THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Océan, Atmosphère et surfaces continentales

Présentée et soutenue par :

Mme CÉCILE DE MUNCK

le vendredi 8 novembre 2013

Titre :

MODELISATION DE LA VEGETATION URBAINE ET STRATEGIES D'ADAPTATION POUR L'AMELIORATION DU CONFORT CLIMATIQUE ET DE LA DEMANDE ENERGETIQUE EN VILLE.

Ecole doctorale :

Sciences de l'Univers de l'Environnement et de l'Espace (SUEE)

Unité de recherche :

Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM)

Directeur(s) de Thèse :

MME AUDE LEMONSU

Rapporteurs :

M. GEORGES NAJJAR, UNIVERSITE STRASBOURG 1

Mme MARJORIE MUSY, ECOLE NATIONALE D'ARCHITECTURE DE NANTES

Membre(s) du jury :

M. SERGE CHAUZY, , Président

M. EVYATAR ERELL, BEN-GURION UNIVERSITY OF THE NEGEV, Membre

M. FABRICE RODRIGUEZ, IFSTTAR, Membre

Mme AUDE LEMONSU, METEO FRANCE TOULOUSE, Membre

Mme FLORENCE HABETS, MINESPARISTECH, Membre

M. VALÉRY MASSON, CENTRE NATIONAL RECHERCHE METEOROLOGIQUE, Membre

Remerciements

Tout a vraiment commencé en Angleterre, à Forest Research. J'ai découvert mon goût pour la recherche en travaillant aux côtés de Tony Hutchings et Danielle Sinnett. Et c'est en cherchant un co-financement pour une thèse qu'ils m'avaient proposée que je suis arrivée au CNRM...

Quand j'ai décidé de m'embarquer dans ces travaux de thèse, je n'avais pas remarqué à quel point il s'agirait d'une épreuve d'endurance, moi qui était plutôt du genre *vitesse*...

Mes premiers pas au CNRM et dans le monde de MESO-NH et SURFEX, je les ai faits avec Grégoire Pigeon, avec qui j'ai passé un certain nombre d'heures à reproduire les caractéristiques météorologiques de la canicule 2003. Au début, nous faisions vraiment *la pluie et le beau temps* puisque toutes les journées de canicule se terminaient dans le modèle par des précipitations... Merci Grégoire pour avoir toujours pris le temps et pour ne jamais douter qu'il existe une solution à tout problème...

Je me suis vraiment plongée dans le modèle de surface avec Aude Lemonsu, ma directrice de thèse, qui m'a initiée patiemment aux rouages du modèle de surface SURFEX et au potentiel toujours croissant du modèle de canopée urbaine TEB. Avec Aude, j'ai pu entre autres partager le plaisir du codage en Fortran et celui de me projeter dans des villes plus vertes. J'ai aussi eu la satisfaction d'avoir enfin trouvé quelqu'un d'au moins aussi perfectionniste que moi ! Merci Aude ! ! Enfin, merci de m'avoir épaulée pour préparer et réaliser la campagne de mesures *Jardin* à Nantes, qui me tenait tant à cœur. Cette campagne, que certaines langues ont qualifiée (à juste titre je l'accorde !) d'*exploratoire*, bien qu'elle soit absente de ce manuscrit, m'a beaucoup appris. Elle restera pour moi une expérience mémorable ! J'en profite pour exprimer mes sincères remerciements à Dominique Legain et à son équipe, à Fabrice Rodriguez, Laetitia Letellier et toutes les bonnes volontés de l'IFSTTAR, ainsi qu'à Pascal Kéravec, Jean-Michel Rosant, Patrice Mestayer et David Ramier, sans oublier Anne et Hervé Blanchetière, les heureux propriétaires du 14 rue de Takrouna dans le beau quartier du Grand Clos. Ces derniers nous ont accueillis au-delà de nos espérances...

Pour leur soutien et leurs encouragements tout au long de ce voyage, je voudrais étendre ma gratitude à l'ensemble de l'équipe TURBAU, ainsi qu'aux collègues du couloir GMME, les permanents et ceux de passage :

merci Valéry pour être toujours prêt et motivé pour résoudre n'importe quel problème de code (surtout s'il est compliqué), pour tes idées futuristes, ton enthousiasme et ta bonne humeur quotidienne ; merci Colette pour avoir été mon coach en toutes circonstances ; merci Sylvie pour nos discussions et ta bienveillance ; merci Julia pour ton positivisme et ta gentillesse ; merci Anne-Lise et Solen pour votre bonne humeur et nos discussions couture ; merci Julien pour ton aimable compagnie et ta gourmandise (qui nous a valu un certain nombre de viennoiseries), et évidemment merci ô merci Marie, ma *jumelle doctorante*, pour avoir été mon gourou Latex et mon support café-goûter tout au long de ces trois ans !

Un grand merci aussi à l'équipe remarquable d'informaticiens du CNRM, compétents et toujours de bonne humeur, ainsi qu'à Stéphanie Faroux à qui aucun bug de SURFEX ne résiste !

Merci aussi aux doctorants qui ont partagé certains moments de cette thèse. Je pense surtout à Karine Adeline, à Ryad Bouzouidja...

Merci au groupe TVE (Rémy Claverie, Julien Bouyer, David Ramier, Maeva Sabre, etc..) pour les données terrain et le dynamisme qu'il a insufflé dans mes travaux sur les toitures végétalisées.

Enfin, merci à mon comité de thèse, Aaron Boone, Sylvain Dupont, Katia Chancibault et Luc Adolphe pour m'avoir conseillée au cours de ces trois ans, ainsi qu'à mon jury pour avoir fait de ma soutenance une journée mémorable.

Rien de tout cela n'aurait été possible sans la patience et le support de toute ma famille.

Je dédie cette thèse à mon compagnon, Sébastien, à mes filles, Rébecca et Julie, ainsi qu'à mes parents.

Résumé

Les projections climatiques prévoient une amplification du réchauffement climatique, potentiellement exacerbée en milieu urbain du fait du phénomène d'îlot de chaleur urbain. La recrudescence d'évènements extrêmes comme les canicules peut avoir des conséquences écologiques, sanitaires, et économiques dramatiques à l'échelle des villes qui concentrent la population. Parmi les mesures d'adaptation visant à améliorer le confort climatique et la demande énergétique, la climatisation et la végétalisation urbaine constituent deux leviers d'action aux effets parfois antagonistes. Ce travail de thèse – mené dans le cadre des trois projets de recherche CLIM2, MUSCADE et VegDUD, propose d'évaluer ces effets par des simulations du climat urbain à l'échelle de l'agglomération parisienne. La modélisation repose en particulier sur le modèle de canopée urbaine TEB qui permet de simuler les échanges de chaleur, d'eau et de quantité de mouvement entre les surfaces urbaines et l'atmosphère, et depuis peu l'énergétique des bâtiments et des indices de confort thermique dans les bâtiments et dans les rues.

Afin d'améliorer la prise en compte de la végétation urbaine dans TEB, un modèle de toitures végétalisées extensives a tout d'abord été développé et évalué. Différentes pratiques d'arrosage de la végétation urbaine au sol ou sur les toits ont également été paramétrées.

Les scénarios d'adaptation de la ville de Paris par la climatisation, évalués dans le cadre de CLIM2 pour la canicule 2003 par des simulations couplées de TEB avec un modèle atmosphérique, ont mis en évidence que toutes les formes de climatisation qui rejettent de la chaleur dans l'atmosphère (sèche ou humide) génèrent une augmentation de la température des rues au niveau des piétons. Ce réchauffement, proportionnel à la puissance des rejets de chaleur sensible dans l'atmosphère, est en moyenne de 0.5 à 2°C, selon le niveau de déploiement de la climatisation.

Différentes stratégies de végétalisation ont ensuite été mises en œuvre et évaluées toujours sur Paris, en faisant varier soit la végétation au sol (plusieurs taux et types de végétation testés), soit celle en toiture (avec ou sans arrosage), soit les deux. Ces simulations, réalisées dans la configuration générale du projet MUSCADE, i.e. en mode forcé avec une version de TEB disposant d'un générateur dynamique d'îlot de chaleur urbain, ont montré que l'augmentation de la couverture végétale au sol a un pouvoir rafraîchissant plus efficace que les toitures végétalisées, et ce d'autant plus que le taux de végétalisation et que la proportion d'arbres sont importants. Les toitures végétalisées quant à elles constituent le moyen le plus efficace de réduire la consommation d'énergie, non seulement estivale mais aussi à l'échelle annuelle, essentiellement grâce à leur pouvoir isolant.

Abstract

Climate projections predict an amplification of global warming, potentially exacerbated in urban areas by the urban heat island effect. More frequent extreme events such as heat waves may have severe public health, ecological, and economic consequences as cities concentrate population. Among the measures aiming at improving thermal comfort or energy demand, air conditioning and urban greening are measures that may have antagonistic effects. This PhD work is undertaken within the framework of three research projects, CLIM2, MUSCADE and VegDUD. Its objective is to evaluate the respective effects of air conditioning and urban greening based on urban climate simulations across the Paris area. The modelling relies on the Town Energy Balance (TEB) model, which simulates the exchange of heat, water and momentum between the urban surface and the atmosphere. It has been recently improved to simulate building energetics, as well as indoor and outdoor thermal comfort indices.

To improve the description of urban vegetation within TEB, a green roof model has been developed and evaluated. In addition, watering practices have been implemented to model the watering of urban vegetation at ground or roof level.

Within CLIM2, the air conditioning scenarios tested for adapting Paris city to the extreme temperatures of the 2003 heatwave have been evaluated based on simulations using TEB coupled with an atmospheric model. Results shows that all forms of conditioning that release waste heat (dry or wet) into the atmosphere generate a temperature increase in the streets. This warming is proportional to the power of the sensible heat releases in the atmosphere and is on average 0.5 to 2°C, depending on the level of deployment of the air conditioning.

Then, the greening of Paris city has been evaluated based on simulations carried out with the general configuration of the MUSCADE project, i.e. with climate forcings and a dynamic urban heat island generator. The scenarios tested consisted in an increase in ground-base vegetation or an implementation of green roofs on compatible buildings, or the two combined, with the option of watering green roofs or not in summer. Results show that increasing the ground cover has a stronger cooling effect than implementing green roofs, and even more so when the greening rate and the proportion of trees are important. The green roofs are however the most effective way to reduce energy consumption, not only in summer but also on an annual basis, mainly due to their insulating properties.

Sommaire

1 Introduction **1**

I Contexte et état de l'art **5**

2 Etat de l'art **7**
2.1 Villes et changement climatique : contexte et enjeux 8
2.1.1 Ilot de chaleur urbain 8
2.1.2 Changement climatique et conséquences en ville 11
2.2 Stratégies d'adaptation pour les villes 15
2.2.1 La climatisation 16
2.2.2 Les stratégies de végétalisation 17
2.2.2.1 Différentes typologies de végétation mises en œuvre en ville . . . 17
2.2.2.2 Rôle de la végétation urbaine 19
2.2.2.3 Etat des lieux des études existantes 22
2.2.3 Conclusions 26

3 Contexte et outils de recherche **29**
3.1 De la modélisation du climat urbain à la modélisation de l'adaptation des villes . 30
3.1.1 SURFEX 30
3.1.2 TEB : le schéma urbain d'origine 32
3.1.3 TEB-Veg : une meilleure prise en compte des interactions bâti-végétation . 34
3.1.4 TEB-BEM : une meilleure description de l'énergétique du bâtiment 36
3.1.5 TEB-UHI : un générateur d'îlot de chaleur dynamique 39
3.1.6 TEB-UTCI : un modèle pour évaluer le confort thermique 43
3.2 Projets CLIM2, MUSCADE et VegDUD et objectifs de la thèse 45

II Adaptation par la climatisation **49**

4 Climatisation et confort **51**
4.1 Présentation et synthèse de l'étude CLIM2 52
4.2 Article 56

III Adaptation par la végétation 75

5 Modélisation des toitures végétalisées dans TEB 77
5.1 Etat de l'art des modèles . . . 79
5.2 Caractérisation hydraulique des sols . . . 81
5.3 Développement d'un modèle de toitures végétalisées pour TEB . . . 84
5.3.1 Synthèse de l'article . . . 84
5.3.2 Article . . . 86

6 Méthodologie pour l'évaluation de stratégies de végétalisation pour le confort estival 107
6.1 Construction des scénarios . . . 108
6.1.1 Leçons tirées de projets de recherche récents . . . 109
6.1.2 Choix des stratégies de végétalisation . . . 113
6.2 Simulation des scénarios de végétalisation . . . 115
6.2.1 Deux périodes de simulation pour deux types d'analyse . . . 115
6.2.2 Configuration des simulations . . . 115
6.2.3 Nouvelle paramétrisation pour l'arrosage de la végétation . . . 118
6.2.4 Cartes d'occupation du sol spécifiques à chaque scénario . . . 124
6.3 Choix des indicateurs pour évaluer les stratégies simulées . . . 126
6.3.1 Indicateurs de confort thermique . . . 127
6.3.2 Indicateurs d'efficacité énergétique . . . 128
6.3.3 Indicateurs hydrologiques . . . 129

7 Performances des stratégies de végétalisation 131
7.1 Impact de la végétalisation sur le confort thermique extérieur . . . 133
7.1.1 Comparaison de la température de l'air dans les rues . . . 133
7.1.2 Conséquences en termes de confort thermique . . . 141
7.2 Impact de la végétalisation sur les consommations d'eau et d'énergie . . . 150
7.3 Conclusions . . . 153

IV Impacts saisonniers 155

8 Impacts saisonniers des mesures de végétalisation 157
8.1 Impacts sur les températures à 2 m dans les rues . . . 158
8.2 Impacts sur les consommations d'énergie . . . 162
8.2.1 Variations annuelles et saisonnières d'EF_{cum} . . . 162
8.2.2 Variations annuelles moyennes d'EP_{cum} . . . 166
8.3 Impacts sur la gestion de l'eau urbaine . . . 169
8.4 Conclusions . . . 172

9 Conclusions et perspectives 175

A Influence of air conditioning management on Paris street temperatures 181

B Présentation d'ISBA-DF pour la modélisation des toitures végétalisées 191

C Configuration MUSCADE **195**
C.1 Configuration de modèles 196
C.2 Caractéristiques des bâtiments 198
C.3 Données physiographiques 207

CHAPITRE 1

Introduction

L'adaptation aux changements climatiques ou au dérèglement climatique désigne les stratégies, initiatives et mesures individuelles ou collectives visant à réduire la vulnérabilité des systèmes naturels et humains aux effets réels ou attendus des changements climatiques.

Les projections climatiques actuelles prévoient une amplification du réchauffement climatique déjà observé à l'échelle du globe (Meehl et Tebaldi, 2004; IPCC, 2007). Ce changement climatique global est caractérisé par une hausse moyenne des températures mais aussi par une forte variabilité inter annuelle du climat (Giorgi, 2006) favorable à une recrudescence des évènements extrêmes (précipitations intenses, sècheresses, canicules). A l'échelle de la France, les études récemment menées prédisent même une hausse des températures pour le 20ième siècle légèrement supérieure aux tendances établies par l'IPPC à l'échelle globale, avec notamment de fortes variations régionales pour la température maximale (Moisselin et al., 2002) et une augmentation d'évènements extrêmes (Déqué et al., 2007). A l'échelle régionale du bassin parisien, Lemonsu et al. (2013) mettent en évidence un réchauffement de l'ordre de +2.0/2.4°C en hiver et +3.5/5.0°C en été, respectivement pour les températures minimales et maximales, à l'horizon 2100 par rapport à la période historique. Sur le même domaine d'étude, Beaulant et al. (2012) obtiennent, à partir de l'analyse de projections climatiques d'un grand nombre de modèles de climat régionaux, une augmentation très nette du nombre, de la durée et de l'intensité des canicules en 2100, avec en moyenne pour le scénario d'émission de gaz à effet de serre A1B une canicule et demi par an.

Dans ce contexte de changement climatique, les villes tiennent un rôle majeur et complexe : d'un côté, elles contribuent au réchauffement observé à l'échelle globale (IPCC, 2007), de par les émissions de gaz à effet de serre que les activités humaines qu'elles abritent dégagent (trafic routier, chauffage domestique et climatisation, industries, métabolismes dans une moindre mesure) ; de l'autre, ce réchauffement global est susceptible d'être amplifié au cœur des villes par le micro-climat spécifique qui y règne, phénomène bien connu sous le nom d'îlot de chaleur urbain (Oke, 1988) qui se traduit par une anomalie de température positive entre le milieu urbain et la campagne environnante. Sur l'agglomération parisienne, cet îlot de chaleur est de l'ordre 4°C la nuit pour un été standard et peut atteindre jusqu'à 8°C en période de canicule (2003).

Ainsi, le réchauffement climatique au sens large et la recrudescence d'évènements extrêmes comme les canicules peuvent avoir des conséquences écologiques, sanitaires et économiques dramatiques à l'échelle des villes, qui en outre concentrent la population (Rosenzweig et Solecki, 2001), les infrastructures et les activités socio-économiques. La canicule 2003 en France illustre, de façon tragique, les effets combinés de la canicule elle-même et de l'îlot de chaleur urbain qui ont donné lieu à une surmortalité exceptionnelle en Ile-de-France (Canouï-Poitrine et al., 2006) liée à des conditions de stress thermique extrêmes. La question énergétique, et en particulier la demande énergétique des villes pour le chauffage et la climatisation, est également primordiale dans le contexte du changement climatique. Lemonsu et al. (2013) et Pigeon et al. (2012) anticipent notamment une très forte augmentation de la consommation d'énergie en été liée à un usage massif de la climatisation.

Ces perspectives font donc des villes des territoires où non seulement les enjeux de mitigation seront les plus forts, mais aussi des territoires potentiellement plus vulnérables que les milieux naturels au changement climatique. Notons que parmi les conséquences néfastes des canicules, le projet VURCA (ANR-08-VULN-013/VURCA, 2009-2012) a mis en évidence que le niveau de confort ou stress thermique subi par les habitants ainsi que la consommation énergétique étaient les indicateurs les plus pertinents pour définir la vulnérabilité d'une ville aux canicules.

De nombreux leviers d'action sont envisageables pour l'amélioration du confort thermique et de la consommation énergétique en situation de canicule. On peut citer, par exemple, l'adaptation de l'habitat et de l'urbanisme (formes urbaines qui freinent la pénétration du rayonnement et donc le stockage de chaleur, et matériaux plus isolants ou plus réfléchissants), mais aussi la modification des pratiques individuelles, avec le recours aux protections solaires (volets) ou une baisse d'activité aux heures les plus chaudes de la journée.

J'ai plus particulièrement étudié, dans le cadre de ma thèse, deux leviers d'action qui me semblent remarquables du fait de leurs effets et de leurs approches antagonistes : il s'agit de la climatisation et de la végétalisation du tissu urbain.

La climatisation, d'une part, présente l'avantage de proposer une solution rapide et efficace aux températures extrêmes (comme on a pu le voir pendant la canicule 2003). Elle représente une solution d'*urgence* qui est en général mise en place de façon individuelle, à un coût immédiat et raisonnable, afin d'assurer le confort thermique à l'intérieur des bâtiments. C'est une mesure d'adaptation individuelle, non planifiée et dont l'usage est difficile à contrôler, notamment concernant le choix des températures de consigne.

La végétalisation, d'autre part, est une mesure qui, par son pouvoir rafraîchissant sur le climat extérieur, tient lieu à la fois de levier d'adaptation au changement climatique et de levier de mitigation en réduisant la demande de climatisation. La végétation remplit aussi de multiples fonctions au sein de l'écosystème urbain. Le terme de stratégie *sans regret* est d'ailleurs utilisé par Colombert et Boudes (2012) pour la végétation. Ce terme qualifie des stratégies, qui, en plus d'apporter une solution à un problème donné (ici le changement climatique), peuvent être valorisées par les bénéfices conjoints qu'elles offrent : dans le cas de la végétation urbaine, une meilleure gestion des évènements pluvieux intenses et le maintien de la biodiversité par exemple.
La végétation comme mesure d'adaptation tant au micro-climat urbain qu'au changement climatique est de plus en plus reconnue par les habitants, les aménageurs et les acteurs politiques,

même si cette pratique n'est pas encore assez planifiée à l'échelle de l'aire urbaine. Non seulement la variété des solutions végétales (arbres d'alignement, parcs, friches, noues, végétalisation des bâtiments, etc...) est vaste (Anquetil 2011) mais les avantages et les bienfaits que la végétation peut apporter en milieu urbain sont nombreux : réduction de l'îlot de chaleur urbain, de la consommation énergétique des bâtiments et de l'empreinte carbone des villes, amélioration de la qualité de l'air, de la gestion et de la qualité des eaux pluviales, ainsi que de la biodiversité (Anquetil 2010).

Quelque soit le levier d'action considéré, l'évaluation de ses effets est souvent complexe car les processus mis en jeu sont multiples et peuvent interagir entre eux. Ainsi, l'usage de la climatisation génère des rejets de chaleur et d'humidité vers l'extérieur qui peuvent affecter le climat urbain à des échelles différentes. Quant aux solutions végétales, du fait de leurs caractéristiques différentes (densité, hauteur, surface végétalisée, et disposition spatiale dans le tissu urbain), elles n'ont pas les mêmes effets sur les fonctions qu'elles adressent. Et les effets synergiques de plusieurs solutions ne sont pas encore bien connus. C'est pourquoi l'évaluation des mesures d'adaptation au changement climatique passe par une approche globale du système urbain, appelée approche *écosystémique*. Ce type d'approche permet de prendre en compte les effets synergiques et antagonistes d'une même mesure d'adaptation sur un ou plusieurs processus, comme de plusieurs mesures sur un processus d'intérêt. Ainsi, la thématique du climat urbain, qui était initialement étudiée par les climatologues seuls, regroupe maintenant architectes, géographes, hydrologues, urbanistes, et aménageurs pour l'étude du système urbain dans sa globalité. Une conséquence de cette approche est l'augmentation des projets de recherche pluri-disciplinaires.

L'approche écosystémique implique des méthodes d'études des processus différentes et la modélisation numérique est finalement l'outil le mieux adapté pour l'évaluation des interactions entre processus et mesures d'adaptation, pour des villes et des climats variés. Deux types de modélisation abordent des aspects différents : celle à fine échelle qui permet l'étude détaillée de processus physiques spécifiques à l'échelle du bâti ou du quartier ; celle à une échelle plus large, allant du quartier à l'agglomération, qui permet de mieux étudier les interactions entre processus et ainsi fournir des réponses intégrées à l'échelle de la ville.

Au CNRM-GAME, les études micro-climatiques menées à l'échelle de la ville depuis une dizaine d'années sont basées sur une plateforme de modèles (Masson et al., 2013) qui simule les interactions entre différents types de surface (urbaines, naturelles et en eau) et l'atmosphère. Couplés à un modèle atmosphérique, ces modèles permettent l'étude de processus spécifiques sur des périodes temporelles courtes. Forcés avec des données météorologiques, ils permettent d'étudier des processus sur de plus longues périodes temporelles à moindre coût numérique.

Pour répondre aux besoins d'évaluation des stratégies d'adaptation au changement climatique, le modèle de canopée urbaine TEB (Town Energy Balance) développé par Masson (2000) s'est étoffé ces dernières années. De nouvelles paramétrisations permettent de mieux décrire les processus énergétiques des bâtiments (Bueno et al., 2012), les interactions à fine échelle entre le bâti et la végétation (Lemonsu et al., 2012). Des indicateurs ont été développés pour évaluer la vulnérabilité énergétique (Bueno et al., 2012) et la vulnérabilité thermique (Pigeon, 2011). Enfin, un générateur d'îlot de chaleur urbain a aussi été développé pour permettre de simuler les rétro-actions surface-atmosphère sans le recours à un modèle atmosphérique complexe et coûteux.

L'ensemble de ces développements permet ainsi d'évaluer des scénarios d'adaptation : variation du tissu urbain de départ, mesures d'adaptation simulées de façon combinée ou indépendante, ... La construction de scénarios prospectifs est une étape majeure dans l'évaluation des performances des mesures d'adaptation.

Ainsi, ces thèmes se retrouvent dans l'objectif général de ma thèse qui consiste à améliorer les typologies de végétation urbaine du modèle de canopée urbaine TEB, afin d'évaluer l'adaptation de la ville par la climatisation et la végétalisation pour l'amélioration du confort thermique et de la consommation énergétique.
Pour répondre à cet objectif, ma thèse est articulée en quatre parties.

La première partie, intitulée **Contexte et état de l'art** dresse tout d'abord un état des lieux des connaissances relatives aux enjeux du changement climatique en milieu urbain et développe le thème de l'adaptation de la ville en rapport avec la climatisation et la végétalisation (Chap. 2). Le rôle de la végétation urbaine, cœur de la thèse, est présenté plus en détail. Le Chap. 3 décrit ensuite le contexte des trois projets de recherche dans lequel mon travail de thèse s'est inséré (CLIM2, MUSCADE, et VegDUD), ainsi que mes outils numériques de travail, avant de rappeler les principaux objectifs du travail de thèse.

Dans une seconde partie, le thème de l'**adaptation par la climatisation** est abordé dans le cadre du projet CLIM2. Le travail de simulation réalisé pour quantifier l'impact de la climatisation sur les températures urbaines extérieures en situation de canicule est présenté, sous la forme d'une publication (de Munck et al., 2013).

La troisième partie se concentre sur l'**adaptation par la végétation** pour les situations estivales futures, en trois chapitres. En premier lieu, elle décrit les développements que j'ai réalisés dans le cadre des projets MUSCADE et VegDUD pour mieux prendre en compte la végétation urbaine dans le modèle TEB, à savoir deux paramétrisations, la première (Chap. 5) pour la simulation des toitures végétalisées, appelée *GREENROOF*, la seconde (Chap. 6) pour l'arrosage automatique de l'ensemble de la végétation urbaine (au sol et en toiture). Une publication détaille le modèle GREENROOF et sa calibration à partir d'un cas d'étude (de Munck et al., 2013b). S'ensuit un chapitre méthodologique (Chap. 6) qui décrit les différents scénarios de végétalisation que j'ai mis en œuvre et évalués dans le cadre du projet MUSCADE pour l'agglomération parisienne ainsi que les indicateurs spécifiques que j'ai produits et évalués pour les aspects de confort thermique, de demande énergétique et de consommation en eau. Les résultats des performances respectives des scénarios évalués en contexte de canicule sont synthétisés dans le dernier chapitre de cette section.

Finalement, dans une quatrième section intitulée **Impacts saisonniers**, les impacts annuels et saisonniers des scénarios de végétalisation mis en place pour l'amélioration des situations estivales sont analysés en termes de confort, de consommation énergétique et de gestion d'eau.

Le manuscrit s'achève sur une conclusion qui présente les avancées majeures auxquelles la thèse a contribué. Pour finir, je dresse une liste de perspectives qu'il serait, selon mon point de vue, intéressantes d'aborder, dans la continuité de ce travail.

Première partie

Contexte et état de l'art

CHAPITRE 2

Etat de l'art

Contents

2.1 Villes et changement climatique : contexte et enjeux 8
2.1.1 Ilot de chaleur urbain 8
2.1.2 Changement climatique et conséquences en ville 11
2.2 Stratégies d'adaptation pour les villes 15
2.2.1 La climatisation 16
2.2.2 Les stratégies de végétalisation 17
2.2.2.1 Différentes typologies de végétation mises en œuvre en ville . . 17
2.2.2.2 Rôle de la végétation urbaine 19
2.2.2.3 Etat des lieux des études existantes 22
2.2.3 Conclusions 26

2.1 Villes et changement climatique : contexte et enjeux

2.1.1 Ilot de chaleur urbain

Les villes sont soumises à un micro-climat particulier qui est caractérisé par des températures près du sol généralement plus chaudes au centre des villes qu'en périphérie. Ce phénomène, appelé *îlot de chaleur urbain* (*ICU*) et qui a été mis en évidence pour la première fois à Londres en 1820 (Landsberg, 1981) a marqué, dans les années 1980, le début de l'ère de la recherche en climatologie urbaine.

La formation et l'intensité d'un ICU dépendent de plusieurs facteurs, à commencer par les conditions météorologiques. Les différences de températures ville-campagne apparaissent par temps clair avec peu de vent et sont en général plus marquées en début de nuit comme le montre la FIGURE 2.1. Un autre exemple de ces différences est présenté sur la FIGURE 2.2 pour la ville de Toulouse, à partir de mesures acquises en hiver pendant la campagne CAPITOUL (Masson et al., 2008), avec un îlot de chaleur d'environ 4°C.

Ces îlots de chaleur s'expliquent par le remplacement des sols végétalisés et perméables par des bâtiments et revêtements imperméables. La comparaison des bilans d'énergie des surfaces naturelles et urbanisées permet d'appréhender les processus physiques qui sont à l'origine de ce phénomène.

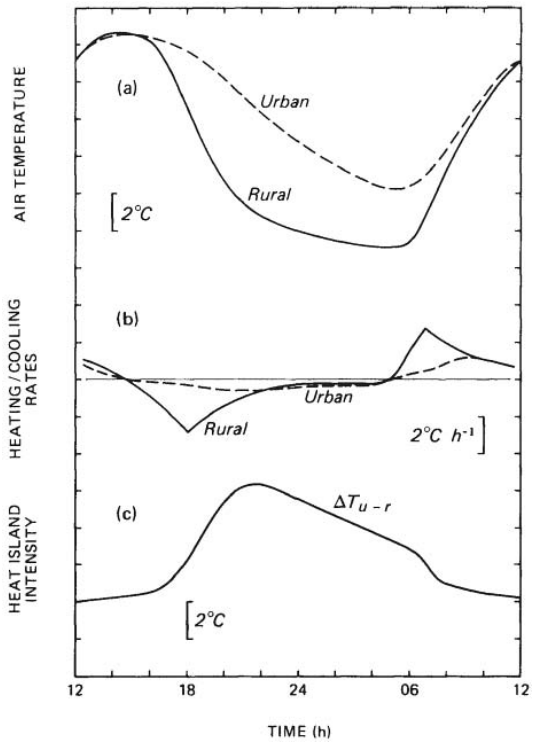


FIGURE 2.1 – *Différences temporelles typiques (a) des températures de l'air en milieu rural et urbain, (b) des taux de refroidissement/réchauffement respectifs, et (c) de l'intensité de l'îlot de chaleur résultant, en conditions météorologiques idéales (d'après Oke, 1987)*

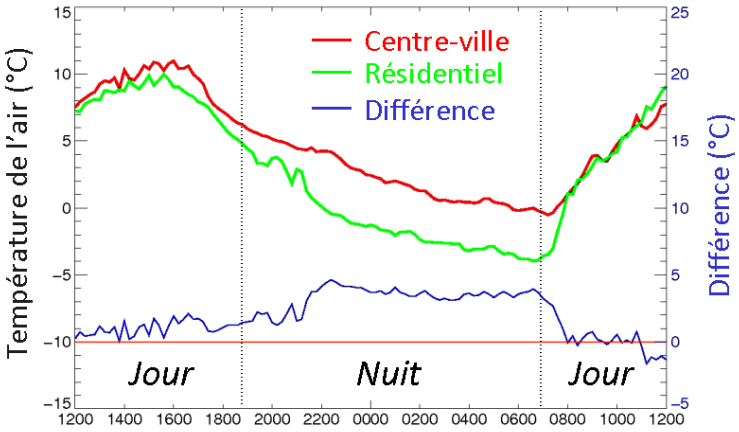


FIGURE 2.2 – *Evolution temporelle des températures de l'air en milieu rural et péri-urbain observées dans l'agglomération toulousaine le 25 février 2005 pendant la campagne CAPITOUL (2004-2005), le 25 février 2005. Source : Pigeon et al. (2008a)*

En effet, si on calcule le bilan énergétique d'une surface naturelle, on obtiendra à partir de l'EQUATION 2.1 la répartition des flux présentée sur la FIGURE 2.3 du haut.

$$Q^* = Q_{LE} + Q_H + \Delta Q_S + \ (\Delta Q_A) \tag{2.1}$$

où Q^* est le rayonnement net résultant du bilan radiatif dans le visible et l'infrarouge (qui dépend des caractéristiques radiatives, albédo et émissivité des surfaces), Q_{LE} et Q_H, les flux de chaleur respectivement latent et sensible, et enfin ΔQ_S le terme de stockage de chaleur dans le sol, avec éventuellement un terme d'advection de chaleur ΔQ_A.
Le bilan énergétique d'une surface urbaine formulé par Oke (1988) est similaire, avec un apport de chaleur supplémentaire Q_F provenant des activités anthropiques (trafic routier, industrie, chauffage, etc.) :

$$Q^* + Q_F = Q_{LE} + Q_H + \Delta Q_S + \ (\Delta Q_A) \tag{2.2}$$

Les termes de gauche dans ces deux bilans énergétiques représentent les apports d'énergie nets et les termes de droite les différents processus de dissipation et stockage d'énergie pour les surfaces condidérées. Les différences de température qui caractérisent l'ICU proviennent d'une part d'un apport supplémentaire de chaleur (Q_F) dans les villes et d'autre part de la façon différente dont cette énergie est dissipée à la ville et à la campagne.

Comme on peut le voir sur la FIGURE 2.3 du haut, le bilan d'énergie à la campagne se caractérise par des pertes de chaleur latente élevées et bien supérieures aux pertes sensibles du fait de l'évaporation des sols et de la transpiration des plantes et un terme de stockage relativement faible. Dès lors que la surface s'urbanise (FIGURE 2.3 du bas), même faiblement comme dans l'exemple présenté sur la FIGURE 2.3 du bas (36 %), les modes de dissipation de la chaleur sont différents, avec de faibles pertes de chaleur latente qui conduisent à une répartition des flux de chaleur sensible/latent inversée par rapport à celles de la campagne du fait de l'imperméabilisation des surfaces, avec un rapport de Bowen, Q_H/Q_{LE} plus élevé (1.28) qu'à la campagne (0.46), et aussi un stockage de chaleur élevé dans les matériaux urbains à forte capacité thermique. La nuit, les surfaces urbaines dissipent cette chaleur stockée en journée, par refroidissement infrarouge, et limitent ainsi le refroidissement de l'air urbain.

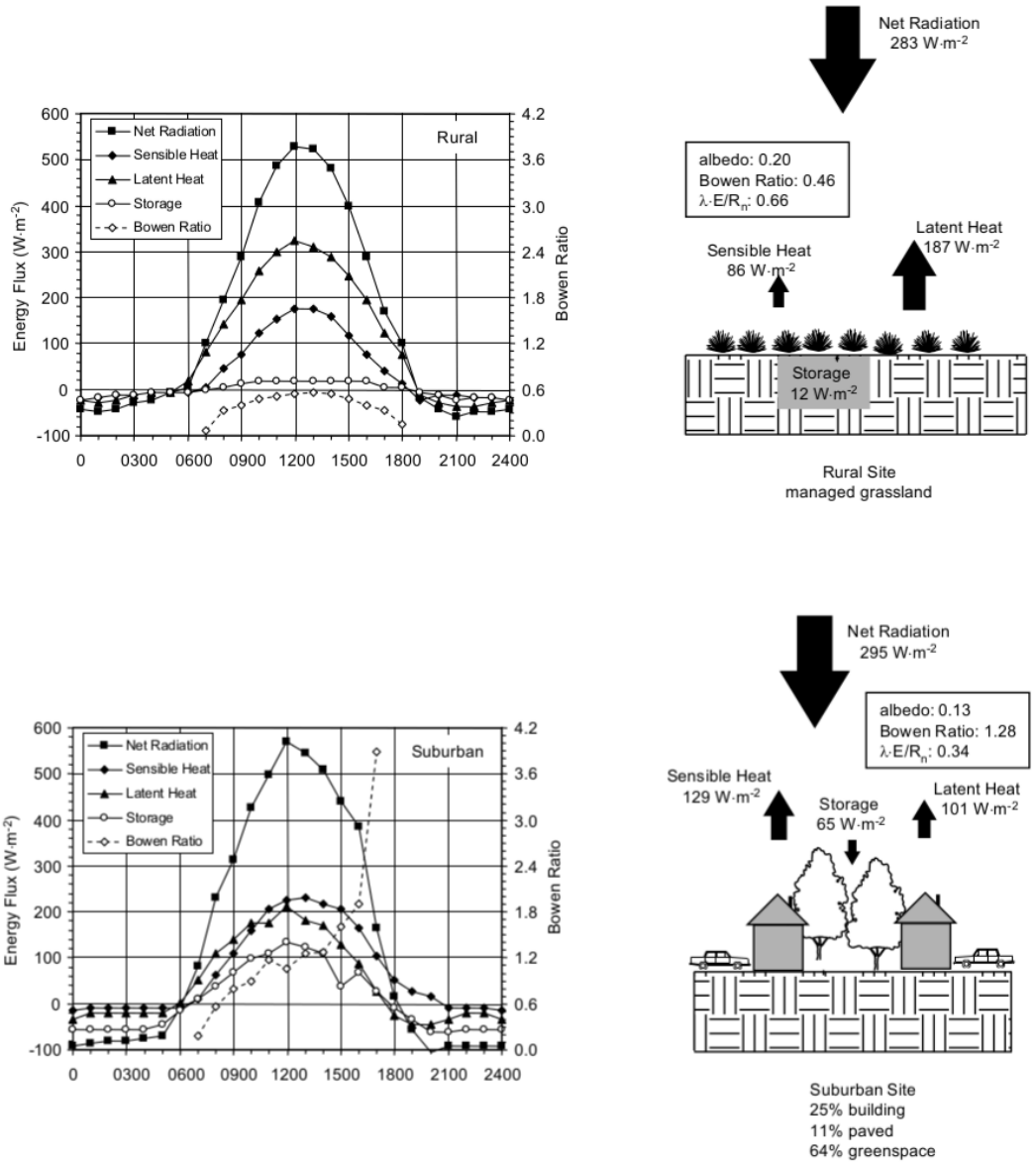


FIGURE 2.3 – *Comparaison des composantes du bilan radiatif (rayonnement net, flux de chaleur sensible et latent, et terme de stockage) pour un jour d'été moyen à Vancouver (Bristish Columbia), en zone rurale (haut) et en zone péri-urbaine (bas). A gauche sont indiqués les cycles diurnes des flux, à droite leur valeurs aggrégées sur les heures de jour. Source : Bonan (2002) d'après Cleugh et Oke (1986)*

Il règne ainsi au cœur des villes des températures généralement plus élevées que dans les zones rurales alentour. Mais comment ce micro-climat urbain, que l'on caractérise généralement par ses températures ou par l'amplitude de son îlot de chaleur urbain, est susceptible d'évoluer dans les prochaines décennies, est une question complexe qui nécessite de prendre en compte non seulement le changement du climat à l'échelle globale mais aussi l'expansion des zones urbanisées. Ce dernier aspect, bien qu'important, ne sera pas étudié dans ce travail de thèse. Son impact sur le climat urbain, peu étudié jusqu'ici, fait partie des objectifs des projets de recherche MUSCADE (ANR-09-VILL-0003, 2012-2013) et ACCLIMAT (RTRA-STAE, 2010-2013) dans lesquels le GAME est investi.

2.1.2 Changement climatique et conséquences en ville

Le **changement climatique global** est caractérisé par une hausse moyenne des températures mais aussi une forte variabilité inter annuelle du climat favorable à une recrudescence des évènements extrêmes (précipitations intenses, sècheresses, canicules, Giorgi, 2006). Les projections climatiques actuelles prévoient même une intensification du réchauffement climatique qui est déjà observé à l'échelle du globe (Meehl et Tebaldi, 2004; IPCC, 2007).

A l'échelle de la France, les études récemment menées prédisent pour le 20ième siècle une hausse des températures légèrement supérieure aux tendances établies par l'IPCC à l'échelle globale (IPCC, 2007) avec de fortes variations régionales pour la température maximale (Moisselin et al., 2002) ainsi qu'une augmentation d'évènements extrêmes (Déqué et al., 2007).

A l'échelle régionale du bassin parisien, Lemonsu et al. (2013) ont mis en évidence en climat futur un réchauffement moyen des températures minimales/maximales qui est plus marqué en été (+ 3.5/5.0°C) qu'en hiver (+ 2.0/2.4°C). Ce réchauffement estival moyen est associé à une augmentation du nombre de jours chauds à très très chauds (FIGURE 2.4 e et f) et de nuits qualifiées de *tropicales* (FIGURE 2.4 g), avec un effet plus marqué dans le tissu péri-urbain que dans les tissus urbains ou ruraux. D'après le scénario d'émission A1B (A2), pour le tissu urbain qui nous intéresse, le nombre de jours moyens annuels qualifiés de très chauds (5.5 en climat présent) pourrait atteindre 29 (42), et celui de jours très très chauds 33 (47) d'ici à la fin du siècle, avec pour conséquence une augmentation des alertes de canicule (FIGURE 2.4 g).

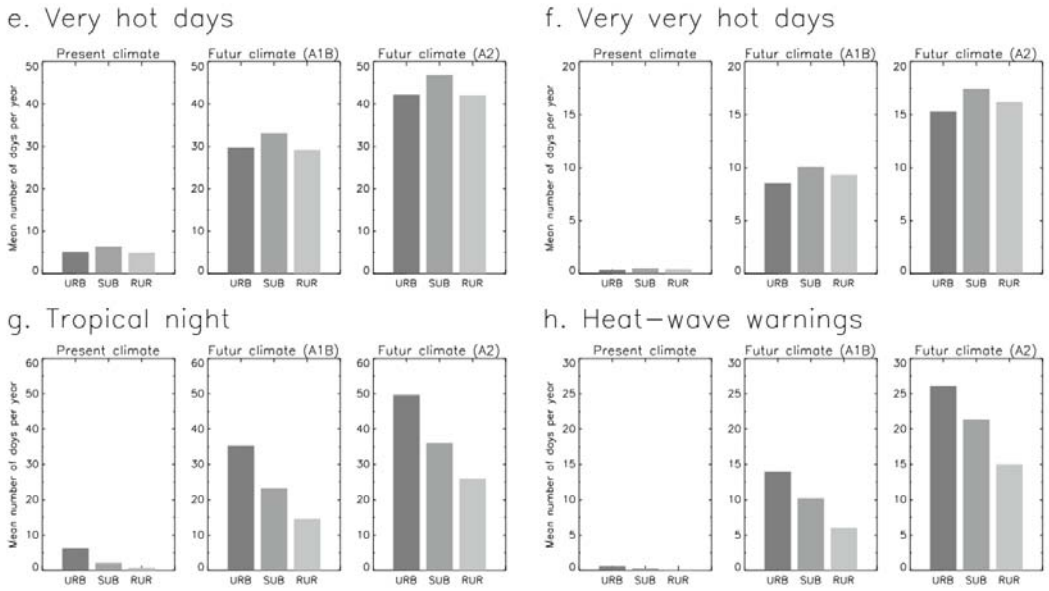


FIGURE 2.4 – *Nombres de jours très chauds (Tmax>=30° C) et très très chauds (Tmax>=35° C), de nuits tropicales (Tmin>=20° C) et d'alertes canicule, par an, en climat présent et futur d'après Lemonsu et al. (2013)*

Sur le même domaine d'étude que Lemonsu et al. (2013), Beaulant et al. (2012) obtiennent, à partir de l'analyse de projections climatiques d'un grand nombre de modèles de climat régionaux, une augmentation très nette du nombre, de la durée et de l'intensité des canicules sur la période 2071-2100, avec en moyenne pour le scénario d'émission A1B une canicule et demi par an.

Conséquences sur l'îlot de chaleur urbain

Un des enjeux de l'étude du micro-climat urbain est d'appréhender l'impact que le changement climatique pourrait avoir en milieu urbain, en termes notamment d'îlot de chaleur.
Comme bon nombre d'études ont montré que le climat futur serait notamment caractérisé par une augmentation de la fréquence de canicules, l'étude du micro-climat en contexte de canicule est un bon indicateur du micro-climat futur. Les températures minimales nocturnes relevées en Ile-de-France au cours de l'été 2003 ont permis d'évaluer la structure et l'amplitude de l'îlot de chaleur qui s'est établi pendant la canicule d'août 2003 à l'échelle du bassin parisien (FIGURE 2.5 de droite).

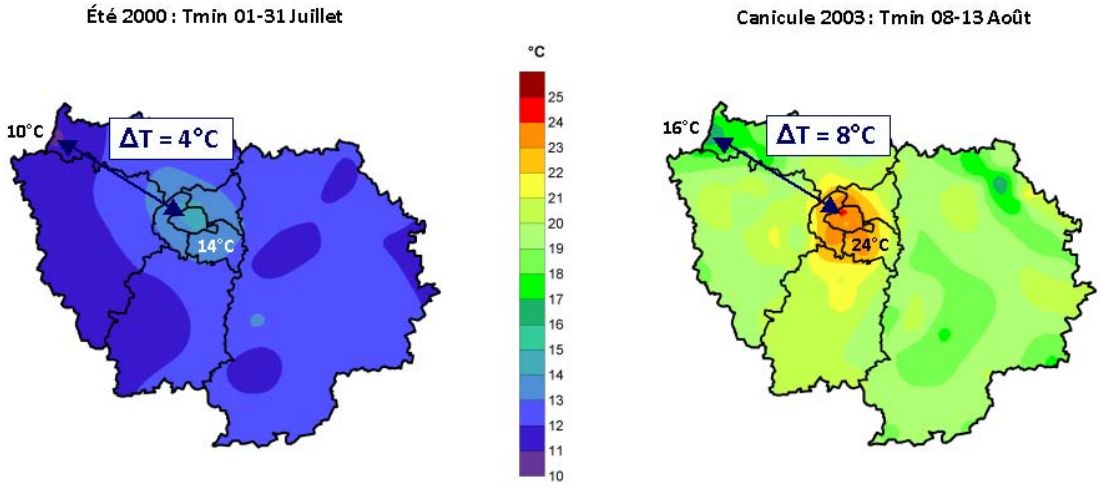


FIGURE 2.5 – *Cartes des températures minimales relevées aux stations météorologiques de Météo France en Ile-de-France et interpolées spatialement, au cours d'un été moyen (2000) et de la canicule d'août 2003. Source : Kounkou-Arnaud R, Météo-France*

Au cours de cette canicule, l'îlot de chaleur nocturne moyen était deux fois plus intense que celui observé lors d'un été moyen (8°C au lieu de 4°C habituellement), avec des températures extérieures au centre de Paris de l'ordre de 24°C en moyenne, et plus élevées au plus fort de la canicule. Ces gammes de températures, au-delà de compromettre le confort thermique des habitants, peuvent avoir des conséquences sanitaires graves, comme l'a attesté la surmortalité observée en août 2003 (FIGURE 2.6), qui fait état d'environ 15 000 décès en excès au cours de la canicule, imputables aux extrêmes chaleurs (Hémon et Jougla, 2004).

