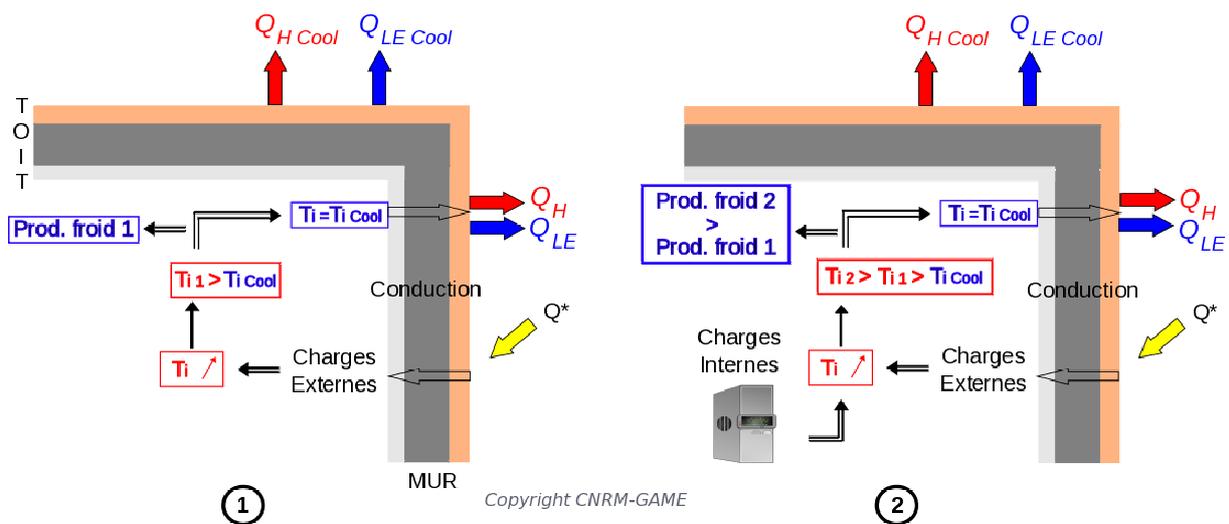


Figure 52. Représentation schématique de l'impact des charges internes et externes sur les paramètres de climatisation

3. Comparaison de l'énergie frigorifique diagnostiquée entre différents scénarios de climatisation

3.1. Comparaison de l'énergie frigorifique générée pour les scénarios SEC et 2SEC

Les flux d'énergie frigorifique (W.m^{-2} de ville) diagnostiqués par le modèle résultant de l'activation de la climatisation dans les bâtiments pour les scénarios SEC et DOUBLESEC ont été calculés et sont présentés ci-dessous (Figure 53 pour leur amplitude respective et Figure 54 pour leur différence).

Le passage du scénario SEC au scénario DOUBLESEC montre bien une augmentation de la puissance frigorifique, avec les différences les plus marquées le 12 août. Dans les quartiers les plus climatisés, cette augmentation est de l'ordre de 10 à 16 W.m^{-2} de ville, ce qui correspond à une augmentation relative de 40 à 55% par rapport au scénario SEC (Figure 54). Cette augmentation de la production de froid est la conséquence :

- * de l'augmentation de la fraction de bâti climatisé ;
- * et probablement de la rétroaction de l'augmentation de la température dans les rues (due à l'augmentation de la puissance des rejets de chaleur prescrits) sur la demande de production de froid.