Parallèlement, les simulations réalisées par Lemonsu et al. (2013) à l'échelle du bassin parisien suggèrent, malgré une fréquence plus élevée de nuits tropicales en milieu urbain, qu'en péri-urbain ou rural (FIGURE 2.4 g) et exacerbée en climat futur, que les ICUs seront en moyenne moins marqués en climat futur qu'en climat présent. Ces résultats s'expliqueraient par l'élévation des températures rurales en climat futur, conséquence de l'assèchement des sols.
Il est donc difficile de conclure quant à l'impact des changements climatiques sur les îlots de chaleur urbains, sachant qu'au delà des aspects purement morphologiques et spatiaux (expansion urbaine) qui ne sont pas abordés ici, celui-ci est fortement corrélé à la ressource en eau, comme le montre l'étude de Lemonsu et al. (2013).

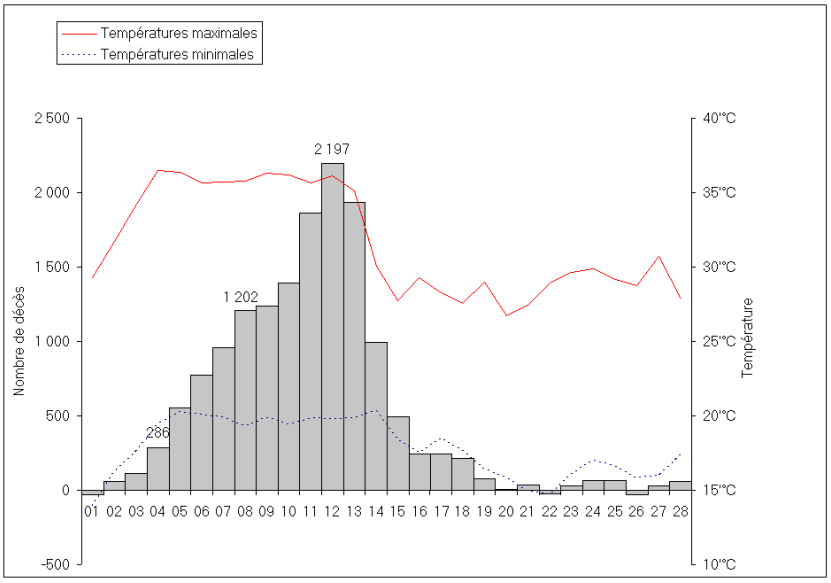


FIGURE 2.6 – *Surmortalité journalière observée en France pendant le mois d'août 2003 comparé au relevé des températures extérieures d'après le rapport réalisé par l'INSERM (Hémon et Jougla, 2004)*

Méthodes pour les études d'impacts en climat futur

L'étude des impacts du changement climatique et des stratégies d'adaptation en milieu urbain (et donc la question des forçages des modèles numériques), peut être abordée par des méthodes plus ou moins complexes :

1. en appliquant des méthodes statistico-dynamiques de descente d'échelle aux projections climatiques des modèles régionaux, comme l'ont fait Lemonsu et al. (2013) sur Paris dans le cadre du projet EPICEA (Desplat et al., 2012) ;

2. par la recherche et l'étude d'*analogues climatiques*. Pour une ville donnée dont le climat futur a été établi par projections climatiques, cette méthode consiste à rechercher le climat actuel (présent) qui pourrait raisonnablement être considéré comme *analogue* ou *équivalent* en termes de températures mensuelles moyennes, cumuls de précipitation mensuels et annuels (caractéristiques climatiques généralement fournies par les projections climatiques régionales). Une fois l'analogue climatique établi, les forçages des modèles pour la réalisation d'études d'impacts peuvent être réalisés à partir des conditions météorologiques actuelles du climat analogue. Par cette méthode, Hallegatte et al. (2007) ont établi les analogues climatiques de 17 mégapoles Européennes (FIGURE 2.7). Leurs résultats (FIGURE 2.7) montrent par exemple que les climats futurs des villes de Paris et Marseille d'ici à la fin du siècle seront équivalents à celui de l' Andalousie ;

3. ou bien par l'analyse d'évènements extrêmes représentatifs du climat futur, comme c'est le cas pour la canicule 2003 qui est estimée représentative en intensité et en durée des projections de températures estivales après 2050 (FIGURE 2.8).

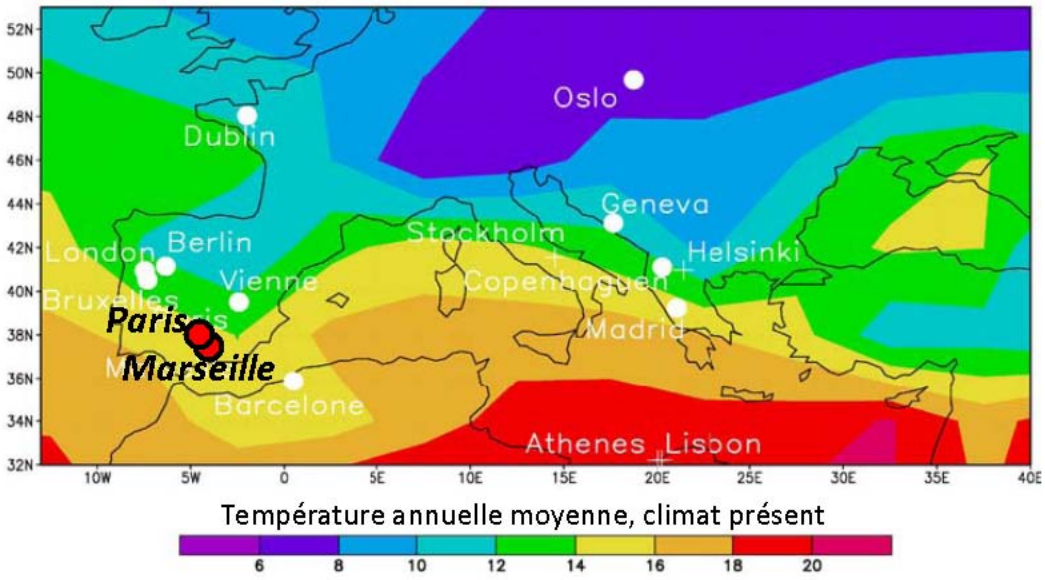


FIGURE 2.7 – *Projection du climat futur des grandes métropoles européennes, calculée pour le scénario d'émission A2 avec le modèle régional du Hadley Centre HadRM3H d'après Hallegatte et al. (2007)*

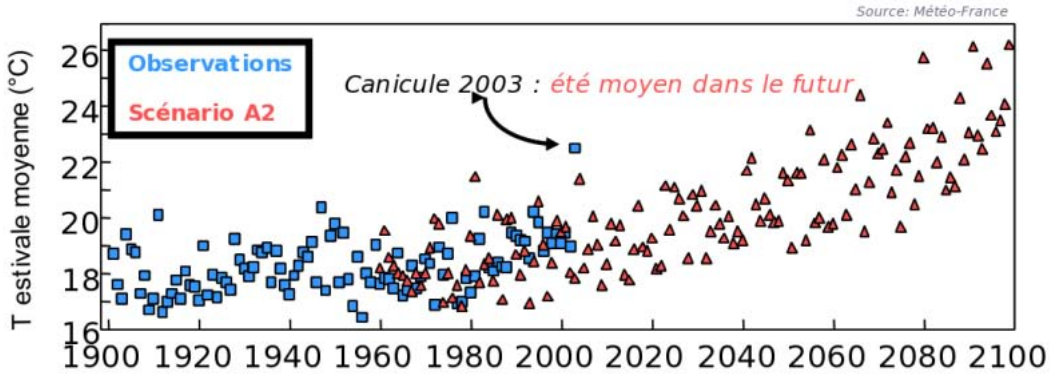


FIGURE 2.8 – *Températures estivales moyennes en France 1900-2100.*

Considérations énergétiques

En lien direct avec la problématique du confort et du stress thermique, l'augmentation des températures urbaines futures laisse supposer une augmentation de la consommation d'énergie liée à la sur-demande de climatisation.

Pendant la canicule 2003, considérée comme représentative des étés moyens d'ici la fin du siècle, cette sur-consommation d'énergie liée aux besoins de climatisation, avait été estimée à 10 % de la consommation d'électricité totale. Du fait des changements climatiques, le rapport commandité par la Communauté Européenne (Adnot, 2003a,b) prévoit en France une augmentation de la consommation d'énergie liée à la climatisation de 180 % entre 2003 et 2020.

Par l'approche statistico-dynamique utilisée par Lemonsu et al. (2013), l'évolution de la consommation d'énergie du bassin parisien concernant les besoins en chauffage et en climatisation futurs a été évaluée par le biais du nombre de degrés jour de chauffe (DJH) et de climatisation (DJC), en

prenant comme températures de référence respectivement 18°C et 24°C (standards français). Du fait de l'élévation des températures hivernales mise en évidence dans leur étude, une diminution moyenne des DJH de 30% en milieu urbain et de 26 % dans le péri-urbain est observée. Inversement, l'élévation des températures estivales engendre une augmentation des DJC de 8 à 14% selon le scénario d'émission (respectivement A1B et A2) en milieu urbain. Comme l'augmentation des DJC reste inférieure à la diminution des DJH, Lemonsu et al. (2013) montrent une diminution du nombre de degré jours quelque soit le scénario d'émission considéré.

Par le biais d'une autre méthode, celle des analogues climatiques citée précédemment (Hallegatte et al., 2007) et du modèle de canopée urbaine TEB-BEM (Bueno et al., 2012), Pigeon et al. (2012) ont simulé l'évolution de la consommation d'énergie d'ici à la fin du siècle : ils ont montré que les consommations respectives de chauffage et de climatisation actuelles seraient susceptibles de s'équilibrer voire de s'inverser en climat futur (Table 2.1).

		Consommation d'énergie (kWh m $^{-2}$ plancher an^{-1})	
Climat	**Bâtiment**	**Chauffage**	**Climatisation**
Présent	Haussmannien	83	5
Présent	Collectif	124	9
Futur	Haussmannien	23	42
Futur	Collectif	42	69

Table 2.1 – *Répartition des consommations d'énergie dues à l'usage du chauffage et de la climatisation au cours d'une année et pour deux types de bâtiments situés à Paris (Haussmannien et Collectif), calculées avec le modèle TEB couplé à EnergyPlus (Bueno et al., 2011), en climat présent et futur (Cordoue, Andalousie), d'après Pigeon et al. (2012)*

Les tendances de consommation énergétique différentes établies dans ces deux dernières études, qui diffèrent dans leur approche et l'échelle qu'elles considèrent, mettent en évidence non seulement la difficulté de prédire l'impact du changement climatique sur les consommations énergétiques des villes, mais surtout une tendance à l'augmentation des besoins énergétiques liés à l'usage de la climatisation. Ces perspectives climatiques, sanitaires et énergétiques mettent en évidence la vulnérabilité des villes au changement climatique et le besoin de définir rapidement des stratégies de mitigation et d'adaptation.

2.2 Stratégies d'adaptation pour les villes

Il existe différentes formes et échelles de mise en œuvre de stratégies d'adaptation pour faire face aux changements climatiques dans les villes :

— celle de l'aménagement urbain qui passe par la requalification des surfaces urbaines (avec par exemple une augmentation des espaces verts) ;

— celle du bâti (modifications des formes urbaines et de l'enveloppe interne et externe des bâtiments avec un choix de matériaux plus isolants et/ou réfléchissants) ;

— et finalement, celles individuelles que les êtres humains mettent en place de façon innée ou suggérée comme l'a démontré le projet de recherche PIRVE (Programme Interdisciplinaire

de Recherche Ville et Environnement) : baisse de l'activité aux heures les plus chaudes de la journée, recours aux protections solaires (volets à l'intérieur, situations ombragées à l'extérieur), et/ou à la climatisation.

Dans le cadre de ma thèse, deux stratégies d'adaptation, la climatisation et la végétalisation urbaine, qui sont fréquemment mises en œuvre pour l'amélioration du confort thermique et/ou de la demande énergétique, sont évaluées à l'échelle de la ville. Ces deux types de stratégies ont des effets potentiellement antagonistes. La climatisation présente un intérêt car c'est une solution d'urgence qui peut être mise en place de façon individuelle, ponctuelle, et à un coût raisonnable, pour assurer un minimum de confort thermique à l'intérieur des bâtiments. Elle présente cependant l'inconvénient de ne pas être planifiée à l'échelle du territoire urbain et d'affecter la température de l'air dans la rue. Au contraire, la végétalisation des villes, de part son pouvoir rafraîchissant, régulateur du micro-climat urbain, peut si elle est planifiée, tenir lieu à la fois de levier d'adaptation et de mitigation. La végétalisation présente aussi l'avantage de résoudre ou d'améliorer d'autres problématiques urbaines comme la gestion des eaux pluviales ou la qualité de l'air pour ne citer que deux exemples.
Les paragraphes suivants présentent les principaux dispositifs associés à ces deux stratégies et les effets qui leur sont prêtés à différentes échelles.

2.2.1 La climatisation

Méthode d'adaptation au changement climatique, la climatisation ne vise qu'un objectif, mais pas le moindre, celui du confort à l'intérieur des bâtiments. Face aux épisodes de fortes chaleurs estivales, certains bâtiments recourent nécessairement à la climatisation pour rafraîchir non seulement l'environnement des personnes mais aussi du matériel. C'est le cas d'un certain nombre de bâtiments résidentiels mais surtout des bâtiments de bureaux ou de tourisme, ainsi que de la plupart des établissements de soins ou paramédicaux qui prennent en charge des personnes âgées (plus fragiles aux 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, centres informatiques,...), ou qui nécessitent des conditions microclimatiques contrôlées (musées, chambres froides). Différents types d'installations de refroidissement, répartis dans la ville, permettent de satisfaire ces besoins en froid (Figure 2.9) : des systèmes individuels (a) ou collectifs (b) qui rejettent de l'air chaud dans la rue (*rejets secs*), des systèmes (c) qui rejettent la chaleur sous forme de vapeur d'eau dans l'air (*rejets humides*), et parfois dans les grandes villes (comme Paris, Londres et Barcelone, etc ...), des réseaux de production et de distribution d'eau glacée (d) qui rejettent une grande partie de la chaleur dans l'eau des rivières (technique connue sous le nom de *free cooling*). Dans le cas de Paris, le réseau urbain de froid géré par la société Climespace (à l'origine du projet de recherche CLIM2, Chap. 3) distribue de l'eau glacée produite par des centrales frigorifiques à près de 500 immeubles neufs ou rénovés de la capitale.

Tous ces systèmes, de par leurs technologies respectives n'ont pas les mêmes rendements et ne génèrent donc pas la même demande énergétique. Aussi, du fait de leur localisation en façade, sur les toits, ou en souterrain, ils n'ont pas non plus les mêmes impacts sur l'environnement extérieur (nuisances sonores, rejets de chaleur notamment). Cette question des impacts de la climatisation est primordiale car il faut finalement être capable d'évaluer les effets et nuisances potentielles de cette mesure d'adaptation mise en place pour le confort intérieur sur l'environnement extérieur et les habitants.

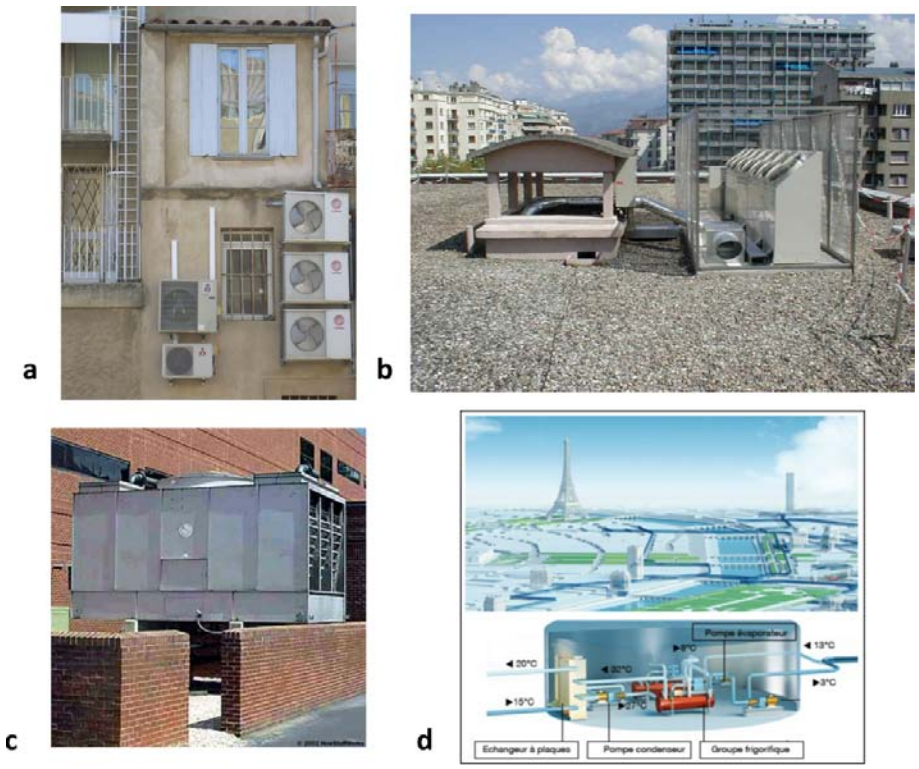


FIGURE 2.9 – *Quatre systèmes de climatisation urbains*

Enfin, l'usage que font les habitants de la climatisation varie selon leur perception du confort thermique. Par conséquent, à l'échelle de la ville, ces comportements se traduisent par des températures de consignes différentes dans les bâtiments. La règlementation thermique en cours (RT 2012) recommande une température de consigne de 26°C, ce qui, on le sait, est rarement suivi, les logements et les zones de bureaux et d'activités étant souvent plus fortement climatisés.

Alors que de nombreuses études existent sur l'impact du micro-climat urbain sur la demande climatisation, peu se sont intéressées à l'impact inverse, celui de la climatisation sur l'environnement extérieur. Celles qui ont simulé cet impact à partir de modèles de complexités variables ont estimé que cet impact était de l'ordre de + 1-2°C pour des échelles d'étude différentes, allant du quartier à l'échelle de la ville (Salamanca et al., 2011; Ohashi et al., 2007; Kikegawa et al., 2003; Hsieh et al., 2007).

2.2.2 Les stratégies de végétalisation

2.2.2.1 Différentes typologies de végétation mises en œuvre en ville

La variété des solutions végétales pour le milieu urbain est vaste comme le montre Anquetil (2011) dans l'inventaire qu'elle a dressé dans le cadre du projet VegDUD (ANR-09-VILL-0007-08). Les typologies de végétation les plus fréquemment rencontrées sont les suivantes : arbres d'alignement, bois, parcs, squares, terrain de jeux et de sport, friches, jardins familiaux, et plus récemment les enveloppes végétales des bâtiments (telles que les façades et toitures végétalisées) et les noues végétalisées par exemple.

Du point de vue du modélisateur urbain, ces solutions végétales peuvent se classer en fonction des échelles auxquelles elles sont mises en œuvre :

— l'échelle du bâtiment pour les enveloppes végétales des bâtiments (murs et toits) ;

— l'échelle de la rue pour les surfaces végétalisées de pleine terre comme les pelouses et les arbres d'alignement ;

— l'échelle du quartier ou de la ville pour les surfaces végétalisées de pleine terre comme par exemple les parcs et bois urbains, les squares, les terrains de jeux, les jardins familiaux, les noues végétalisées ;

— l'échelle du paysage dans le cas des forêts péri-urbaines.

De plus, une certaine variabilité existe à l'intérieur même de chaque dispositif. Par exemple, on trouve en ville des toitures végétales qualifiées d'*extensives*, de *semi-intensives* ou d'*intensives* (Figure 2.10). Celles intensives ou semi-intensives sont plus complexes et coûteuses à mettre en place et à entretenir et telles de vrais jardins sont en général destinées à un usage récréatif. Celles *extensives* sont constituées de végétaux de plus petite taille (pelouses de sédums, graminées, plantes endémiques) nécessitant un support de culture relativement fin (de l'ordre de 10 cm) et sont donc moins lourdes à mettre en œuvre que les précédentes. Elles sont généralement implémentées pour leurs performances thermiques, énergétiques et hydrologiques (Wark et Wark, 2003), tout en contribuant à améliorer l'esthétique du bâtiment.

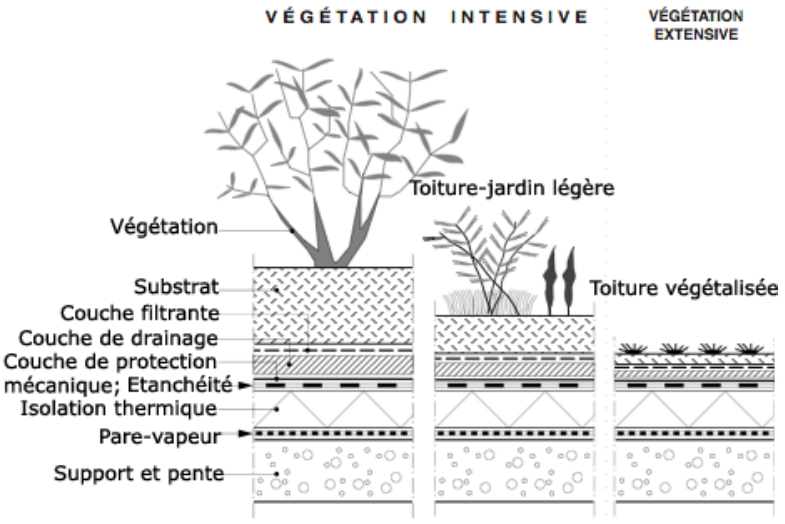


Figure 2.10 – *Différents types de toitures végétalisées. Source : GARDEN-DECO.BE*

Le terme de *façades végétalisées* regroupe aussi plusieurs formes de dispositifs qui du point de vue du modélisateur ne se simulent pas de la même façon, et n'ont pas non plus les même effets sur le bâtiment et l'environnement extérieur. On peut les classer en trois grandes familles comme l'a proposé Malys (2009) : celle des *revêtements de façade* (plantes grimpantes comme le lierre, Figure 2.11 a), celle des *brises-soleil* (Figure 2.11 b), et celle des *éléments de parois* (Figure 2.11 c) qui sont les plus proches des dispositifs mis en œuvre pour les toitures végétalisées extensives. Les différences entre ces trois grandes familles et au sein de chaque famille de

façades végétalisées ont pour conséquences qu'elles ne se modélisent pas de la même façon et suggèrent qu'elles n'ont pas les mêmes effets sur l'environnement intérieur et extérieur aux bâtiments.

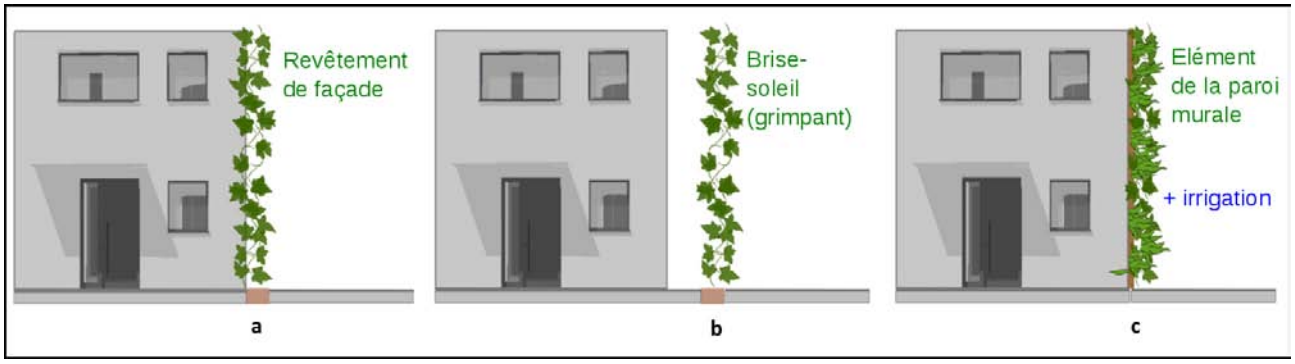


FIGURE 2.11 – *Différents types de façades végétalisées*

Quant aux dispositifs faisant intervenir des arbres urbains, ils varient aussi en termes d'agencement spatial (arbre isolé ou en bosquet, arbres d'alignement, ceintures péri-urbaines) et d'essence. Le choix des essences d'arbres utilisées en milieu urbain est important car celles-ci varient en hauteur, et en forme et taille de houppier, qui comme on le verra plus loin sont des paramètres qui confèrent aux arbres des effets variables sur l'environnement qui les entoure. Du point de vue du modélisateur, il est intéressant de répertorier les essences urbaines les plus courantes afin de modéliser leurs caractéristiques, notamment géométriques par rapport aux bâtis urbains. Un travail collaboratif, réalisé avec Karine Adeline, doctorante à l'ONERA, nous a permis d'établir, notamment à partir des *Chartes de l'arbre urbain* ou des bases de données SIG des Services d'Espaces Verts (Paris et Nantes) publiées par différentes grandes villes les essences principales que l'on trouve en milieu urbain (TABLE 2.2), et finalement les caractéristiques géométriques des essences principales (TABLE 2.3) qui sont à prendre en compte pour leur modélisation.

2.2.2.2 Rôle de la végétation urbaine

La végétation agit sur le milieu urbain en modifiant ses propriétés radiatives, thermiques, hydriques et aérodynamiques. C'est une mesure efficace pour limiter l'îlot de chaleur et l'inconfort thermique des habitants en été.

Les modifications radiatives et thermiques du climat urbain engendrées par la végétation résultent de trois processus physiques :

— le premier est l'évaporation de l'eau retenue dans le sol et interceptée par le feuillage des plantes. Elle concerne toutes les surfaces naturelles et peut se produire de jour comme de nuit, même si la stabilité nocturne la limite quelque peu ;

— le second est la transpiration des plantes (FIGURE 2.13 a), qui concerne tous les types de végétaux (pelouse, buissons, arbustes, arbres, façades et toitures végétalisées, etc..) mais qui se produit le jour ;
Ces deux processus combinés sont à l'origine d'un effet qualifié *d'oasis* (Oke, 1987), par

Essence (F/C)	Paris	Lyon	Nantes	Marseille	Montpellier	Nîmes
Cerisier (F)	✓	4				
Charme (F)	✓		6.1			
Chêne (F)	✓		18			
Érable (F)		13	4	✓	3	
Févier (F)				✓		
Frêne (F)	✓	3	2.6	✓		
Liquidambar (F)		4.6				
Magnolia (F)			2			
Marronnier (F)	✓✓					5
Merisier (F)						2
Micocoulier (F)	✓	3.5	2.5	28	12	40
Mûrier (F)				✓		
Orme (F)	✓					3
Palmier						✓
Peuplier (F)	✓✓					
Pin (C)				✓	5	2
Platane (F)	✓✓	39	27	20	47	42
Prunus (F)			5.7			
Robinier (F)		4			4	1
Sophora (F)	✓✓	2.3		7	5	2
Tilleul (F)	✓✓	9	9.3	15		1
Répartition connue (%)		77.8	81.2	70	76	100

TABLE 2.2 – *Principales essences d'arbres urbains répertoriées à partir des données publiées par les villes respectives : Paris (base de données du Service des Espaces Verts), Lyon (2002), Nantes (base de données du Service des Espaces Verts), Marseille (2002), Montpellier (1996), Nîmes (2011) et répartition en % (quand disponible). Les données pour la ville de Montpellier concernent principalement des arbres de rues. F fait référence à Feuillu, C à Conifère.*

Hauteur	Essence	Forme géométrique
15 à 20 m et +	Platane	sphérique ou en rideau
10 à 20 m	Erable Tilleul Micocoulier	sphérique
< à 10 m	Sophora	conique (flèche)
	Conifères	cylindrique/conique/sphérique

TABLE 2.3 – *Caractéristiques géométriques des essences urbaines d'alignement dominantes, établies à partir de Bordeaux (2011) pour la hauteur et Marseille (2002) pour la forme géométrique.*

opposition à l'îlot de chaleur. La transpiration des plantes qualifie la transformation d'eau liquide en vapeur d'eau au cours de la photosynthèse ou de la régulation thermique des plantes. C'est à travers les stomates, structures qui gouvernent les échanges gazeux (notamment de H_2O et CO_2) entre la plante et l'extérieur, que le phénomène de transpiration a lieu. Ce processus est consommateur d'énergie. C'est le fait que cette énergie soit prélevée dans l'environnement qui participe à son refroidissement, tout en générant une source d'humidité locale.

Les facteurs climatiques qui contrôlent le taux de transpiration sont l'ensoleillement (la fraction photosynthétique du rayonnement), la température (FIGURE 2.12 a), l'humidité de l'air (FIGURE 2.12 b) ou plus précisément la VPD (*Vapour Pressure Deficit*, différence de pression de vapeur entre l'environnement et l'intérieur de la plante), la force du vent (FIGURE 2.12 c) mais aussi la disponibilité en eau du sol. La transpiration des plantes dépend aussi fortement de leurs paramètres physiologiques, principalement de leur type de

photosynthèse (C3, C4, CAM, etc...) et du nombre total de stomates qui est fonction de l'ampleur du houppier (qualifiée par un indice foliaire appelé LAI - *Leaf Area Index*) et de la taille des feuilles. Comme l'ensemble de ces facteurs varient avec les conditions climatiques et selon les espèces de plantes, l'influence de la transpiration sur le climat urbain est variable et suit notamment le cycle des saisons.

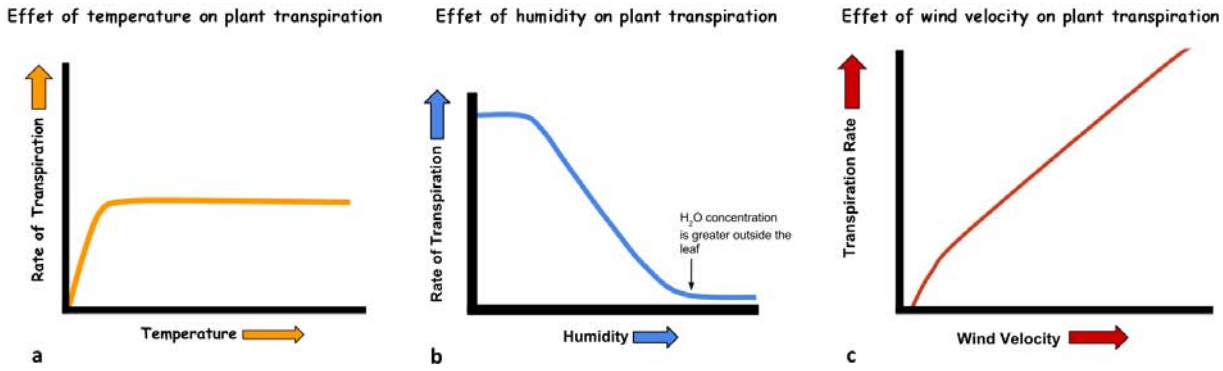


FIGURE 2.12 – *Processus physiques principaux à l'origine des modifications radiatives et thermiques du climat urbain. Source : Wikipédia*

— la végétation arborée joue un rôle supplémentaire en interceptant une partie du rayonnement solaire incident en journée (FIGURE 2.13 b), créant des effets d'ombrage sur les surfaces artificielles alentour qui limitent leur réchauffement (Oke et al., 1989). Ce phénomène est lié à la volumétrie de la végétation et dépend donc de la hauteur de la végétation ainsi que de la densité foliaire (LAI) du houppier.

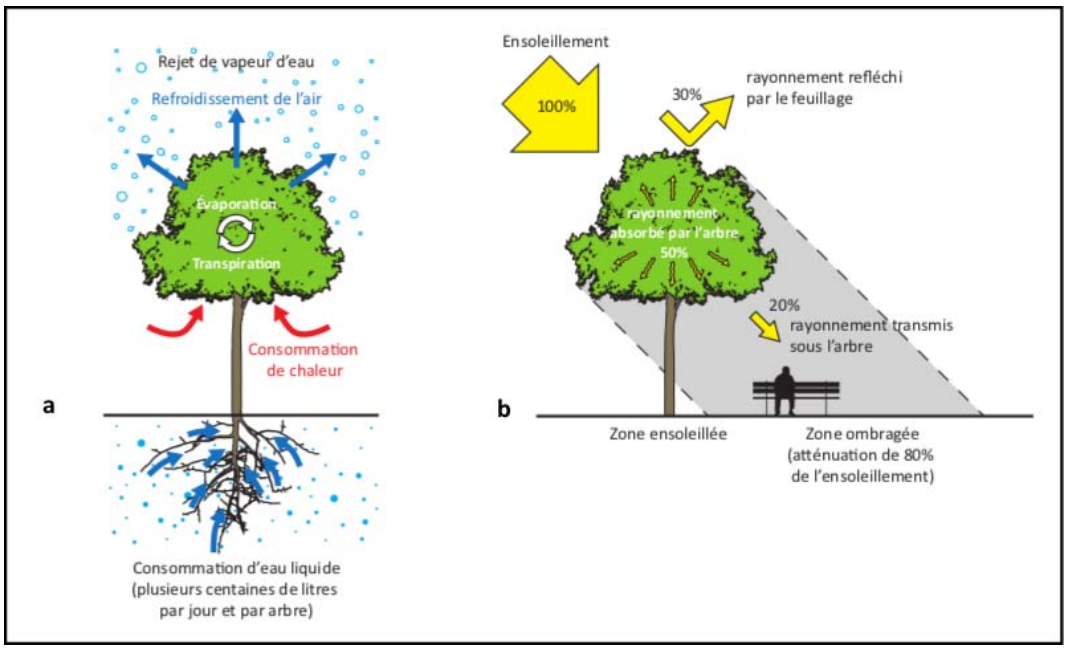


FIGURE 2.13 – *Processus physiques principaux à l'origine des modifications radiatives et thermiques du climat urbain. Source : APUR (2012)*

Parallèllement, la végétation urbaine constitue un obstacle supplémentaire à l'écoulement de l'air, avec des conséquences notamment sur le transport des polluants (adsorption des polluants gazeux

au travers des stomates et interception des particules, Nowak, 2000) et le ressenti thermique. Les facteurs qui contrôlent ce phénomène sont principalement la forme et la hauteur des plantes.

2.2.2.3 Etat des lieux des études existantes

La littérature sur les effets de la végétation en milieu urbain est abondante mais inégale en ce qui concerne les types de végétation abordés. Historiquement, ce sont les effets des arbres, directs (ombrage) ou indirects (bioclimatiques) qui ont d'abord été étudiés. Plus récemment, de plus en plus d'études se sont intéressées aux effets des enveloppes végétales des bâtiments sur le milieu urbain, même si la quantité de publications qui traitent des toitures végétalisées est bien plus conséquente que celle des façades végétalisées. Ces dernières sont encore peu mises en œuvre dans les villes, et finalement peu étudiées et documentées.

A l'échelle du bâtiment

En absorbant le rayonnement solaire incident pour sa croissance et son fonctionnement biologique, la végétation agit sur les bâtiments comme une barrière solaire (Eumorfopoulou et Kontoleon, 2009). Plusieurs études expérimentales montrent que les enveloppes végétales des bâtiments peuvent réduire les températures de surface comparées à des surfaces artificielles (Onmura et al., 2001; Takebayashi et Moriyama, 2007; Eumorfopoulou et Kontoleon, 2009; Wong et al., 2010; Kontoleon et Eumorfopoulou, 2010; Sternberg et al., 2011), ce qui limite la quantité de chaleur qui peut pénétrer dans les bâtiments. Ce faisant, elles diminueraient les variations saisonnières de température à l'intérieur des bâtiments (Castleton et al., 2010), générant une certaine économie d'énergie, sans toutefois pouvoir atteindre l'efficacité d'une couche d'isolant d'après (Eumorfopoulou et Aravantinos, 1998; Eumorfopoulou et Kontoleon, 2009). Jaffal et al. (2012) sont plus nuancés et démontrent par la simulation que la performance thermo-énergétique des toitures végétalisées diminue avec le niveau d'isolation des bâtiments, ce qui les rendrait intéressantes pour des bâtiments non ou peu isolés.

L'amplitude des effets thermo-énergétiques des enveloppes végétales relevés dans la littérature sont donc relativement variables puisqu'ils dépendent du niveau d'isolation des bâtiments considérés, du type d'enveloppe étudié et enfin des conditions micro-climatiques environnantes (notamment l'ensoleillement), conditions qui sont très variables du fait que les études existantes sont réalisées sous des latitudes très différentes (majoritairement en Amérique du Nord, en Europe et en Asie). En ce qui concerne les toitures végétalisées, Jacquet (2011) observe sous le climat de Montréal une étonnante réduction de la demande d'énergie en été, de l'ordre de 90 % et une réduction moindre en hiver, de l'ordre de 30 %. Jaffal et al. (2012) ont comparé par la simulation l'impact d'une même toiture végétalisée sous trois climats différents (Athènes, La Rochelle et Stockholm, respectivement chaud, tempéré et froid). Leurs résultats illustrent à quel point les performances des toitures végétalisées peuvent varier en fonction du climat sous lequel elles sont implantées : la consommation annuelle de chauffage est peu affectée par la toiture végétalisée à La Rochelle, alors que celle à Athènes s'en trouve augmentée d'environ 8 % et celle à Stockholm diminuée d'environ la même quantité (- 8 %) ; inversement la consommation de climatisation est fortement diminuée à Athènes (- 52 %) et à La Rochelle (- 98 %) et n'est pas affectée à Stockholm où elle est initialement inexistante. Les performances énergétiques des façades végétalisées sont elles aussi fonction du climat sous lequel elles sont implantées. En été par exemple, la réduction de la consommation

d'énergie qu'elles engendrent pour la climatisation des bâtiments peut varier considérablement (de 5 à 68 %) comme le montre la synthèse établie par Malys (2013) (FIGURE 2.14).

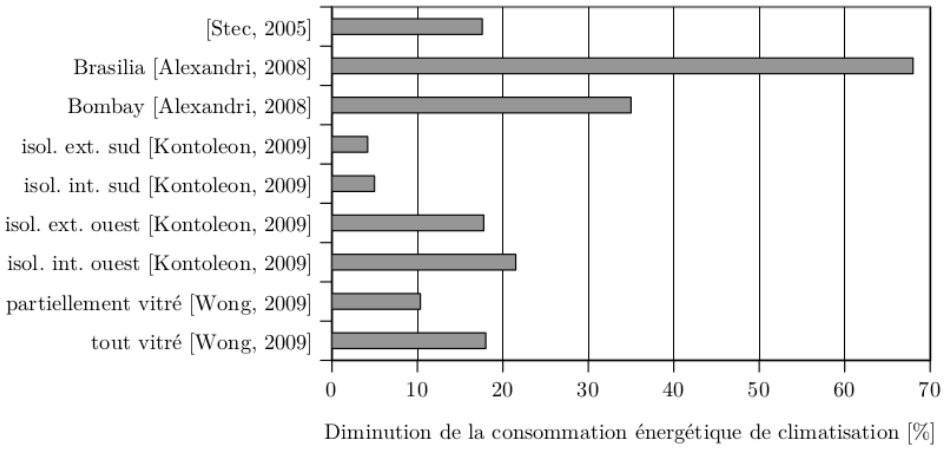


FIGURE 2.14 – *Diminutions relatives de la consommation d'énergie pour la climatisation des bâtiments engendrée par la végétalisation des façades établies par Malys (2013)*

D'ailleurs selon Alexandri et Jones (2008), la performance énergétique estivale des enveloppes végétales est d'autant plus marquée que le climat est chaud et sec (avec - 68 % pour Brasilia et - 35 % pour Bombay), ce qui corrobore les résultats obtenus par Jaffal et al. (2012) pour les toitures végétalisées.

A l'échelle du quartier

A une échelle plus vaste, de nombreuses campagnes de mesures ont mis en évidence l'effet rafraîchissant de la végétation. Dans le cadre d'un projet financé par le PIRVE (Formes urbaines, modes d'habiter et climat urbain dans le périurbain toulousain, 2008-2009), les températures relevées au sein d'un quartier de l'agglomération toulousaine montrent des écarts pouvant atteindre 3°C (FIGURE 2.15 de gauche). L'étude de ces variabilités thermiques en rapport avec les différentes unités paysagères de ce quartier montre une tendance des zones à dominante végétalisée à être plus fraîches (FIGURE 2.15 de droite).

Récemment, Bowler et al. (2010) ont réalisé une méta-analyse de la littérature concernant quatre types de végétation urbaine (parcs urbains, arbres de rue et forêts urbaines et végétation basse au sol ou en toiture), basée sur 47 études empiriques décrivant l'impact de la végétation sur la température de l'air.

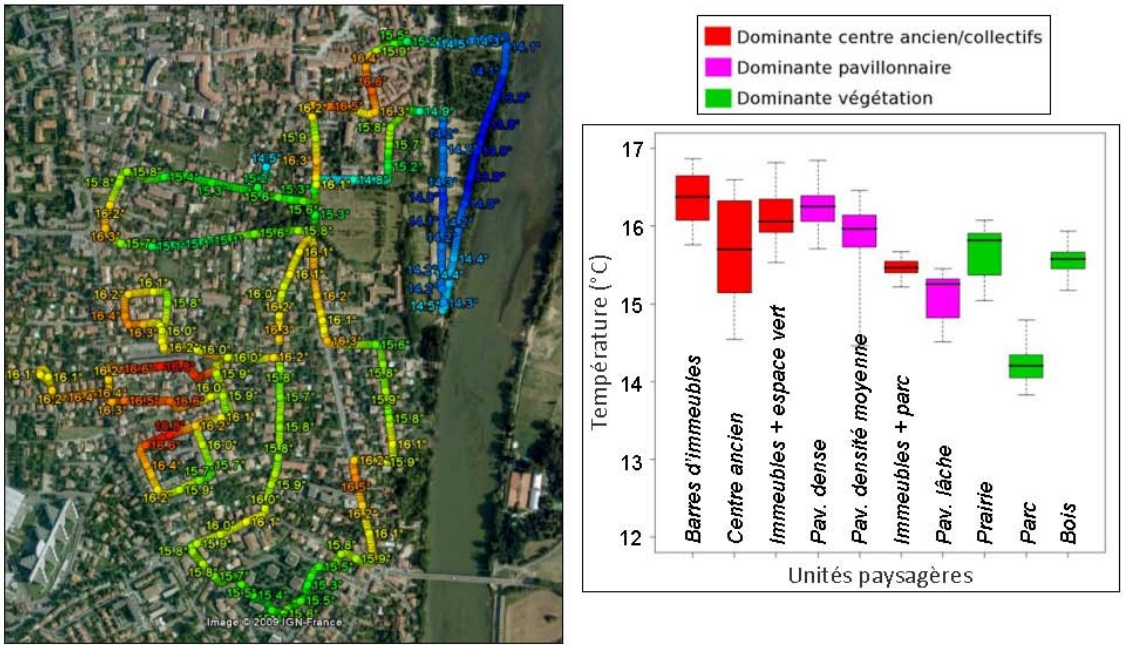


FIGURE 2.15 – *Températures dans les rues d'un quartier de Blagnac relevées à vélo le matin du 3 juin 2009 à 6h30 dans le cadre du projet interdisciplinaire PIRVE, d'après Haoues-Jouve et co auteurs (2009)*

Leurs résultats montrent que les parcs urbains (mélange de végétation arborée et herbacée) engendrent un rafraîchissement moyen en journée de l'ordre de 0.94°C (FIGURE 2.16), avec des variations qui s'expliquent notamment par la taille du parc (Chang et al., 2007; Barradas, 1991) et sa composition (ratio arbre/pelouse, Potchter et al., 2006), mais aussi les conditions climatiques environnantes. Les travaux de Potchter et al. (2006) et de Spronken-Smith et Oke (1998) suggèrent que l'effet de rafraîchissement est d'autant plus marqué que la couverture arborée est élevée, et que les températures les plus basses observées pour un des parcs étudiés seraient dues à son irrigation. Le rafraîchissement moyen nocturne calculé sur un sous-échantillon de sept études est du même ordre de grandeur que celui observé en journée (1.15°C).

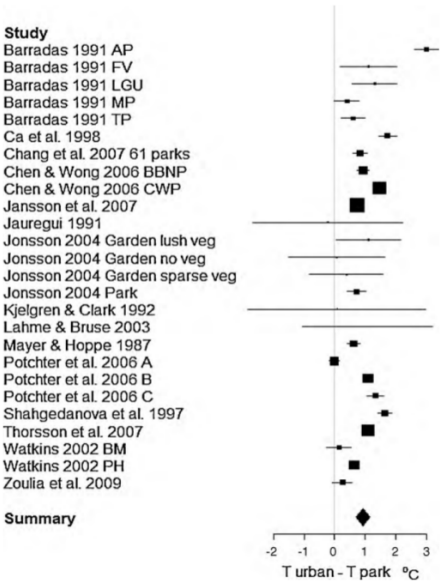


FIGURE 2.16 – *Effet des parcs et espaces verts urbains sur la température de l'air en journée d'après la méta-analyse réalisée par Bowler et al. (2010).*

Finalement, Bowler et al. (2010) ont relevé peu d'études documentant des surfaces seulement engazonnées de pleine terre. Sur quatre études (Kjelgren et Montague, 1998; Mueller et Day, 2005; Gill, 2006; Yilmaz et al., 2008), trois suggèrent des températures de l'air au-dessus de surfaces engazonnées plus faibles qu'au dessus du béton (excepté Kjelgren et Montague, 1998) et toutes

sont unanimes pour décrire des températures de surface pour l'herbe plus faibles que pour le béton ou l'asphalte. Cette conclusion sur les températures de surface s'applique aussi en général à la végétation basse en toiture (Wong et al., 2003; Alexandri et Jones, 2007). Pour ce qui est de l'effet des toitures végétalisées sur les températures de l'air, les conclusions sont mitigées et semblent dépendre fortement du moment de la journée , avec certaines études montrant des réductions de température au-dessus du compartiment végétalisé (Harazono et al., 1991; Wong et al., 2003) et d'autres non (Alexandri et Jones, 2007; Nyuk Hien et al., 2007), effet qui semble fortement dépendant du cycle diurne et des saisons.