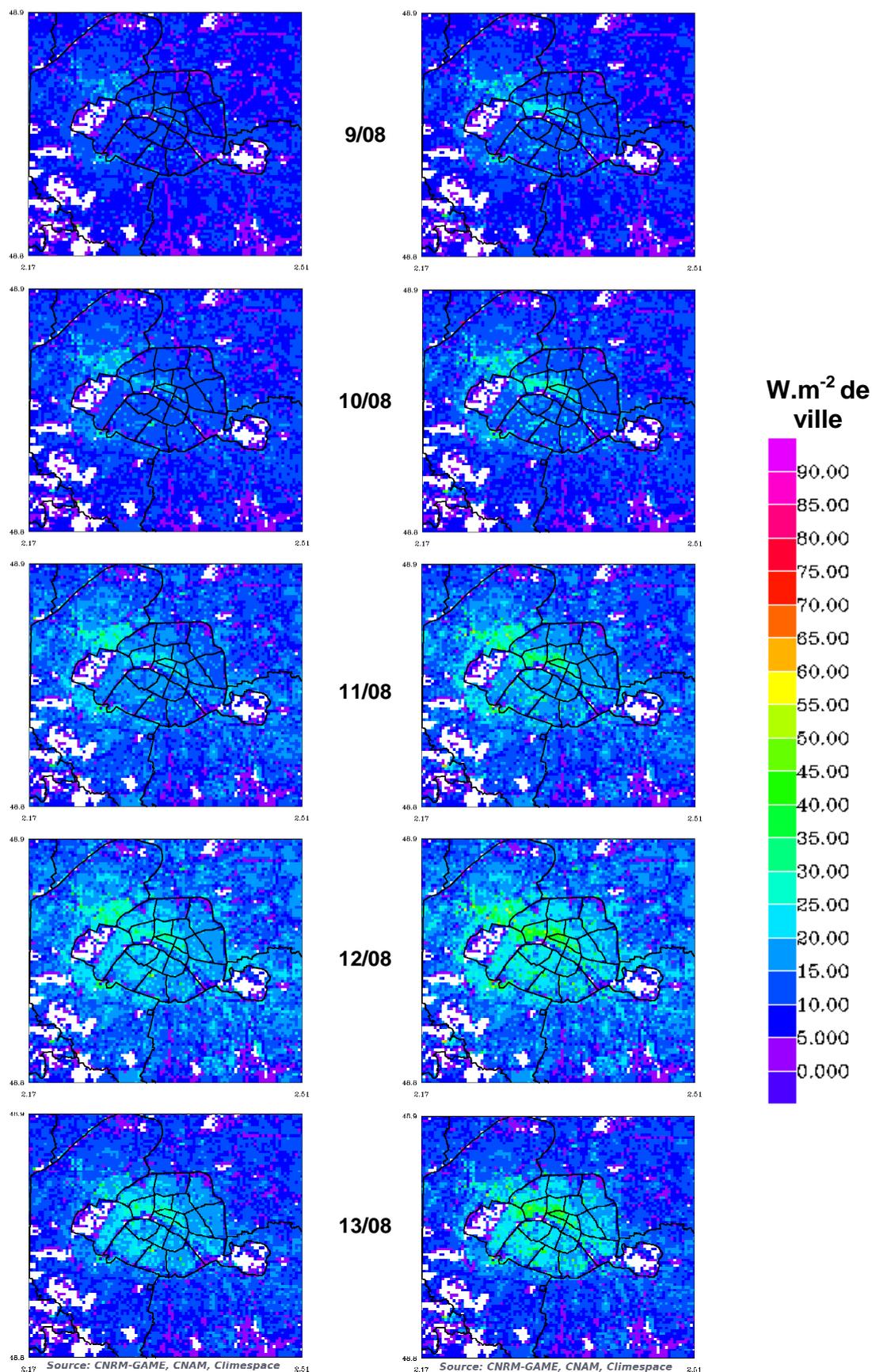


Figure 53. Énergie frigorifique moyenne journalière pour les 9, 10, 11, 12 et 13 août 2003 (de haut en bas) pour les scénarios SEC (à gauche) et DOUBLESEC (à droite)