Les conclusions de Bowler et al. (2010) en ce qui concerne les arbres, isolés ou regroupés en bois ou forêts urbaines, sont que les températures sous les arbres sont en journée systématiquement plus fraîches qu'au-dessus des espaces dégagés alentour, et que l'amplitude de ce rafraîchissement varie en fonction de l'espèce d'arbre. La taille des arbres et de leur houppier semblent être les facteurs explicatifs des variations inter-espèces d'après Bueno-Bartholomei (2003) et Georgi et Zafiriadis (2006).
L'amplitude du rafraîchissement diurne serait corrélé à la capacité d'ombrage de la végétation d'après Shashua-Bar et Hoffman (2000), ce qui corrobore le résultat précédent. Les études qui ont étudié l'effet des arbres sur les températures la nuit ont par contre montré que la canopée des arbres peut retenir de la chaleur (Taha et al., 1991; Souch et Souch, 1993; Liangmei et al., 2008).

Dans leur étude évaluant l'effet isolé et en groupement d'érables sucriers, Souch et Souch (1993) ont analysé l'impact du type de sol sous la canopée (herbe et béton) sur les températures de l'air sous les arbres et ont mis en évidence des températures plus chaudes sous la canopée quand celle-ci voyait du béton. Ce résultat suggère que les performances thermiques des arbres de rue peuvent varier en fonction du type de surface sur laquelle ils sont plantés. Finalement les interactions bâti-végétation à prendre en compte dans la modélisation des arbres ne sont pas seulement celles avec les parois des murs alentours.

Finalement, les études analysées par Bowler et al. (2010) ne permettent pas de tirer des conclusions sur des combinaisons optimales en termes d'agencement, d'abondance et de type de végétation. Un autre aspect que trés peu d'études abordent est le lien entre la ressource en eau et le pouvoir thermo-régulateur de la végétation. A part les travaux de Potchter et al. (2006) et de Spronken-Smith et Oke (1998) sur les parcs urbains, on peut citer l'étude de Shashua-Bar et al. (2009) qui évalue sous un climat semi-aride l'efficacité thermique de six stratégies paysagères dans deux cours semi-fermées comme un équilibre entre le refroidissement effectif de l'air et le besoin en eau de la végétation. Selon cette étude, les arbres représentent le système le plus efficace alors que les pelouses sont très consommatrices d'eau (Table 2.4).

Malgré tout, la végétation urbaine peut parfois entraîner certains effets négatifs peu abordés dans la littérature. Thayer et al. (1985), qui ont montré l'avantage des arbres de rues sur le microclimat estival, soulignent toutefois qu'en hiver et sous certaines latitudes, ces arbres peuvent générer des effets d'ombrage sur les façades des bâtiments tels que les besoins en chauffage s'en trouvent accrus. Ce phénomène pourrait cependant être évité par un choix adéquat du type d'arbres, notamment par la préférence d'arbres à feuillage caduque.

Stratégie	Modification thermique ΔT (K)	Consommation d'eau Evapotranspiration (kg m^{-2})	Efficacité thermique $\Delta Q_H/\Delta Q_{LE}$ (%)
(1) Toile d'ombrage seule	+ 0.9		
(2) Pelouse et toile d'ombrage	+ 0.2	4.4	- 2.5
(3) Arbres	- 1.1	1.0	57.0
(4) Arbres sur pelouse	- 1.6	4.0	20.0
(5) Pelouse exposée	- 0.3	6.1	2.8
(6) Pelouse (sous toile)*	- 0.7	4.4	7.6
(7) Pelouse (sous arbre)**	- 0.5	3.0	7.4

TABLE 2.4 – *Efficacité thermique de différentes stratégies d'aménagement d'une cours semi-fermée en climat semi-aride comparée à celle de référence (cours dallée principalement en béton), d'après Shashua-Bar et al. (2009). * valeurs calculées à partir des stratégies (2) et (1) et ** à partir des stratégies (4) et (3)*

A plus grande échelle : ville et paysage

Ces dernières années, des études numériques basées sur des modèles météorologiques et de canopée urbaine ont commencé à s'intéresser à l'impact de différentes stratégies sur le climat urbain, et notamment de la végétalisation. Par exemple, dans le cadre de la consultation du Grand Pari(s), le groupe Descartes (Descartes, 2009) a évalué une stratégie d'aménagement de la région parisienne combinant le remplacement des cultures céréalières par des cultures maraîchères et l'extension des zones forestières, ainsi que l'aménagement de lacs et l'utilisation de peintures réfléchissantes en zones périurbaines. Simulée pour l'épisode de canicule de 2003, cette combinaison de stratégies qui ne touchaient que la périphérie de la ville, a montré une atténuation significative de l'îlot de chaleur urbain sur Paris (2-3°C), comme on peut le voir sur la FIGURE 2.17. Selon une méthodologie similaire, une étude menée sur Toronto (Bass et al., 2003) montre que l'utilisation de toitures végétalisées irriguées (à hauteur de 50% de la surface de toitures de la ville, soit 5% de la surface urbaine) ainsi que l'arrosage des espaces verts existants engendrerait une diminution de 1-2°C de l'îlot de chaleur urbain. Le même scénario sans arrosage n'entraînerait quant à lui qu'une diminution locale de la température de 0.5°C. Des travaux identiques sur la ville de New York (Rosenzweig et al., 2009) suggèrent qu'une infrastructure de toitures végétalisées serait susceptible de réduire les températures urbaines de 1.4°C en moyenne, avec pour conséquence une diminution de l'îlot de chaleur newyorkais.

2.2.3 Conclusions

L'ampleur de la littérature portant sur les effets de la végétation en milieu urbain montre que, même si ce n'est pas un thème de recherche nouveau, il continue d'être en plein développement. D'une manière générale, la plupart des études relevées dans la littérature mettent en évidence les impacts positifs de la végétation urbaine en termes d'amélioration du micro-climat, et par conséquent du confort des piétons et de consommation d'énergie des bâtiments. La végétalisation des villes apparaît donc comme une stratégie pertinente pour la mitigation des effets urbains et l'adaptation au changement climatique. Il reste que la littérature actuelle ne couvre pas l'impact de tous les dispositifs végétaux à toutes les échelles et pour tous les aspects urbains. Or il serait intéressant en termes d'aménagement urbain de connaître l'effet de dispositifs locaux, comme par exemple les enveloppes végétales des bâtiments, à l'échelle d'un quartier ou d'une ville, et sur un ensemble d'aspects, micro-climatiques, énergétiques, hydrologiques, etc ... afin de mettre en perspectives les coûts et bénéfices associés. Aussi, la question primordiale de la ressource en

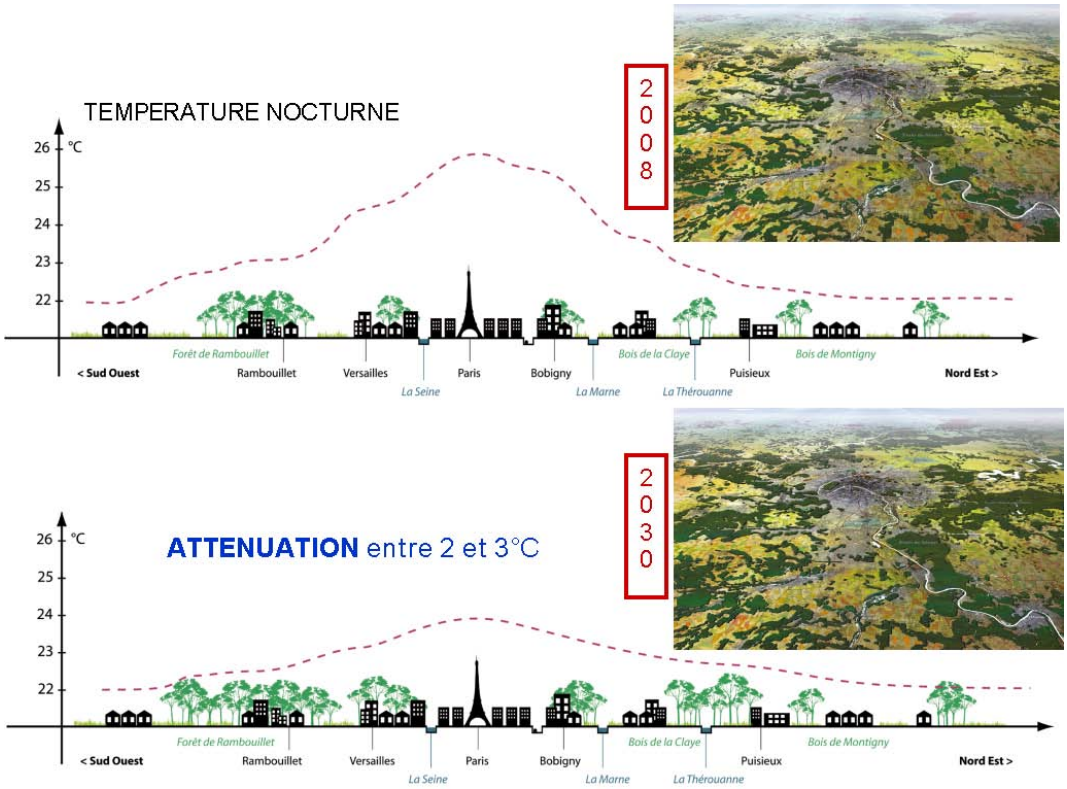


FIGURE 2.17 – *Grand Pari. Source : Météo France*

eau nécessaire au bon fonctionnement de la végétation est rarement abordée dans la littérature. Quant à la climatisation des bâtiments, elle permet d'assurer un confort minimal à l'intérieur des bâtiments à un coût énergétique mais ses effets sur le climat urbain sont encore mal connus.

Lorsqu'on aborde la question de l'aménagement urbain pour la mitigation et l'adaptation au changement climatique, il est important d'adopter une approche qui considère le système urbain dans sa globalité, afin d'évaluer l'ensemble des impacts engendrés par une stratégie et les interactions potentielles entre différentes stratégies, et ceci pour des morphologies de ville et des climats différents. C'est pourquoi ce type d'études est généralement traité par le biais de la modélisation et par des approches multi-disciplinaires afin de fournir des réponses intégrées à l'échelle de la ville.

CHAPITRE 3

Contexte et outils de recherche

Contents

3.1 De la modélisation du climat urbain à la modélisation de l'adaptation des villes 30

3.1.1 SURFEX 30

3.1.2 TEB : le schéma urbain d'origine 32

3.1.3 TEB-Veg : une meilleure prise en compte des interactions bâti-végétation 34

3.1.4 TEB-BEM : une meilleure description de l'énergétique du bâtiment . . . 36

3.1.5 TEB-UHI : un générateur d'îlot de chaleur dynamique 39

3.1.6 TEB-UTCI : un modèle pour évaluer le confort thermique 43

3.2 Projets CLIM2, MUSCADE et VegDUD et objectifs de la thèse . 45

3.1 De la modélisation du climat urbain à la modélisation de l'adaptation des villes

Un ensemble d'outils numériques a été développé au CNRM-GAME pour la modélisation des surfaces continentales, initialement pour des applications en météorologie ou prévision du temps, à des échelles spatiales de l'ordre du km. Ces modèles sont actuellement regroupés au sein d'une plateforme appelée SURFEX (SURFace EXTernalisée, Masson et al., 2013). Ils ont évolué ces dernières années pour être appliqués à de plus hautes résolutions et pour améliorer les paramétrisations des processus physiques qu'ils décrivent.

3.1.1 SURFEX

Le système de modélisation des surfaces continentales SURFEX est une plateforme qui permet de décrire les caractéristiques des surfaces d'un domaine d'étude 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 ces surfaces et l'atmosphère, pour des applications variées (Figure 3.1).

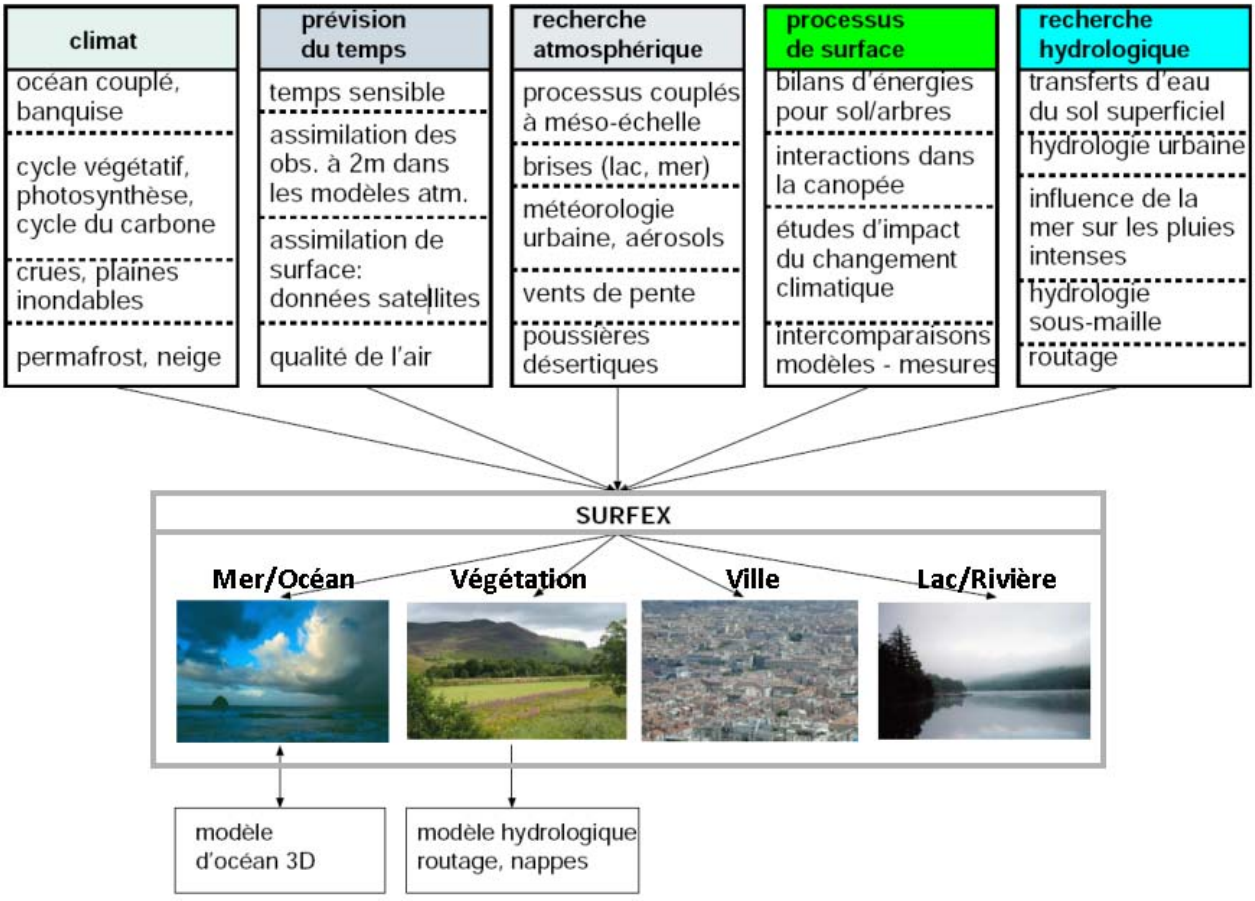


Figure 3.1 – *Vue générale des domaines de recherche et applications couverts par le schéma de surface SURFEX. Source : V. Masson*

Pour décrire les caractéristiques de la surface, SURFEX utilise différentes paramétrisations ou schémas selon les types de surfaces, en particulier :

— TEB (Town Energy Balance, Masson, 2000) pour les surfaces urbaines ;
— ISBA (Interaction between Soil Biosphere and Atmosphere, Noilhan et Planton, 1989) pour les surfaces naturelles et agricoles.

L'occupation du sol au sein de chaque maille est décrite dans SURFEX par le biais de fractions (respectivement de surfaces artificielles, naturelles, d'eau douce et de mer) pour être ensuite traitée au cours d'une simulation, par le schéma de surface correspondant au type de surface. En tout point du domaine d'étude, les flux sont calculés séparément par chaque schéma de surface puis ensuite aggrégés au prorata de leurs fractions de surface initiales (FIGURE 3.2). SURFEX peut fonctionner en mode *couplé* avec un modèle atmosphérique, comme illustré sur la FIGURE 3.2, ou bien en mode *forcé* avec des conditions atmosphériques prescrites à un niveau donné au-dessus de la surface.

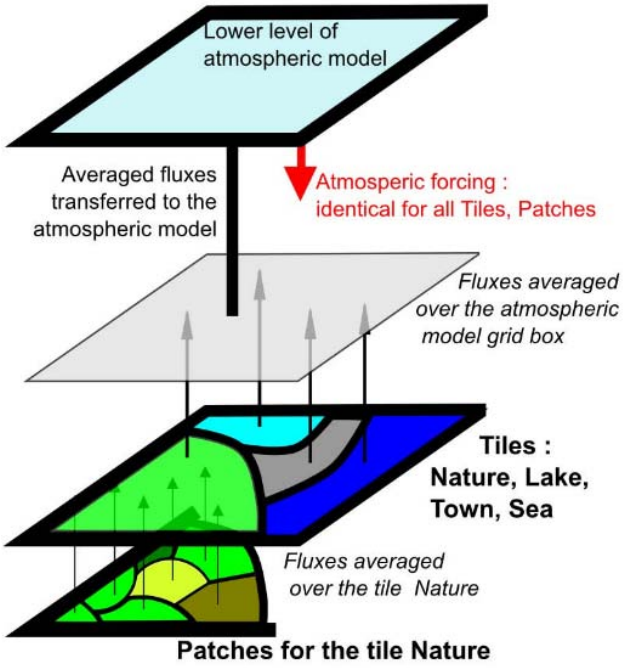


FIGURE 3.2 – *Représentation schématique de la discrétisation de la surface en quatre tuiles dans SURFEX (Masson et al., 2013)*

Historiquement développé pour améliorer les prévisions météorologiques par la prise en compte des effets de l'urbanisation, le modèle TEB, qui est actuellement utilisé dans sa version orginale pour la prévision météorologique opérationnelle en France, au Pays-Bas, en Europe du Nord, s'est enrichi de nouvelles paramétrisations (Veg, BEM, UHI, UTCI) afin d'étudier les effets de l'urbanisation et de l'aménagement du territoire sur le micro-climat urbain.

3.1.2 TEB : le schéma urbain d'origine

Le modèle TEB est un modèle physique qui permet de paramétrer des processus complexes (radiatifs, énergétiques, hydriques, et turbulents) aux interfaces entre les surfaces artificielles bâties et l'atmosphère, au prix d'une géométrie urbaine quelque peu simplifiée (FIGURE 3.3). Dans sa version originale, le paysage urbain est représenté par un réseau de rues *canyon* de longueur infinie (sans intersections) et dont les directions sont équiprobables. En chaque point du paysage urbain étudié, des caractéristiques génériques sont attribuées à ce canyon (rapport d'aspect, hauteur des bâtiments, caractéristiques thermiques et radiatives des éléments qui le composent, comme les toits, les murs, la route). Cette hypothèse, qui peut paraître simplificatrice, est cependant assez réaliste à haute résolution spatiale (100-200 m).

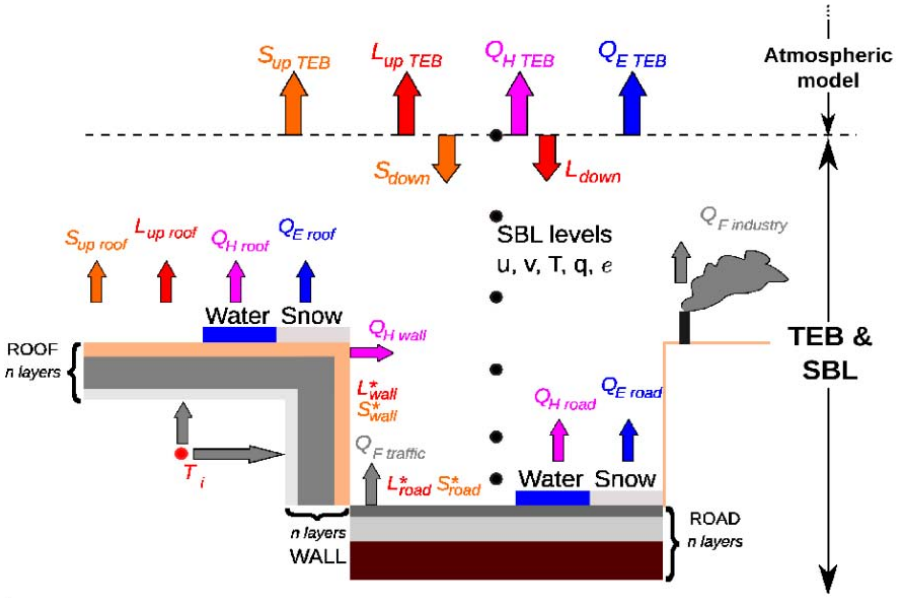


FIGURE 3.3 – *Représentation schématique de la rue canyon générique de TEB. Source : Météo France*

Pour simuler les échanges de chaleur et d'eau entre la surface urbaine et l'atmosphère, TEB établit un bilan radiatif (S et L les rayonnements courtes et grandes longueurs d'onde sur la FIGURE 3.3) et énergétique (Q_H et Q_E les flux de chaleur sensible et latent sur la FIGURE 3.3) pour chaque surface générique du canyon (toit, mur, et route) et prend en compte, sous leurs formes latentes et sensibles, les rejets de chaleur anthropiques provenant de la circulation automobile ($Q_{F\ traffic}$) et des industries ($Q_{F\ industry}$), s'ils sont connus.

Le fonctionnement thermique d'un bâtiment générique est réalisé en établissant le bilan d'énergie des faces extérieures des deux parois mur et toit en tenant compte du rayonnement solaire et infrarouge (Q^*), afin de calculer la modification des températures internes des parois (T_k) par conduction de chaleur. Sur les faces internes, les échanges avec l'air intérieur du bâtiment (F_{IN}) sont calculés à partir de la température interne du bâtiment.

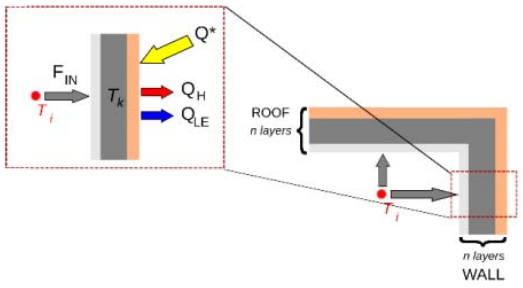


FIGURE 3.4 – *Echanges au niveau des parois du bâtiment dans TEB*

Depuis sa création en 2000, un effort constant a été fait pour évaluer le modèle TEB. Comme il est basé sur la paramétrisation de processus physiques, TEB peut être utilisé pour n'importe quelle ville. Il a ainsi été évalué pour un grand nombre de villes à travers le monde et sous différents climats : Vancouver et Mexico (Masson et al., 2002), Marseille (Lemonsu et al., 2004; Roberts et al., 2006), Łódź en Pologne (Offerle et al., 2005), Ouagadougou, Burkina Faso (Offerle et al., 2005), Toulouse (Pigeon et al., 2008b) et Montréal (Lemonsu et al., 2010). Ces études ont montré que TEB était capable de reproduire 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, en mode forcé ou bien en mode couplé avec un modèle atmosphérique.

Dans la version originale de TEB, la couche de surface urbaine était représentée par un volume d'air unique compris à l'intérieur du canyon urbain, et le modèle calculait chaque variable micro-climatique pour cette couche unique. Récemment, une paramétrisation appelée CANOPY a été rajoutée à TEB pour résoudre les échanges verticaux dans cette couche limite de surface urbaine et ainsi accéder à une meilleure prédiction des variables microclimatiques à l'intérieur et au-dessus du canyon urbain. Cette paramétrisation, développée par Hamdi et Masson (2008) et Masson et Seity (2009) introduit à toutes les équations d'évolution un terme de traînée pour prendre en compte l'influence des bâtiments sur l'intérieur du canyon. Il est ainsi possible de prédire les variables micro-climatiques à plusieurs niveaux verticaux dans le canyon (Figure 3.5), ce qui permet de s'intéresser plus particulièrement au micro-climat expérimenté dans les rues au niveau des piétons par exemple.

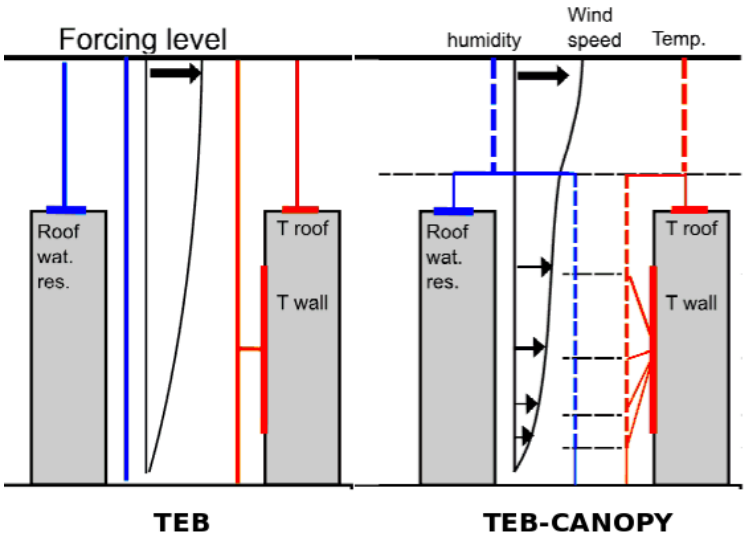


Figure 3.5 – *Vue schématique du couplage de TEB avec l'atmosphère, sans CANOPY (à gauche) et avec CANOPY (à droite), d'après Masson et al. (2013). Avec CANOPY, les profils de température et d'humidité à l'intérieur du canyon sont influencés respectivement par les températures et humidités de la route, des murs et des toits.*

L'évaluation de cette paramétrisation, en mode forcé sur une rue de Bâle (Hamdi et Masson, 2008), a montré qu'elle donnait de meilleurs résultats pour la simulation de la température potentielle, du vent, de la vitesse de frottement et des flux turbulents que la version à une seule couche. Depuis, cette paramétrisation est utilisée presque systématiquement dans les études d'impact réalisées avec TEB.

3.1.3 TEB-Veg : une meilleure prise en compte des interactions bâti-végétation

Comme la version originale du schéma urbain TEB (Masson, 2000) ne permet de traiter que les surfaces bâties, la modélisation des zones urbaines résidentielles avec de la végétation nécessite de coupler TEB avec le schéma dédié aux surfaces naturelles, ISBA (Noilhan et Planton, 1989). Dans cette configuration TEB-ISBA, les flux et variables micro-climatiques sont calculés par les schémas respectifs, sans interaction, puis aggrégés en pondérant par les fractions de surfaces respectives. Cette configuration (FIGURE 3.6 a), présente l'inconvénient de ne pas décrire les interactions à micro-échelle entre le bâti et la végétation.

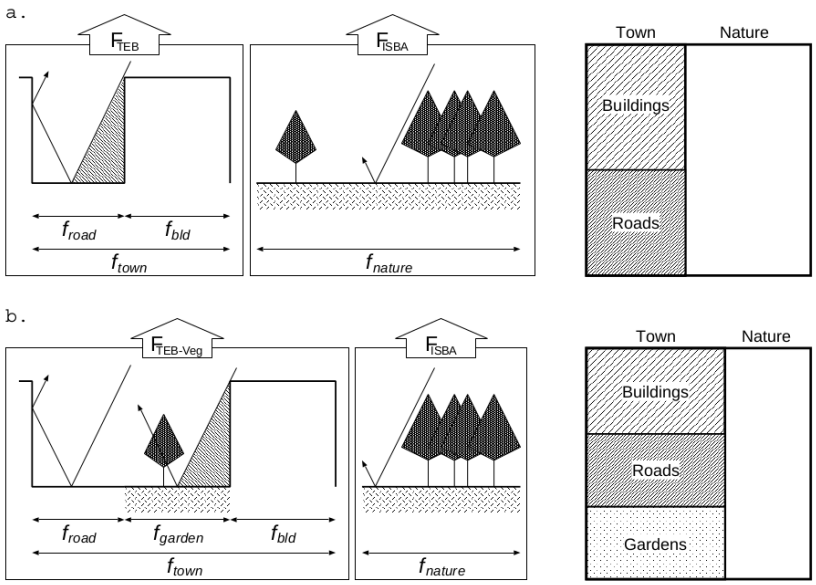


FIGURE 3.6 – *Comparaison des configurations TEB-ISBA (haut) et TEB-Veg (bas) pour le calcul des flux de surface par SURFEX en un point où co-existent des surfaces artificielles et naturelles (urbaines et rurales). f_{town}, f_{bld}, f_{road}, f_{garden}, et f_{nature} sont respectivement les fractions de ville, bâti, route, jardins urbains, et nature d'une surface d'étude donnée. Source : Lemonsu et al. (2012)*

C'est la raison pour laquelle le modèle TEB a récemment été amélioré par Lemonsu et al. (2012) pour intégrer explicitement la végétation basse (jardins) dans le canyon entre les bâtiments (FIGURE 3.6 b). Dans cette nouvelle version du modèle, appelée TEB-Veg, la végétation à l'intérieur du canyon est toujours traitée par l'intermédiaire d'ISBA, mais :

— les flux turbulents sur la végétation sont calculés depuis TEB, de façon à fournir à ISBA les conditions atmosphériques à l'intérieur du canyon et non pas au-dessus de la canopée urbaine ;

— les calculs de rayonnement prennent en compte les effets d'ombrage des bâtiments sur la végétation et la contribution de la végétation dans le bilan radiatif du canyon ;

— les variables micro-climatiques à l'intérieur du canyon (température, humidité, vent) sont calculées en incluant les contributions de la végétation, en recalculant la fraction de végétation urbaine (f $_{\text{garden}}$) à partir de son emprise sur la surface de ville ;

— les paramètres géométriques du canyon urbain sont plus réalistes (canyon plus large).

En outre, il est désormais possible de spécifier l'orientation, ainsi que de séparer le comportement thermique des deux murs du canyon.

La nouvelle version du modèle TEB-Veg a été évaluée en 1D grâce à des données expérimentales collectées sur un site au sud de l'Israël (Shashua-Bar et al., 2009) dans deux cours semi-fermées aménagées selon des stratégies paysagères différentes (Lemonsu et al., 2012). Les résultats obtenus pour le canyon semi-fermé aménagé avec de la pelouse sont présentés FIGURE 3.7. Ils montrent de bonnes performances pour TEB-Veg qui simule systématiquement de meilleures températures de surfaces que l'ancienne configuration TEB-ISBA aussi bien pour les surfaces artificielles que pour la végétation, ainsi qu'un microclimat plus réaliste à l'intérieur du canyon.

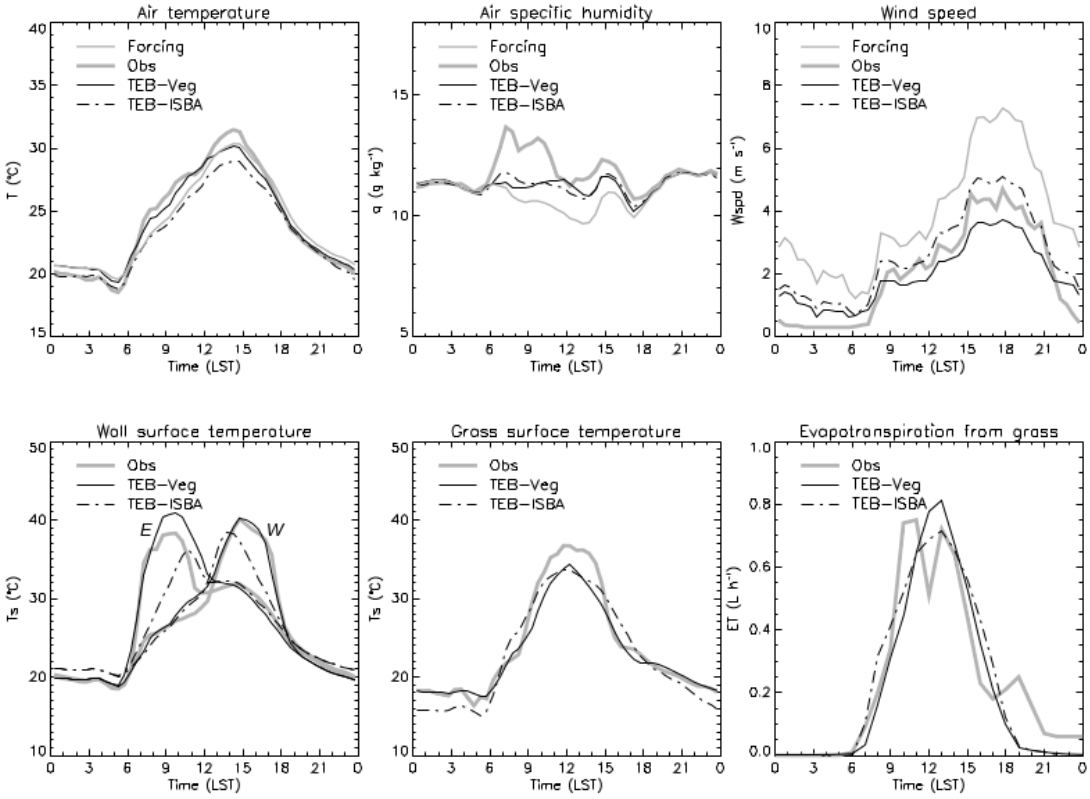


FIGURE 3.7 – *Comparaison des résultats obtenus respectivement pour les configurations TEB-Veg et TEB-ISBA et pour des observations collectées dans une cours aménagée avec une pelouse herbacée en Israël. Pour la température de l'air et la vitesse du vent à 10 m, les valeurs des données de forçage sont indiquées par des lignes grises fines. Les températures de surface observées pour les murs correspondent aux expositions est (E) et ouest (W). Source : Lemonsu et al. (2012)*

La FIGURE 3.7 montre de meilleurs résultats pour la simulation des températures radiatives des murs et des surfaces au sol (surtout la nuit quand les effets de piégeage radiatif sont dominants). La séparation des deux murs a nettement amélioré leurs températures de surface en journée, même si un décalage persiste le matin. Le vent simulé en journée par TEB-Veg est aussi plus faible que si les jardins avaient été traités comme un espace ouvert (TEB-ISBA), ce qui représente bien l'effet du bâti sur la végétation. Cela contribue à diminuer le flux de chaleur sensible au profit du latent en meilleur accord avec les observations (Lemonsu et al., 2012), avec pour conséquence une

meilleure simulation de l'évapotranspiration. Finalement, TEB-Veg réussit à simuler des températures dans le canyon plus chaudes qu'au-dessus de la canopée urbaine, ce que ne permet pas TEB-ISBA. Pour ce qui est de l'humidité, comme on peut l'observer sur la FIGURE 3.7, la masse d'air dans la cour est plus humide que l'atmosphère au-dessus, en raison de l'évaporation de la pelouse qui est irriguée. TEB-Veg et TEB-ISBA sont capables de simuler ce phénomène, même si ils semblent sous-estimer le transfert d'humidité entre la surface et l'atmosphère à l'intérieur du canyon.

Les résultats de TEB-Veg sont encourageants et montrent l'intérêt d'un couplage de schémas de ville et végétation au sein d'un canyon pour les environnements urbains qui présentent un taux significatif d'espaces verts. Cette nouvelle version du modèle permettra de simuler de façon plus réaliste que la configuration TEB-ISBA l'impact de mesures de végétalisation sur le micro-climat des villes. Notons toutefois que cette version ne représente ni les effets d'ombrage de la végétation sur le bâti, ni les effets dynamiques de la végétation haute sur l'écoulement dans le canyon.

L'amélioration de la description de la végétation urbaine dans TEB a été poursuivie avec la mise en place, au cours de ma thèse, d'une paramétrisation pour les toitures végétalisées (Chap. 5).

3.1.4 TEB-BEM : une meilleure description de l'énergétique du bâtiment

Une meilleure description des processus physiques au sein des bâtiments et des systèmes qui régulent leurs températures a été ajoutée à TEB afin de simuler une énergétique des bâtiments plus réaliste. Basée sur des hypothèses physiques et géométriques simples en phase avec celles de TEB, cette paramétrisation appelée TEB-BEM (Building Energy Model) et développée par Bueno et al. (2012), résoud le bilan d'énergie interne du bâtiment pour une zone thermique unique, pour laquelle l'inertie thermique des matériaux de construction est représentée par une seule masse thermique.

Il est basé sur les processus physiques suivants (FIGURE 3.8) :

- apport de chaleur par le rayonnement solaire pénétrant à travers le vitrage, en supposant un ratio vitrage/mur uniforme sur toutes les façades, avec la possibilité de simuler des protections solaires (volets-stores) ;
- apport de chaleur par convection au travers des parois des bâtiments ;
- apports de chaleur des équipements présents dans le bâtiments (*apports internes*) ;
- échanges de chaleur avec l'extérieur par infiltration d'air et ventilation ;
- refroidissement ou réchauffement de l'air à l'intérieur du bâtiment en fonction de la température de consigne prescrite par les utilisateurs (chauffage et climatisation).

Une avancée majeure de BEM est qu'il permet une description sophistiquée des systèmes de climatisation, avec évolution des performances des systèmes en fonction des conditions de températures

extérieures, déshumidification de l'air passant à travers les systèmes, génération des rejets de chaleur latents et sensibles associés au fonctionnement des systèmes.

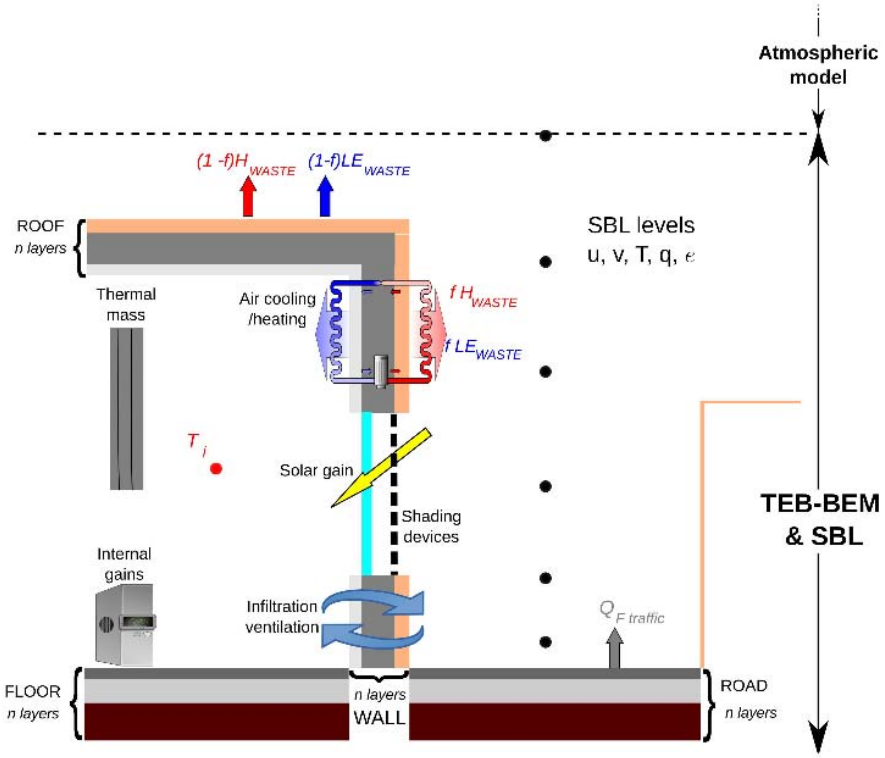


FIGURE 3.8 – *Représentation schématique de la rue canyon de TEB et des principaux processus pris en compte par BEM. Source : Météo-France*

BEM a passé avec succès différents processus d'évaluation, des tests de ses hypothèses de modélisation (FIGURE 3.9) aux exercises d'évaluation proprement dits avec des données de terrain (FIGURE 3.10).

La FIGURE 3.9 présente les résultats de deux simulations réalisées en mode forcé avec les conditions météorologiques de la campagne expérimentale Capitoul (Masson et al., 2008) pour la ville de Toulouse : une simulation avec la nouvelle version TEB-BEM et une en couplant TEB au modèle détaillé d'énergétique du bâtiment *EnergyPlus* (Crawley et al., 2001). Les résultats obtenus en termes de consommation énergétique et de rejets de chaleur associés dans le cas de la climatisation, trés proches, ont permis de valider les hypothèses de TEB-BEM (Bueno et al., 2012). Les données de consommation d'énergie collectées lors de la campagne Capitoul ont aussi permis d'évaluer les performances de TEB-BEM au cours d'une année complète : pour une résolution spatiale de l'ordre de 500 m, le modèle a été capable de représenter la consommation d'énergie annuelle à + ou - 20 % (Bueno et al., 2012). Il a également démontré une excellente capacité à reproduire les variations journalières de la consommation d' énergie.
Des résultats satisfaisants sont aussi obtenus pour la prédiction des températures intérieures, comme le montre la comparaison de celles simulées pour un quartier d'Athènes par TEB-BEM et celles observées dans trois de ses bâtiments (Synnefa et al., 2010) sur la FIGURE 3.10.

Grâce à ces améliorations, TEB est désormais capable de calculer la demande énergétique liée au fonctionnement d'un système de climatisation ou de chauffage en réponse aux conditions cli-

matiques extérieures et d'évaluer les rejets vers l'extérieur sous forme de chaleur et de vapeur d'eau engendrés par ces systèmes, ainsi que leur rétroaction sur le micro-climat extérieur.

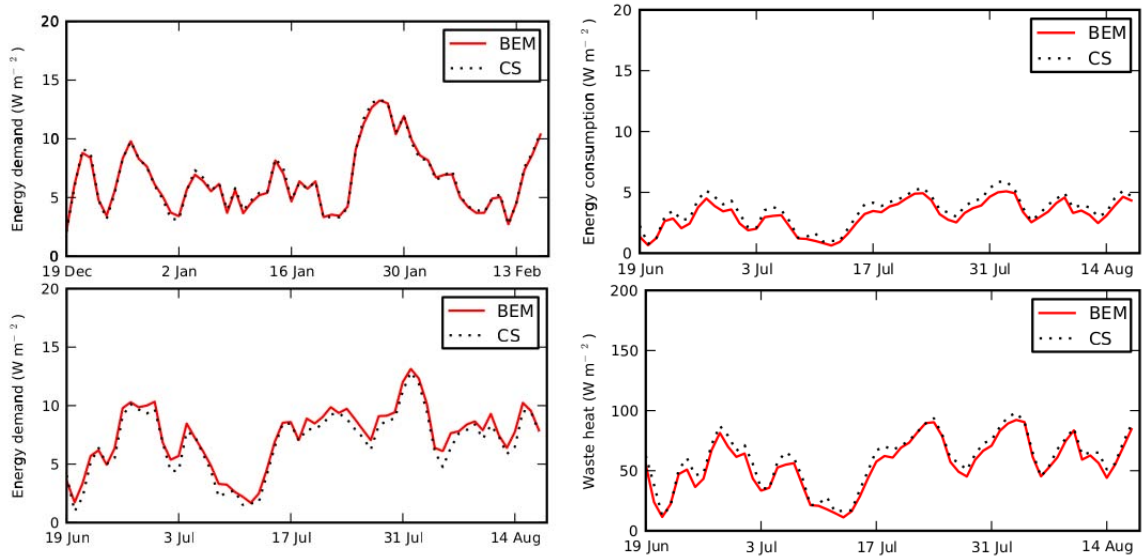


FIGURE 3.9 – *Comparaison de résultats de simulation réalisées sur le centre urbain dense de Toulouse. A gauche : demande énergétique journalière moyenne (en W m^{-2} de plancher) provenant du chauffage en hiver (haut) et de la climatisation en été (bas) pour les deux configurations de modèle TEB-BEM (BEM) et TEB-EnergyPlus (CS). A droite : consommation énergétique journalière moyenne (en W m^{-2} de plancher) provenant de la climatisation (haut) et (bas) rejets de chaleur associés (en W m^{-2} de surface urbaine). Source : Bueno et al. (2012)*

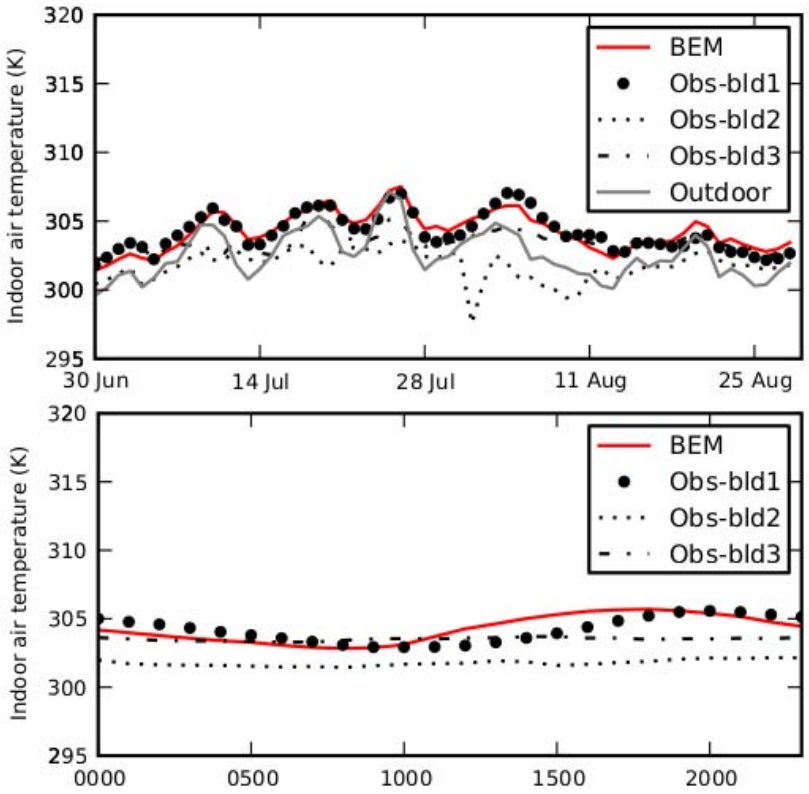


FIGURE 3.10 – *Evolution temporelle (haut) et cycle diurne moyen (bas) de température intérieure simulées par TEB-BEM pour le quartier d'Athènes et issues d'observations pour trois bâtiments (bld1, bld2, bld3) entre le 30 juin et le 30 août. Source : Bueno et al. (2012)*

3.1.5 TEB-UHI : un générateur d'îlot de chaleur dynamique

Comme nous l'avons vu précédemment, le schéma de surface SURFEX peut être utilisé de deux manières : on-line (i.e. couplé avec un modèle atmosphérique de méso-échelle) ou off-line (i.e. forcé avec des conditions météorologiques au-dessus de la canopée). L'approche off-line est celle qui a le moindre coût en temps de calcul mais de nombreuses données météorologiques sont requises pour lancer une simulation.
Or ce genre de données n'est accessible qu'à une petite communauté scientifique spécialisée dans le domaine, par simulation ou par des campagnes de mesure. Pour rendre les simulations de climat urbain plus accessibles à une communauté plus vaste, comme les ingénieurs en bâtiment ou les urbanistes, une méthode permettant de calculer des forçages météorologiques 2D à partir d'un unique point de mesures opérationnel, comme sur un aéroport, peut s'avérer nécessaire. C'est ce que permet de faire le module UHI développé pour TEB.

La construction de ces forçages atmosphériques 2D nécessite dans un premier temps d'extrapoler les données météorologiques collectées par la station de mesures près de la surface (température et humidité à 2 m au-dessus du sol, force du vent à 10 m et rayonnement IR incident) à un niveau d'altitude qui soit suffisamment haut au-dessus des bâtiments pour se placer au-delà de la couche limite de surface et qui sera utilisé par la suite comme niveau de forçage pour les simulations off-fline. Ces conditions atmosphériques 1D doivent ensuite être spatialisées en 2D sur la ville entière afin de retranscrire la signature de l'îlot de chaleur urbain à ce niveau d'altitude.

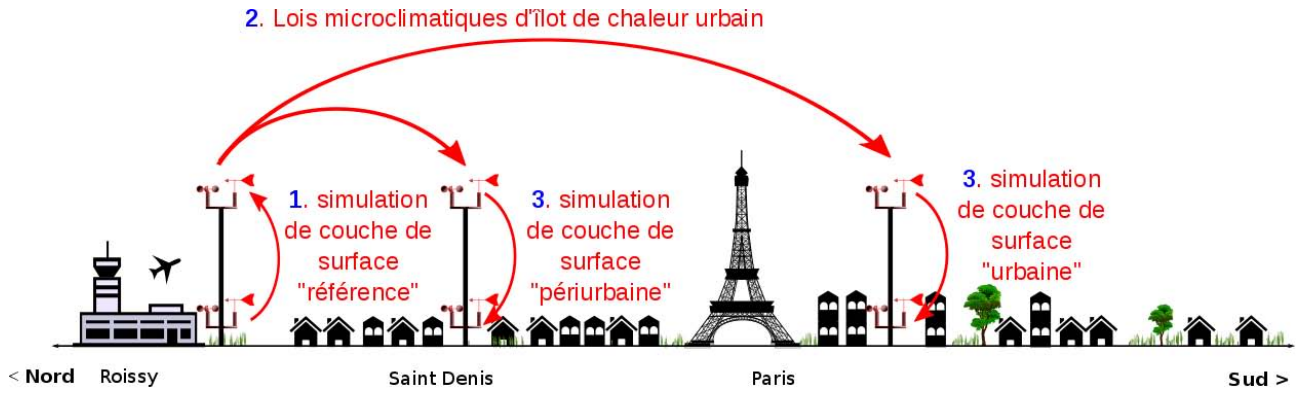


FIGURE 3.11 – *Etapes de construction de l'ICU dans TEB. Source : Julien Le Bras*

1. Calcul du forçage 1D au niveau de forçage

La première étape (**1** sur la FIGURE 3.11) consiste, par une méthode itérative, à extrapoler à 30 m au-dessus du sol les données de la station de mesures disponibles en surface (température à 2 m, humidité à 2 m, vent à 10 m et rayonnement IR incident). Cette méthode se décompose ainsi :

1. Les données sont utilisées pour forcer le modèle de surface en un point à 30 m ;
2. Les résultats de simulation pour la température et l'humidité ainsi que le vent sont comparés aux données respectivement à 2 m et 10 m ;

3. Les écarts entre les simulations et les données à 2 et 10 m sont imposés au forçage à 30 m et le rayonnement IR est recalculé en fonction des nouvelles températures et humidités et de la nébulosité locale selon Prata (1996) ;
4. Avec le nouveau forçage à 30 m, une nouvelle simulation est effectuée et les résultats sont de nouveau comparés aux données à 2 et 10 m.

Cette boucle est effectuée tant que l'écart-type entre les données et les simulations n'est pas inférieur à 0.1 K, ce qui nécessite en général quatre itérations. Cette méthode a été validée grâce à des données du mât de l'aéroport de Roissy sur la température et l'humidité à 2 et 30 m.
La température à 30 m calculée par itération va ensuite servir de température de campagne (T_{rur}) pour la spatialisation du champ de température.

2. Spatialisation du champ de température

Pour calculer l'amplitude de l'îlot de chaleur (UHI), une paramétrisation inspirée par celle de Bueno et al. (2013) a été implémentée dans TEB. La température de l'air (T) est calculée pour un volume d'air de $z_i = 100$ m de hauteur la nuit et $z_i = 1000$ m de hauteur le jour (z_i étant la hauteur de la couche limite) et dont la base correspond à la surface globale de ville. Ici, la ville est supposée circulaire, de rayon r_{ville}, de superficie A_{ville} et de périmètre P_{ville}. Le bilan d'énergie de ce volume permet de calculer l'évolution de sa température à chaque pas de temps (δt) en fonction des variations de la température urbaine (ΔT_{urb}) et de la température de la masse d'air advectée (ΔT_{adv}) :

$$T\ (t+\delta t) = T\ (t) + \Delta T_{urb}\ (t+\delta t) + \Delta T_{adv}\ (t+\delta t) \tag{3.1}$$

La variation de la température urbaine est calculée en fonction du flux de chaleur sensible émanant de la ville (Q_{Hville}) réparti sur toute la hauteur de la couche limite :

$$\Delta T_{urb} = \frac{Q_{Hville}\ \delta t}{z_i\ \rho\ c_v} \tag{3.2}$$

c_v représente la capacité calorifique de l'air à volume constant et ρ sa masse volumique.

Quant à la variation de la température de la masse d'air par advection, elle est fonction des conditions de vent synoptique (u_{synop}). Si l'intensité du vent est supérieure à la brise urbaine (u_{brise}), calculée selon la paramétrisation de Hidalgo et al. (2010), ce terme est calculé à chaque pas de temps de la simulation (δt) comme :

$$\Delta T_{adv} = \frac{u_{synop}\ \delta t\ c_p}{\frac{P_{ville}}{4}\ c_v} \tag{3.3}$$

c_p représente la capacité calorifique de l'air à pression constante. Sinon, le terme d'advection est attribué à la brise urbaine :

$$\Delta T_{adv} = \frac{u_{brise}\ P_{ville}\ \delta t\ c_p}{A_{ville}\ c_v} \tag{3.4}$$

Ensuite, l'amplitude de l'îlot de chaleur sur le volume de ville considéré est calculée comme l'anomalie de température entre la température calculée par 3.1 et la température rurale T_{rur} (étape **1**

sur la FIGURE 3.13) :

$$UHI = T - T_{rur} \tag{3.5}$$

Si cette différence est négative, l'amplitude de l'îlot de chaleur est rendue nulle et la température de campagne est appliquée sur l'ensemble du domaine de simulation.

Finalement, cette amplitude d'UHI est ensuite spatialisée en calculant deux contributions en chaque point de grille du domaine liées à :

— l'éloignement du point de grille par rapport au centre-ville (étape **2a** sur la FIGURE 3.13) :

$$\Delta T_{ville\ i,j} = max\ \{\ 0\ ,\ 2.UHI\ (1 - \frac{d_{i,j}}{r_{ville}})\ \} \tag{3.6}$$

où $d_{i,j}$ est l'éloignement au centre-ville en chaque point du domaine (2D) et r_{ville} est le rayon de la ville supposée circulaire (FIGURE 3.12) ;

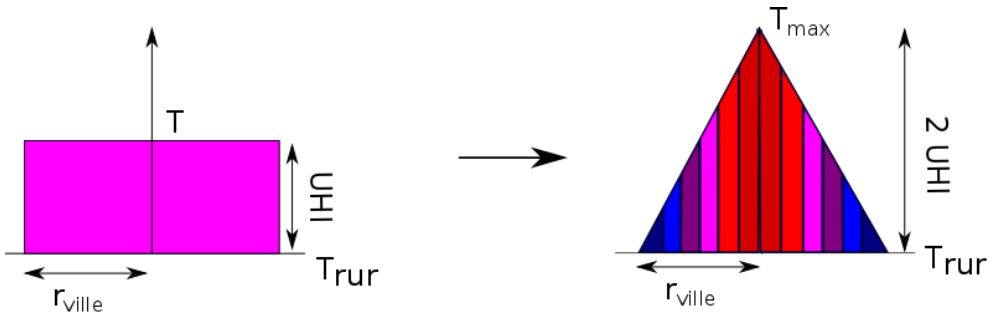


FIGURE 3.12 – *Prise en compte de l'éloignement au centre-ville (droite) pour la spatialisation de l'UHI (gauche). Source : Julien Le Bras*

— la fraction urbanisée au point de grille (étape **2b** sur la FIGURE 3.13) :

$$\Delta T_{loc\ i,j} = UHI\ f_{ville\ i,j} \tag{3.7}$$

où $f_{ville\ i,j}$ est la fraction de ville en chaque point de grille du domaine (2D).
Ainsi, pour la région parisienne, une ville éloignée du cœur de Paris mais suffisamment grande, pourra générer un îlot de chaleur notable.

Finalement, l'îlot de chaleur spatialisé est constitué à parts égales des contributions provenant de l'éloignement et de la fraction de ville (étape **3** sur la FIGURE 3.13) :

$$UHI_{2D}(t + \delta t) = UHI_{2D}(t) + \frac{1}{2}\ \Delta T_{ville\ (t+\delta t)} + \frac{1}{2}\ \Delta T_{loc\ (t+\delta t)} \tag{3.8}$$

Le choix de coefficients de pondération identiques ($\frac{1}{2}$) pour ces deux contributions est celui qui, dans les premières validations (FIGURE 3.14), réalisées par Julien Le Bras dans le cadre de sa thèse, donne les meilleurs résultats.

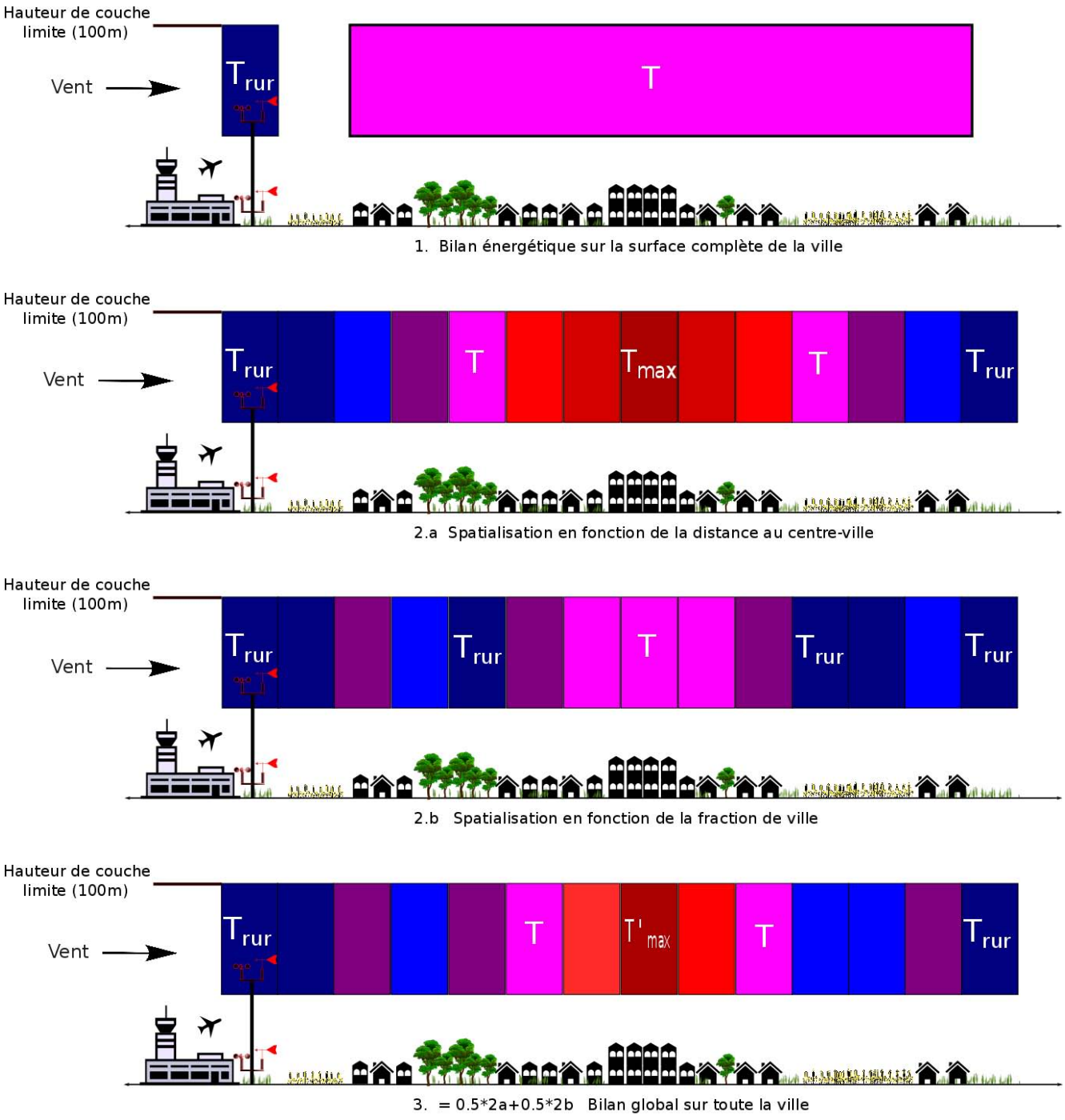


FIGURE 3.13 – *Différentes étapes de construction de UHI 2D. Source : Julien Le Bras*

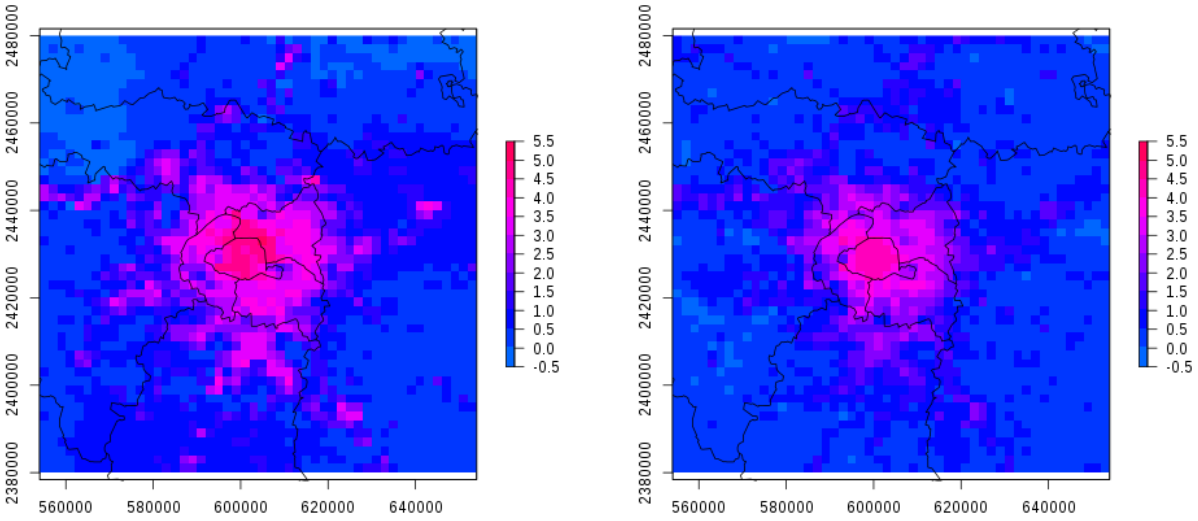


FIGURE 3.14 – *Comparaison de l'ICU moyen observé (à gauche) et simulé par TEB-UHI (à droite) en juin 2013 sur les jours de beau temps pour l'agglomération parisienne. Source : Julien Le Bras*

3.1.6 TEB-UTCI : un modèle pour évaluer le confort thermique

Les versions précédentes de TEB permettent de décrire les variables microclimatiques qui définissent l'environnement urbain. Ces variables peuvent ensuite être analysées pour estimer le confort thermique ressenti qui leur est associé. Ce confort thermique dépend des échanges entre les êtres vivants et leur environnement. Il est contrôlé par la température ambiante de l'air, mais aussi par d'autres facteurs météorologiques : le vent, le rayonnement environnant (solaire et infra-rouge) et l'humidité de l'air.

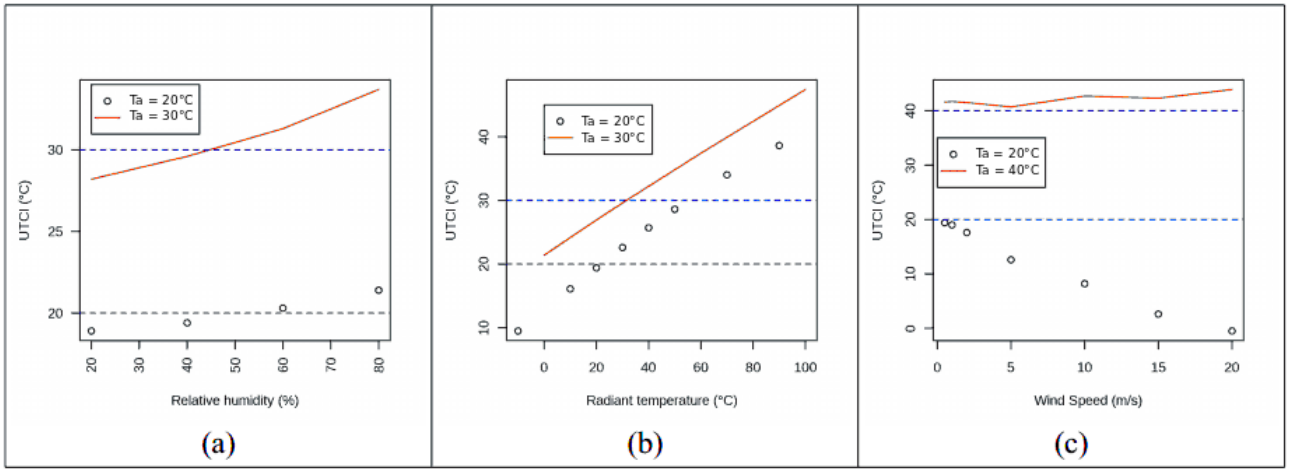


FIGURE 3.15 – *Sensibilité de l'UTCI à l'humidité relative (a), la température radiative (b), et la vitesse du vent (c) pour différents régimes de température de l'air. Source Pigeon (2011)*

L'UTCI (Universal Thermal Climate Index) a été développé par une équipe internationale comme indicateur de confort thermique (www.utci.org). Cet indice corrige la température de l'air pour estimer une température ressentie en fonction de l'humidité de l'air, du vent et la température radiative. L'environnement de référence (celui pour lequel l'UTCI est égal à la température de l'air) est défini par une humidité relative de 50 %, pas de vent, et une température radiative égale à la température de l'air. Il tient compte de l'habillement et du métabolisme de la personne (on prend pour référence une personne marchant à 4 km h^{-1}). Ainsi une humidité au dessus de 50 % tendra à faire augmenter l'UTCI au dessus de la température de l'air. Le vent diminuera l'UTCI si la température de l'air est inférieure à la température du corps, et l'augmentera légèrement si elle est supérieure (Figure 3.15). L'UTCI a d'abord été calculé à partir d'un modèle physique du bilan thermique de l'homme (Fiala et al., 2012), puis un modèle statistique a été développé de manière à permettre des calculs plus rapides (Bröde et al., 2012).

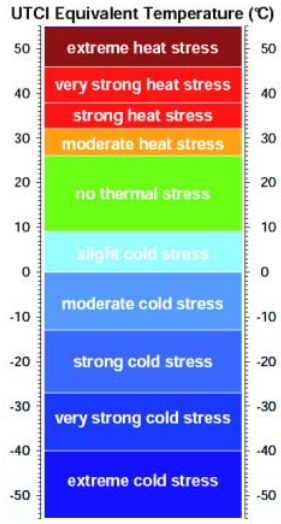


Figure 3.16 – *Echelle associée à l'UTCI pour l'évaluation des niveaux de stress thermique. Source : www.utci.org*

Le calcul de l'UTCI a été introduit dans le modèle TEB par Pigeon (2011) dans le cadre du projet VURCA. Trois différents cas sont considérés dans TEB (Figure 3.17) :

— Cas 1 : Une personne placée à l'extérieur au soleil. Son confort thermique est calculé à partir de la température dans le canyon, de l'humidité de l'air dans le canyon, de la somme du rayonnement solaire direct et du rayonnement solaire réfléchi et enfin du rayonnement infra-rouge émis par les parois du canyon ;

— Cas 2 : Une personne placée à l'extérieur à l'ombre. On utilise les mêmes paramètres que précédemment à l'exception du rayonnement solaire direct ;

— Cas 3 : Une personne placée à l'intérieur. L'UTCI est alors calculé à partir de la température et de l'humidité de l'air intérieur et des variables radiatives à l'intérieur du bâtiment.

L'UTCI étant basé sur des processus physiques, il peut être utilisé pour des environnements chauds et froids, comme le montre l'échelle des niveaux de stress associés (Figure 3.16) qui ont été établis par The Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences (2003).

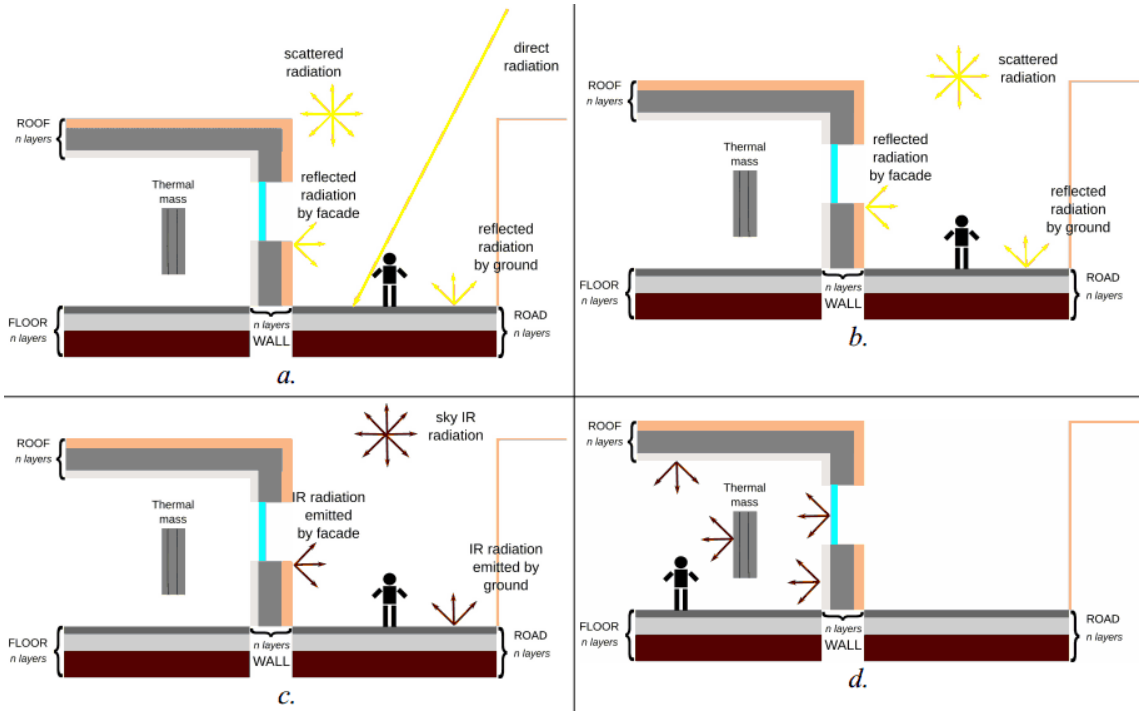


FIGURE 3.17 – *Description des trois environnements considérés dans TEB pour le calcul de l'UTCI, montrant l'influence du rayonnement solaire pour un individu à l'extérieur au soleil (a) et à l'ombre (b), et l'influence du rayonnement infrarouge pour les deux cas en extérieur (c) et celui d'un individu à l'intérieur. Source : Pigeon (2011).*

3.2 Projets CLIM2, MUSCADE et VegDUD et objectifs de la thèse

Ma thèse a été financée par trois projets de recherche, CLIM2, MUSCADE et VegDUD que je présente ci-dessous. Mon travail de recherche a ainsi contribué à leurs objectifs respectifs.

CLIM2

CLIM2 (**Clim**at et **Clim**atisation) a été réalisé grâce à une collaboration de recherche entre la société Climespace, le laboratoire de Génie des Procédés pour l'Energie, l'Environnement et la Santé du CNAM, et le Groupe d'Etudes de l'Atmosphère Météorologique (GAME, CNRS-Météo France). Grâce à un inventaire des rejets de chaleur issus de la climatisation réalisé par l'équipe de chercheurs du CNAM pour la ville de Paris, j'ai pu quantifier, par des simulations avec TEB en mode couplé, l'impact de la climatisation, comme moyen d'amélioration du confort thermique intérieur, sur le climat extérieur (Chap. 4).

MUSCADE

Comme l'indique son acronyme (**M**odélisation **U**rbaine et **S**tratégies d'adaptation au **C**hangement climatique pour **A**nticiper la **D**emande et la production **E**nergétique), le projet MUSCADE (ANR-09-VILL-0003, 2012-2013) vise à étudier, de nos jours à 2100, les interactions entre structure de ville, procédés constructifs, consommation d'énergie, production d'énergie décentralisée, micro-climat urbain, et changement climatique, afin de fournir des éléments de réponse aux questions

suivantes :

— Quel sera le climat d'une ville en expansion soumise au changement climatique ?
— Quelle sera sa demande énergétique pour assurer le confort thermique des habitants en hiver comme en été ? Ses émissions de CO2 ?
— Comment déployer en ville une production décentralisée d'énergies renouvelables ?
— Comment adapter la structure urbaine ?

Afin de répondre à ces questions, MUSCADE regroupe un consortium de recherche interdisciplinaire [1] et propose une approche intégrative, qui est mise en place et testée pour l'agglomération parisienne. Elle est basée sur un ensemble de modèles (un modèle socioéconomique d'expansion urbaine, un générateur d'îlots morphologiques urbains et un modèle de climat urbain) qui vont permettre d'identifier, parmi tous les scénarios prospectifs étudiés, les plus pertinents et les plus réalistes, c'est-à-dire ceux qui constituent concrètement une stratégie d' adaptation au changement climatique.

Dans le cadre de ce projet, j'ai d'abord amélioré le modèle TEB-Veg en lui ajoutant une paramétrisation pour la simulation des toitures végétalisées (présentée Chap. 5). Des études précédentes ayant démontré le peu d'effet de la végétation sur le micro-climat en l'absence d'arrosage, j'ai aussi mis en place dans TEB un arrosage automatique estival pour la végétation au sol et en toiture. Cette dernière paramétrisation est détaillée Chap. 6.

Le projet MUSCADE m'a finalement servi de cas d'étude pour la comparaison de stratégies de végétalisation. Ainsi, parallèlement aux scénarios prospectifs de MUSCADE, j'ai construit mes propres scénarios de végétalisation afin d'évaluer uniquement l'impact de la végétalisation (Chap. 6), mais appliquée à la ville de Paris de façon différente (en faisant varier principalement le type de végétation et le taux de végétalisation appliqué). L'effet de ces scénarios sur le confort thermique et la consommation énergétique a été évalué, tout d'abord en période estivale (Chap. 7) puis aux échelles multi-annuelles et saisonnières (Chap. 8).

VegDUD

Le projet **VegDUD** ou le rôle du **Veg**étal dans le **D**éveloppement **U**rbain **D**urable (ANR-09-VILL-0007-08) est constitué de différents volets qui permettent de qualifier et quantifier un certain nombre de services écosystémiques rendus par le végétal urbain, notamment l'amélioration du confort climatique en été, une meilleure gestion des eaux pluviales, une moindre demande énergétique et plus généralement une amélioration des ambiances urbaines.

1. Le consortium de MUSCADE se compose du GAME (Groupe d'étude de l'Atmopshère MEtéorologique), du CSTB (Centre Scientifique des Techniques du Bâtiment), du CIRED (Centre International de Recherche en Environnement et Développement), du LRA-GRECAU (Laboratoire de Recherhce en Architecture), du LIENSs (Laboratoire Littoral Environnement et Sociétés), de l'APUR (Atelier Parisien d'Urbanisme), et de l'IAU Ile de France (Institut d'Aménagement et d'Urbanisme).

Là encore, ce projet de recherche associe des expertises variées [2] permettant d'étudier l'ensemble des processus évoqués précédemment, et ce à des échelles spatiales allant du bâtiment à la ville entière. La démarche mise en œuvre dans VegDUD repose sur plusieurs méthodes (FIGURE 3.18) : synthèse bibliographique pour dresser un inventaire des fonctions de la végétation urbaine et des différentes typologies de végétation urbaine (volets TYPO et PHYSIO), développement ou raffinement de modèles pour mieux prendre en compte le végétal urbain (volet MODE), expérimentation pour quantifier les interactions bâti-végétal en ville et fournir des données pour valider les modèles (EXPE), évaluation de scénarios de végétalisation par la modélisation (volets EVAL pour le végétal privé et le végétal collectif).

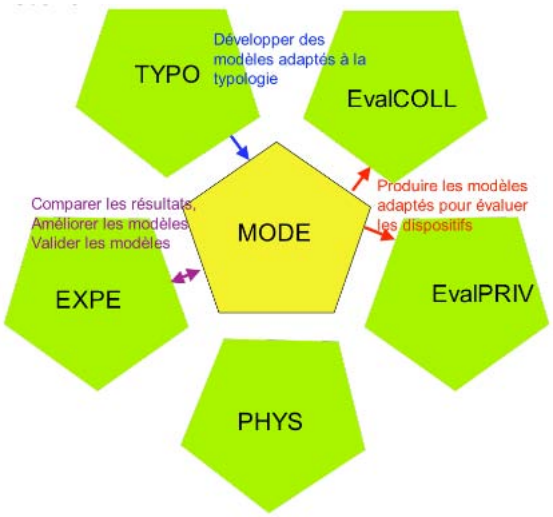


FIGURE 3.18 – *Les différents volets de recherche de VegDUD*

La construction de mes scénarios de végétalisation pour la ville de Paris (MUSCADE) s'est fortement inspirée des synthèses réalisées dans le cadre de VegDUD au sujet des typologies de végétation urbaine. Inversement, l'amélioration du modèle TEB-Veg à laquelle j'ai travaillé pendant ma thèse permettra la simulation des toitures végétalisées dans les scénarios de végétalisation d'un quartier Nantais qui seront évalués dans les volets EVAL.

2. Le consortium de VegDUD est composé des laboratoires suivants : IRSTV (Institut de Recherche en Sciences et Techniques de la Ville), CERMA (CEntre de Recherche Méthodologique d'Architecture), IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aaménagement et des Réseaux), LMF (Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique - Ecole Centrale de Nantes), Plante & Cité, LEPTIAB (Laboratoire d' Etude des Phénomènes de Transfert et de l'Instantanéité : Agro-ressources et Bâtiment), LPGN (Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes) EPHYSE (Ecologie fonctionnelle et PHYSique de l'Environnement, INRA Bordeaux), ONERA (Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales), GAME (Groupe d'étude de l'Atmopshère MEtéorologique), IRSN (Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire), CSTB (Centre Scientifique des Techniques du Bâtiment)

Objectifs de la thèse

Les objectifs de ma thèse sont des objectifs de modélisation qui se sont construits sur les outils numériques qui ont été développés au CNRM-GAME soit avant le début de mes travaux de thèse, soit en parallèle dans le cadre des projets de recherche auxquels j'ai participé.

Les objectifs de ce travail de thèse étaient organisés selon les étapes suivantes :

1. étudier l'impact de la climatisation, utilisée comme moyen d'améliorer son confort thermique à l'intérieur, sur le micro-climat urbain, sujet qui avait peu été abordé dans la littérature à l'échelle de la ville ;

2. améliorer la description de la végétation urbaine dans le modèle numérique TEB-Veg, par la prise en compte de nouveaux types de végétation tels que toitures et façades végétalisées, arbres de rue. Cette étape impliquait une meilleure connaissance des interactions bâti-végétation, ainsi que le développement de nouvelles paramétrisations ;

3. évaluer grâce aux développements précédents (2) et à ceux réalisés en parallèle par les autres chercheurs de l'équipe, les performances de la végétation comme mesure d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la consommation énergétique liée à l'usage de la climatisation et du chauffage.

Deuxième partie

Adaptation par la climatisation

CHAPITRE 4

Climatisation et confort

Contents

4.1 Présentation et synthèse de l'étude CLIM2 52
4.2 Article 56

La question du confort intérieur ne se pose plus dès lors qu'un bâtiment est suffisamment climatisé. Cependant, par conception, tout système de climatisation classique rejette de la chaleur à l'extérieur pour rafraîchir l'intérieur d'un bâtiment. Selon le type de système de refroissement, ces rejets sont souvent qualifiés de *secs* quand la chaleur est dégagée sous forme sensible et d'*humides* quand elle est dégagée sous forme latente. Un autre paramètre important qui dépend du type de système de refroissement employé est la hauteur à laquelle ces rejets sont dégagés dans la ville, le plus souvent sur la rue en façade ou bien au niveau des toits (comme illustré sur la FIGURE 2.9 du Chap. 2), plus rarement en souterrain ou dans l'eau (rivière ou mer).
Cette mesure d'adaptation pour l'amélioration du confort intérieur en cas de fortes chaleurs soulève par conséquent d'autres questions :

Quel est l'effet des systèmes de refroidissement sur le climat d'une ville ?
Cet effet est-il dépendant de la densité des équipements de climatisation ?
Est-il localisé ou bien étendu ? Se fait-il sentir plutôt le jour ou la nuit ?
Certains équipements affectent-ils plus le climat urbain que d'autres ?
Et surtout, cet effet est-il sensible pour les habitants ?
Au point de nuire au confort de ceux qui ne sont pas climatisés ?

mais aussi :

Quel est le coût énergétique à payer pour ce confort climatisé ?
Ce coût est-il fortement dépendant des systèmes de refroidissement utilisés ?

Finalement, ces questions peuvent de résumer en une seule question : *la climatisation des bâtiments, mesure d'adaptation pour le confort intérieur, est-elle une solution durable ?* C'est afin de répondre à un certain nombre de ces questions que l'étude CLIM2 présentée Chap. 3 a été entreprise. Cette étude, issue du partenariat entre le Laboratoire de Génie des Procédés pour l'Energie, l'Environnement et la Santé (CNAM), le Groupe d'études de l'Atmosphère MEtéorologique (GAME, CNRS-Météo France) et la société Climespace a permis d'évaluer l'impact des différents systèmes de refroidissement utilisés à Paris sur les températures extérieures, lors d'un épisode de canicule similaire à celui de août 2003. L'ensemble de cette étude est présenté dans les articles de de Munck et al. (2013) dans ce chapitre (section 4.2) et de Trémeac et al. (2012) en Annexe A. Une présentation synthétique de la méthodologie et des principaux résultats est donnée ci-après.

4.1 Présentation et synthèse de l'étude CLIM2

L'objectif de l'étude CLIM2 est de quantifier l'impact sur le climat de la ville de Paris de différents scénarios d'expansion de la climatisation lors d'un épisode de canicule similaire à celui d'août 2003 car cette canicule est estimée représentative en intensité et en durée des projections de températures estivales après 2050 (FIGURE 2.8 et encadré ci-dessous).

La canicule 2003

L'été 2003 a été l'été le plus chaud observé depuis le début de la mise en place d'un réseau d'observation en France (FIGURE 2.8). Il s'est caractérisé non seulement par des températures maximales très élevées (de 1,7 à 2.7°C de plus que les trois précédents étés les plus chauds – 1976, 1983 et 1994) mais aussi et surtout par des températures minimales plus élevées que la normale (3.5°C au dessus de la moyenne de la période 1950-1980, Bessemoulin et al., 2004; Météo France, 2004). 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 1er et le 5 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).

Au cours de cette canicule, l'îlot de chaleur observé à Paris fût particulièrement intense, avec des températures jusqu'à 8°C plus élevées dans le centre que dans les alentours. Comparée à l'amplitude de l'îlot de chaleur parisien pour un été standard (2000), l'amplitude observée en août 2003 montre que ce phénomène est susceptible de s'amplifier en période de canicule (FIGURE 2.5), avec des conséquences sanitaires similaires à celles observées en 2003 (surmortalité de 141 %, Canouï-Poitrine et al., 2006) liées principalement aux fortes chaleurs (coup de chaleur, déshydratation, et hyperthermie).

La méthode numérique mise en place dans cette étude est basée sur l'utilisation de deux modèles. Elle s'appuie sur le couplage du modèle atmosphérique MESO-NH (Lafore et al., 1998; Stein et al., 2000) avec le schéma de surface SURFEX et plus précisemment pour les surfaces urbaines le modèle de canopée urbaine TEB. Ce couplage permet de décrire les échanges de chaleur, d'eau et de quantité de mouvement entre la surface (zones urbanisées, végétalisées, étendues d'eau) et l'atmosphère. En s'appuyant sur une telle méthode, on peut simuler et comparer plusieurs situations ou scénarios de climatisation dans notre cas (FIGURE 4.1).

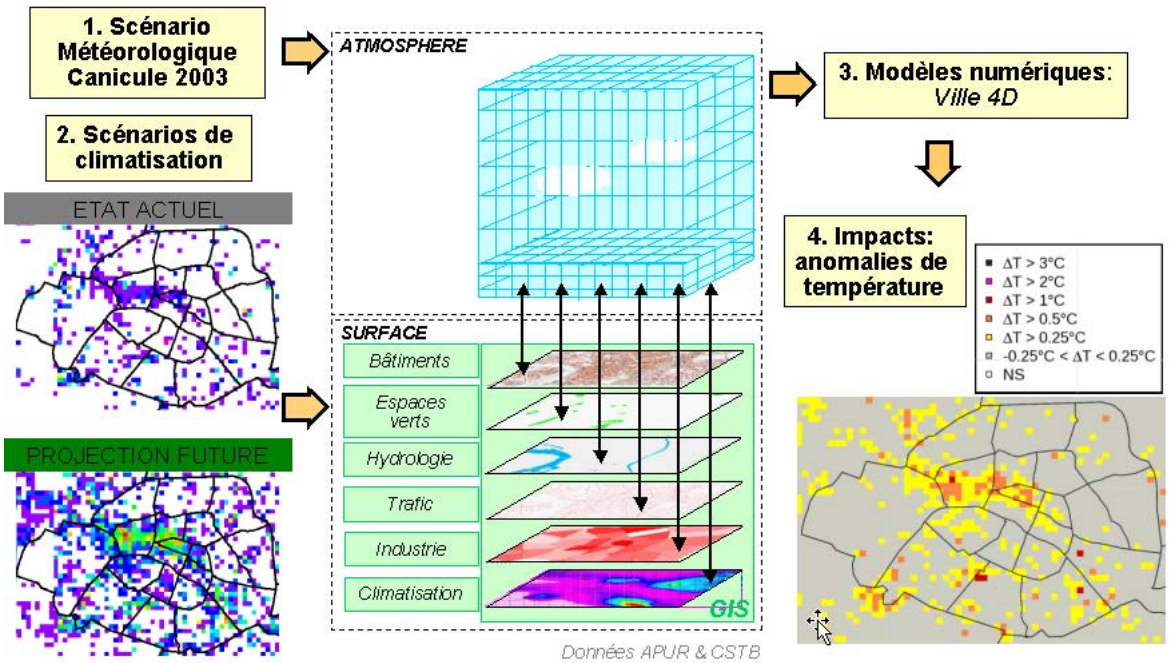


FIGURE 4.1 – *Méthodologie utilisée dans CLIM2*

La version de TEB que j'ai utilisée pour mener cette étude correspond à la version originale de TEB (Masson, 2000) qui a été modifiée pour prendre en compte le processus de climatisation des bâtiments. Dans les bâtiments climatisés, la climatisation est simulée en modifiant l'équation d'évolution de la température intérieure des bâtiments climatisés pour que celle-ci soit rappelée à une température de consigne de 26°C. Pour simuler la chaleur anthropique générée par la climatisation (qui n'est pas calculée dans cette version de TEB), les rejets de chaleur, sous forme sensible ou latente, ont été prescrits dans le modèle TEB et émis au niveau des toits des bâtiments. Cette configuration nécessitait donc de disposer de cadastres de rejets de chaleur à l'échelle du domaine parisien simulé.

Pour ce faire, le type (voir Chap. 2), le nombre, la localisation et la puissance des installations de climatisation actuelles de Paris et sa région ont été estimés par le laboratoire du CNAM (Trémeac et al., 2012) : via la préfecture pour recenser les installations classées (tours à refroidissement), par le biais de Climespace pour les centrales de production du réseau de froid parisien (Climespace), et par l'analyse d'images aériennes pour les climatiseurs secs installés en toiture et en façade. Ce recensement a permis de dresser un inventaire des émissions actuelles de chaleur anthropique provenant de la climatisation à Paris. Ensuite, TEB module ces rejets de chaleur exprimés en puissance nominale en fonction d'un calendrier horaire et hebdomadaire établi à partir de données réelles fournies par la société Climespace. Ces données qui représentent l'état plus ou moins actuel (même si sous-estimé) de l'équipement de climatisation de la capitale constituent le scénario qualifié de *réel* par la suite (*REAL-AC*). La puissance de climatisation pour l' ensemble du domaine d'étude concerné (562.5 km^2) s'élève à 5.16 GW.

En plus de ce scénario et d'un scénario de référence non climatisé (*NO-AC*), trois autres scénarios correspondant à des situations climatisées alternatives ont été établis :

- un scénario où tous les rejets actuels sont *secs* (*DRY-AC*, 5.32 GW)
- un scénario où les rejets actuels sont doublés et *secs* (*DRY-ACX2*, 10.32 GW)
- un scénario où les rejets actuels sont doublés et émis, non pas dans l'air, mais en souterrain ou dans la Seine par l'utilisation de systèmes alternatifs (*NOAIR-ACX2*, 10.32 GW)

Les données d'entrée nécessaires à la caractérisation de la surface (occupation du sol, caractéristiques du bâti) ont été établies et mises en cohérence via SIG à partir de données réelles fournies par l'Agence Parisienne d'URbanisme (APUR) et le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB).

Ces cinq scénarios d'usage de la climatisation ont finalement été simulés en forçant les conditions aux limites du domaine à celle de la canicule 2003 (période du 8 au 13 août 2003). En sortie des modèles numériques, les résultats ont été traités statistiquement pour en déduire deux indicateurs par scénario climatisé : l'anomalie de température de l'air dans les rues engendrée par le scénario (par rapport au scénario non climatisé) et les caractéristiques de l'îlot de chaleur parisien associé, et ce pour les heures de jours et les heures de nuit.