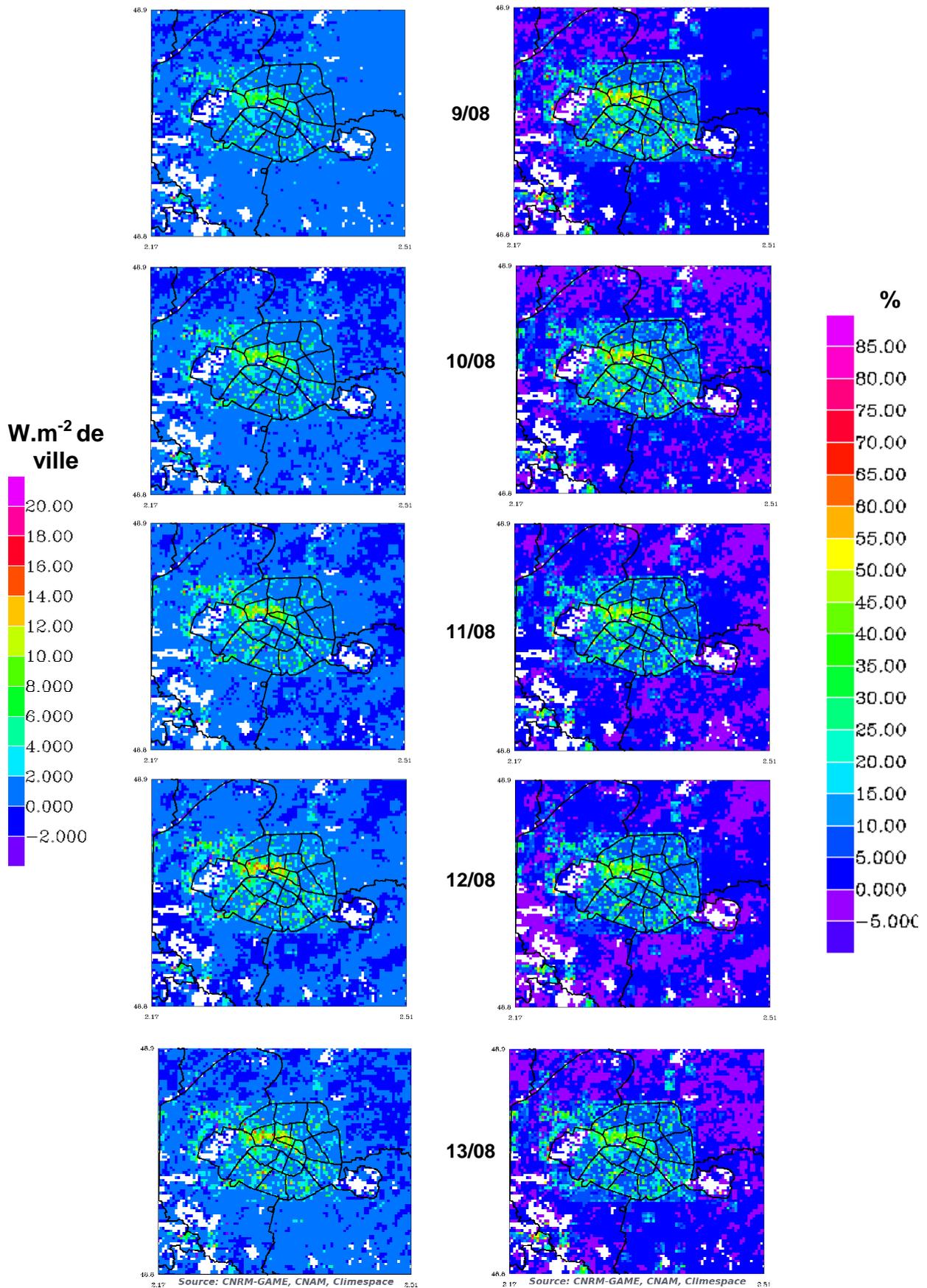


Figure 54. Différences absolue (à gauche) et relative (à droite) entre les énergies frigorifiques moyennes journalières des scénarios DOUBLESEC et SEC entre le 9 et le 13 août 2003 (de haut en bas)

3.2. Comparaison de l'énergie frigorifique diagnostiquée pour les scénarios 2SEC et CLIM0R

Pour les scénarios 2SEC et CLIM0R, la climatisation des bâtiments dans TEB a été activée avec la même fraction de bâtiments climatisés. L'unique différence réside en la prescription des rejets de chaleur résultant de la climatisation dans le scénario 2SEC, ce qui génère par rapport au cas CLIM0R l'augmentation de température des rues présentée Figure 55 : + 0.25 à 3°C avec des impacts plus étendus de nuit que de jour. Ainsi, la comparaison des bilans d'énergie des bâtiments pour ces 2 scénarios (Figure 56) permet de vérifier l'hypothèse de rétroaction de la température sur la production de froid que nous avons proposée précédemment.