Les cartes d'anomalies de température générées par les différents scénarios (Figure 4.2) montrent que les rejets du parc actuel de systèmes de refroidissement (secs et humides, scénario *REAL-AC*) provoquent une augmentation faible et locale de la température nocturne dans les rues (0.25 à 1°C par rapport au cas de référence sans climatisation). Si l'ensemble des rejets est uniquement sous forme sèche (scénario *DRY-AC*), 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

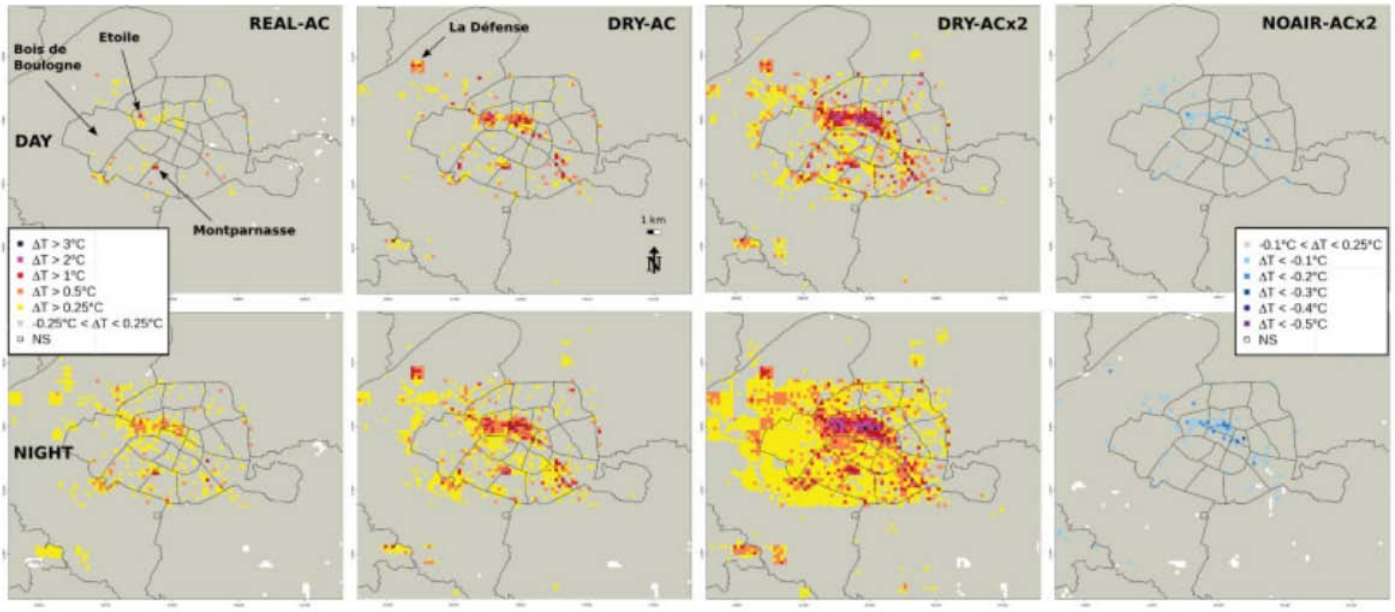


FIGURE 4.2 – *Anomalies de température à 2 m dans la rue, évaluées de jour et de nuit, pour chaque scénario climatisé, entre le 8 et le 13 août 2003*

chaleur urbain nocturne (+ 0.75°C, *Figure 10* de l'article). Dans une situation future proche où la puissance globale de climatisation serait doublée et l'ensemble des rejets se ferait sous forme sèche (scénario *DRY-ACX2*), l'intensité et l'emprise spatiale des impacts augmenteraient fortement, même en journée, et au-delà des zones où les rejets sont prescrits : l'augmentation de la température nocturne serait alors de l'ordre de 0.5 à 3°C, avec un îlot de chaleur nocturne nettement plus étalé et plus intense (+ 1.75°C), toujours par rapport à un cas de référence sans climatisation. A l'inverse des scénarios avec rejets de chaleur dans l'air, le scénario *NOAIR-ACX2* aurait lui tendance à légèrement rafraîchir la température localement.

L'analyse locale réalisée par Trémeac et al. (2012) sur 12 mailles du domaine de simulation (0.75 km^2 localisés dans différents arrondissements de Paris) avec l'ensemble des scénarios climatisés va plus loin en montrant que cette augmentation de température extérieure est proportionnelle à la puissance des rejets de chaleur sensible émis par les climatiseurs (FIGURE 4.3).
L'analyse des résultats a aussi permis de mettre en évidence que l'augmentation de température extérieure provoquée par la climatisation des bâtiments est plus marquée de nuit que de jour. Cet impact, qui semble décalé temporellement par rapport aux périodes d'utilisation intense de la climatisation, s'explique logiquement par un plus faible mélange turbulent la nuit. Ce résultat est important car l'augmentation des températures plus marquée de nuit que de jour risque d'exacerber le stress thermique nocturne des personnes ne disposant de climatisation, et ce faisant d'augmenter le risque de sur-mortalité comme cela a pu être observé pendant la canicule de 2003.

Cette étude démontre que toutes les formes de climatisation qui rejettent de la chaleur dans l'air génèrent une augmentation de la température des rues, et dans des ordres de grandeur qui peuvent être, dans certains cas, ressentis par les habitants à l'extérieur. Pour un climat parisien, les tours à refroidissement, qui limitent la quantité de rejets de chaleur sensible dans l'atmosphère urbaine semble un meilleur moyen de générer du froid. Des réseaux de froid souterrain ou rejettant dans la Seine restent la meilleure solution en termes de confort intérieur et extérieur, même

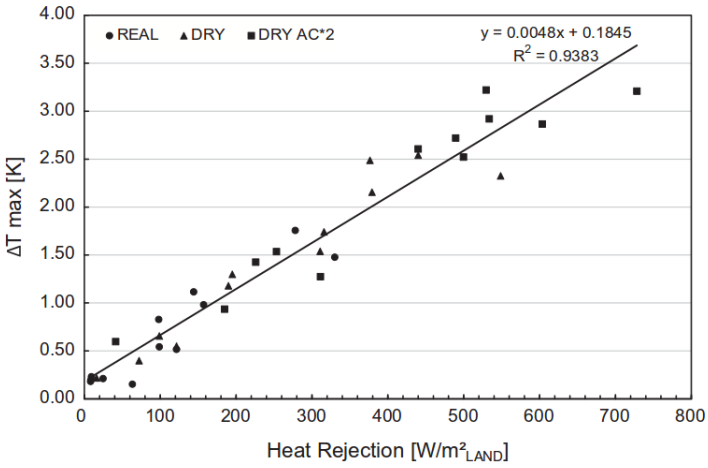


FIGURE 4.3 – *Relation entre l'anomalie de température locale et la puissance des rejets de chaleur sensible établie pour un échantillon de 12 mailles (Trémeac et al., 2012)*

si ce type de solution relève pour le moment du challenge technologique à l'échelle d'une ville. Cependant, ces deux dernières solutions comportent des risques dont il faut tenir compte, même s'ils n'ont pas été évalués dans cette étude, notamment un risque sanitaire liée à la légionellose pour les tours à refroidissement et des impacts sur la faune et la flore lorsque les rejets de chaleur sont émis dans le Seine.
Enfin, les performances énergétiques associés aux différents scénarios/dispositifs de climatisation n'ont pas été évoqués dans cette étude car la version de TEB utilisée pour leurs simulations ne permettait pas de les étudier de façon satisfaisante. Parallèlement à cette étude, un module détaillé d'énergétique du bâtiment (Building Energy Model, BEM) a été développé par Bueno et al. (2012). Il permettra non seulement de moduler les caractéristiques des systèmes de climatisation (type de rejets, localisation des rejets) mais surtout de calculer de façon dynamique les rejets de chaleur et la consommation d'énergie finale associés. Ce faisant, la rétro-action de l'élévation de température de l'air extérieur générée par la climatisation sur la demande de climatisation pourra être simulée, ce que ne permettait pas la version de TEB que nous avons utilisée pour cette étude.

Quoiqu'il en soit, aux vues des nos résultats, la climatisation seule n'apparaît pas comme une mesure d'adaptation durable pour l'amélioration du confort de tous. D'autres mesures devraient être évaluées pour permettre de diminuer au mieux son utilisation. Dans la partie suivante, l'augmentation de la végétation au sein du tissu urbain comme stratégie de mitigation de l'îlot de chaleur urbain et d'adaptation au changement climatique est évaluée, combinée à la climatisation.

4.2 Article

de Munck C., Pigeon G., Masson, V., Meunier F., Bousquet P., Tréméac B., Merchat M., Poeuf P. and Marchadier C. 2013. How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France ? *International Journal of Climatology* 33 : 210-227.

INTERNATIONAL JOURNAL OF CLIMATOLOGY
Int. J. Climatol. **33**: 210–227 (2013)
Published online 17 January 2012 in Wiley Online Library
(wileyonlinelibrary.com) DOI: 10.1002/joc.3415

RMetS
Royal Meteorological Society

How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France?

Cécile de Munck,[a]* Grégoire Pigeon,[a] Valéry Masson,[a] Francis Meunier,[b] Pierre Bousquet,[b] Brice Tréméac,[b] Michèle Merchat,[c] Pierre Poeuf[c] and Colette Marchadier[a]

[a] *CNRM/GAME, Météo France, 42 avenue Gaspard Coriolis, 31 057 Toulouse Cedex, France*
[b] *LGP2ES (EA21), CNAM IFFI, Case 331, 292 rue Saint Martin, 75 141 Paris Cedex 03, France*
[c] *Climespace, 185 rue de Bercy, 75 012 Paris, France*

ABSTRACT: A consequence of urban heat islands in summer is an increase in the use of air conditioning in urbanized areas, which while cooling the insides of buildings, releases waste heat to the atmosphere. A coupled model consisting of a meso-scale meteorological model (MESO-NH) and an urban energy balance model (TEB) has been used to simulate and quantify the potential impacts on street temperature of four air conditioning scenarios at the scale of Paris. The first case consists of simulating the current types of systems in the city and was based on inventories of dry and evaporative cooling towers and free cooling systems with the river Seine. The other three scenarios were chosen to test the impacts of likely trends in air conditioning equipment in the city: one for which all evaporative and free cooling systems were replaced by dry systems, and the other two designed on a future doubling of the overall air conditioning power but with different technologies. The comparison between the scenarios with heat releases in the street and the baseline case without air conditioning showed a systematic increase in the street air temperature, and this increase was greater at nighttime than day time. It is counter-intuitive because the heat releases are higher during the day. This is due to the shallower atmospheric boundary layer during the night. The increase in temperature was 0.5 °C in the situation with current heat releases, 1 °C with current releases converted to only sensible heat, and 2 °C for the future doubling of air conditioning waste heat released to air. These results demonstrated to what extent the use of air conditioning could enhance street air temperatures at the scale of a city like Paris, and the importance of a spatialized approach for a reasoned planning for future deployment of air conditioning in the city. Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

KEY WORDS meso-scale atmospheric modelling; air conditioning; urban micro-climate; urban heat island

Received 15 June 2011; Revised 21 October 2011; Accepted 23 November 2011

1. Introduction

During the 2003 European heat wave, which could be representative of a normal summer by the end of the century (Déqué, personal communication), the urban heat island (UHI) observed in Paris, with temperatures up to 8 °C higher in central Paris than in the countryside, exacerbated the heat stress situation. Paris is faced with an increasing urban population, a specific micro-climate, and recent episodes of high summer temperatures. In this context, the cooling requirements for the city of Paris, in order to cool or maintain constant the temperature of goods and people for health, comfort, commercial and industrial reasons, could increase. Current energy demand projections suggest that air conditioning (AC) usage is likely to increase significantly in the short term. The Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners Report commissioned in 2003 by the European Union (Adnot, 2003b) forecasts a doubling of the energy consumption due to AC by 2020 in France. Hence, considering that the use of AC systems, while cooling the insides of buildings, releases waste heat to the lower part of the urban atmosphere, it is legitimate to question its effect on the local climate at the scale of the city. What is the order of magnitude of potential impacts on street air temperatures? Are they localized or spread out? Do they worsen during the day or during the night? Are they dependent on the density of AC installations and the cooling technology implemented such as dry and evaporative cooling towers and free cooling systems?

Literature is scarce on the effects of AC on urban microclimates worldwide. Surprisingly, the literature on North American urban areas (Akbari *et al*., 2001; Akbari and Konopacki, 2004; Salamanca *et al*., 2011) or European cities, such as Athens (Hassid *et al*., 2000) and London (Kolokotroni *et al*., 2006), mainly focuses on the impact of the urban heat islands on AC-related energy consumption/demand but not on the feedback on outdoor temperatures. On this point, studies were only found for one North American city (Houston) and three Asian cities (Tokyo, Taipei and Wuhan), and they differ in the level of sophistication of the models that the authors used and the spatial scale that they focused on. Of those

* Correspondence to: C. de Munck, CNRM/GAME, Météo France, 42 avenue Gaspard Coriolis, 31 057 Toulouse Cedex, France.
E-mail: cecile.demunck@meteo.fr

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

studies, that of Salamanca *et al.* (2011) investigated the feedbacks of AC systems on outdoor air temperatures at the scale of Houston City (Texas) based on the coupling between a meso-scale model, a multilayer urban canopy model and a simple building energy model. They found an increase in night temperatures of up to 2 °C in the densest areas of Houston. For Tokyo, Ohashi *et al.* (2007) have simulated a 1–2 °C increase in air temperatures in the office districts due to AC usage during week days, by using a multilayer urban canopy model and a building energy analysis model. Kikegawa *et al.* (2003) used a coupled model consisting of a building energy analysis model, an urban canopy model and a meso-scale meteorological model. Their simulation results were focussed on a single office district in central Tokyo and corroborate Ohashi *et al.* (2007) findings, with an average 1 °C increase in street air temperature across three air conditioner-placement scenarios. The Hsieh *et al.* (2007) study, based on a building energy software (EnergyPlus) and a computational fluid dynamics software (Windperfect), shows a similar effect on street air temperature for the densest residential district of Taipei city where buildings were equipped with window-type air conditioners: a local temperature rise between 0.78 °C and 1.84 °C, with the maximum rise occurring between 23 : 00 and 24 : 00 h. Contrary to previous studies, figures for the city of Wuhan (China) were obtained by Wen and Lian (2009) based on simple calculations (box model type). They show that domestic air conditioner usage may increase Wuhan City's mean temperature of 0.2 or 2.56 °C, depending on the temperature profile modelled for the city (under normal or inversion conditions, respectively).

However, no estimate of the impacts of different types of cooling technologies on outdoor temperatures has yet been carried out at a larger scale than the neighbourhood with detailed meso-scale models. The present paper describes the methodology implemented to do so at the scale of Paris City. Simulation results are presented for a set of AC scenarios chosen to represent likely equipments for the city, currently (based on the inventory of current AC waste heat emissions) and in the near future.

2. Methodology

2.1. Overview

The methodology implemented in this work (Figure 1) is a numerical atmospheric meso-scale simulation of the 2003 European heat wave for the City of Paris for different scenarios of AC usage. With the aim of comparing and estimating the influence of cooling systems on the street air temperatures and the magnitude of the UHI of Paris City, several configurations/scenarios of AC were simulated (Table I) by varying the form of heat waste discharged to the atmosphere (as sensible or latent heat), the distribution pattern of AC (individual *versus* networked systems) or the intensity of cooling power. The different cases of AC usage are as follows:

(1) without AC to allow referring to a baseline (NO-AC),
(2) with the current types of AC systems coexisting in the city, dry and evaporative cooling towers and free cooling systems (REAL-AC),
(3) with all current AC systems converted to dry cooling systems (DRY-AC),
(4) a future projection of AC, with doubling of the dry waste heat releases (DRY-ACx2),

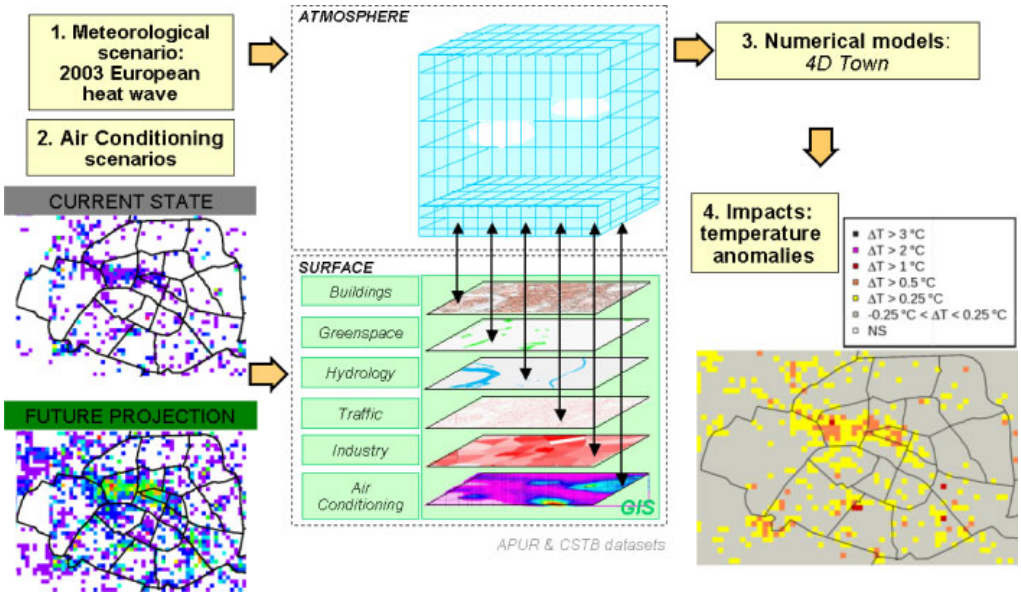


Figure 1. General methodology. This figure is available in colour online at wileyonlinelibrary.com/journal/joc

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

Table I. Air conditioning scenarios.

Case	Description
NO-AC	A scenario without AC (baseline)
REAL-AC	The current situation with an overall heat release power of 5.16 GW, which encompasses three types of AC systems in the city: • dry air conditioners discharging sensible waste heat to air implemented for individual flats or houses (such as window units) or at the scale of a building (such as rooftop units), • evaporative air conditioners (such as evaporative cooling towers) discharging 95% of latent waste heat and 5% of sensible waste heat to air implemented at the scale of a building or a neighbourhood, with a distribution network, • free cooling systems discharging waste heat to the river Seine and implemented at the scale of a neighbourhood with a district network (such as the ones developed and maintained by the Climespace Company).
DRY-AC	Same overall heat release power than in the REAL-AC case, with conversion of latent heat releases to sensible releases (which implies that all evaporative air conditioners are replaced by dry air conditioners). Moreover, we assume that systems are autonomous and that network districts disappear. Consequently, the heat releases are located where the cooling power is used.
DRY-ACx2	A future projection of AC usage assuming a doubling of the overall power of the heat released over the simulation domain covered only by dry air conditioners. This increase would be mainly due to an increase in usage in the office district. The overall power of the sensible heat released (10.32 GW) is distributed with two thirds in central Paris and one third outside. The distribution is carried out by increasing the power of the grid cells up to what the floor area can allow.
NOAIR-ACx2	A future projection of AC usage for which all the cooling needs for Paris are satisfied by free cooling district networks that do not release their waste heat to air. The cooling power inside the buildings is kept identical to that of scenario DRY-ACx2.

(5) a future projection of AC with the same cooling power as in scenario DRY-ACx2 but without discharging waste heat to air, implying the use of alternative methods for heat discharge (NOAIR-ACx2).

The choice for dry scenarios is based on the assumption that existing evaporative cooling towers (with a lifetime of around 15 years) might be replaced in the future by dry cooling towers because of their heavy maintenance and the fear associated with the risk of legionellosis. Then the nationwide projections of AC usage from Adnot (2003a, 2003b) allowed to choose a realistic figure for future projections of heat releases. Not only is doubling the power of AC releases a realistic hypothesis for the 2020s (even if it is probably underestimated), but its tangible aspect also facilitates the interpretation of simulation outputs.

Finally, the outputs of numerical models were statistically processed to derive two indicators: the temperature anomalies in the streets and the characteristics of Paris heat island.

2.2. Meteorological conditions

We have chosen to simulate the meteorological conditions of the 2003 European heat wave because this heat wave is estimated to be representative in mean temperature of summers of the second half of the 21st century, according to the Météo France global climate model projection (Déqué, personal communication). The characteristics of this heat wave allow us to understand what kind of weather conditions Paris and its inhabitants are likely to face in the future.

The summer of 2003 has been the warmest in France since the establishment of the French weather station network (in 1951). The heat wave observed during the month of August 2003 was notable not only by the amplitude of its maximum temperature but also by its records for night temperatures (above 25 °C on the 11th and 12th of August in the Park Montsouris on the southern outskirts of inner Paris (Figure 2), and its duration (about 2 weeks). There was a gradual rise in temperatures between the 1st and 5th of August (with first record-breaking temperatures in the southwest of France on the 3rd and 4th of August) followed by a period of high heat until the 13th of August, the date of the beginning of the gradual decline in temperatures (Bessemoulin *et al*., 2004). Consequently, we focused on a 6-day simulation period, extending from the 8th to the 13th of August, chosen to be the hottest period of the heat wave. At the scale of France, this period was marked by settled anticyclonic conditions, with dry and stable air masses in the lower layers of the atmosphere which got warmer and warmer until the 14th of August, the date marking the end of the heat wave.

Moreover, Bessemoulin *et al*. (2004) noted that the temperature records of the 11th and 12th of August in Paris were aggravated by the presence of a low wind, which had implications not only in terms of pollution (non-dispersion of pollutants accentuated) but also in terms of health (higher risk of non-cooling of the body). Moisture, which is also recognized as an

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

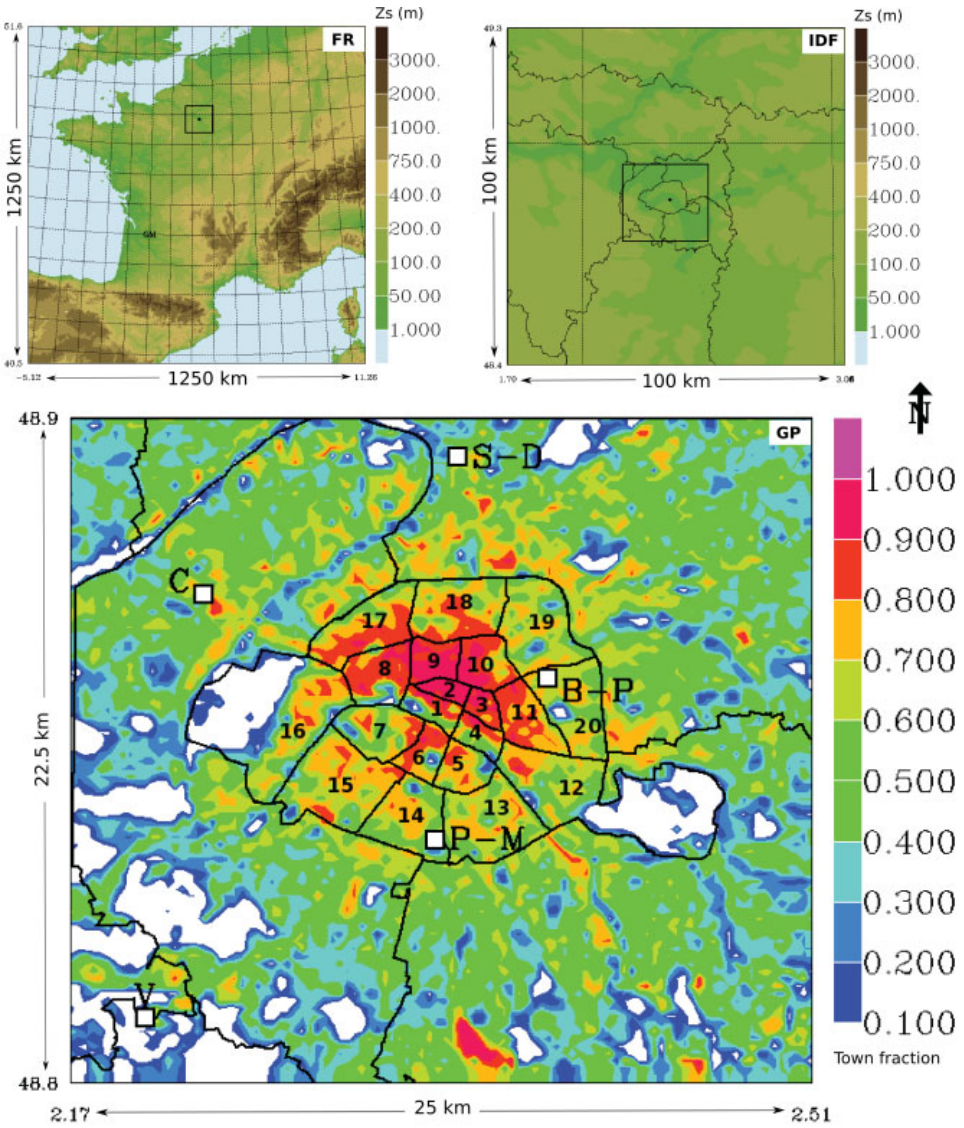


Figure 2. The three-nested simulation domains for the three spatial resolutions (FR: 2.5 km; IDF: 1.25 km; GP: 250 m). Orography (Zs) is shown for FR and IDF, town fraction for GP. On GP domain are also annotated the locations of 5 weather stations (V for Villacoublay, C for Courbevoie, S-D for Saint-Denis, B-P for Belleville-Park, P-M for Paris-Montsouris) and inner Paris district numbers.

aggravating factor in heat waves, has not played a determinant role because the situation remained relatively dry all along that period except for some sporadic storm events. These storms, often occurring in mountainous regions, were also observed over plains, with variable daily precipitation totals (3–35 mm). These precipitation events might have affected the IDF region on the 10th, 11th and 13th of August (Figure A1). Also, the effects of the heat wave over the capital were compounded at nighttime due to the smaller decline in temperatures in the city than in its surroundings (UHI). On the basis of a spatial extrapolation of station records (available at http://climascope.meteo.fr/), it was possible to estimate the intensity of the Paris nighttime heat island during the 2003 heat wave: it reached about 8 °C between the countryside northwest of Paris and central Paris (i.e. for a distance of 65 km), with the mean minimum temperature rising up to 24 °C in central Paris when the countryside peaked at 16 °C. At a smaller scale, between the city centre and the limit of the dense agglomeration of Paris (4 km from Notre Dame Cathedral, Paris), the magnitude of the nighttime heat island was about 4 °C.

2.3. Atmospheric model implementation

The simulations were performed with a coupled model consisting of the non-hydrostatic meso-scale atmospheric model MESO-NH (Lafore *et al*., 1998; Stein *et al*., 2000) and four surface-atmosphere energy-exchange models gathered in the SURFEX numerical tool. The implementation of the models actually rely on a combination of

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

3 nested domains (Stein *et al*., 2000) of different spatial and temporal resolutions to go down to a 250 m horizontal resolution: the first domain includes all of France (FR, with a size of 500 × 500 grid cells and a 2.5 km resolution, top left of Figure 2), while the second extends to the Île-de-France region (IDF, with a size of 80 × 80 grid cells and a 1.25 km resolution, top right of Figure 2), and the third and last domain focuses on Greater Paris (GP, domain of interest, with a size of 100 × 90 grid cells and a 250 m resolution, bottom of Figure 2). To model the period of interest (8–13 August 2003), the atmospheric model running on FR is initiated and then coupled at its lateral boundaries every 6 h with the analysis of the weather forecasts from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Then, the models running on the IDF and GP are nested 2 ways. For the three simulation domains, a vertical grid of 55 levels is used, with a stretched resolution ranging from 30 m at the lowest level to 1000 m at the highest (17 600 m). The simulations are conducted using an Eddy-Diffusivity Mass Flux (EDMF) approach. The mass flux scheme (Pergaud *et al*., 2009) simulates boundary layer thermals (and cumuli clouds if any). The turbulence scheme (Cuxart *et al*., 2000) uses a Turbulent Kinetic Energy (TKE) approach. The mixing length formulation varies with the spatial resolution of the simulation domain: Bougeault and Lacarrère (1989) at 2.5 km and at 1.25 km, and that of Deardorff at 250 m. 3D turbulent fluxes are computed for the last two domains (1.25 km and 250 m).

2.4. Surface model description

The four surface models allow to characterize each grid cell of the simulation domain by four different land covers (agricultural and natural land, urban areas, inland waters and sea or oceans). The surface schemes consist in Interaction between Soil Biosphere and Atmosphere (ISBA; Noilhan and Mahfouf, 1996) for agricultural and natural land, and two parameterisations of the Charnock (1955) formulation for inland waters, seas and oceans and Town Energy Balance (TEB; Masson, 2000), designed for urban and artificial surfaces. Finally, water, heat (radiation, conduction, convection), momentum and carbon dioxide fluxes between the Earth's surface and the atmosphere are aggregated according to the area fraction of the land covers within each grid cell. Within TEB, the urban landscape is simplified as a network of street canyons (Figure 3) of infinite length and equiprobable orientation. TEB simulates the exchanges of heat and water from three generic surfaces (road, wall, roof, Figure 3). In order to estimate microclimate within street canyons, TEB is generally used in conjunction with the Surface Boundary Layer (SBL) model which solves vertical turbulent diffusion within the average street canyon from the surface fluxes provided by the road, wall and roof (Hamdi and Masson, 2008; Masson and Seity, 2009). Off-line simulations with TEB have already demonstrated that TEB was able to accurately reproduce the energy balance of urban surfaces, the street air temperatures and the energy consumptions for a wide range of cities under various climates and seasons: Vancouver and Mexico (Masson *et al*., 2002), Marseille (Lemonsu *et al*., 2004), Basel (Hamdi and Masson, 2008), Łódź (Offerle *et al*., 2005), Toulouse (Pigeon *et al*., 2008) and Montréal (Lemonsu *et al*., 2010).

TEB simulates the thermal functioning of a generic building (Figure 3): an energy balance is established on the outer surfaces of both wall and roof, taking into account the solar and infrared net radiation (Q*), the convective heat flux (Q_H), and the water evaporation (Q_E) for the roof. The evolution of the wall and roof internal temperatures (T_w and T_r, respectively) by heat conduction is then solved at each time step by the model. Finally, exchanges with the air inside the building are calculated from the air temperature inside the building (T_i). T_i is described in a simplified way to account for the inertia of buildings and the temperatures of the inner surfaces of walls and roofs (Masson *et al*., 2002).

2.5. Baseline surface input data

The surface models require input data to estimate their parameters. The terrain for each simulation domain was described by Shuttle Radar Topography Mission data (SRTM), the spatial resolution of which is finer than those of the simulation domains described. Then, land cover types (urbanized fraction, fractions of natural or agricultural covers, freshwater and ocean) for the two domains with the coarsest spatial resolution (FR and IDF) were taken from the Ecoclimap database (Masson *et al*., 2003). A specific database was developed by the Paris Urban Planning Agency (APUR) to characterize urban parameters necessary in TEB (Masson, 2000, for the necessary parameters) at 250 m spatial resolution (APUR, 2007). It was based on surface inventories and spatial analyses of the vector maps of buildings and parks and completed by the Scientific and Technical Construction Center (CSTB) for the radiative and thermal parameters of the materials.

Additional sources were needed for the estimation of anthropogenic fluxes for the City of Paris. An initial estimate of the heat flow generated by the road traffic within the street canyon was completed and incorporated in the surface parameterisation. Within each grid cell of the Paris domain, this heat flow was approximated by weighting the global heat flow generated by traffic within Paris (Colombert, 2008) by the fraction of road within the grid cell (normalized to the total fraction within the domain), and assuming that combustion of fuels generates 92% of sensible heat and 8% of latent heat, as postulated by Pigeon *et al*. (2007).

2.6. Modelling AC

2.6.1. Implementation of AC within TEB

In the baseline case (NO-AC), the indoor temperature within the TEB model evolves in a simplified way which accounts for the inertia of buildings and the temperatures of the inner surfaces of the walls. To

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

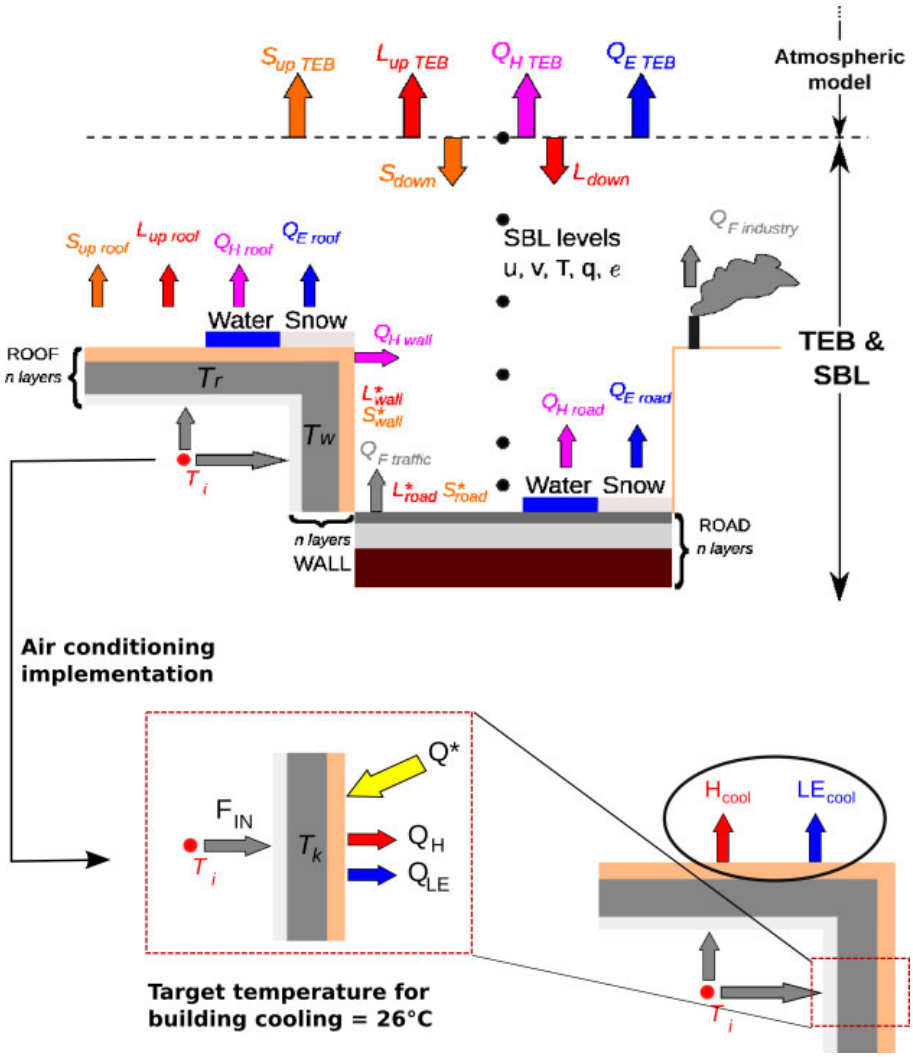


Figure 3. Schematic description of TEB model, showing how AC is accounted for at the building level. This figure is available in colour online at wileyonlinelibrary.com/journal/joc

Table II. Anthropogenic fluxes parameterisation within TEB.

Input data	Unit	Description
H_{cool}	W.m^{-2} of urban area	Maximum sensible waste heat flux associated with AC of buildings
LE_{cool}	W.m^{-2} of urban area	Maximum latent waste heat flux associated with AC of buildings
F_{cool}	–	Fraction of air conditioned buildings
$TIME_{cool}$(j,h)	–	Coefficients for the hourly modulation of the maximum AC waste heat flux, function of day type (j) and time of day (h)
T_{cool}	°C	Set-point temperature for air conditioned buildings

address the objectives of this study and account for AC usage, the TEB model has been slightly modified: the cooling of buildings has been represented by limiting the indoor temperature of air conditioned buildings to 26 °C (whereas, in the baseline case, there is no limiting of the indoor temperature), and by prescribing for those buildings the waste heat generated by air conditioners at roof level. The new surface data necessary for the model are presented in Table II. Two forms of AC waste heat released to the atmosphere are accounted for, which allow to describe common types of AC systems: sensible heat for dry cooling systems (H_{cool}, bottom diagram of Figure 3) and latent heat for evaporative cooling towers (LE_{cool}, bottom diagram of Figure 3).

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

This current implementation of AC within TEB, with a single setpoint temperature for air conditioned buildings and the integration of AC waste heat fluxes towards the energy balance of the roof, represents the cooling of buildings in a simplified way. Although 26 °C is a legal setpoint for comfort cooling, it is common knowledge, for example, that most luxury hotels in Paris apply an internal setpoint temperature below 26 °C, and frequently around 21 °C or lower. Also, some processes require much more cooling than required for comfort, as is the case, for example, with the food industry. Also, since the AC heat discharges to the atmosphere are currently prescribed to the model and not calculated from the cooling power demand of the buildings, it is not currently possible to model the retrofitting of the outdoor temperatures on the demand of cooling power in the buildings.

2.6.2. AC current heat releases

The AC systems currently used in Paris can be classified in four broad categories: (1) small dry cooling systems (from 6 to 70 kW per unit), (2) large dry cooling towers (for commercial centres, leisure facilities, data centres...); both systems discharge sensible waste heat to air, (3) evaporative cooling towers discharging latent waste heat to air, and (4) the free cooling plants (50 MW) developed by the Climespace Company discharging waste heat to the river Seine. These last two types of installations are mainly used for cooling large spaces, computer rooms, hospitals, and museums, or for cooling industrial processes, and are sometimes distributed via district networks such as those developed and maintained by the Climespace Company.

The estimation of the heat released by dry AC systems (1 and 2) over the Paris domain was undertaken based on a visual inventory via open-source satellite images for roof condensers and Google Street View for front condensers. The visual inventory of small condensers (1) was first carried out within inner Paris on a sub-sample of five districts (1, 11, 14, 16 and 18, Figure 2), representative in dwellings/businesses diversity and building type (building date, shape and allocation). The number and the cooling power of the small dry condensers observed yielded two levels of dry waste heat intensity for these five districts: 8 and 34 W m^{-2} of ground area. Each grid cell of the GP simulation domain was classified according to these two levels. Then, the waste heat associated with the large dry cooling towers (2) was added to each grid cell according to the number and the power of the installations observed during the visualisation phase. In terms of collating data for the evaporative cooling towers (3), their inventory was facilitated by the legal requirement imposed on them, as 'classified installations', to declare their power and other characteristics to the authorities due to the sanitary hazard that they might carry. The collation of their cooling power was obtained upon request from the 'Prefecture de département' (local authorities). In terms of heat discharge, the waste heat is assumed partitioned into 95% latent heat and 5% sensible heat. Finally, the heating of small corridors of the river Seine induced by the free cooling systems (4) was not integrated because the analysis of their temperature records (Climespace, personal communication) showed that they would not cause a significant impact on the temperatures of the lower layers of air above the Seine. Then, in addition to the sources of AC waste heat themselves, the thermal discharge of the power transformers supplying the AC systems was accounted for amounting to 3% of the electrical power requested by the AC systems identified.

Gathering the information from all the current sources of waste heat emission (AC systems and power transformers) resulted in the sensible waste heat fluxes (H_{cool}) and latent waste heat fluxes (LE_{cool}) presented on top of Figure 4 for the REAL-AC case. These stand for maximum values which are modulated by the hourly schedules provided in Figure 5, depending on the day of the week simulated. The hourly schedules of AC power demand for the period of simulation were gathered for each day type of the week (weekday, Saturday, Sunday) based on records from the Climespace Company, and then normalized. In conclusion, the inventory of AC waste heat releases for the REAL-AC scenario reports a waste heat power of 5.16 GW over the Paris domain and shows that sensible heat releases are more spread out than those of latent heat (Figure 4), which is consistent with the higher spatial density of small or large dry systems compared to evaporative cooling towers. Continuous zones present sensible heat releases of about 75 Wm^{-2} of urban cover area (top left of Figure 4), when higher values up to 650–900 Wm^{-2} occur locally. The highest values are located at powerful evaporative cooling towers connected to district networks and, in this case, a part of the cooling power generated is used in grid cells adjacent to where it is produced.

Then, from these data of waste heat release, the building surface and a median level of cooling power requirement, the fraction of cooled buildings in each grid cell was estimated. A cooling power of 90 Wm^{-2} of floor was chosen as being representative of a building fully air conditioned (median value for various building types such as offices in central Paris, offices with data centres or IT department, shops and malls, with 100% of air cooled floor area). Consequently, the fraction of air conditioned buildings (F_{cool}) was calculated as follow for each grid cell.

$$F_{cool} = \min\left(\frac{\frac{H_{cool}+LE_{cool}}{BLD\times\frac{z_{BLD}}{2.5}}}{90\times\left(\frac{1+COP}{COP}\right)},\ 1\right)$$

where BLD is the grid cell average building plan area density of the urban area, z_{BLD} is the grid cell average building height, COP is the Coefficient of Performance taken as 2.5 and the floor-to-floor height is fixed at 2.50 m. Then the waste heat fluxes estimated for the

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

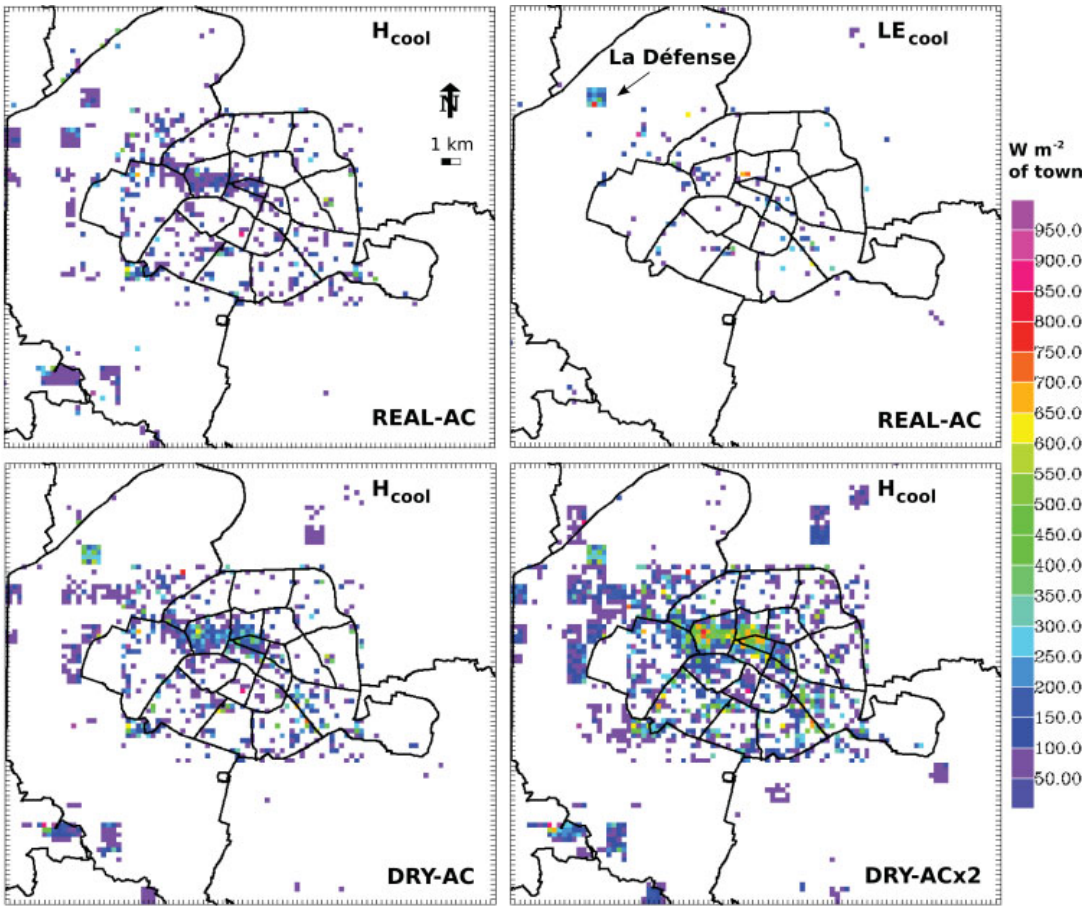


Figure 4. Maximum AC waste heat fluxes for the three scenarios with heat discharges to air Top: REAL-AC scenario, sensible heat fluxes (left) and latent heat fluxes (right) Bottom: DRY-AC scenario sensible heat fluxes (left), DRY-ACx2 scenario sensible heat fluxes (right).

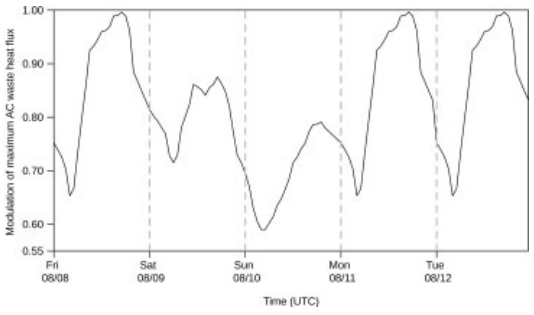


Figure 5. Hourly schedule for the modulation of maximum AC waste heat fluxes based on records from the Climespace Company.

REAL-AC case served as a basis for the development of the waste heat fluxes for the remaining AC scenarios (Table I).

2.6.3. *AC scenario heat releases*

The maps of heat fluxes for the two AC scenarios discharging only dry waste heat to air (bottom maps on Figure 4) were developed by converting the latent heat released by evaporative cooling towers or free cooling installations to sensible heat. Moreover, in the case of cooling installations connected to the district network, the sensible heat releases have been attributed to the grid cells where the cooling power is used. A good example of the consequences of the relocation of those waste heat discharges at the level of the cooled buildings is the office district of 'La Défense' (Figure 4, REAL-AC and DRY-AC scenarios). Also, a ratio of 1.05 was used to convert latent heat discharges to sensible heat, assuming a drop in the COP value between evaporative cooling towers and small dry systems. This drop has been observed by the Climespace Company and occurs because the dry autonomous systems have generally a lower-level performance by construction, and a lower level of monitoring and maintenance. By comparison, the large evaporative cooling towers, or free cooling plants that distribute their cooling power by district network, are monitored and adjusted around the clock to have the best level of performance. For the DRY-ACx2 scenario, the heat discharge power over the Paris domain was doubled (10.32 GW) to be consistent with the forecasts by Adnot (2003a, 2003b) predicting by

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

2020 an increase in commercial and office surfaces in France such that it would induce about a doubling of the AC consumption in comparison to 2003 (mean across 11 AC technical scenarios, Adnot, 2003b). Two thirds of this increased AC power was distributed in central Paris (on the hypothesis that the increase in commercial and business surfaces would occur there) and one third outside. In this scenario and the NOAIR-ACx2 scenario, F_{cool} has been recalculated to represent this increase in cooled buildings.