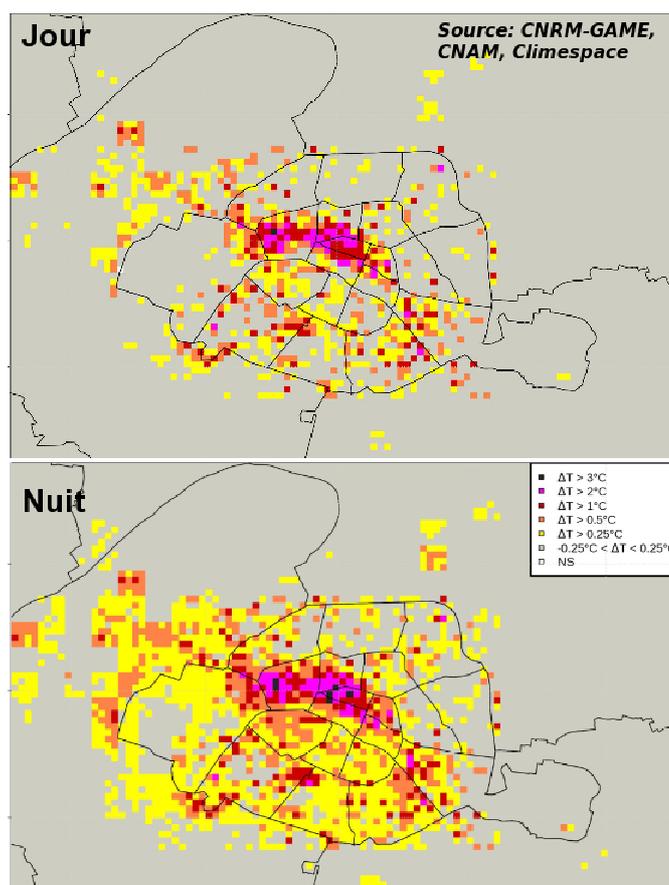


Figure 55. Anomalies de température à 2m entre les scénarios climatisés 2SEC et CLIM0R, en journée (haut) et de nuit (bas)

Dans les arrondissements fortement climatisés au centre de Paris (2^e, 3^e, 8^e, 9^e), les cartes de la Figure 55 montrent une augmentation de la température dans les rues qui est de l'ordre de 1 à 2°C quand on passe du scénario CLIM0R au scénario DOUBLESEC. Pour ces mêmes arrondissements, la Figure 56 montre une augmentation d'énergie frigorifique de 6 à 18 W.m⁻² de ville, ce qui correspond à une augmentation de 20 à 55%.

Ces résultats montrent bien que l'augmentation de la température à 2m dans les rues observée quand on passe du cas CLIM0R au cas DOUBLESEC est fortement corrélée à une augmentation de la production de froid et confirment l'hypothèse de rétroaction de la température extérieure sur la demande de froid dans le bâtiment.