2.6.4. Uncertainties and limitations

The accuracy of the current heat release inventory (REAL-AC case) has been evaluated. Firstly, to assess the quality of the visual inventory, the cooling power values have been recovered for a set of ten buildings (mostly hotels within inner Paris). For the buildings of this set for which the condensers have been visualized, the uncertainty has been estimated to be 15%. For some buildings, although present, the systems had not been visualized because they were placed on the inner facet of the building, hidden within a compartment, the attic or the basement. The global result of the visual estimation for this set of ten buildings in comparison with the real consumption was an underestimation of the heat releases by a factor of two.

Secondly, concerning the accuracy of the releases by the classified installations (evaporative cooling towers), it did not prove to be feasible to collate data for all installations in Greater Paris. This study was based on a record of 1740 classified installations out of 2118 (i.e. 82% of operating installations).

3. Evaluation and analysis of the baseline simulation

3.1. Evaluation against meteorological observations

The baseline simulation without AC has been evaluated against meteorological observations to establish how well the configuration of the coupled models behaves in the context of this study. For this purpose, we used the temperatures simulated at 2 m for the vegetated fraction of each grid cell in order to be consistent with the temperatures provided by weather stations which are measured on a grassy area away from any obstacle (hence, generally in parks in urban settings). In the case of the IDF domain, there are 31 stations providing hourly records of temperatures. On the other hand, rare are the urban weather stations recording hourly temperatures. In the case of Paris, there are five. Their location is shown on the bottom of the map in Figure 2. Two stations are located in inner Paris: Paris-Montsouris (P-M) within the Park Montsouris, south of the river Seine and Belleville Park (B-P). The other three are located outside inner Paris: southwest of Paris for Villacoublay (V) at the military airport, northwest of Paris for Courbevoie (C) and north of Paris for Saint-Denis (S-D). Figure 6 presents the evolution of the 2-m temperature modelled during the heat wave at a 1.25 km resolution for the 31 weather stations of the IDF domain (top left), and at a 250 m resolution for each of the five weather stations of the GP domain. At 1.25 km horizontal resolution, the standard deviations for simulated temperatures are lower than those observed for daily minima (top left of Figure 6), showing that the model, at this resolution, underestimates the geographic variability of daily minima. Nevertheless, the model is able to properly simulate the evolution of daily temperatures at the scale of the IDF. On average, the model is slightly too cold during the day and too warm at night (Table III). This tendency of the model to overestimate the daily minima is also observed across the GP domain, but to a lesser extent because the increase in resolution (from 1.25 km down to 250 m) shows a better correlation between simulated and observed 2-m air temperatures (Table III). This improved correlation is characterized by a root mean square error (RMSE) on the 2-m temperature of 1.5 °C for the GP model compared to 2.6 °C for the IDF model, with respective mean bias errors (MBE) of 0.2 °C and 1.0 °C. Increasing in resolution, the prediction of minimum temperatures is the most improved, with a RMSE of 1.3 °C for the GP domain *versus* 3.5 °C across the IDF domain and respective MBE of 1.0 °C and 3.0 °C. The prediction of the maximum temperatures remains relatively unchanged when changing resolution, with an average RMSE and MBE of 1.7 °C and −0.2 °C. These improvements are attributable not only to the spatial resolution itself, but also to a better description of the different types of surface covers on the GP domain.

The RMSE and the MBE were also calculated for the REAL-AC scenario as this is the scenario closest to reality. They were equivalent to those estimated for the baseline simulation. Indeed, there are not enough stations within the GP domain and they are not located near enough to substantial sources of AC waste heat emissions to demonstrate a better agreement between the temperatures simulated and observed when current AC waste heat emissions are accounted for.

The evaluation of the simulation on the FR domain against meteorological observations is presented in Appendix A.

3.2. Characteristics of the baseline UHI

The description of results from the NO-AC scenario is of importance as it sets a baseline for further comparison, as the model results are analysed in terms of differences (temperature anomalies). This enables, over the Paris domain, not only to compare the impacts of AC scenarios with the baseline situation, but also to free oneself from the remaining bias between the modelled and the observed temperatures. Figure 7 presents a map of 2-m air temperatures as well as a 2-m air temperature profile obtained for a west-to-east cross-section passing through the hottest districts of inner Paris. This profile is used to visualize with a finer scale of temperature the structure of the heat island for that cross-section, and to refine the magnitude of the heat island in the direction indicated.

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

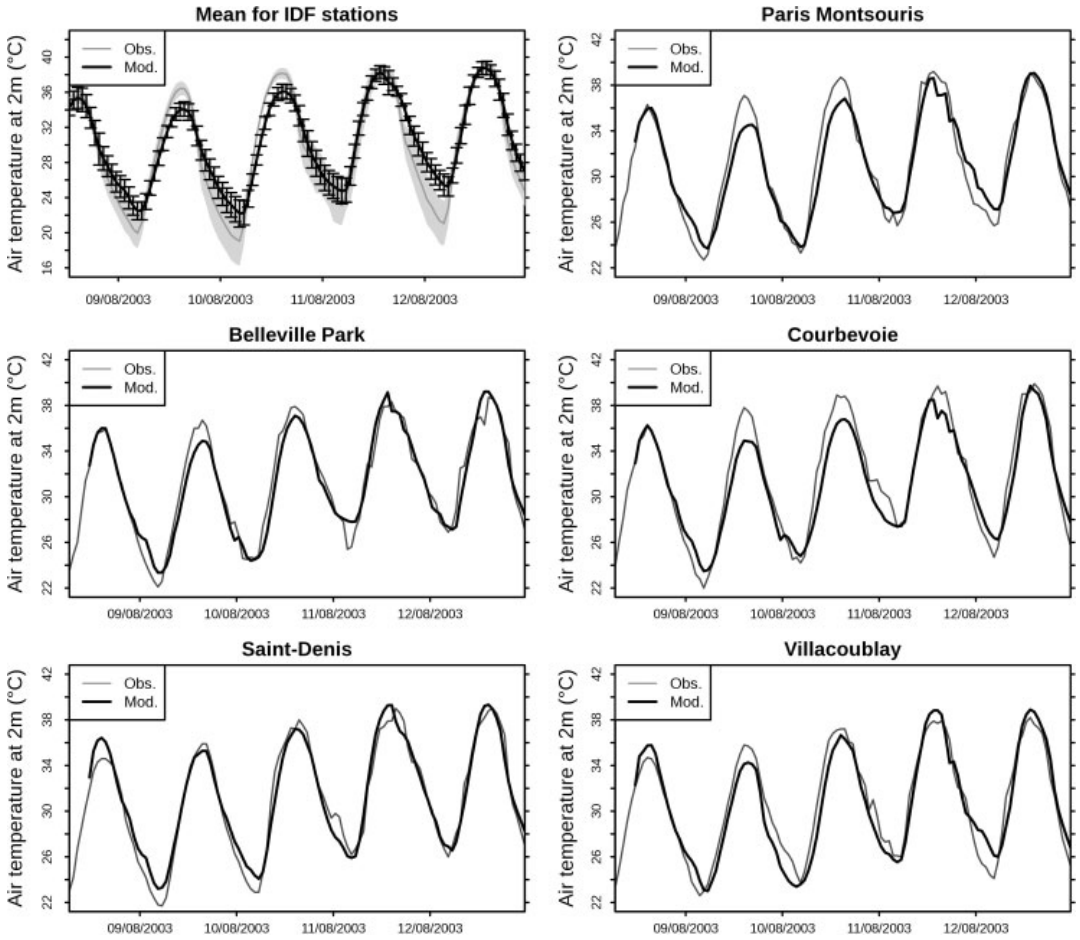


Figure 6. Temperatures observed and modelled between 8 and 12 August 2003, for IDF weather stations (top left: full lines represent the mean across 31 stations; standard deviations are indicated by whiskers for the model and by a grey envelope for observations) and for each of the five Greater Paris stations.

Table III. Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Bias Error (MBE) Mod-Obs on 2-m air temperatures, calculated between 8 August 2003, 12 UTC, and 13 August 2003, 23 UTC, based on the maximum number of weather stations in each domain (31 for IDF and 5 for GP).

Domain/Spatial resolution	T (°C)		Tmin (°C)		Tmax (°C)	
	RMSE	MBE	RMSE	MBE	RMSE	MBE
IDF/1.25 km (for 31 stations)	2.6	+1.0	3.5	+3.0	1.9	−0.5
GP/250 m (for 5 stations)	1.5	+0.2	1.3	+1.0	1.6	+0.1

The mean nighttime 2-m air temperatures present the structure of a standard UHI (Figure 7), which demonstrates the influence of the most urbanized areas in central Paris on the temperatures. Its maximum amplitude (between the hottest districts 2, 3, 9 and 10) and the least urbanized areas in the southwest of Paris) is about 6 °C. The mean nighttime temperature profile for the west-to-east cross-section passing through the districts 8, 9 and 10 (bottom of Figure 7) shows finer temperature variations and, in particular, the influences of artificial and natural surfaces on temperatures, with the highest temperatures over the densest urbanized areas (between 8 and 15 km) and lower temperatures over the Bois de Boulogne (between 6 and 8 km), and the river Seine (at approximately 3.5 km). The temperature profile shows a baseline UHI amplitude of about 4.5 °C, which can stand as a reference for assessing the potential impacts of AC scenarios on UHI. The UHI amplitude was estimated as the difference between the maximum of the mean nighttime temperature profile and the average of its two minima (east and west of the cross-section). The value of 4.5 °C agrees well with that of 4 °C observed

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

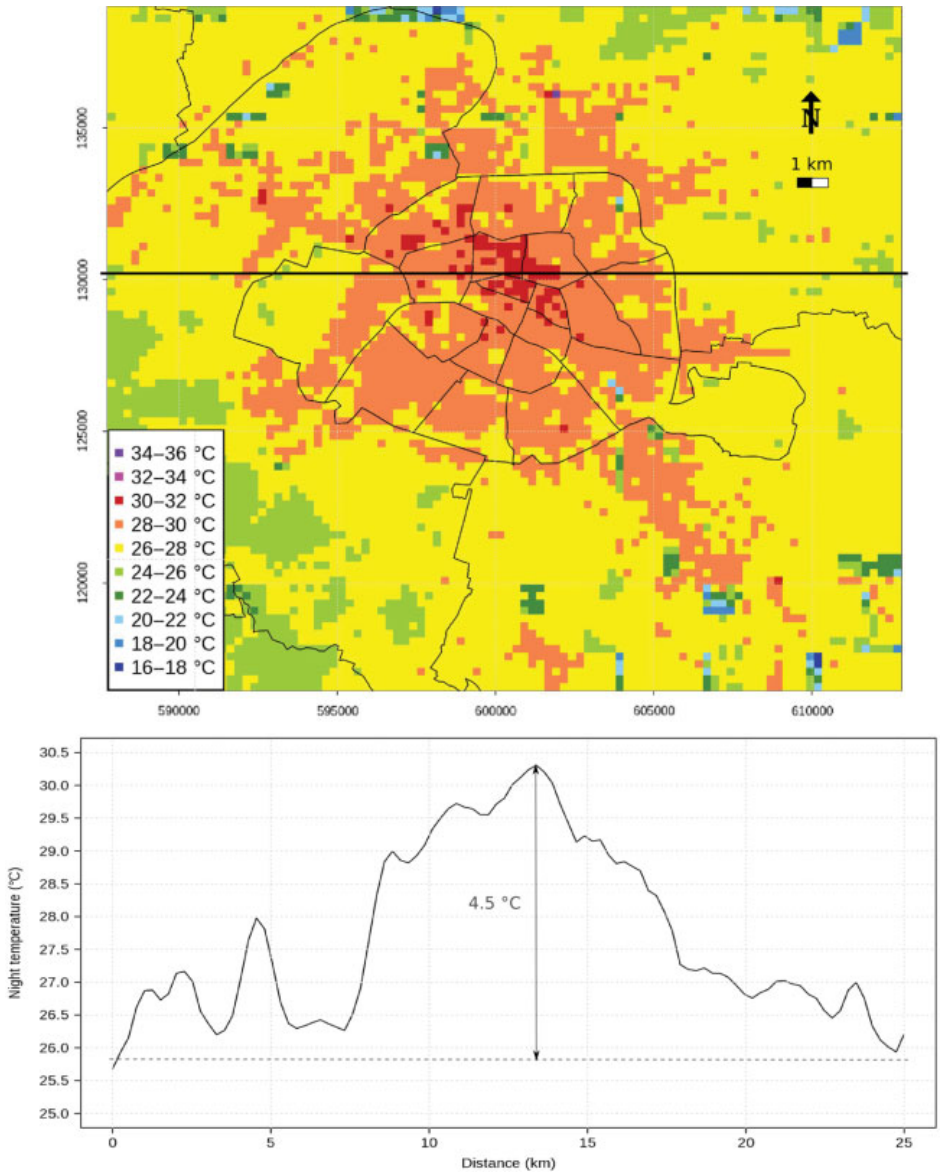


Figure 7. Characteristics of Paris nighttime UHI without activation of air conditioning (top: map of temperatures; bottom: mean temperature profile for the west-to-east cross-section mentioned on the top map, estimated across three hourly terms – 2, 3 and 4 UTC). The amplitude of the heat island is estimated on the temperature profile as the difference between the maximum and the average of the two minima (east and west).

during the 2003 heat wave between the city centre and the limit of the dense agglomeration of Paris.

4. Results and discussion: analysis of the AC scenarios

4.1. Statistical processing to estimate the impacts of AC scenarios

Potential impacts of AC have only been analysed for the Paris simulation domain where it was parameterized in the model. We have chosen two indicators to compare the differences between each AC scenario and the baseline scenario, both based on street air temperatures. Firstly, we have estimated the differences in 2-m street air temperatures between each scenario and the baseline over the simulation period, and it is called the 'temperature anomaly'. Secondly, we have compared urban heat islands morphology (maps) and amplitude (maps and temperature profiles) between all the scenarios.

Prior to the analysis, the temperature anomaly time series within each grid cell were processed in three steps using the R tool (R Development Core Team, 2010). Firstly, the filtering of anomaly time series was necessary to remove some storm-type events that have

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

occurred during the period as described in Section 2.2 and Appendix A. Indeed, in the simulations for which only the AC heat releases have been changed, some storm-type events have appeared at different locations and timings between two cases and have generated impacts on air temperature. However, given the current state-of-the-art in storm prediction, the perturbations of deep convection between two different simulations can grow rapidly (Hohenegger and Schär, 2007), and it is not possible to attribute these storm pattern modifications to the AC heat releases. Secondly, a random resampling of filtered anomalies by daytime (9 a.m.–7 p.m.), and nighttime (8 p.m.–6 a.m.) series was necessary so as to (1) obtain uncorrelated data, and (2) generate for each grid cell a larger sample that would follow a quasi-normal distribution before proceeding to anomaly characterisation. This resampling was performed using a bootstrapping method (Efron and Tibshirani, 1993). Thirdly, the characterisation of daytime and nighttime anomalies was based on a one-sided statistical test at 95% confidence on the average of the filtered and resampled daytime and nighttime temperature anomaly series to rank them in relation to fixed temperature thresholds.

To analyse the morphology and the amplitude of Paris mean UHI for each simulation, the 2-m temperatures for three nighttime hourly terms (2, 3 and 4 UTC) and the last four nights of the simulation (9–10, 10–11, 11–12 and 12–13 August) were selected and averaged.

4.2. Impacts of AC scenarios on street level air temperatures

Figure 8 shows the location and the amplitude of the daytime and nighttime temperature anomalies obtained for each of the four scenarios with AC (REAL-AC, DRY-AC, DRY-ACx2, NOAIR-ACx2). These results highlight four main outcomes.

4.2.1. Increase in street air temperatures

Firstly, all AC scenarios, but the NOAIR-ACx2, show an increase in street air temperatures, and the amplitude of this increase varies with the scenario of AC waste heat emission considered and the time of day. Under the present time REAL-AC case, 2-m air temperature anomalies range from 0.25 to 1 °C locally (across a grid cell, i.e. at 250 m), with the greatest temperature anomalies (1 °C) observed in districts 8 ('Etoile'), 12, 13 and 14 ('Montparnasse') for grid cells which are strongly air conditioned. Moving on to the DRY-AC scenario shows increased impacts, ranging from 0.25 to 2 °C. In this scenario, temperature anomalies of at least 0.5 °C are widespread in districts 2, 8 and 9 and 'La Défense' office district, and can be up to 1 and 2 °C locally (e.g. for the 'Etoile' and 'Montparnasse' neighbourhoods, in districts 8 and 14, respectively). Under the DRY-ACx2 scenario, impacts are even greater than for the DRY-AC scenario, ranging from 0.25 °C to 3 °C locally, with the greatest anomalies found in districts 2, 8 and 9. For these three AC scenarios, the increase in street air temperature is generally greater near the sources of emission of AC waste heat (shown in the maps of waste heat fluxes in Figure 4). It should also be noted that impacts of AC on local air temperatures in the area of 'La Défense' office district (northwest outside inner Paris, see Figure 8) only appear clearly with the DRY-AC and the DRY-ACx2 scenarios, due to converting latent heat releases from the REAL-AC scenario to only dry releases (heat fluxes in Figure 4).

Moreover, the uncertainty carried by the inventory of AC waste heat intensities over Greater Paris for the REAL-AC case (Section 2.6.4) suggests that the impacts on street air temperatures of the AC scenarios simulated estimated in this study are likely to be underestimated.

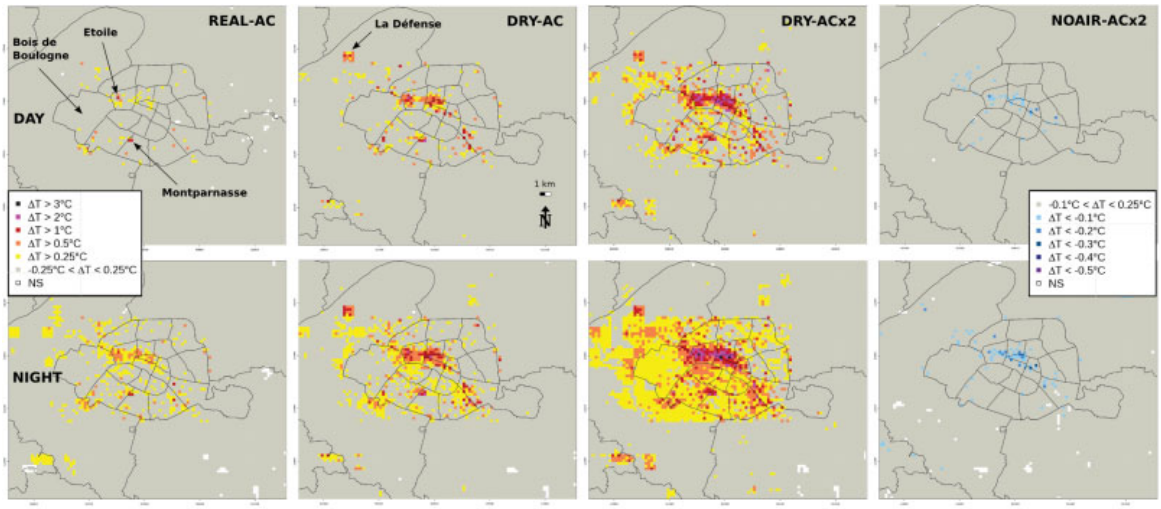


Figure 8. Street level (2 m) air temperature anomalies estimated at daytime (top) and nighttime (bottom) between 8 and 13 August 2003 for each scenario with air conditioning (by reference to the baseline/NO-AC scenario). Temperature anomalies were obtained through a random resampling of simulated temperature anomalies (from 9 a.m. to 7 p.m. daytime, and from 8 p.m. to 6 a.m. night time) and a one-sided statistical test at 95% confidence. NS stands for non-significant temperature anomalies.

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

Nevertheless, at the scale of Paris City, the magnitude of the impacts of the AC scenarios discharging waste heat to air corroborates relatively well with the results from Kikegawa *et al*. (2003) and Ohashi *et al*. (2007) obtained at the scale of Tokyo office districts, showing an increase in street air temperatures of 1 and 1–2 °C, respectively. Hsieh *et al*. (2007) for Taipei's densest residential district, demonstrated a similar increase in street air temperature of between 0.78 and 1.84 °C.

Results for the NOAIR-ACx2 are of a different nature: they present temperature anomalies which are negative, meaning that this scenario has a potential for cooling the streets. However, the activation of AC within the buildings did not reduce the street air temperature by more than 0.2 °C during the day.

4.2.2. *Greatest impacts at night*

Secondly, AC is used more during the day (when it is the hottest) than during the night (Figure 5). However, the impacts on local air temperature are the strongest at night and all the AC scenarios with heat discharge to air show an increase in street air temperatures that is greater at nighttime than daytime (first three scenarios, left of Figure 8). Why is this? In fact, this common characteristic is consistent with, and can be explained by, a different structure of the atmospheric boundary layer at nighttime and daytime. The vertical profiles of simulated potential temperatures presented in Figure 9 for the DRY-AC and the DRY-ACx2 allow to estimate the depths of the mixing layer at different times of the day (based on Sullivan *et al*., 1998). The large boundary layer thickness of about 2300 m observed throughout the day, correlated to a strong turbulent mixing, explains the low amplitude of temperature anomalies observed during the day. At night, due to the thinness of the boundary layer (about 250 m, Figure 9) and the much lower turbulent mixing, the impacts of heat releases on temperature are greater than those observed during the day. These processes can explain the greater anomalies observed at night for some grid cells, as well as the occurrence of temperature anomalies at night where they did not exist during the day (areas with 0.25 °C anomalies). For example, for the DRY-ACx2 scenario, temperature anomalies observed during the day range from 0.25 to 2 °C (Figure 8). At night, they can reach up to 3 °C locally and wide areas with a 0.25 °C anomaly appear. Under this scenario, districts 2, 8 and 9 again show the strongest impact at nighttime (1–2 °C in almost all the grid cells concerned). The appearance at night of areas with a 0.25 °C anomaly is also the case with the DRY-AC scenario but to a lesser extent (Figure 8). Besides, it may be noted that the impacts on temperatures observed at night for the DRY-AC scenario are equivalent to those for the DRY-ACx2 during the day (both in terms of amplitude and spatial extent). This can again be explained by Figure 9 which highlights similar depths of the mixing layer for the DRY-AC and the DRY-ACx2 scenarios, whether at nighttime or daytime (around 250 m at nighttime, and 2200 and 2350 m at daytime, respectively), and therefore explains why, with greater waste heat releases in the DRY-ACx2 than in the DRY-AC, the DRY-ACx2 presents greater temperature anomalies than the DRY-AC (Figure 8).

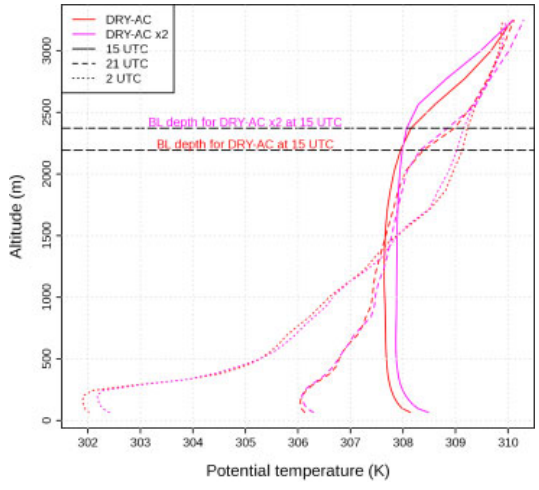


Figure 9. Vertical profile of potential temperature (averaged across a 2.5 × 2.5 km^2 zone centred on the west-to-east cross-section shown in Figure 7) for the DRY-AC and the DRY-ACx2 scenarios, on 10/08/2003 15 and 21 UTC and 11/08/2003 2 UTC. This figure is available in colour online at wileyonlinelibrary.com/journal/joc

In the case of the NOAIR-ACx2 scenario, the temperature reduction is also slightly more pronounced at night than during the day (for a few grid cells, the temperature reduction has improved by 0.1 °C), although still less than 0.5 °C (bottom right of Figure 8). These impacts remain marginal and we can not conclude that this scenario, which constitutes an attempt to mitigate AC impacts on the urban climate, would allow to substantially cool the streets of inner Paris (and, consequently, reduce the UHI) in addition to cooling the buildings. The slight cooling effect observed might not be perceptible or beneficial to the inhabitants.

4.2.3. *Variable extent of AC scenario impacts*

Thirdly, while the impacts on temperature in the REAL-AC case are relatively localized by or near the sources of release of AC waste heat, in the DRY-AC, the grid cells which are heavily air conditioned start to affect slightly adjacent grid cells (Figure 8). Indeed, with this latter scenario are emerging wide zones of several grid cells bearing temperature anomalies of 0.5 °C even during the day (in districts 2, 8, 9 and 'La Défense' office district). The comparison of these two scenarios (REAL-AC and DRY-AC) shows that assigning the sources of heat emission locally to user buildings (DRY-AC) instead of centralising them to a cooling production unit (as is the case when buildings are connected to a cooling network in the REAL-AC case) does have an effect, however limited, on the spatial spread of the temperature increase at the scale of the city. Our results suggest two factors that generate a significant spatial extent of impacts.

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

The first one is the nighttime situation (explained just above) since during the night more grid cells presented significant temperature anomalies than during the day (areas with anomalies above 0.25 °C for example). The second one is the intensity of AC heat discharge. Indeed, contrary to the DRY-AC scenarios, the DRY-ACx2 impacts wider zones in the city, with repercussions on the temperature that extend beyond the areas where the heat emissions are prescribed (west of Paris, including the 'Bois de Boulogne' and further, Figure 8) and larger zones bearing 1 °C temperature anomalies at daytime and 2 °C at nighttime. In summary, the thermal impact of heavily air conditioned grid cells on surrounding grid cells is gradually increasing at night and with the intensity and the type of heat discharge (first three AC scenarios from left to right in Figure 8).

4.2.4. Greatest impacts of dry systems

When analysing the previous results by focusing on the type of AC systems simulated (air-cooled *versus* water-cooled), it appears that the scenarios that evaluate the equipment of the city with only dry and individual AC systems (DRY-AC and DRY-ACx2) generate the greatest increase in temperature, both in terms of amplitude and spatial extent. This suggests that a conversion from water-cooled to air-cooled AC systems would not be a sustainable option in terms of street temperatures and, therefore, energy demand.

4.3. Impacts of AC scenarios on Greater Paris heat island

The urban heat islands for each AC scenario are analysed in the form of maps (Figure 10) and temperature profiles (Figure 11) which are compared to those of the baseline NO-AC scenario (Figure 7). Given the results obtained for street level temperatures, remarkable trends have been observed for the nighttime UHI. Figure 10 illustrates well the variations in the spatial structure of the heat island between the scenarios with AC and the baseline (Figure 7). Although the heat islands diagnosed for each scenario retain a standard UHI structure, the heat island simulated for the AC scenarios with heat release to air present a spreading of the hottest areas in central Paris compared to the baseline scenario. This spreading is gradual from the REAL-AC case to the DRY-AC and the DRY-ACx2 scenarios. A clear amplification of the heat island appears with the future projections of waste heat emissions of the DRY-ACx2 scenario. The maximum amplitude across the Paris simulation domain reaches approximately 8 °C, which corresponds to a 2 °C increase compared to all the other scenarios (Figures 7 and 10). District 8 of inner Paris seems to be the most affected by the gradual spreading and amplification of warmer

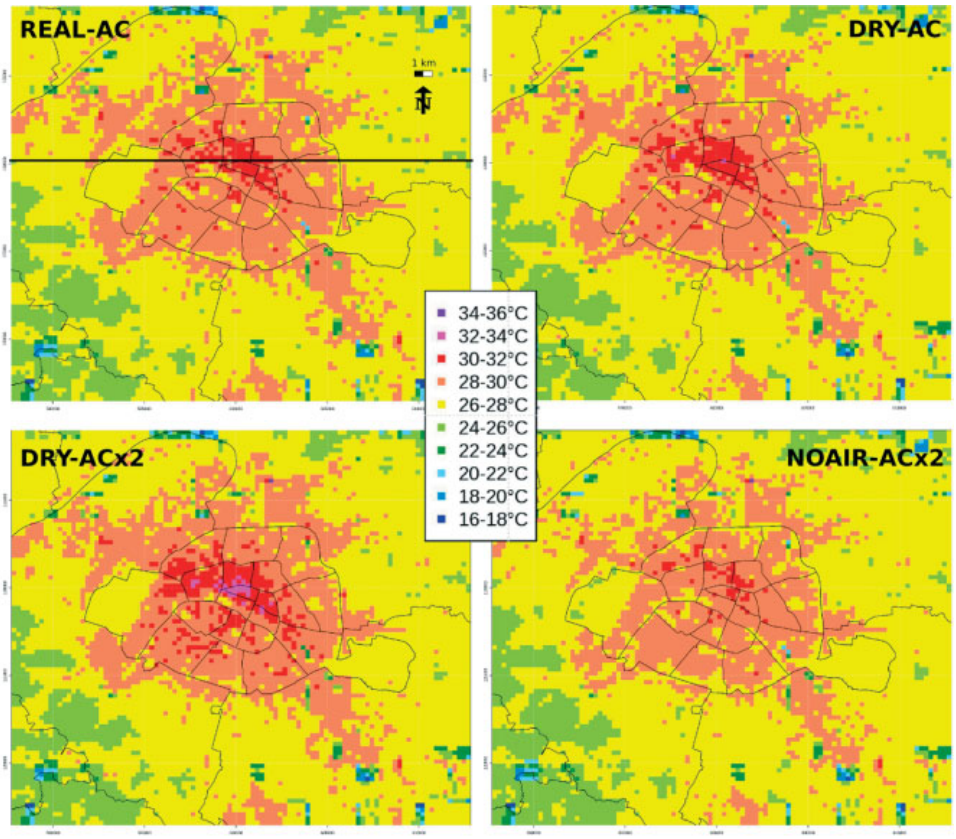


Figure 10. Comparison of the UHI generated by the four air conditioning scenarios.

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

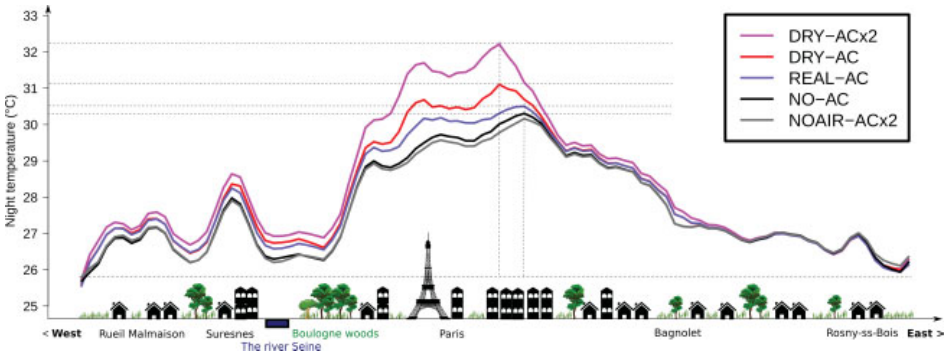


Figure 11. Temperature profiles showing Paris UHI for a west-to-east section passing through the warmest districts of inner Paris (8, 9 and 10, as shown by the black line in Figure 7 for the NO-AC scenario).

temperatures. As expected, the heat island diagnosed for the NOAIR-ACx2 scenario presents a much less spread-out structure of the warmest areas than the baseline NO-AC scenario.

Looking at the temperature profiles (Figure 11), the increase in waste heat logically resulted in an increase in the magnitude of the urban heat island. Indeed, compared with an amplitude of 4.5 °C in the baseline NO-AC scenario (bottom of Figure 7 and dotted lines reported in Figure 11), scenarios with AC heat releases to air show a steady increase in UHI amplitude with a value of 4.8 °C for the REAL-AC case, 5.3 °C for the DRY-AC scenario, and 6.4 °C for the DRY-ACx2 scenarios.

5. Conclusions and perspectives

Compared with pre-cited studies on the impact of AC on temperatures at the scale of neighbourhoods, this study, by coupling an urban energy balance model to a meso-scale atmospheric model, has allowed to access the impact of AC on temperatures at the scale of a city. This study was conducted to compare, for the City of Paris, different systems and intensity of cooling power to meet the chilling requirements inherent to some buildings now and in the near future. Our results suggest that the classic means to meet the cooling needs of the buildings in Paris during a heat wave event similar to that of 2003 are likely to increase street air temperatures and, consequently, the amplitude of the heat island, with the most intense impacts near the greatest AC waste heat releases. The impacts observed on street air temperatures varied with the type of AC systems and the intensity of emission simulated, but the proliferation of dry systems demonstrated the greatest increase in street air temperatures and the worst enhancement of the nighttime heat island. All the systems releasing waste heat to air showed an increase in street air temperatures in the most urbanized parts of central Paris, of 0.5 °C considering the current AC equipments (with reference to 2003), of 1 °C if all current systems were replaced by dry autonomous AC systems, and 2 °C in case Greater Paris was led to double its cooling load. And these impacts have probably been underestimated because of the uncertainty in the inventory of waste heat from air conditioning systems. Finally, the impact of a future situation with a large number of air-cooled buildings without generating waste heat to the air lowered street air temperatures but not significantly enough to be perceptible by the inhabitants. Besides, if the free cooling systems were to be generalized at the scale of the entire city in the future, the impacts of the warming up of the river Seine (due to this cooling technique) on air temperatures should be studied with caution.

This study shows that future developments of cooling facilities at the scale of a city like Paris should preferably be controlled so as to be sustainable. Besides, the increase in temperature observed for most of the AC scenarios bears consequences, not only in terms of energy consumption, but also regarding public health. Our simulations showed the greatest increase in temperature at nighttime, which might exacerbates night thermal stress (for those without access to AC), a factor identified in Paris as highly related to excess mortality during the 2003 heat wave (Ledrans *et al*., 2005; Dousset *et al*., 2011). In terms of energy, the increase in temperatures related to the usage of AC is likely to lead to an increasing demand for air cooling (and, consequently, energy consumption), while at the same time lowering the efficiency of air conditioners. But in order to study these feed-back processes, the urban energy model TEB will need to be improved. To provide an energy balance for the buildings that would be not only more consistent with the observations but also dynamic, the new version of TEB will calculate the evolution of the internal temperature of buildings by an energy balance equation that will account for heat gains such as the internal loads of the building (corresponding to people, uses of energy for lighting and various electrical needs) and the direct solar gain through glazing, as well as the representation of the building internal thermal mass (floors and load-bearing walls). These implementations will allow for calculating AC waste heat emissions in relation to the demand for cooling within the buildings (i.e. in relation to outdoor temperatures). These developments will also allow to run simulations for cities which do not have access to AC waste heat records. Future work

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

will as well focus on simulating the combined impacts of AC on temperature and humidity, which is of importance for humid cities, but was not the case for the 2003 heat wave in Paris.

Acknowledgements

The results presented in this publication are the outcome of the CLIM^2 project which was co-funded by the CNRM-GAME (Météo France and CNRS) and by the Climespace Company. This work has benefited from the expertise developed within the multidisciplinary study EPICEA, a study on the impacts of climate change at the scale of Greater Paris, which was funded by the City of Paris as part of its Climate Action Plan. We would especially like to thank Aude Lemonsu (CNRM/GAME), Raphaëlle Kounkou-Arnaud and Julien Desplat (DIRIC – MétéoFrance), Julien Bigorgne (APUR) and Jean-Luc Salagnac (CSTB).

Appendix A

A1. Model configuration and evaluation on FR domain

The sporadic and very localized storms that occurred during the simulation period are not easy to simulate, hence several configuration versions were tested for the model running over France (parent model for the three-nested model configuration) in order to improve the consistency between the simulation results and the hydrological situation.

Two main configurations were tested: one with a deep convection scheme activated (DCS; Kain and Fritsch, 1993) running at a 6 km spatial resolution, and one with a cloud-resolving model (CRM, with a 2.5 km spatial resolution). In both configurations, surface parameters were initialized and coupled with the reanalysis of the numerical weather prediction system of the European Center for Medium Range Weather Forecast.

Test results showed that the DCS configuration running at 6 km resolution generated excessive precipitation. For the CRM configuration running at 2.5 km resolution, even though precipitation was on the whole better simulated than in the DCS configuration in terms of location, the accumulated precipitation was still too high compared to observations. In both cases, the overestimation of precipitation was attributed to high soil moistures, which was not consistent with the soil drought conditions observed over that period of time. Consequently, for the two configurations, initial soil moisture conditions were adjusted over the entire domain by uniformly initialising soil moisture with a soil water content index of 0.2. This uniform value was chosen based on the reanalysis of soil moistures by Météo France for the beginning of August 2003 (SAFRAN-ISBA-MODCOU data (SIM), Habets *et al*., 2008). Adjusting soil moisture in the DCS configuration did not significantly improve the simulation of precipitation, which remained too abundant (up to around 35 mm locally) and far too spread out compared to those observed (Figure A1), demonstrating the inability of that specific parameterisation to reproduce sporadic storms during the heat wave. On the contrary, the adjustment of soil moisture to that of SIM improved the simulation of precipitation by the CRM configuration (Figure A1), showing that this configuration was well able to reproduce the patterns of precipitation at the scale of the entire domain, mainly in terms of extent, with daily accumulation locally up to about 35 mm (Figure A1).

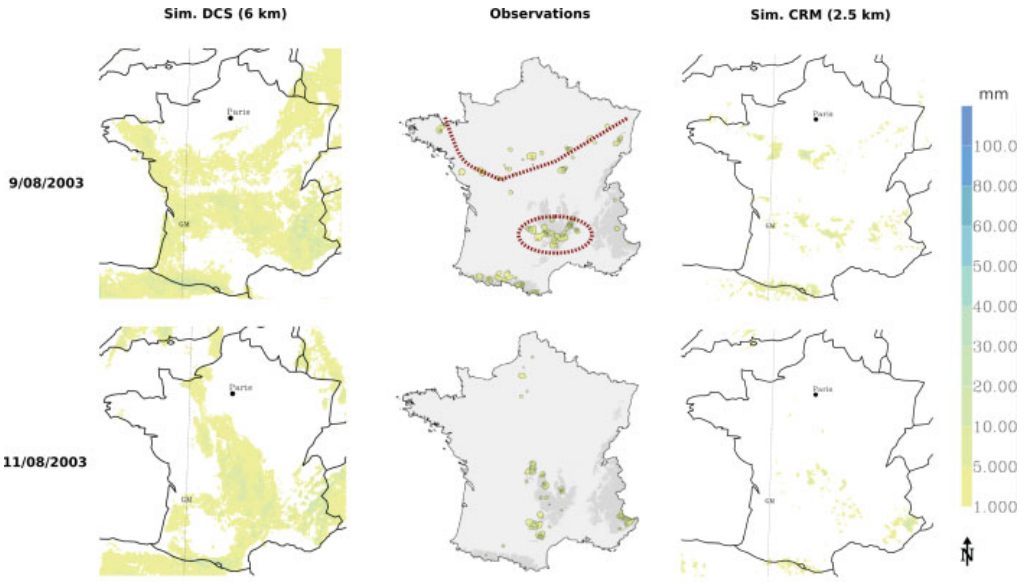


Figure A1. Accumulation and location of precipitation observed on FR domain (centre) and simulated at a 6 km (left) and a 2.5 km (right) spatial resolution, for 9 and 11 August 2003.

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

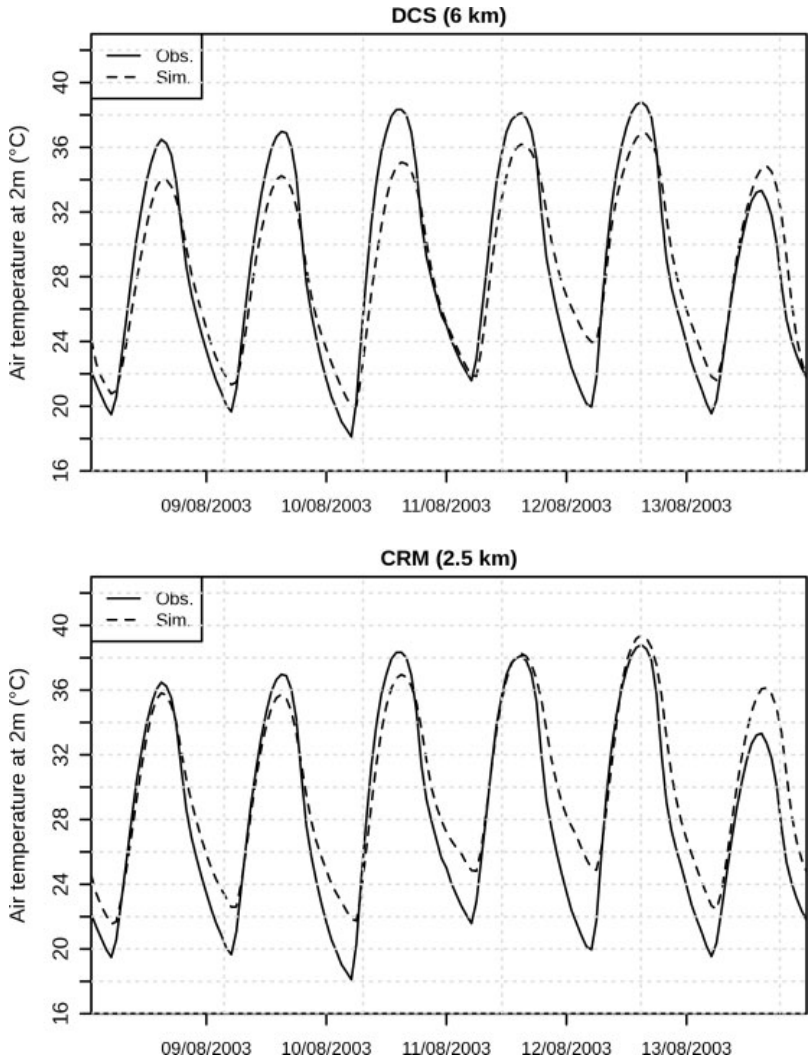


Figure A2. Mean (across 63 weather stations) 2-m air temperatures observed and simulated with a Deep Convection Scheme (DCS) configuration running at a 6 km spatial resolution (top) and with a Cloud Resolving Model (CRM) running at a 2.5 km spatial resolution (bottom), between the 8 and 14 of August 2003.

The two configurations were also compared in terms of simulating 2-m air temperatures, based on 63 weather stations located about the IDF domain. Although both configurations have a similar root mean square error (around 3 °C, Table AI), they do not present the same mean bias. The difference in mean bias between the two configurations (almost 0 °C for the DCS and 2.7 °C for the CRM) is illustrated in Figure A2, which presents mean time series of observed and simulated 2-m air temperatures (mean across the 63 stations). For the two configurations, the daily cycle of temperatures is well reproduced. In the case of the DCS configuration, the simulated temperatures show a tendency of this parameterisation to overestimate daily minima and underestimate daily maxima in similar proportions, resulting in an almost zero bias. The CRM configuration also overestimates the minima of temperatures, but in that case, this overestimation is not compensated by an underestimation of maxima which are better simulated. This results in a greater bias (1.5 °C) than for the DCS configuration, but this value is acceptable at this spatial resolution.

Table AI. Statistics on the agreement between simulated and observed 2-m air temperatures for the two FR model configurations tested and for an ensemble of 63 weather stations. RMSE stands for Root Mean Square Error, DSC for Deep Convection Scheme, CRM for Cloud Resolving Model.

Statistic	Model configuration	
	DCS (at 6 km)	CRM (at 2.5 km)
RMSE on T (°C)	2.7	3.0
Mean bias on T (°C)	−0.0	1.5

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

Given these results, the CRM configuration running at a 2.5 km resolution was chosen as being the most realistic regarding the simulation of sporadic storm events, and able to reproduce correctly air temperatures at 2 m, although differences remain between observed and simulated daily minima.

References

Adnot J. 2003a. *Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners. Study for the D.G. Transportation-Energy (DGTREN) of the Commission of the EU*. Ed. ARMINES. Final report, vol 1, April 2003, 1–54.

Adnot J. 2003b. *Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners. Study for the D.G. Transportation-Energy (DGTREN) of the Commission of the EU*. Ed. ARMINES. Final report, vol 3, April 2003, 1–91.

Akbari H, Konopacki S. 2004. Energy savings of heat-island reduction strategies in Toronto, Canada. *Energy* **29**: 191–210.

Akbari H, Pomerantz M, Taha H. 2001. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy* **70**(3): 295–310.

APUR (Atelier Parisien d'Urbanisme). 2007. *Consommation d'énergie et émissions de gaz à effet de serre liées au chauffage des résidences principales parisiennes*. Atelier Parisien d'Urbanisme: Paris, décembre 2007, 1–46.

Bessemoulin P, Bourdette N, Courtier P, Manach J. 2004. La canicule d'août 2003 en France et en Europe. *La Météorologie* **46**: 25–33.

Bougeault P, Lacarrère P. 1989. Parameterization of orography-induced turbulence in a meso-beta scale model. *Monsoon Weather Review* **117**: 1872–1890.

Charnock H. 1955. Wind stress on a water surface. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **81**: 639–640.

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.

Cuxart J, Bougeault Ph, Redelsperger JL. 2000. A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **126**: 1–30.

Dousset B, Gourmelon F, Laaidi K, Zeghnoun A, Giraudet E, Bretin P, Mauri E, Vandentorren S. 2011. Satellite monitoring of summer heat waves in the Paris metropolitan area. *International Journal of Climatology* **31**(2): 313–323.

Efron B, Tibshirani R. 1993. *An Introduction to the Bootstrap*. Chapman and Hall: New York, London.

Habets F, Boone A, Champeaux JL, Etchevers P, Franchistéguy L, Leblois E, Ledoux E, Le Moigne P, Martin E, Morel S, Noilhan J, Quintana Segui P, Rousset-Regimbeau F, Viennot P. 2008. The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. *Journal of Geophysical Research* **113**: DOI: 10.1029/2007JD008548.

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.

Hassid S, Santamouris M, Papanikolaou N, Linardi A, Klitsikas N, Georgakis C, Assimakopoulos DN. 2000. The effect of the Athens heat island on air conditioning load. *Energy and Buildings* **32**: 131–141.