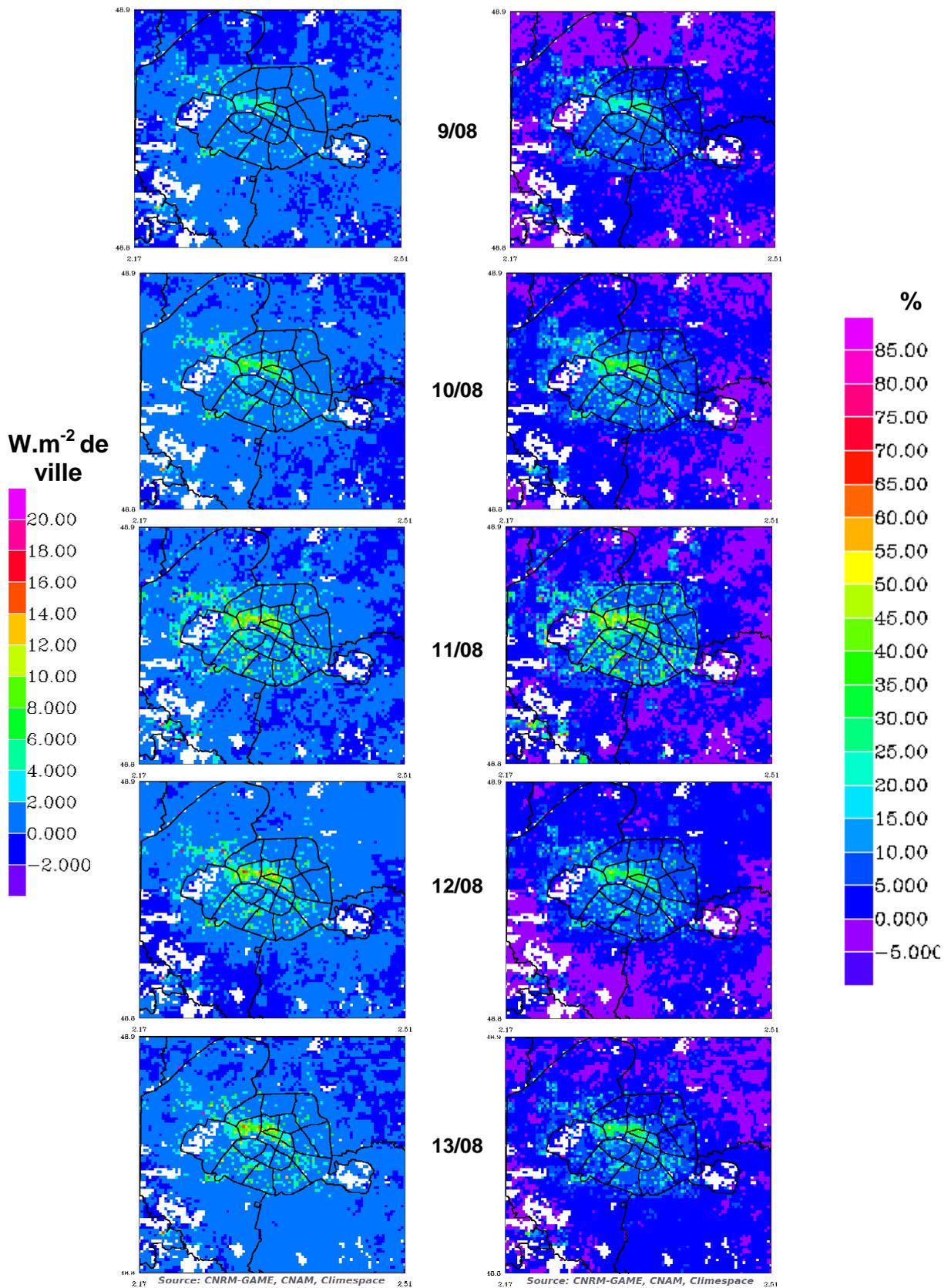


Figure 56. Différences absolue (à gauche) et relative (à droite) entre les énergies frigorifiques moyennes journalières des scénarios 2SEC et CLIM0R entre le 9 et le 13 août 2003 (de haut en bas)

CONCLUSIONS SUR LES SIMULATIONS ET PERSPECTIVES

1. Conclusions sur la comparaison des différents systèmes de refroidissement

Cette étude a permis de comparer différents systèmes de refroidissement utilisés pour satisfaire les besoins en froid inhérents à certains bâtiments, pour la ville de Paris dans les conditions d'une canicule similaire à celle observée en 2003. Les simulations de plusieurs configurations ont permis de mettre en évidence d'une part le fait que les différents systèmes de refroidissement ont des impacts différents, en terme de localisation et d'amplitude, sur la température dans les rues et sur la puissance frigorifique appelée, et d'autre part des impacts sur les températures nocturnes toujours supérieurs aux impacts sur les températures diurnes.

Les estimations quantitatives doivent néanmoins être considérées avec précaution dans la mesure où la représentation de la température interne des bâtiments dans le modèle a pour conséquence d'introduire une « légère climatisation » même lorsqu'il n'y en n'a pas.

Actuellement, les besoins en froid dans Paris sont satisfaits par différents systèmes autonomes, secs et humides, et par le réseau de froid urbain, qui n'utilise que des systèmes humides.

Compte tenu des résultats obtenus, des tendances remarquables ont été observées, tout d'abord en ce qui concerne la température des rues et l'îlot de chaleur.

- Comparés à une situation de référence sans climatisation, les résultats pour la situation climatisée actuelle montrent une augmentation de la température dans les rues relativement faible et spatialement peu étendue : augmentation de 0,25 à 1°C très localement à l'échelle des îlots (i.e. des mailles) les plus fortement climatisés (principalement Étoile et Montparnasse). La conséquence sur l'îlot de chaleur est un léger étalement des zones les plus chaudes au centre de Paris (2°, 3°, 8°, 9° et 10°) par rapport à la situation de référence, mais sans changement d'amplitude marqué.

- Par rapport à la même situation de référence, la substitution de tous les systèmes actuels de refroidissement humides autonomes et du réseau de froid urbain par des systèmes « secs » (scénario SEC), induit une augmentation de température plus élevée et spatialement plus étendue que dans le cas précédent : augmentation de la température de 0,5°C à l'échelle de l'arrondissement, de 1°C à l'échelle du quartier et de 2°C à l'échelle de l'îlot (i.e. une maille). Dans cette situation, l'étalement des zones les plus chaudes au centre de Paris modifie légèrement la structure et l'amplitude de l'îlot de chaleur nocturne par rapport à la situation de référence : l'amplitude de l'îlot de chaleur dans une direction traversant les 8°, 9° et 10° arrondissements d'ouest en est d'environ 4,5°C, soit une augmentation de 0,75°C par rapport à une situation sans climatisation.

- Dans une situation future pour laquelle la puissance globale de climatisation actuelle serait doublée en utilisant uniquement des systèmes secs, l'intensité et l'emprise spatiale des impacts augmentent fortement (même en journée) . De plus, on observe des répercussions sur la température au-delà des zones où les rejets sont prescrits: augmentation de la température de 0,5°C à l'échelle de l'arrondissement, de 2°C à l'échelle du quartier et jusqu'à 3°C à l'échelle de l'îlot (i.e.

une maille). Les conséquences sur l'îlot de chaleur nocturne sont marquées par un étalement spatial et une nette intensification: l'amplitude de l'îlot de chaleur observée dans la direction ouest-est précédente s'élève maintenant à 5,5°C, soit une augmentation de 1,75°C par rapport à la situation non climatisée.

- Finalement, l'impact d'une situation future fortement climatisée mais qui ne générerait pas de rejets de chaleur dans l'air a été évalué. Cette situation permet d'effacer totalement l'amplification de l'îlot de chaleur observé pour les autres situations et même de réduire légèrement l'îlot de chaleur de la situation de référence. Par contre, la climatisation des bâtiments ne permet pas de refroidir les rues de façon perceptible par les habitants: le rafraîchissement des températures des rues par rapport à une situation non climatisée est inférieur à 0,4°C, ce qui est probablement imperceptible pour les habitants.

L'autre tendance remarquable observée concerne les besoins appelés de climatisation et donc la consommation d'énergie associée.

La comparaison de la puissance frigorifique appelée pour une même satisfaction du confort dans les bâtiments climatisés dans le cas de la puissance globale de climatisation doublée fait apparaître, dans les quartiers où la climatisation est importante, une augmentation de la puissance frigorifique due aux apports lorsqu'il y a rejet de chaleur dans l'air par rapport au cas où il n'y en a pas.

La combinaison de ces deux effets: augmentation de la température et de la puissance frigorifique appelée avec une climatisation à tour sèche par rapport à une climatisation sans rejet de chaleur dans l'air montre que la climatisation à tour aéroréfrigérante sèche, a pour effet:

- * d'augmenter le plus la température des rues là où la demande de climatisation est la plus forte,
- * d'augmenter la puissance frigorifique due aux apports (et donc la consommation électrique) par rapport à la climatisation sans rejet de chaleur.

Autrement dit, avec une climatisation à tour aéroréfrigérante sèche, la climatisation augmente la température des rues et appelle donc plus de climatisation pour combattre l'îlot de chaleur renforcé. Les quartiers les plus impactés par cet effet sont les quartiers où la climatisation à tour aéroréfrigérante sèche est la plus développée. En revanche, avec une climatisation sans rejet de chaleur dans l'air, l'appel de climatisation sera beaucoup réduit sans influence néfaste sur l'îlot de chaleur avec, en plus, un petit effet de mitigation de l'îlot de chaleur.

De façon similaire, l'augmentation de température des rues et l'appel de climatisation sont aussi réduits dans le cas où une partie des rejets de chaleur se font sous une forme humide.

Cette étude montre bien que les moyens mis en œuvre pour satisfaire les besoins en froid des bâtiments parisiens lors d'une canicule ont un impact sur la température des rues et l'îlot de chaleur : la réflexion sur ces moyens est donc nécessaire pour gérer au mieux la climatisation future et limiter les impacts sur le climat urbain.

2. Conclusions sur le modèle actuel

Dans sa version actuelle, le modèle utilisé pour réaliser les simulations est bien adapté pour évaluer l'impact des rejets de chaleur par les machines frigorifiques sur l'atmosphère. Les simulations réalisées ont démontré qu'on pouvait rajouter des flux de chaleur (secs ou humides) au niveau des toits et que ceux-ci avaient un impact sur la température de l'air dans les rues d'une ville comme Paris. Le modèle représente aussi l'utilisation de l'énergie frigorifique à l'intérieur du bâtiment de manière simplifiée. C'est sur ce point que les limites du modèle sont les plus nombreuses. Il a été constaté que le cycle de la demande frigorifique calculée dans le modèle était déphasé par rapport aux observations. De plus, les rejets dans chaque maille ne sont pas systématiquement en accord avec la demande de froid calculée. Plusieurs hypothèses de travail sont à étudier pour corriger les écarts constatés. Ils concernent des processus énergétiques internes au bâtiment à ajouter au modèle pour améliorer sa représentation. La première étape consiste à calculer l'évolution de la température interne du bâtiment par une équation de bilan d'énergie plutôt que par l'équation lissée actuelle. Par la suite, on peut rajouter :

- * les charges internes du bâtiment correspondant aux personnes, aux usages d'énergie pour l'éclairage et les différents appareils électriques,
- * les gains d'énergie solaire directs par les vitrages,
- * la représentation de la masse thermique interne du bâtiment, c'est à dire l'ensemble des parois internes qui peuvent accumuler ou libérer une quantité significative de la chaleur soit principalement les planchers et les parois lourdes comme les murs porteurs,
- * les gains (ou pertes) d'énergie par infiltration d'air,
- * les calculs des rejets en fonction de la demande frigorifique à l'intérieur du bâtiment.