Hohenegger C, Schär C. 2007. Predictability and error growth dynamics in cloud-resolving models. *Journal of Atmospheric Science* **64**: 4467–4478.

Hsieh C-M, Aramaki T, Hanaki K. 2007. The feedback of heat rejection to air conditioning load during the nighttime in subtropical climate. *Energy and Building* **39**: 1175–1182.

Kain JS, Fritsch JM. 1993. Convective parameterization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme. *Meteorological Monographs* **46**: 165–170.

Kikegawa Y, Genchi Y, Yoshikado H, Kondo H. 2003. Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands. *Applied Energy* **76**: 449–466.

Kolokotroni M, Giannitsaris I, Watkins R. 2006. The effect of the London urban heat island on building summer cooling demand and night ventilation strategies. *Solar Energy* **80**: 383–392.

Lafore JP, Stein J, Asencio N, Bougeault P, Ducrocq V, Duron J, Fischer C, Héreil P, Mascart P, Masson V, Pinty JP, Redelsperger JL, Richard E, de Arellano JV-G. 1998. The Méso-NH atmospheric simulation system. Part I: adiabatic formulation and control simulation. *Annales Geophysicae* **16**: 90–109.

Ledrans M, Vandentorren S, Bretin P, Croisier A. 2005. Etude des facteurs de risque de décès des personnes âgées résidant à domicile durant la vague de chaleur d'août 2003. Rapport de l'Institut national de Veille Sanitaire. pp 1–116. ISBN: 2-11-094963-5.

Lemonsu A, Bélair S, Mailhot J, Leroyer S. 2010. Evaluation of the Town Energy Balance Model in Cold and Snowy Conditions during the Montreal Urban Snow Experiment 2005. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **49**: 346–362.

Lemonsu A, Grimmond CSB, Masson V. 2004. Modeling the surface energy balance of the core of an old Mediterranean city: Marseille. *Journal of Applied Meteorology* **43**: 312–327.

Masson V. 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology* **94**: 357–397.

Masson V, Champeaux JL, 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, Grimmond CSB, Oke TR. 2002. Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities. *Journal of Applied Meteorology* **41**: 1011–1026.

Masson V, Seity Y. 2009. Including atmospheric layers in vegetation and urban offline surface schemes. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **48**: 1377–1397.

Noilhan J, Mahfouf JF. 1996. The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global and Planetary Change* **13**: 145–159.

Offerle B, Grimmond CSB, Fortuniak K. 2005. Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre. *International Journal of Climatology* **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.

Pergaud J, Masson V, Malardel S, Couvreux F. 2009. A parameterization of dry thermals and shallow cumuli for mesoscale numerical weather prediction. *Boundary-Layer Meteorology* **132**: 83–106.

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 MA, Voogt JA, 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.

R Development Core Team. 2010. *R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing*. Vienna, Austria. ISBN: 3-900051-07-0. URL: http://www.R-project.org.

Salamanca F, Martilli A, Tewari M, Chen F. 2011. A Study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with WRF. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* **50**: 1107–1128, DOI: 10.1175/2010JAMC2538.1.

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. *Meteorolology and Atmospheric Physics* **72**: 101–110.

Sullivan PP, Moeng C-H, Stevens B, Lenschow DH, Mayor SD. 1998. Structure of the entrainment zone capping the convective atmospheric boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences* **55**: 3042–3064.

Wen Y, Lian Z. 2009. Influence of air conditioners utilization on urban thermal environment. *Applied Thermal Engineering* **29**: 670–675.

Copyright © 2012 Royal Meteorological Society

Troisième partie

Adaptation par la végétation

CHAPITRE 5

Modélisation des toitures végétalisées dans TEB

Contents

5.1 Etat de l'art des modèles 79
5.2 Caractérisation hydraulique des sols 81
5.3 Développement d'un modèle de toitures végétalisées pour TEB . . 84
5.3.1 Synthèse de l'article 84
5.3.2 Article 86

Comparé à la climatisation, la végétalisation des villes apparaît comme une mesure d'adaptation durable en contexte de canicule. Parmi les solutions de végétalisation recencées section 2.2.2.2, les toitures végétalisées ont l'avantage de rafraîchir les toîts des bâtiments par évapotranspiration et d'isoler les bâtiments tout en étant plus faciles à mettre en oeuvre et plus durables que par exemple les murs végétaux.
Les toitures végétalisées qui sont mises en oeuvre dans les villes peuvent se classer en deux catégories. Les premières, dont le but est généralement récréatif, peuvent se comparer à de vrais jardins. Elles sont aggrémentées de buissons et d'arbres et nécessitent par conséquent une couche de sol relativement épaisse (supérieure à 30 cm). Elles imposent donc une charge conséquente au bâtiment porteur, et doivent être planifiées lors de la conception du bâtiment. Du fait de l'épaisseur de sol et de l'entretien important qu'elles nécessitent, elles sont qualifiées de toitures *intensives*.
La seconde catégorie de toitures, appelées *extensives* par opposition aux premières, sont constituées de végétaux de petite taille nécessitant un support de culture plus fin (de 4 à 5 cm) et un entretien limité. Ces toitures sont moins lourdes à mettre en oeuvre que les précédentes et sont en général implémentées en raison de leurs performances thermiques et hydrologiques (Wark et Wark, 2003). C'est par conséquent ce type de toitures végétalisées qu'il est intéressant de modéliser comme stratégie d'adaptation.

Ce choix étant fait, j'ai pu établir grâce à la littérature (notamment Wark et Wark (2003) et Lazzarin et al. (2005)) une stratigraphie typique de toiture végétalisée extensive (TVE), ainsi que les processus physiques associés qu'il était primordial de simuler. Cette stratigraphie typique ou générique est représentée sur la FIGURE 5.1 et a servi de base à la modélisation du comportement hydrologique et thermo-énergétique des TVE dans TEB.

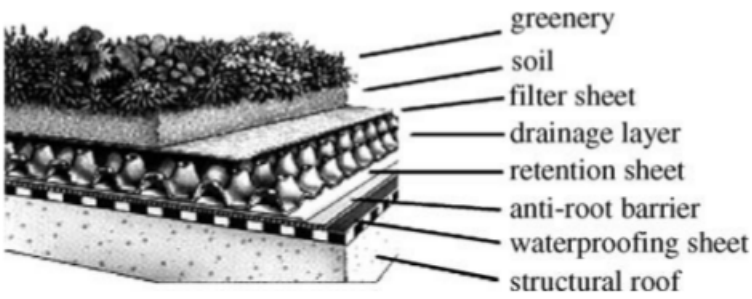


FIGURE 5.1 – *Stratigraphie standard d'une toiture végétalisée extensive d'après Lazzarin et al. (2005)*

La paramétrisation des toitures végétalisées implémentée dans TEB s'est basée sur la prise en compte d'objectifs précis, à savoir le besoin de modéliser de façon explicite et détaillée les performances combinées (énergétique, thermique et hydrologique) des TVE pour des applications à l'échelle de la ville. Aux vues des échelles spatiales et temporelles de ce type d'application, il s'agit de mettre en place une paramétrisation pour les TVE qui soit un juste compromis entre un niveau de détail acceptable et des temps de calcul raisonnables. C'est dans l'esprit de ces objectifs que l'état de l'art des modèles de TVE existants a été réalisé.

5.1 Etat de l'art des modèles

L'état de l'art des modèles de toitures végétalisées extensives a mis en évidence deux points, d'une part que la modélisation des processus hydrologique et thermo-énergétique des TVE est en général découplée, et d'autre part que le degré de complexité des modèles de TVE existants est trés variable. Une compilation des différents modèles de TVE rencontrés dans la littérature est proposée dans la Table (5.1). Les approches simples, qu'elles soient à visée thermo-énergétique ou hydrologique ne sont pas présentées ici car elles ne répondent pas aux critères définis dans nos objectifs de modélisation.

Modèle			
Thermo-énergétique		**Hydrologique**	
Simple	**Détaillé**	**Simple**	**Détaillé**
Bass et Baskaran (2003)	Del Barrio (1998)	Mentens et al. (2006)	Bass et Baskaran (2003)
Gaffin et al. (2010)	Kumar et Kaushik (2005)	Kasmin et al. (2010)	Hilten et al. (2008)
Lazzarin et al. (2005)	Alexandri et Jones (2007)		Palla et al. (2009, 2012)
Martens et al. (2008)	Sailor (2008)		
Feng et al. (2010)	Jim et Tsang (2011)		
	Ouldboukhitine et al. (2011)		

Table 5.1 – *Modèles de toitures végétalisées relevés dans la littérature*

Les modèles décrivant explicitement les transferts thermo-énergétiques des toitures végétalisés présentent des paramétrisations relativement similaires : elles permettent de décrire les transferts de chaleur au sein des TVE par le biais d'un modèle structural de toit, d'un modèle de sol et d'un modèle de couvert végétal. Parmi les modèles les plus détaillés, les seuls qui couplent les aspects thermiques et hydrologiques sont ceux de Del Barrio (1998) (dont Kumar et Kaushik s'inspirent en 2005), Alexandri et Jones (2007), Sailor (2008) (module d'EnergyPlus « Ecoroof ») et Ouldboukhitine et al. (2011). Toutefois, c'est dans l'unique but de tenir compte de l'humidité dans le calcul des caractéristiques thermiques des sols (caractéristiques dites « efficaces ») que les transferts hydrologiques sont pris en compte dans leurs modèles. La performance hydrologique quantifiée en termes de potentiel de rétention d'eau par rapport à une toiture de référence, ne semble pas visée et n'est donc pas évaluée.
Celle-ci doit être recherchée dans des modèles hydrologiques spécifiques comme ceux utilisés par Hilten et al. (2008) et Palla et al. (2009, 2012). En fait, pour être exact, Bass et Baskaran (2003) ont évalué les deux types de performance, mais ils l'ont fait au moyen de deux modèles indépendants, un modèle hydrologique relativement détaillé et un logiciel d'énergétique du bâtiment (« Visual DOE »).

En ce qui concerne les modèles thermo-énergétique, le bilan énergétique à la surface des TVE est effectué différemment selon les auteurs des différents modèles : ceux de Del Barrio (1998) et Alexandri et Jones (2007) fournissent un bilan d'énergie pour la surface du feuillage en équilibre avec le ciel et la terre environnante, alors que ceux de Sailor (2008) et Ouldboukhitine et al. (2011) réalisent un bilan d'énergie distinct pour le feuillage et les couches de sol. Ensuite, les transferts de chaleur sont simulés par tous les auteurs par une équation de conduction standard. En ce qui concerne l'évolution de la teneur en eau dans le sol, la méthode utilisée par les auteurs n'est pas toujours détaillée. Lorsque qu'elle est détaillée et simulée (Del Barrio, 1998; Alexandri et Jones, 2007; Jim et Tsang, 2011; Ouldboukhitine et al., 2011), la teneur en eau du sol est estimée par une

forme simple ou mixte de l'équation de Richards. Les variations de la teneur en eau du sol (simulées ou mesurées) sont finalement prises en compte dans le calcul, soit de la capacité calorifique du sol (Kumar et Kaushik, 2005) ou de la conductivité thermique du sol (Ouldboukhitine et al., 2011) mais le plus souvent des deux (Del Barrio, 1998; Alexandri et Jones, 2007; Sailor, 2008). Ensuite, tous les modèles paramètrent l'évapotranspiration des plantes en fonction des conditions météorologiques extérieures et de l'équilibre gazeux qui s'établit entre l'extérieur et l'intérieur de la plante (via la résistance stomatique des plantes), sauf celui de Ouldboukhitine et al. (2011) qui utilise une formulation plus simple (Penman-Monteith).

L'analyse des modèles hydrologiques de TVE cités TABLE5.1 indique que trois de ces études ont utilisé le logiciel HYDRUS de Simunek, sous sa forme 2D (Simunek et al., 1994) pour Palla et al. (2009) et sa forme 1D (Simunek et al., 2005) pour Hilten et al. (2008) et Palla et al. (2012). Le modèle calibré HYDRUS s'appuie sur une forme 1D ou 2D de l'équation de Richards et sur les fonctions hydrauliques de Van Genuchten et Mualem pour simuler les processus d'infiltration, d'écoulement latéral et de ruissellement de surface qui permettent finalement de déduire les profils de teneur en eau d'une matrice de sol. En entrée du modèle, outre les caractéristiques du sol (texture du sol sous forme de fractions de sable, de limon et d'argile, densité, capacité au champ, point de flétrissement), l'utilisateur doit fournir les précipitations mais aussi les taux d'évapotranspiration, qui doivent donc être estimés à l'aide de méthodes alternatives. En raison de la méthode numérique utilisée dans HYDRUS (des éléments finis), les résolutions spatiales se doivent d'être très fines : pour modéliser une parcelle de toiture végétalisée de 215 cm de large par 46 cm d'épaisseur, Palla et al. (2009) la discrétise en 3695 éléments, ce qui correspond à une grille d'éléments de taille 1 cm^2 (voir FIGURE 5.2, ce qui est couteux en temps de simulation (Yu et Zheng, 2010).

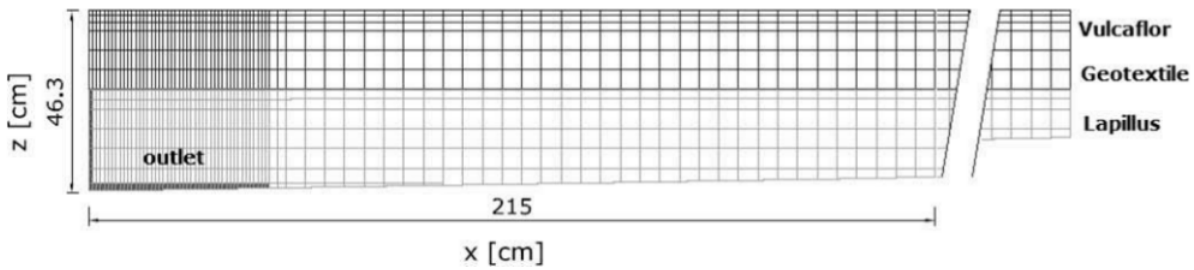


FIGURE 5.2 – *Discrétisation typique d'une parcelle de TVE pour HYDRUS 2D d'après Palla et al. (2009)*

Ce type de modèle est utilisé par les auteurs pour évaluer la performance d'une parcelle de toiture végétalisée en termes de ruissellement à l'échelle d'événements hydrologiques (de quelques heures à quelques jours). Après avoir calibré leur modèle sur un ensemble d'évènements hydrologiques connus (pour leur parcelle de toiture végétalisée instrumentée), ils obtiennent de bons résultats (avec une efficacité de modèle en général supérieure à 0.6 pour Palla et al. (2012)). Parallèlement Yu et Zheng (2010) indiquent que la version de HYDRUS développée par Simunek et al. (2005) et utilisée dans ces deux études prévoit également le transport de chaleur, mais cette fonction n'est pas commentée dans ces deux dernières car les aspects thermiques ne sont pas le sujet de leur étude.

Quant à l'approche développée par Bass et Baskaran (2003) pour étudier la performance hydrologique des toits végétalisés à l'échelle ici encore de l'événement hydrologique, elle prend en compte un ensemble relativement exhaustif de processus : l'infiltration de l'eau dans le substrat, avec trois

méthodes au choix (Horton modifié pour prendre en compte l'humidité du sol, Green Ampt, et Richards), l'évapotranspiration potentielle (basée sur Priestley et Taylor), par déduction de ces deux processus, le ruissellement de surface, et finalement le débit d'eau en sortie de toiture. Ce modèle offre également la possibilité de simuler la quantité d'eau libérée par les processus d'accumulation et de fonte de neige à la surface du toit végétalisé et d'en déduire le ruissellement de surface résultant. Par contre, les auteurs n'ont pas considéré la modélisation des processus hydriques intervenant dans la couche de drainage qui est présente sur leur parcelle expérimentale (d'épaisseur 3.6 cm). Avec ce modèle, Bass et Baskaran (2003) indiquent obtenir des résultats similaires aux observations qu'ils obtiennent sur leur parcelle expérimentale en terme de capacité de rétention (42 % pour une parcelle végétalisée de graminées installées sur un substrat de limon sableux de 15 cm d'épaisseur). On soulignera le travail de Jim et Tsang (2011) qui ont développé des modèles de transfert de chaleur et d'humidité pour les trois types de compartiments abiotiques (donc sans végétation) que l'on trouve généralement sur les toitures végétalisées, à savoir un sol, une couche de rétention (ici en laine de roche) et une couche de drainage (ici synthétique). Pour dériver leurs modèles ils ont étudié le comportement de ces compartiments de façon itérative et ont obtenu des résultats qui se comparent bien à leurs observations. Leur travail peut fournir une base pour la modélisation des couches de rétention ou de drainage.
Dans l'ensemble, tous les modèles détaillés relevés dans la littérature (Table 5.1)) sont relativement similaires dans leur niveau de détail. Quand la plupart des modèles sont capables de capturer les processus dominants en jeu au sein des compartiments naturels et artificiels des toitures végétalisées et de relativement bien simuler l'évolution de leur température, seuls Jim et Tsang (2011) simulent les couches de drainage ou de rétention. Pourtant, comme en témoigne le travail de Jim et Tsang (2011), ces couches jouent un rôle majeur, non seulement dans la performance hydrologique de la toiture, mais aussi en termes de performance thermique. De façon générale, il n'a pas été possible d'estimer le nombre de paramètres d'entrée des modèles et notamment ceux qui doivent être absolument fournis aux modèles car peu d'auteurs font la distinction entre les paramètres de leurs modèles qui sont constants ou bien qui doivent être spécifiés par l'utilisateur ou bien calculés par leur modèle. Il reste que la difficulté majeure de tous les modèles étudiés concerne leur calibration, comme c'est le cas pour tout modèle présentant ce niveau de complexité. C'est pourquoi certains auteurs (Jim et Tsang, 2011; Alexandri et Jones, 2007; Palla et al., 2009, 2012) améliorent la précision de leurs modèles en ajustant certains paramètres qui leur sont inconnus par le biais de la mesure sur leur parcelle d'étude ou par des relations empiriques.
Par contre, aucun de ces modèles ne semble avoir permis d'évaluer l'impact des TVE sur le confort thermique extérieur (ICU). Seules deux études, celles de Bass et al. (2003) et Rosenzweig et al. (2009) réalisées pour les villes de Toronto et New York, présentent ce type d'impact, mais les auteurs n'utilisent pas à proprement parler de modèles de TVE. Dans leurs simulations, basées sur le couplage d'un schéma de surface avec un modèle de circulation à mésoéchelle, ils traitent les bâtiments équipés de toitures végétalisés comme des surfaces enherbées de pleine terre.

5.2 Caractérisation hydraulique des sols

Le sol est un milieu poreux, constitué de micro-particules et de pores qui sont remplis d'eau et/ou d'air. Le volume qu'occupent ces pores rapporté à un volume unitaire de sol correspond à ce qu'on appelle la porosité. Au cours des saisons et selon le type de sol et de végétation, la teneur en eau d'un sol peut ainsi évoluer entre ces différents états. Le bilan hydrique d'un volume de sol s'établit finalement par bilan de l'eau reçue (précipitations) et perdue (ruissellement de surface,

évapotranspiration, infiltration, percolation).

La quantité d'eau résiduelle d'un sol va dépendre de l'équilibre entre les différentes forces en présence dans la matrice de sol, dont les principales sont les forces gravitationnelles et les forces de capillarité et d'adsorption de l'eau sur les particules de sol.

Pour caractériser le comportement hydrique d'un sol composé de particules de sol et de pores, les physiciens du sol se servent des grandeurs suivantes :

— la *teneur en eau du sol à la saturation* ($m^3\ m^{-3}$)
— la *teneur en eau du sol à la capacité au champ* ($m^3\ m^{-3}$)
— la *teneur en eau du sol au point de flétrissement* ($m^3\ m^{-3}$)
— le *potentiel hydraulique* du sol aussi appelé *potentiel matriciel* (m)
— la *conductivité hydraulique du sol à la saturation* ($m\ s^{-1}$)

Quand le sol est saturé en eau (teneur en eau à saturation), le sol contient dans ses pores la plus grande quantité d'eau possible, et celle-ci remplit tout le volume qui n'est pas occupé par les micro-particules de sol (FIGURE 5.3 a). Cette teneur en eau à saturation est donc équivalente à la porosité du sol. Ensuite, l'eau en excès va s'écouler en profondeur jusqu'à atteindre la *capacité au champ*. Cette capacité dite *au champ* du fait qu'elle était historiquement mesurée in-situ au champ correspond à la teneur en eau qui s'établit après que l'excédent d'eau du sol ait été drainé par gravité et que l'écoulement vertical soit quasi-nul (deuxième planche de la FIGURE 5.3 b). Cet état est en général atteint au bout de quelques jours pour un sol naturel.

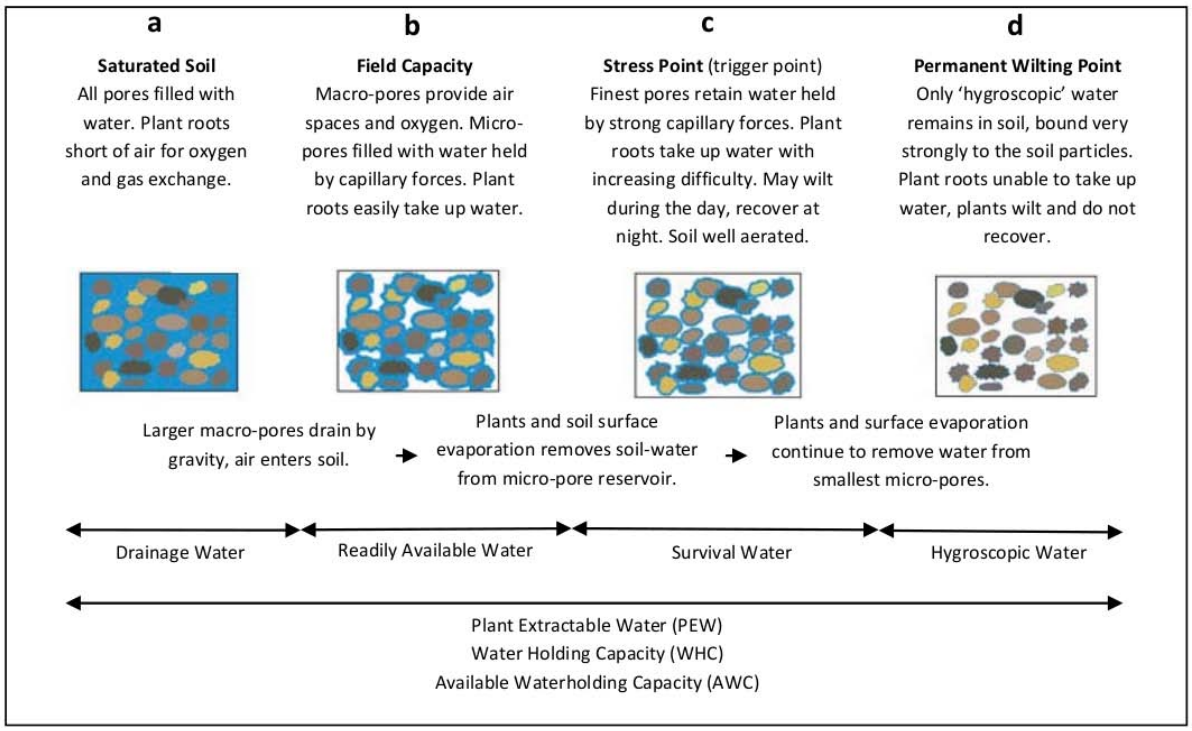


FIGURE 5.3 – *Visualisation des états hydrauliques des sols d'après Claridge et Edwards (2012)*

Ce qu'on appelle le point de flétrissement, correspond à une teneur en eau pour laquelle l'eau n'est plus accessible par la plante et correspond au moment où les forces d'adsorption de l'eau sur les micro-particules de sol sont supérieures aux forces d'extraction de l'eau par la plante (FIGURE 5.3 d).
Pour caractériser l'état hydrique d'un sol, les physiciens utilisent aussi la notion de *potentiel matriciel* ou encore *potentiel hydraulique* qui correspond à la force de succion qu'il faudrait exercer pour extraire l'eau contenue dans le sol. Cette force est d'autant plus élevée que la teneur en eau est faible. Cette relation entre potentiel matriciel et teneur en eau se représente par une courbe conceptuelle appelée « courbe de rétention »qui dépend de la texture du sol (FIGURE 5.4 a) et qui est utilisée dans la plupart des modèles d'hydrologie. Cette courbe théorique reflète en partie la réalité puisque sur le terrain, au cours des cycles de déssèchement et de recharge en eau du sol, on observe en général un phénomène d'hystérésis (FIGURE 5.4 b) qui vient du fait que l'eau ne circule pas forcément de la même façon dans le sol quand elle est drainée et quand elle est adsorbée.

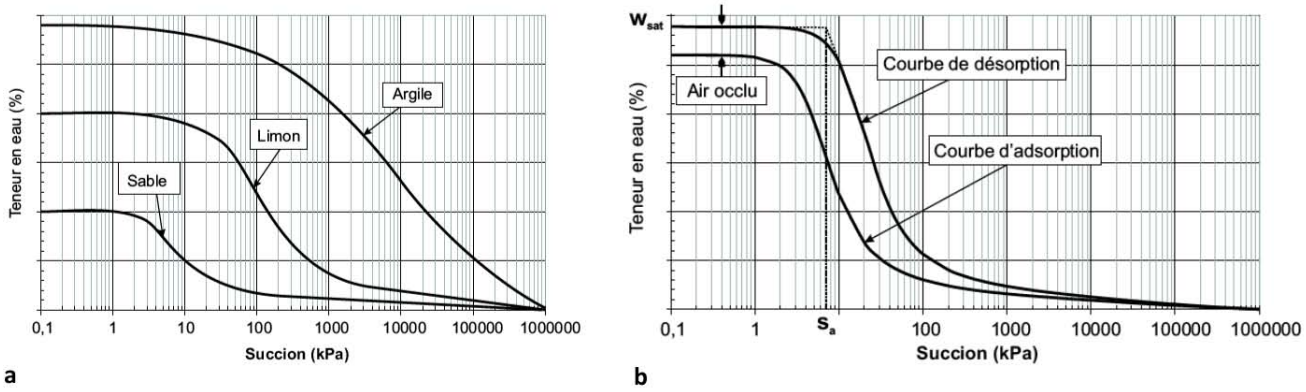


FIGURE 5.4 – *Courbes de rétention pour différents types de sol (a) et phénomène d'hystérésis (b). Source : Salager (2007)*

Quant à la *conductivité hydraulique* d'un sol, c'est un coefficient qui exprime l'aisance et donc la vitesse avec laquelle l'eau va se déplacer dans le milieu poreux qu'est le sol ou encore l'aptitude du milieu poreux à laisser circuler l'eau à travers lui.
Contrairement aux caractéristiques thermiques pour lesquelles les grandeurs sont mesurées à sec, les caractéristiques hydrauliques sont mesurées pour l'état de référence qui est la saturation.

Finalement, quand il s'agit d'un sol naturel, ces grandeurs dépendent de la texture du sol (fractions de sable, argile, limon) et elles peuvent être estimées par des fonctions dites de *pédo-transfert*, ce qui est le cas dans le modèle ISBA (Interaction between Soil Biosphere and Atmosphere, Noilhan et Planton (1989)). Les sols plus techniques et un peu moins naturels comme on trouve sur les TVE (FIGURE 5.5) sont assez difficiles à décrire par une texture classique et par conséquent les fonctions de pédo-transfert sont peu adaptées. C'est cette constatation qui m'a conduite à directement fournir au modèle des caractéristiques hydrauliques.



FIGURE 5.5 – *Exemple de sols utilisés pour une toiture végétalisée standard située au CETE de Nancy, avec à gauche, le substrat, et à droite, les billes d'argile expansée qui constituent une couche de drainage. Source : R. Bouzouidja*

5.3 Développement d'un modèle de toitures végétalisées pour TEB

5.3.1 Synthèse de l'article

L'article présente l'approche que j'ai choisie pour modéliser les toitures végétalisées dans TEB aux vues de l'état de l'art des modèles existants et des contraintes et avantages liés au schéma TEB qui va les accueillir. TEB étant intégré à la plateforme de modélisation des surfaces continentales **SURFEX** (Masson et al., 2013), au sein de laquelle il caractérise les surfaces artificielles, j'ai fait le choix de le coupler au schéma qui décrit les interactions entre le sol, l'atmopshère et la végétation dans SURFEX, appelé ISBA (Noilhan et Planton, 1989) pour caractériser les couches dites naturelles des toits végétalisés, et plus précisemment une version d'ISBA appelée ISBA-DF qui est présentée Annexe B.
Sur la base de la littérature scientifique et technique, un design générique a été retenu pour saisir les processus physiques dominants qui s'établissent au sein des toitures végétalisées et les simuler par le biais d'une paramétrisation que l'on a appelée **TEB-GREENROOF**. Ce design est constitué de quatre compartiments ou couches présenté(e)s sur la FIGURE 5.6 : de haut en bas, un compartiment pour la végétation, qui interagit avec l'atmosphère, une couche de substrat (milieu de croissance pour les plantes), une couche qui permet de contrôler les échanges hydrologiques avec la couche supérieure de substrat (qui peut servir à drainer ou à retenir l'eau qui sort du substrat, en fonction de l'association espèce végétale-climat) et un compartiment pour représenter le toit structural, qui comprend un revêtement d'étanchéité obligatoire pour préserver le bâtiment des dégâts occasionnés par les intempéries.

Une parcelle de toiture végétalisée instrumentée située à Nancy, au Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement (CETE) de l'Est, a ensuite été utilisée pour évaluer les comportements hydrique et thermique des couches naturelles de la toiture telles que simulées par GREENROOF. Sur cette parcelle, la végétation installée en mai 2011 s'est rapidement développée. Les photos de la FIGURE 5.7 montrent l'évolution de la couverture végétale de la toiture entre les mois de juin et décembre 2011.

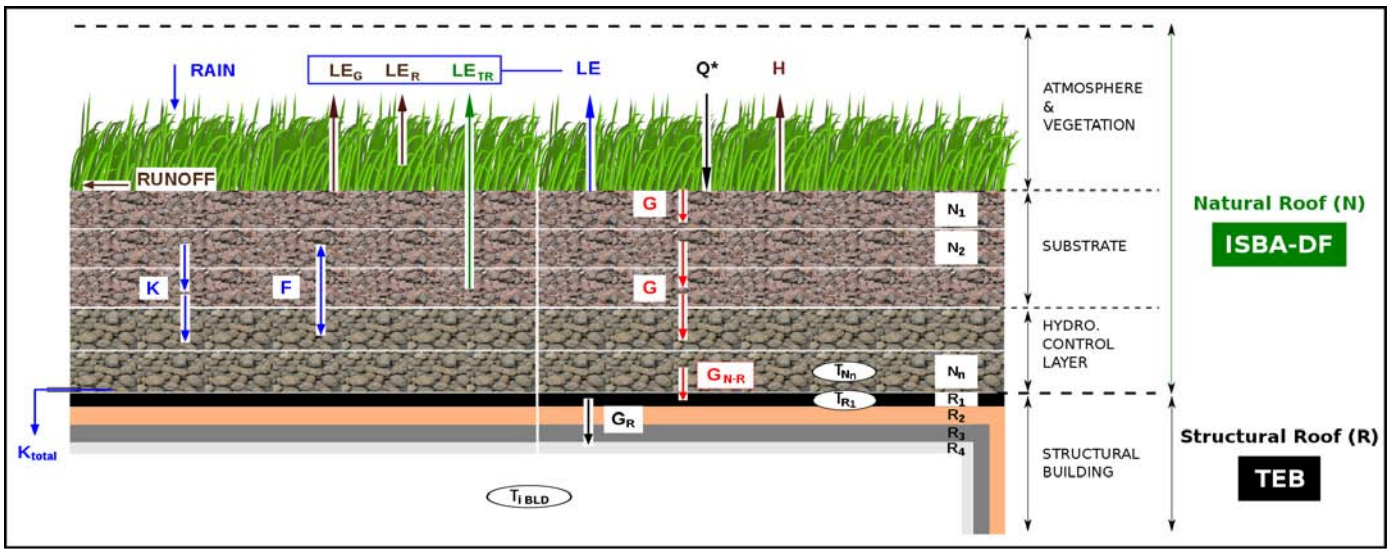


FIGURE 5.6 – *Design de toiture végétalisée pour TEB-GREENROOF et processus physiques associés. A gauche : processus hydrologiques : ruissellement de surface (RUNOFF), flux de masse d'eau verticaux (F, infiltration ou remontées capillaires selon gradient vertical), drainage causé par la sur-saturation (DRAIN), drainage final à la base du toit (TOTAL DRAIN), précipitations (RAIN). A droite : termes du bilan de surface : rayonnement net (Q*), flux de chaleur sensible (H), flux de chaleur latente (LE) et flux de conduction de chaleur (G and G_{N-R}). LE est la somme de l'évaporation du sol nu (LE_G), de l'évaporation de l'eau interceptée par le feuillage de la plante (LE_R), et de la transpiration de la plante (LE_{TR})*

Le modèle a été évalué après calibration des caractéristiques hydrauliques de ses couches de sols. Cet exercice de calibration a permis de mieux comprendre le comportement hydraulique des sols composites utilisés sur la parcelle. Les résultats obtenus démontrent que le modèle est capable de bien simuler la dynamique temporelle des teneurs en eau du substrat et du drainage en sortie de toiture, avec néanmoins une tendance à la sous-estimation des teneurs en eau et à la sur-estimation des quantités d'eau drainées en sortie. Cela n'impacte pas trop fortement les températures simulées dans les deux couches qui sont en bon accord, même si généralement sur-estimées, avec celles observées.
Aux vues de ces résultats, il serait intéressant dans le futur de disposer d'une parcelle instrumentée présentant un jeu d'observations complet, incluant notamment la mesure du bilan radiatif et des flux de surface. Un tel jeu de données permettrait d'étudier en détail les hypothèses évoquées dans mon étude concernant la sous ou sur-estimation, respectivement des teneurs en eau et des températures, et d'améliorer le modèle en conséquence. Des parcelles différentes, avec notamment une couche de rétention à la place ou en plus d'une couche de drainage, permettraient de déterminer une calibration hydrologique pour ce type de couche et ainsi de proposer davantage de combinaisons de couches aux utilisateurs de GREENROOF.

Finalement, comme la parcelle d'étude est d'un type qui est fréquemment implanté sur les toitures des bâtiments urbains (extensive, pelouse de sédums, sols composites typiques), les meilleures caractéristiques obtenues en appliquant GREENROOF à cette parcelle sont retenues pour réaliser des études portant sur l'impact des toitures végétalisées à l'échelle de la ville. Grâce aux développements parallèles dans TEB des modules de toitures végétalisées et d'énergétique du bâtiment BEM (Building Energy Model, Bueno et al. (2012)), cette version calibrée de GREENROOF permettra d'évaluer le potential des TVE comme stratégie d'adaptation durable au changement climatique.

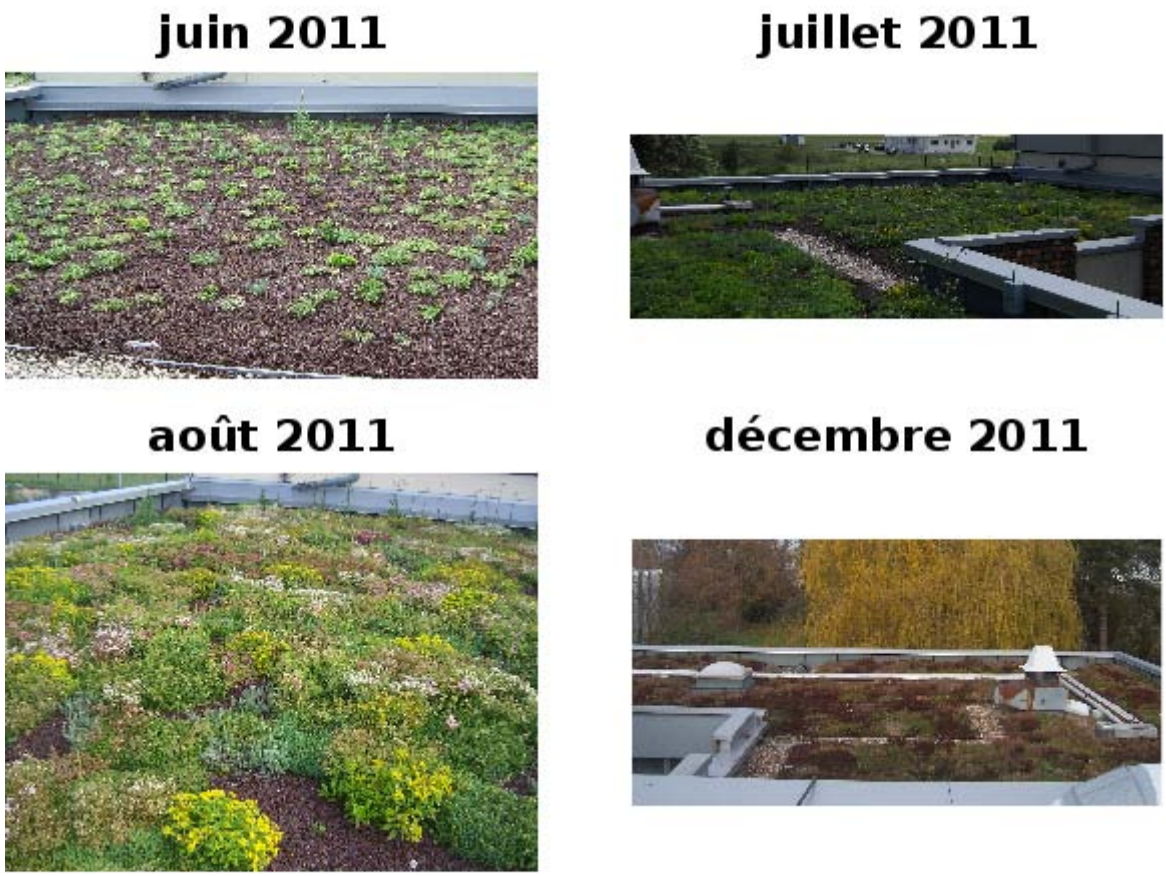


FIGURE 5.7 – *Evolution de la végétation sur la parcelle d'étude entre juin et décembre 2011. Source : Ryad Bouzouidja*

5.3.2 Article

de Munck C., Lemonsu A., Bouzouidja R., Masson V., Claverie R. 2013. The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and thermal performances within TEB. *Geoscientific Model Development* 6 : 1941-1960.

Geosci. Model Dev., 6, 1941–1960, 2013
www.geosci-model-dev.net/6/1941/2013/
doi:10.5194/gmd-6-1941-2013
© Author(s) 2013. CC Attribution 3.0 License.



Geoscientific Model Development
Open Access

The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and energetic performances within TEB

C. S. de Munck[1], **A. Lemonsu**[1], **R. Bouzouidja**[2,3,4], **V. Masson**[1], **and R. Claverie**[3]

[1]Météo France, CNRM-GAME, CNRS UMR3589, Centre National de Recherches Météorologiques, Toulouse, France
[2]NIDAPLAST, Thiant, France
[3]Centre d'Études Techniques de l'Équipement de l'Est, Tomblaine, France
[4]Université de Lorraine, LEMTA UMR7563, Vandœuvre-les-Nancy, France

Correspondence to: C. S. de Munck (cecile.demunck@meteo.fr)

Received: 21 December 2012 – Published in Geosci. Model Dev. Discuss.: 20 February 2013
Revised: 13 September 2013 – Accepted: 17 September 2013 – Published: 8 November 2013

Abstract. The need to prepare cities for climate change adaptation requests the urban modeller community to implement sustainable adaptation strategies within their models to be tested against specific city morphologies and scenarios. Greening city roofs is part of these strategies. In this context, the GREENROOF module for TEB (town energy balance) has been developed to model the interactions between buildings and green roof systems at the scale of the city. This module, which combines the ISBA model (Interaction between Soil Biosphere and Atmosphere) and TEB, allows for one to describe an extensive green roof composed of four functional layers (vegetation – grasses or sedums; substrate; retention/drainage layers; and artificial roof layers) and to model vegetation-atmosphere fluxes of heat, water and momentum, as well as the hydrological fluxes throughout the substrate and the drainage layers, and the thermal fluxes throughout the natural and artificial layers of the green roof. TEB-GREENROOF (SURFEX v7.3) should therefore be able to represent the impact of climate forcings on the functioning of green roof vegetation and, conversely, the influence of the green roof on the local climate. An evaluation of GREENROOF is performed for a case study located in Nancy (France) which consists of an instrumented extensive green roof with sedums and substrate and drainage layers that are typical of this kind of construction. After calibration of the drainage layer hydrological characteristics, model results show good dynamics for the substrate water content and the drainage at the green roof base, with nevertheless a tendency to underestimate the water content and overestimate the drainage. This does not impact too much the green roof temperatures, which present a good agreement with observations. Nonetheless GREENROOF tends to overestimate the soil temperatures and their amplitudes, but this effect is less important in the drainage layer. These results are encouraging with regard to modelling the impact of green roofs on thermal indoor comfort and energy consumption at the scale of cities, for which GREENROOF will be running with the building energy version of TEB – TEB-BEM. Moreover, with the green roof studied for GREENROOF evaluation being a type of extensive green roof widespread in cities, the type of hydrological characteristics highlighted for the case study will be used as the standard configuration to model extensive green roof impacts at the scale of cities.

1 Introduction

In the literature, green roofs (roofs with a vegetated surface and a growing medium have been credited with a large number of environmental benefits. Many experiments conducted on green roofs have highlighted their potential to reduce roof runoff entering the storm water systems through retention and evapotranspiration. This has been demonstrated at the site scale (Berghage et al., 2009 and Voyde et al., 2010, are two good examples) as well as at the city (Mentens et al., 2006) and landscape (Oberndorfer et al., 2007) scales. Reduced roof runoff also implies reduced rain water pollutants entering storm water systems (Berndtsson et al., 2009), although this benefit may slightly be counterbalanced by the additional source of pollution represented by the green roof

Published by Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union.

substrates themselves (Oberndorfer et al., 2007). Considering energy aspects, green roofs have the ability to moderate temperature changes within buildings (Castleton et al., 2010), with beneficial consequences on building energy consumption (Getter and Rowe, 2006; Castleton et al., 2010; Jacquet, 2011) due to increased thermal mass, shading and evaporative cooling (compared to standard roofs). As for energy savings, it may vary with the season and green roof design (materials and thicknesses), although it seems strongly influenced by the level of insulation of the structural roof (Jaffal et al., 2012). Jacquet (2011) observed for a green roof plot in Montréal a reduction in air conditioning demand in summer of 98.9 and 90.8 % (respective of when the green roof was irrigated and not) and a milder reduction in heating demand in winter (38.3 and 27.4 %, depending again on irrigation). All this site-based evidence for green roof benefits has now contributed to promoting the use of city-scale green roof infrastructure as a sustainable adaptation strategy for climate change (Bass and Baskaran, 2003; EEA, 2012; Foster at al., 2011; Giguère, 2009; Lawlor et al., 2006; Penney, 2008; USEPA, 2008). The implementation of green roofs as opposed to urban forests and street trees may represent a more realistic and efficient greening strategy at the heart of cities, where the building fraction is high (and the ground-base surface available for greening scarce) and the initial evapotranspiration potential low.

The need for taking this research from the building scale to that of the city is clear, especially in the light of climate change. A modelling approach is the only realistic way an adaptation strategy such as roof greening can be evaluated citywide and for various seasons or long time series, hence the need for green roof models.

So far, very few studies have attempted to quantify the potential of green roof infrastructures at city scale. Three such studies were found, but these do not represent green roofs (nor buildings) explicitly. In these studies, building roofs are replaced by natural evaporating surfaces (grass, ground level), and energy and hydrological transfers are simulated with very simple parameterizations and calibrations. Bass et al. (2003) attempted to quantify the potential of green roofs for urban heat island (UHI) mitigation using this kind of modelling approach. They simulated the greening of 50 % of the available roof surfaces throughout the city of Toronto (by replacing roof surfaces with grass), and predicted a mild cooling over part of the city of the order of 0.5 °C without irrigation, and a greater and spatially wider cooling (2 °C) with irrigation of the "green roofs" and the ground-level grass of the densest areas of Toronto. Gill et al. (2007) compared the impact of green roofs on surface temperatures (based on a simple energy balance equation) and runoff (via a standard runoff curve number approach) for various urban morphology classes (UMC) for the conurbation of Greater Manchester in the UK. They showed that "greening" all roofs made the most significant contribution to maximum surface temperature and runoff reduction in the most urbanized UMCs (respectively 6.6 °C and 17.6 % for the town centre). Following the approach of Bass et al. (2003), Rosenzweig et al. (2009) suggested that a "green roof" infrastructure for New York City could reduce urban air temperatures by 1.4 °C on average and 3.2 °C at best, which may lead to a reduction in UHI amplitude.

More detailed models are needed for city-scale applications that can explicitly describe green roofs and the thermal and hydrological behaviours associated with them, so that their impacts in terms of building energetics, comfort, UHI and runoff can be more accurately evaluated. With this aim, a detailed green roof model should be integrated into an urban canopy model in order to be run under imposed (present or future) climatic conditions or coupled to a meteorological model. This way the environmental benefits highlighted at the building scale could be studied and quantified more widely, more accurately and under various climatic constraints.