3. Perspectives : Développement du module de climatisation

Afin de dépasser les limites de la version du modèle utilisée dans cette étude (dite version actuelle), des modifications sont en cours afin d'améliorer la représentation du bâtiment.

La première concerne le calcul de la température interne du bâtiment. Dans la version en développement du modèle, celle-ci est calculée en établissant son bilan d'énergie. Cependant afin d'avoir une évolution réaliste de cette température il faut procéder à plusieurs modifications qui traduisent le fonctionnement du bâtiment (Figure 57). Ainsi, un sol composé de plusieurs couches dont la température évolue au cours du temps est rajouté. Il est constitué en première approximation d'une couche de revêtement (type carrelage, épaisseur 1cm), d'une couche de mortier (épaisseur 5 cm), d'une couche de béton (épaisseur 35 cm) et d'une couche de terre et graviers (épaisseur 1m). Ensuite, une paroi interne est rajoutée. Elle est dimensionnée en fonction de la taille (emprise et hauteur) du bâtiment et a les propriétés thermiques du béton. Le rayonnement solaire entrant dans le bâtiment est calculé en tenant compte d'une certaine densité de vitrage sur la façade et d'un

facteur de transmission et il est reçu en intégralité par la paroi interne. Des charges internes moyennes sont attribuées à une valeur de 12 W m^{-2} par unité de surface de plancher et la valeur totale des charges internes du bâtiment dépend de sa hauteur et de son emprise au sol. L'infiltration d'air nécessaire au renouvellement de l'air intérieur est également prise en compte. Enfin, la température interne évolue selon les échanges avec l'ensemble des parois, dont la paroi interne, les charges internes et l'infiltration. Comme dans la version actuelle du modèle, si elle dépasse la température de consigne, un rappel est effectué et on peut alors calculer la quantité d'énergie nécessaire pour revenir de la valeur prévue par l'équation à la valeur de consigne. Cette quantité d'énergie est alors convertie en rejets de chaleur en tenant compte du coefficient de performance de la machine qui varie en fonction de la température de l'air extérieur.

Copyright CNRM-GAME

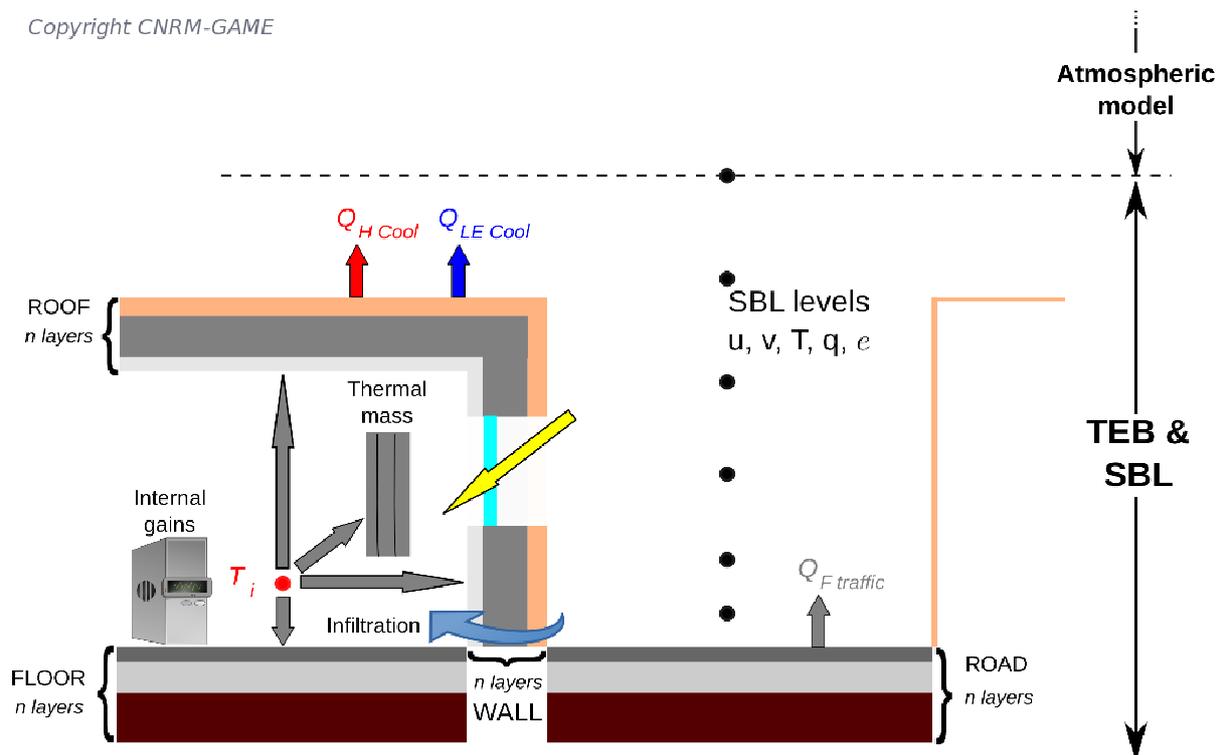


Figure 57. Schématisation de la représentation du bâtiment dans la nouvelle version du modèle TEB

REFERENCES

- APUR (2007). *Consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes*, Atelier Parisien d'Urbanisme .
- Bessemoulin, P.; Bourdette, N.; Courtier, P. & Manach, J. (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 l'Université Paris-Est.
- Hamdi, R. & Masson, V. (2008). *Inclusion of a Drag Approach in the Town Energy Balance (TEB) Scheme: Offline 1D Evaluation in a Street Canyon*, Journal of Applied Meteorology and Climatology 47 : 2627-2644.
- Lafore, J. P.; Stein, J.; Asencio, N.; Bougeault, P.; Ducrocq, V.; Duron, J.; Fischer, C.; Hérel, P.; Mascart, P.; Masson, V.; Pinty, J. P.; Redelsperger, J. L.; Richard, E. & de Arellano, J. V.-G. (1998). *The Méso-NH atmospheric simulation system. Part I: adiabatic formulation and control simulation*, Ann. Geophys. 16 : 90-109.
- Lemonsu A., Grimmond C.S.B. & Masson V. (2004). *Modeling the surface energy balance of the core of an old mediterranean city: Marseille*, J. Appl. Meteorol. 43 : 312-327.
- Masson, V. (2000). *A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models*, Boundary-Layer Meteorol. 94 : 357-397.
- Masson, V.; Grimmond C.S.B. & Oke T. R. (2002). *Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities*, J. Appl. Meteorol. 41 : 1011-1026.
- Masson, V.; Champeaux, J. L.; Chauvin, F.; Meriguet, C. & Pigeon, G. (2003). *ECOCLIMAP: a global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models*, Journal of climate 16 (9): 1261-1282.
- Masson, V. & Seity, Y. (2009). *Including atmospheric layers in vegetation and urban offline surface schemes*, Journal of Applied Meteorology and Climatology 48 : 1377-1397.
- MétéoFrance (2004). *Bilan météorologique de la canicule d'août 2003 - Dossier de presse du 17 février 2004*.
- Noilhan, J. & Mahfouf, J. F. (1996). *The ISBA land surface parameterisation scheme*, Global Planet. Change 13 : 145-159.
- Offerle B., Grimmond C.S.B. & Fortuniak K. (2005). *Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre*, Int. J. Climatol. 25 : 1405-1419.
- Ohashi, Y.; Genshi, Y.; Kondo, H.; Kikegawa, Y.; Yoshikado, H. & Hirano, Y. (2007). *Influence of air-conditioning waste heat on air temperature in Tokyo during summer: numerical experiments using an urban canopy model coupled with a building energy model*, Journal of Applied Meteorology and Climatology 46 : 66-81.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*. Methuen, London and New York.
- Pigeon, G.; Lemonsu, A.; Masson, V. & Hidalgo, J. (2008). *De l'observation du micro-climat urbain à la modélisation intégrée de la ville*, La Météorologie 62 : 39-47.
- Pigeon, G.; Legain, D.; Durand, P. & Masson, V. (2007). *Anthropogenic heat releases in an*

old European agglomeration (Toulouse, France), International Journal of Climatology 27 : 1969-1981.

Pigeon G., Moscicki M.A., Voogt J.A. & Masson V. (2008). *Simulation of fall and winter surface energy balance over a dense urban area using the TEB scheme*, Meteorology and Atmospheric Physics 102 : 159-172.

Stein, J.; Richard, E.; Lafore, J.; Pinty, J.; Asencio, N. & Cosma, S. (2000). *High -resolution non-hydrostatic simulations of flash-flood episodes with grid-nesting and ice-phase parametrization*, Meteorol. Atmos. Phys. 72 : 101-110.

ANNEXES

A1. Tests de configuration/paramétrisation de MESO-NH sur le domaine « France étendue » pour la canicule d'août 2003

A2. Note sur la préparation des données physiographiques en entrée de SURFEX pour l'agglomération parisienne

A3. Namelists Fortran pour les données d'entrée physiographiques

A4. Caractéristiques des stations horaires du domaine de simulation « Île-de-France »