In order to set up a strategy for implementing green roofs within our town energy balance (TEB) urban canopy model (Masson, 2000; Hamdi and Masson, 2008), a review of the types of green roof implemented in cities nowadays was primarily undertaken (Sect. 2). This allowed for us to determine the main design and functions that a green roof model should describe, and consequently the physical processes associated that need to be captured. There followed a review of green roof modelling studies to establish an inventory of existing green roof models, with regard to both their complexity and their research objectives. On these bases, a green roof parameterization has been developed for TEB. The implementation of this GREENROOF module was part of a wider effort to implement various types of urban vegetation within the model TEB (Lemonsu et al., 2012). The hypothesis and the parameterization of GREENROOF are presented (Sect. 3). Then GREENROOF is run for an instrumented extensive green roof plot in the northeast of France (Sect. 4). Within Sect. 4, prior to the actual evaluation, a calibration exercise is undertaken and presented in order to determine the hydrological behaviour (and the associated hydrological properties) of the experimental plot drainage layer. Indeed, through this case study we aim to establish from which soil type the standard materials which form green roof drainage layers are closest to in terms of their hydrological behaviour. Evaluation results are presented both with regard to the hydrological and thermal performances of the green roof.

2 Strategy for modelling green roofs within TEB

2.1 Generic design of a green roof and physical processes associated

Green roofs of two types can be found in cities. Those called "rooftop gardens" support fairly large shrubs or trees. Due to the intensive care needed at implantation and management,

they are commonly called "intensive green roofs", and are generally implemented for recreational use. Those containing only one or two low-profile plant species, and therefore requiring a minimal growing medium, are called "extensive". They are often used for improved thermal and hydrological performances (Wark and Wark, 2003), and are thus interesting to model as an adaptation strategy.

Based on the technical and scientific literature (Wark and Wark, 2003; Lazzarin et al., 2005), a generic design for extensive green roofs can be reached. From top to bottom, the essential components are a layer of vegetation; a layer of soil-forming material called substrate, which is the growing medium for the vegetation; a different soil-forming-material layer which helps to control the moisture status of the overlaying substrate (drainage or retention function depending on the plant species/climate association); and a mandatory waterproofing sheet to prevent water damage to the structural roof. Therefore, the final green roof design can be considered as the superposition of a "natural" compartment (vegetation and different soil-forming-material layers) and of an artificial compartment (waterproof and structural roof materials).

In addition, experimental studies on pilot green roofs (for example Bass and Baskaran, 2003; Berghage et al., 2009; Jacquet, 2011; Jim and He, 2010; Jim 2011; Jim and Peng, 2011; Nardini et al., 2012) have highlighted heat and water transfers within these "natural" layers which are similar to those which establish themselves within ground-level natural surfaces except for specific limit conditions. The transfers involved in a natural surface, be it at ground or roof level, are energetic, thermal and hydrological. The energy balance results in the balance between the surface net radiation and the latent, sensible and storage heat fluxes. Heat conduction and storage occur and can be strongly influenced by soil moisture content. But unlike open ground natural surfaces, for green roof natural surfaces, the heat gains or losses from the thermal contact with the bearing roof should be considered. In terms of hydrological transfers, a green roof surface behaves like any other natural surface (vertical water fluxes depend on soil moisture gradients, drainage occurs if super-saturated conditions appear and surface runoff may establish during rainfall events) except that the hydrological characteristics of green roof soil-forming materials are very different from those of natural soils, and that the water drained out of a green roof base is lost "in favour of" the rainwater network. These differences do not change the nature of the transfers involved, but act rather as boundary conditions for these transfers.

Therefore, it seems realistic to make the hypothesis that the natural layers of green roofs could be simulated by a standard soil–vegetation model incorporating the boundary conditions presented and, i.e. the finite dimension of the green roof and the presence of a structural built roof at its base.

2.2 The state of the art in green roof modelling

The current state of the art in green roof models highlights two modelling topics: that of the energy performance, and that of the hydrological performance; the modelling of both is rarely combined. The simple thermal and hydrological approaches are not presented here because they do not meet the criteria defined in the objectives presented.

All the detailed models of heat transfer (Alexandri and Jones, 2007; Del Barrio, 1998; Kumar and Kaushik, 2005; Ouldboukhitine et al., 2011; Sailor, 2008 – also known as the *Ecoroof* module for *EnergyPlus*) have in common an explicit description of green roofs, which takes into account a structural roof model, a soil model and a canopy model. While the energy balance at the green roof surface is performed in a more or less complex way (especially with regard to modelling the behaviour of the vegetation), the heat transfer is subsequently simulated by all these models based on a standard conduction equation. As far as modelling vegetation behaviour is concerned, all models parameterize vegetation transpiration as a function of the meteorological conditions and the gaseous equilibrium which establishes between the outside and the inside of the plant (via the plant stomatal resistance) – except that of Ouldboukhitine et al. (2011), which uses a simpler formulation (Penman–Monteith). Although these models account for the hydrological status of the green roof, it is with the sole purpose of computing soil effective thermal characteristics (as in function of soil moisture). Soil moisture status is either measured or estimated via a simple or a mixed form of Richards equation, but hydrological performance is generally not evaluated.

Most of the studies aimed at modelling the hydrology of green roofs (Hilten et al., 2008; Palla et al., 2009, 2012) have used the HYDRUS software (Simunek et al., 1994, 2005), whose most recent version also takes into account the heat transfer (Yu and Zheng, 2010). This calibrated model relies on the Richards equation and on the hydraulic functions of Van Genuchten (1980) and Mualem (1976) to simulate the processes of infiltration, lateral flow and surface runoff and predict moisture content profiles. Although very detailed, this model needs user-input evapotranspiration rates, which must therefore be estimated by other means. For numerical reasons (finite element method), HYDRUS works at very fine spatial resolutions. The work of Palla et al. (1999) is a good example of this resolution: they used 3695 grid elements to simulate a roof of 215 cm long by 46 cm thick. Consequently, a model such as HYDRUS is used to evaluate the hydrological performance of individual green roofs at small temporal scales such as a hydrological event (generally a few hours), but its computing cost due to its fine spatial resolution is not appropriate for city-scale applications.

In summary, even if most models are able to capture the dominant processes involved in green roof soil and structural compartments, none of them currently couple a combined modelling of thermal and hydrological processes that could

be used on the scale of a city and for long time periods. The presence and impact of drainage or retention layers are also not simulated, even though these layers play a major role, not only with regard to hydrological performance but also in terms of thermal performance, as evidenced in the work of Jim and Tsang (2011). Finally, the difficulty encountered by all models remains the calibration, as is the case for all models with these levels of complexity.

2.3 Strategy for the inclusion of green roofs within TEB

As established previously, the heat and water transfers involved in the natural layers of green roofs (atmosphere, vegetation, and substrate and hydrological control layers) are similar to those of perfectly natural surfaces. They can therefore be simulated, as is the case in the models previously examined, by a standard soil and vegetation model, provided that it is calibrated to reflect the peculiar characteristics of the soil-forming materials used for the construction of green roofs. Therefore, the strategy proposed and ultimately retained for the inclusion of green roofs within TEB is to use a soil and vegetation model that can not only be calibrated for a specific soil but would also have the ability to overcome the limitations of existing models. The ideal model should allow for a coupled modelling of green roof hydrological and energetic performances, employ sufficiently detailed parameterizations to describe the physical processes involved (including evapotranspiration and soil water flows), and at the same time have spatial resolutions (i.e. time calculations) suitable for modelling applications at city scale.

3 A green roof module for TEB

3.1 Current modelling of the urban climate with TEB

Urban climate modelling at the National Centre for Meteorological Research (CNRM-GAME) of Météo France relies on the use of the SURFEX land surface modelling system (Masson et al., 2013). It characterizes a study area based on four land use types (urban, natural, freshwater, and sea and ocean surfaces), and computes the exchange of heat, water and momentum between each type of surface and the atmosphere. More specifically, SURFEX features TEB (Masson, 2000) for solely urban surfaces and the ISBA model (Interaction between Soil Biosphere and Atmosphere) developed by Noilhan and Planton (1989) for natural and agricultural surfaces.

For TEB, the urban landscape is simplified as a network of street canyons of infinite length. Within each surface resolved by the model (also called mesh), it is possible to specify the geometric, radiative and thermal characteristics of an average street canyon represented (for equiprobable street orientations) or to fix these features street canyon by street canyon (for different street directions). TEB simulates the exchange of heat and water for three generic surfaces (roof, wall and road) and computes the urban microclimate variables at street level, as well as energy and water budgets from the neighbourhood to the city scale (Lemonsu et al., 2004, 2010; Offerle et al., 2005; Pigeon et al., 2008) and the feedback on the meteorological variables, when it is coupled to an atmospheric model (de Munck et al., 2013; Lemonsu and Masson, 2002). Recently, to better describe the finer scale interactions between artificial surfaces and natural surfaces found within cities, the ISBA model used for natural and agricultural surfaces has been integrated within TEB (resulting in the TEB-Veg configuration) and evaluated by Lemonsu et al. (2012). Given the modelling strategy retained and the aim to optimize source code development while retaining the modular structure of the SURFEX tool, an approach similar to Lemonsu et al. (2012), relying on ISBA, was considered well adapted and detailed enough to characterize and simulate water, energy and momentum fluxes within the natural layers of green roofs.

3.2 Using ISBA-DF coupled with TEB for modelling green roofs

Beyond being part of the SURFEX platform and being used in the weather forecast model of Météo France, the advantages of ISBA are numerous: since 1989, the year of its initial formulation by Noilhan and Planton (1989), it has been constantly enriched with detailed representations of physical processes (including surface atmosphere processes and hydrological and thermal transfers within the soil) as well as evaluated (Masson et al., 2013). Using ISBA for the natural layers of roofs makes it possible to have a model that offers a good compromise in terms of accuracy and computational costs for local- to global-scale applications, while allowing for the opportunity to benefit from various other options (e.g. carbon sequestration) and future improvements.

3.2.1 Estimation of evapotranspiration

Whatever the version, ISBA uses a detailed parameterization for the estimation of evapotranspiration, which is an essential component of green roof water balance. The transfer of heat and water between the atmosphere, the vegetation and the soil compartments of the green roofs is simulated through surface fluxes (Fig. 1), which are connected to each other through the latent heat flux (LE), which is the sum of the plant transpiration (LE_{TR}), the soil evaporation (LE_G), and the evaporation of the water intercepted by plant foliage (LE_V). These fluxes are estimated by detailed parameterizations, especially plant transpiration (LE_{TR}), which is, in the ISBA standard version, estimated as follows:

$$LE_{TR} = F_{veg}\rho_a C_H V_a H_V(VPD), \quad (1)$$

where F_{veg} is the fraction of vegetation covering the ground; ρ_a the air density; C_H the turbulent exchange coefficient; V_a the wind speed; and H_V and VPD respectively the Halstead

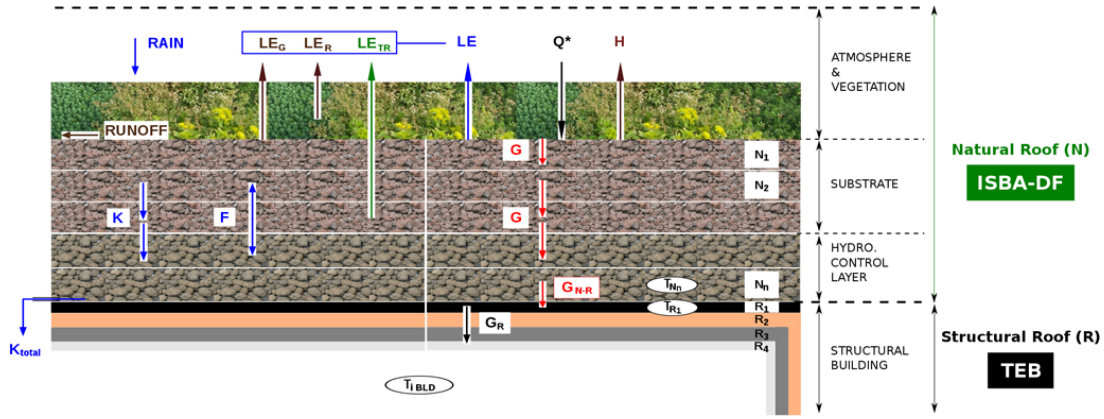


Fig. 1. Green roof design for TEB-GREENROOF and associated physical processes. Left: hydrological processes – surface runoff (RUNOFF), vertical water fluxes (F, infiltration or upward capillary action depending on moisture gradient), supersaturated drainage (K) and water drained out of the green roof base water (K_{total}) and precipitation (RAIN) Right: energy balance terms – net radiation (Q*), sensible heat flux (H), latent heat flux (LE) and ground storage heat flux (G). LE is the sum of the ground evaporation (LE_G), the evaporation of the water intercepted by the plant canopy (LE_R) and the vegetation transpiration (LE_TR). Top: thermal processes – within all layers, thermal conduction (G between natural layers, G_R between artificial layers, with Q_{N-R} the heat flux coupling the natural and structural roofs.

coefficient and the vapour pressure deficit in the air, which are calculated as follows:

$$H_\text{V} = \frac{R_\text{a} + \delta_h R_\text{S}}{R_\text{a} + R_\text{S}}, \tag{2}$$

$$\text{VPD} = q_\text{sat}(T_\text{S}) - q_\text{a}. \tag{3}$$

VPD is calculated in Eq. (3) as the difference between the humidity of the air at saturation $q_\text{sat}(T_\text{S})$ and the actual air humidity q_a around the plants. In Eq. (2), δ_h represents the fraction of foliage covered by intercepted rainwater, R_a the aerodynamic resistance and R_S the stomatal resistance. The latter is derived within ISBA from the formulation of Jarvis (1976):

$$R_\text{S} = \frac{R_\text{S\,min}}{\text{LAI}} \frac{F_1}{F_2 F_3 F_4}, \tag{4}$$

where R_Smin represents the minimum stomatal resistance of the vegetation, LAI its leaf area index, and the F factors' functions describe the influence of the environment (F_1, F_3 and F_4) or the soil hydrological status (F_2) on the stomatal resistance. F_1 describes the effect of the photosynthetic active radiation (PAR), and F_3 and F_4 the respective influence of the temperature and the VPD on evapotranspiration. For a for a detailed description of these factor formulations, see Boone (2000).

3.2.2 Modelling of hydrological and thermal transfers in the soil

Given the different nature and role of the soil compartments of green roofs (substrate and drainage or/and retention layers), it is interesting to use ISBA for its explicit multilayer version ISBA-DF, developed by Boone et al. (2000). Because it allows for us to represent the vertical heterogeneity of a soil (in terms of its hydrological and thermal properties but also in terms of its root distribution), ISBA-DF has the potential to accurately simulate different hydrological behaviours for a substrate and drainage/retention layers, which appears to be an improvement compared to existing green roof models.

On the hydrological side, ISBA-DF is capable of predicting green roof surface runoff that may occur in response to extreme rainfall events (Fig. 1). Inside the substrate and the hydrological control layers, ISBA-DF simulates the water fluxes due to vertical moisture gradients (F) and the water vertical drainage (K) that establishes when these layers exceed supersaturation. This way, the overall water discharge from the green roof (which is frequently recorded) can be estimated by combining the contributions of the total drainage out of the green roof base (K_{total}) and the surface runoff.

The soil hydrology is based on a mixed form of the Richards equation to describe the transfer of water through the soil through Darcy's law (changes in moisture and water potential) when transfers of heat (conduction) are described by a classical Fourier law. The coupling between heat and water transfers is finally realized through effective soil thermal characteristics, which evolve in time with the soil moisture status. The effective thermal capacity of the soil is calculated as the weighting of the heat capacity of water and the heat capacity of the dry soil matrix following Peters-Lidard et al. (1998). Similarly, the effective thermal conductivity of the soil is estimated according to Farouki (1986) as a function of the water content, the soil porosity and the conductivity of the dry soil. This corresponds to the level of detail encountered in the most detailed green roof models (Alexandri and

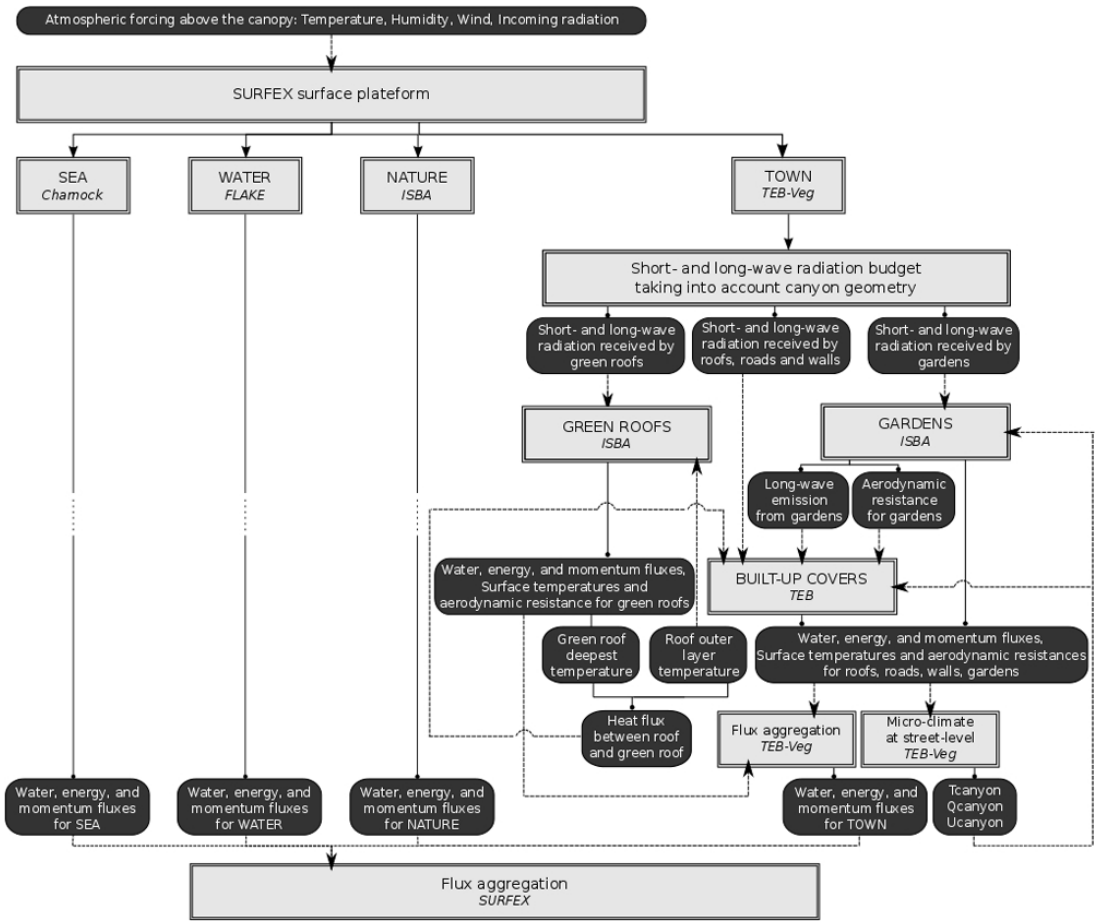


Fig. 2. Source code organization of GREENROOF within TEB-Veg and SURFEX.

Jones, 2007; Del Barrio, 1998; Sailor, 2008). In ISBA-DF, all the soil intrinsic characteristics, be they thermal or hydrological, are estimated based on a set of pedotransfer functions and prognostic equations described in Boone et al. (2000) and Decharme et al. (2011).

The added value of the ISBA-DF version with regard to evapotranspiration comes from a better calculation of the F_2 factor (Eq. 4). Indeed, contrary to the standard version of ISBA, which estimates a uniform stress factor for the entire column of soil, ISBA-DF uses the vertical profiles for root distribution and water content to compute a vertical distribution for F_2:

$$F_2(j) = \frac{w(j) - w_{\text{wilt}}(j)}{w_{\text{fc}}(j) - w_{\text{wilt}}(j)}, \quad (5)$$

where $w_{\text{wilt}}(j)$ and $w_{\text{fc}}(j)$ are respectively the water contents at wilting point and field capacity of the layer j of soil. Using ISBA-DF for green roof natural layers allows for us to specify a root distribution profile only within the substrate layers (and not beyond within the drainage or retention layers).

This constitutes a good level of detail considering the spatial scale aimed at, and should assist in accurately simulating the energy balance at the surface of the green roof, and consequently the heat conduction (G) into the substrate and the layers beyond, which is essential to ensure a good prediction of heat transfers within the entire green roof system.

3.2.3 Coupling ISBA-DF with TEB

The green roof design retained for GREENROOF allows for four distinct compartments or layers to be modelled (Fig. 1): from top to bottom, a compartment for vegetation which interacts with the atmosphere, a layer of substrate (in which lies the root system of the vegetation), a layer that controls the hydrological exchange with the substrate above (retention/drainage layer) and a compartment to represent the structural building and any artificial roof layers installed

(waterproofing or thermal insulation membranes and layers of the bearing roof).

Modelling this physical design within GREENROOF implies a configuration with two models: ISBA-DF to simulate the exchange of heat and water in the natural layers of the roof, and TEB to simulate heat exchange within the artificial layers of the roof which have no biological role and within which no transfer of water is involved. The structure of the resulting source code is presented in Fig. 2. This two-scheme configuration requires implementation of a thermal coupling between the base of the hydrological control layer (managed by ISBA-DF) and the artificial layers of the roof (managed by TEB). This coupling is realized in two ways – one way through the interfacial heat conduction flux, the other way via the temperatures of the layers in contact. TEB is coupled to ISBA through the interfacial heat conduction flux (G_{N-R}) that establishes between the deepest sub-layer (referred to as layer n) of the natural green roof and the top sub-layer (layer 1) of the artificial roof with which the natural roof is in contact:

$$G_{N-R} = \overline{\lambda}_{N-R}\left(T_{N_n} - T_{R_1}\right), \tag{6}$$

T_{N_n} and T_{R_1} are, respectively, the temperatures of the deepest sub-layer of the natural roof and the top layer of the artificial roof. $\overline{\lambda}_{N-R}$ is the interfacial thermal conductivity between the two layers, approximated by

$$\overline{\lambda}_{N-R} = \frac{2\lambda_{N_n}}{\Delta z_{N_n}}, \tag{7}$$

with λ_{N_n} the effective thermal conductivity of the bottom layer of the natural roof and Δz_{N_n} its thickness. This modifies the equation predicting the temperature evolution of the top layer of the structural roof (Eq. 1a of Masson, 2000):

$$C_{R_1}\frac{\partial T_{R_1}}{\partial t} = \frac{(1-f_{GR})}{d_{R_1}}\left(Q^*_{R_1} - H_{R_1} - \mathrm{LE}_{R_1} - G_{R_1-R_2}\right) + \frac{f_{GR}}{d_{R_1}}\left(G_{N-R} - G_{R_1-R_2}\right), \tag{8}$$

where C_{R_1} is the thermal capacity of the artificial layer in contact with the natural roof; f_{GR} the fraction of roof vegetated; and $Q^*_{R_1}$, H_{R_1}, LE_{R_1}, $G_{R_1-R_2}$ the terms of the surface energy balance for the fraction of roof not vegetated.

Then, to ensure the continuity in temperature, ISBA is coupled to TEB by recalling the temperature of the deepest layer of the green roof to that of the top artificial layer of the structural building at each time step.

Due to the presence of waterproofing membranes, no hydrological coupling is required between the soil–vegetation model and the building model, and the excess water and the water that percolates leaves the system and are collated as the "green roof outlet drainage". This will allow for connection to urban drainage systems when these are developed within a future version of TEB.

3.3 GREENROOF input parameters

For a given green roof design, the three natural compartments implemented in the GREENROOF module (vegetation, substrate and hydrological control layers) can be initialized (Table 1). The study of the scientific and technical literature shows that the plant species the most commonly used on green roofs are grasses (Gramineae) or sedums (*Sedum*) or a mixture of both. However, sedums are more frequently used for green roofs implemented under a dry climate due to their ability to stand the conditions inherent in this type of climate. Sedums are low-growing succulent plants of the Crassulaceae family, and are categorized as crassulacean acid metabolism (CAM) plants, CAM being one of three mechanisms for the uptake of CO_2 (photosynthesis) with C3 and C4. Under the CAM photosynthesis pathway, sedums can withstand long periods of heat and water stress (Carter and Butler, 2008; Durhman et al., 2006; Van Woert et al., 2005; Wolf and Lundholm, 2008) by partially closing their stomata during the day (hence reducing or inhibiting transpiration), and opening them at night to fix CO_2 for later use in photosynthesis. Many sedums are facultative CAM, meaning that they can switch to a C3 photosynthetic pathway when water is again available. This ability makes them very water-use-efficient, which is why they are well adapted for extensive green roofs (thin layer of growing medium). However this photosynthetic pathway CAM (or CAM-C3) is not parameterized in standard vegetation models (including ISBA), and even providing standard input values for this type of vegetation is a delicate task because few data have been published. Even if the lack of data did not allow for a parameterization of sedum transpiration mechanisms to be established and implemented in GREENROOF, an attempt to characterize sedums for ISBA-DF has been undertaken, bearing in mind the objective to eventually simulate the differences in characteristics and functioning inherent to the two types of vegetation commonly found on green roofs. To this end, two options for green roof vegetation have been established in GREENROOF and are provided to the user: the *GRASS* option (herbaceous lawn) and the *SEDUM* option (sedum lawn). Default characteristics for *GRASS* were already available in the standard version of ISBA-DF. A set of values was finally collected in the literature to characterize the type *SEDUM* (Table 2).

Ultimately, it is mainly the characterization of the substrate and hydrological layers which is a crucial and challenging step as the soil-forming materials implemented on green roofs are very different from the standard soils. This is discussed further in the next paragraph via a case study. The characterization of the artificial layers (Table 1) which may be added to the initial roof upon green roof implantation (such as insulation or waterproofing layers) is performed within the TEB model.

Table 1. GREENROOF model input parameters (T and H refer respectively to a thermal and a hydrological parameter).

	Parameter (unit)
Design	Fraction of structural roof vegetated (–) Number of green roof sub-layers used for calculation and their respective depths (m)
Vegetation	Type (herbaceous lawn or sedum lawn) Fraction of vegetation covering the vegetated ground (–) LAI (–) Albedo (–) Emissivity (–) Minimum stomatal resistance ($s\,m^{-1}$) Roughness length for momentum (m)
Substrate and hydrological control sub-layers	Initial soil moisture (soil water index) for surface, root layers and hydrological sub-layers Initial soil-forming-material temperature for surface, root layers and hydrological sub-layers
Substrate and hydrological control sub-layers	T: Dry soil thermal conductivity ($W\,m^{-1}\,K^{-1}$) T: Dry soil heat capacity ($J\,m^{-3}\,K^{-1}$) H: Porosity ($m^3\,m^{-3}$) H: Saturated hydraulic conductivity ($m\,s^{-1}$) H: Matrix potential at saturation (m) H: *b* coefficient for water retention curve (–) H: Water content at field capacity ($m^3\,m^{-3}$)[a] H: Water content at wilting point ($m^3\,m^{-3}$)[a]
Artificial layers added to the structural roof (TEB)	Total number of layers of the artificial roof and their respective thicknesses (m) Albedo of the top artificial layer (–) Emissivity of the top artificial layer (–) Thermal conductivity ($W\,m^{-1}\,K^{-1}$) Heat capacity ($J\,m^{-3}\,K^{-1}$)

[a] for hydrological control sub-layers, only used to initialize water contents.

Table 2. Vegetation characteristics for SEDUM compared to those of GRASS (defined according to the default values proposed by Masson et al., 2003).

GREENROOF parameter (unit)	Value (GRASS)	Value (SEDUM)	Method for SEDUM (Source)
Fraction of vegetation covering the ground (–)	0.9	0.9	Chosen identical to that of GRASS
Leaf area index (–)	2	3	Measured (CRITT Horticole, 2012)
Longwave albedo (–)	0.300	0.154	Measured (Doya, 2011)
Shortwave albedo (–)	0.100	0.154	Measured (Doya, 2011)
Emissivity (–)	0.95	0.83	Measured (Feng et al., 2010)
Minimal stomatal resistance ($s\,m^{-1}$)	40	150	Chosen higher than that for GRASS (Sect. 3.3)
Roughness length for momentum (m)	0.01	0.01	Chosen identical to that of GRASS

4 Calibration and evaluation of GREENROOF for a standard case study

For standard applications of ISBA to natural soils, the thermal characteristics for dry soil and the hydrological characteristics are deduced from empirical formulations, called pedotransfer functions, which connect these characteristics to the user-input soil texture properties (sand and clay fractions, Decharme et al., 2011). But the pedotransfer functions derived for natural soils are not really adapted to the soil-forming materials constituting the substrate or the drainage layers of a green roof. Consequently, whenever possible, it is better to directly input GREENROOF with green-roof-specific thermal and hydrological characteristics. However, when thermal characteristics for green roof materials are available, hydrological characteristics are not only hard to find but also consist in lab measurements which do not reflect in situ conditions such as soil compaction or root presence/growth. Indeed, root growth results in the formation of

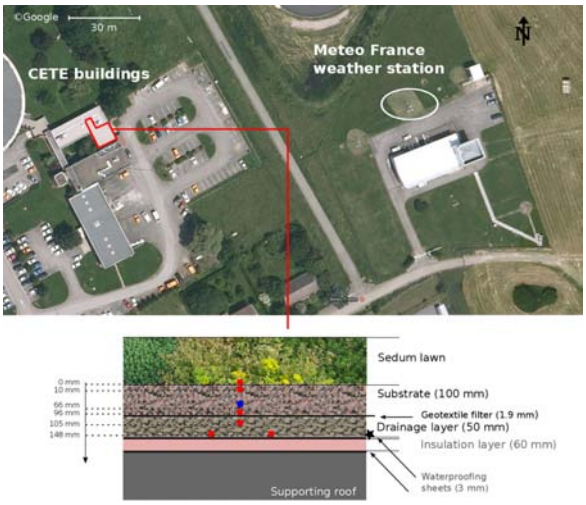


Fig. 3. Location (top) and design (bottom) of the green roof experimental plot modelled, showing the positions of the various sensors (red squares for temperature sensors, blue circle for water content and matrix potential sensor and star for drainage water gauge).

soil microstructures, which modifies the intrinsic soil hydrological behaviour. Consequently, a calibration exercise is undertaken to best fit green roof hydrological characteristics to in situ conditions as well as to the GREENROOF module.

4.1 Case study experimental data

The GREENROOF module is evaluated against observations at a single site. This exercise is based on the experiment conducted by the Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement de l'Est [CETE] in the northeast of France near the city of Nancy. The research team at the CETE has designed an experiment with the aim of studying the relations between the thermal and hydrological characteristics of green roof systems and their thermal and hydrological behaviours for a set of vegetation/substrate/drainage layer combinations (Fig. 3). Due to their location, the plots are exposed to a temperate oceanic climate.

The green roof plot studied, whose surface is 75 m^2, is composed of three natural layers of significant thicknesses (Fig. 3): a vegetation layer, a manufactured growing medium (substrate) and a drainage layer underneath. In addition, the transfer of fine substrate particles into the drainage layer is prevented by a 1.9 mm thick filter sheet which lets the water pass (geotextile material with high hydrological conductivity). In order to improve the energy performance of the building, an insulating layer of 60 mm has been installed between the base of the green roof compartment and the structural roof. Finally, two 3 mm thick waterproofing membranes on either side of the insulating layer prevent water damage to the insulator and the structural roof. The vegetation is a freshly established (2-month old) sedum lawn consisting of a mixture of seven species (*Sedum album*, *Sedum reflexum larix*, *Sedum reflexum germanium*, *Sedum spurium*, *Sedum sexangulare*, *Sedum floriferum*, and *Sedum hispanicum*: Fig. 3). The substrate, manufactured by the firm Falienor, is widely used in extensive green roof implementations. The drainage layer consists of expanded clay granules (2–10 mm grain size) manufactured by the firm Leca®. Therefore, this green roof plot is fairly representative of the green roofs which are nowadays implemented in cities.

The evolution of the thermal and hydrological status within the green roof is recorded as shown in Fig. 3. Soil temperatures are recorded using PT100 sensors at different depths, including the soil surface, near the centre of the plot (0, 10, 96, 105 and 148 mm). Soil water content and matrix potential are provided by a TDR probe at a single depth (66 mm), and the excess water which is drained out of the substrate and drainage layers is measured with a tipping-bucket water gauge at the base of the green roof (water outlet). In addition, a weather station situated on the roof at 1.40 m above green roof surface provides air temperature, wind speed and relative humidity as well as global incoming solar radiation at a 10 min temporal resolution. The time series available for all of these data run from 4 July to 29 November 2011.

4.2 Numerical setup for the case study

This study focuses on the green-roofed plot and its surrounding environment, the scale at which observations are available. Consequently, simulations are carried out on one grid point. To simulate atmospheric conditions to which the green roof is exposed, a series of locally observed meteorological fields are prescribed hourly to the GREENROOF module: atmospheric pressure, shortwave incoming solar radiation (direct and diffuse), longwave incoming radiation, air temperature and relative humidity, average wind speed and precipitation (rain and snow). The weather station installed on the greened roof provides air temperature and relative humidity, as well as average wind speed and global incoming solar radiation. The global incoming solar radiation is assumed to be about 80 % direct and 20 % diffuse. Precipitation and atmospheric pressure are provided by the nearest Météo France weather station (which is about 130 m from the green roof plot; see Fig. 3). Finally, since the infrared incoming radiation ($LW^{\downarrow}$) which must be prescribed to the model is not available at any of the two stations, it is firstly established for clear sky conditions ($LW^{\downarrow}_{CS}$) according to the Stefan–Boltzmann law (Eq. 9), with air emissivity (ε_a) calculated according to Prata (1996) after its temperature (T_a) and humidity. Then it is modulated following Diak et al. (2000) to account for the longwave re-emission of the cloud cover (f_C observed at the nearest Météo France weather station, Eq. (10) – assuming that the cloud temperature is equivalent to that of the surrounding air and cloud emissivity is equal

to 1).

$$\mathrm{LW}^{\downarrow}_{\mathrm{CS}} = \varepsilon_{\mathrm{a}} \sigma T_{\mathrm{a}}^4 \quad (9)$$

$$\mathrm{LW}^{\downarrow} = (1 - f_{\mathrm{C}})\,\mathrm{LW}^{\downarrow}_{\mathrm{CS}} + f_{\mathrm{C}} \sigma T_{\mathrm{a}}^4, \quad (10)$$

where σ is the Stefan–Boltzmann constant.

To model the studied plot with GREENROOF, the three natural layers of the roof (vegetation, substrate and drainage layer) are simulated by the ISBA-DF model, while the artificial layers (the two waterproofing membranes on either sides of the insulator, and the initial structural layers of the roof) are simulated by the TEB model. Both the thermal and hydrological influences of the particle filter are considered negligible because of its low thickness and high water conductivity. Finally, to ensure numerical stability in model runs, and in order to extract temperature and water content model estimates at the same vertical levels as those measured on the plot, the substrate and drainage layers were subdivided respectively into three and two vertical sub-layers.

4.3 Initialization of green roof thermal parameters

Values for radiative and thermal characteristics (referred to as T in Table 1) of all green roof layers, be they natural or artificial, were either recovered from the technical literature (suppliers or manufacturers of similar products), measured by Bouzouidja (in the laboratory or in situ on the study plot) or retrieved from the scientific literature. A compilation of these values is presented in Table 3. Note that the value retained for the dry soil thermal conductivity of the case study substrate is within the range of thermal conductivities reported in Sailor (2008) for eight different green roof substrates at 0 % soil moisture (0.14–0.21 $\mathrm{W\,m^{-1}\,K^{-1}}$), and this information is well correlated with the substrate density (800–851 $\mathrm{kg\,m^{-3}}$ according to Bouzouidja, 2012, and Falienor, 2010). Its heat capacity is slightly above the range of those measured by Sailor et al. (2008: 950 760–1 246 000 $\mathrm{J\,m^{-3}\,K^{-1}}$) but of a similar order of magnitude.

4.4 Methodology for the calibration of green roof hydrological parameters

The first step of this calibration consists in compiling the values available, for each of the six hydrological characteristics needed as model inputs, (referred to as H in Table 1) in the same way as for thermal parameters (technical and scientific literature, measurements). The water contents at field capacity and wilting point are prescribed from in situ observations, leaving only four hydrological characteristics to initialize for both the substrate and the drainage layer: the porosity, which represents the maximum interstitial space available for water; the saturated hydraulic conductivity, which corresponds to the infiltration rate of the water when the soil is saturated; the soil matrix potential at saturation, which corresponds to the pressure required to extract water from a soil matrix saturated with water; and finally the coefficient of the water retention curve used in ISBA, called *b*, which relates the matrix potential to the water content of a soil matrix according to the formulation of Clapp and Hornberger (1978). The *b* coefficient is an empirical coefficient which varies according to soil type, and can be determined by regression based on observations. This method can be used for the substrate layer for which the hydrological status is continuously recorded (Fig. 3), and is applied to two sets of relevant porosity–matrix-potential combination (developed in Appendix A).

Things are slightly more complex for the drainage layer. Indeed, due to the double porosity of this layer (macroporosity of the matrix and microporosity of the expanded clay granules) and the lack of data for initializing the matrix potential at saturation and *b* coefficient, a calibration exercise is run. The objective of this exercise is to determine – from three typical hydrological behaviours, organic matter (OM), SAND or CLAY – the one that best corresponds to this soil-forming material in GREENROOF. Therefore, the calibration exercise consists in running three simulation ensembles differing in the initialization of their drainage layer. Based on the green roof hydrological characteristics listed in Table 4, ensemble members are obtained by the combination of two drainage layer parameter values (matrix potential at saturation and *b* coefficient, written in italics in Table 4) with all the other substrate-drainage characteristic values, resulting in 32 simulations per ensemble. Each of them is then run and the outputs are compared against local observations to identify the best ensemble to model the hydrology of the case study plot.

The calibration period is chosen carefully, firstly to calibrate GREENROOF at a time when many processes are active (presence of rain, vegetation fully developed and photosynthetically active), and secondly when the plot conditions are closest to what GREENROOF is capable of modelling. Indeed, a device with stoppers has been installed between the green roof base and the tipping-bucket water gauge. This device may allow for a water blade of varying height to be retained, when it exists, by using these stoppers placed at different heights of the outlet (multiples of 15 mm). It is intended to keep water on the roof for use during dry spells or to delay and reduce roof runoff peaks during heavy rainfall events. Obviously, this device, which consists in an experimental setup, could complicate the analysis of the calibration exercise presented herein since it prevents part of the water that is drained out of the drainage layer from being recorded. As GREENROOF does not seek to simulate this device, which is not generally implemented on green roofs, and as the dates at which these stoppers were installed are known (two stoppers between 10 July and 8 August and between 28 October and 29 November, one stopper between 9 August and 27 October 2011), the calibration period chosen was when fewer stoppers were installed, from 10 August to 9 September 2011.

Table 3. General and thermal characteristics of green roof substrate, drainage layers and roof artificial layers (values in bold are used in simulations).

	Characteristics (unit)	Value	Method (Source)
SUBSTRATE	Thickness (m)	**0.08**	Measured (Bouzouidja, 2012)
	Dry unit weight of soil particles ($kg\,m^{-3}$)	2610	Deduced from Falienor (2010)
	Dry soil thermal conductivity ($W\,m^{-1}\,K^{-1}$)	**0.15**	Measured[a] (Bouzouidja, 2010)
	Dry soil heat capacity ($J\,m^{-3}\,K^{-1}$)	**1 342 000**	Measured[b] (Bouzouidja, 2010)
DRAINAGE	Thickness (m)	**0.05**	Measured (Bouzouidja, 2012)
	Dry unit weight of soil particles ($kg\,m^{-3}$)	570	Supplier information (Leca®, 2009)
	Dry soil thermal conductivity ($W\,m^{-1}\,K^{-1}$)	<0.11 0.125 0.113 0.075–**0.090**	Supplier information (Leca®, 2009) Manufacturer information (SILRES®, 2012) Manufacturer information (Sinclair, 2012) Ochs et al. (2006)
	Dry soil heat capacity ($J\,m^{-3}\,K^{-1}$)	**331 500**	Deducted from manufacturer information (Sinclair, 2012) according to density
ARTIFICIAL	Material/function *5 layers, from top (1) to bottom (5)*	(1) waterproofing membrane (2) insulating sheet (PIR[c]) (3) waterproofing membrane (4) insulator (5) concrete	(1) Supplier information (SOPREMA®, 2012a) (2) ACERMI (2009) (3) Supplier information (SOPREMA®, 2012b) (4 to 5) Deducted from building type and age (Lemonsu et al., 2011)
	Thickness (m)	(1) **0.003** (2) **0.060** (3) **0.003** (3) **0.10** (4) **0.20**	(1) Supplier information (SOPREMA®, 2012a) (2) Supplier information (RECTICEL®, 2012) (3) Supplier information (SOPREMA®, 2012b) (4 and 5) Deducted from building type and age (Lemonsu et al., 2011)
	Thermal conductivity ($W\,m^{-1}\,K^{-1}$)	(1) **0.7** (2) **0.024** (3) **0.7** (4) **0.035** (5) **2.3**	(1 and 3) Deducted from building type and age (Lemonsu et al., 2011) (2) ACERMI (2009) (4 and 5) Deducted from building type and age (Lemonsu et al., 2011)
	Heat capacity ($J\,m^{-3}\,K^{-1}$)	(1) **2 100 000** (2) **44 800** (3) **2 100 000** (4) **75 000** (4) **2 300 000**	(1 and 3) Deducted from building type, age and usage (Lemonsu et al., 2011) (2) Deducted from BING (2006) and Kalzip® (2010) based on density (RECTICEL®, 2012) (4 and 5) Deducted from building type, age and usage (Lemonsu et al., 2011)

[a] for a similar substrate, mean between −10 and 50 °C. [b] for a similar substrate, at 20 °C. [c] polyisocyanurate foam with aluminium layer.

Over the calibration period, a systematic calculation of simulation statistical scores is undertaken to compare GREENROOF results to observations by focusing on the hydrological variables available on site (substrate water content and outlet drainage). The Pearson coefficient of correlation (R), the root-mean-square error (RMSE), the mean bias error (MBE) and the standard deviation (SD) are computed. For the sake of visualization, R as well as the centred RMSE and the standard deviations (SD) of both the models and observations are initially plotted on a Taylor diagram (Taylor, 2001).

Table 4. Hydrological characteristics tested for green roof calibration exercise.

	Characteristics (unit)	Value	Method (Source)
SUBSTRATE	Porosity ($m^3\,m^{-3}$)	**0.674** **0.411**	Supplier information (Falienor, 2010) Measured (Bouzouidja, 2012)
	Saturated hydraulic conductivity ($m\,s^{-1}$)	$\mathbf{1.073 \times 10^{-3}}$ $\mathbf{2.162 \times 10^{-3}}$	Supplier information (Falienor, 2010) Measured (Bouzouidja, 2012)
	Matrix potential at saturation (m)	**–0.10**	Value fitted on observed water retention curves (Appendix A)
	b coefficient for water retention curve (–)	**2.9** **3.9**	Deducted from water retention curve (Fig. A1) porosity of 0.674 and matrix potential of −0.10 Deducted from water retention curve (Fig. A2) with porosity of 0.411 and matrix potential of −0.10
	Water content at field capacity	**0.37**	Deducted from observations
	Water content at wilting point ($m^3\,m^{-3}$)	**0.15**	Deducted from observations
DRAINAGE	Porosity ($m^3\,m^{-3}$)	**0.553** **0.9**	Deducted from supplier density data (Table 3) Literature (Ochs et al., 2006) & manufacturer information (Argex, 2012)
	Saturated hydraulic conductivity ($m\,s^{-1}$)	$\mathbf{3.32 \times 10^{-3}}$ $\mathbf{1 \times 10^{-2}}$	(Bouzouidjam, 2012) Technical specification (Leca®, 2012)
	Matrix potential at saturation (m) *b coefficient for water retention curve (–)*	***–0.010*** ***2.7***	*Values for organic matter (Lawrence and Slater, 2008)* **OM**
	Matrix potential at saturation (m) *b coefficient for water retention curve (–)*	***–0.121*** ***4.05***	*Values for sand in ISBA (Clapp and Hornberger, 1978)* **SAND**
	Matrix potential at saturation (m) *b coefficient for water retention curve (–)*	***–0.405*** ***11.4***	*Values for clay in ISBA (Clapp and Hornberger, 1978)* **CLAY**

4.5 Determination of the best hydrological ensemble for the case study

The Taylor diagrams for daily outlet drainage and substrate water content are presented in Fig. 4. They demonstrate different behaviours for the three ensembles. The model performance in estimating substrate water content (Fig. 4, left) is better for the OM ensemble than for the SAND and the CLAY ensembles, and is acceptable, with a correlation ranging from 0.6 to nearly 0.85. Two subsets can be identified within the OM ensemble; subset 1 has a slightly lower R, a better SD and a slightly better centred RMSE than subset 2. The scores for the substrate water content are in coherence with the scores for the daily outlet drainage (Fig. 4, right): they are also better for the OM ensemble than for the other two, in the same order of performance (performance OM > performance SAND > performance CLAY). The correlation coefficient ranges from 0.6 to 0.8, and this time, the two OM subsets present different SD and centred RMSE, the water content subset 2 being the outlet drainage subset, with the SD the closest to observations ($0.12\,m^3\,day^{-1}$) and the smallest centred RMSE (around $0.1\,m^3\,day^{-1}$).

Figures 5 and 6 present the evolution of the two variables of interest over the calibration period for each of the three ensembles and their means, as well as additional statistical scores. They confirm that the OM ensemble systematically better suits the observations than SAND and CLAY ensembles, be it for the substrate water content or the outlet drainage. In Fig. 5, for the substrate water content, the mean bias error (MBE) of the OM ensemble mean is $-0.10\,m^3\,m^{-3}$, and those of the SAND and CLAY ensemble means respectively two and three times more. Figure 6 demonstrates similar results for the outlet drainage, with a percentage bias error (PBE) of +121, +310 and +337 % for the OM, SAND and CLAY ensemble means respectively, resulting in an excess of 1.4, 3.5 and 3.8 m^3 being drained out of the green roof over the calibration period. These better biases for the OM ensemble are also associated with better RMSEs, be it for the substrate water content ($0.11\,m^3\,m^{-3}$ against 0.24 and 0.30 for the SAND and

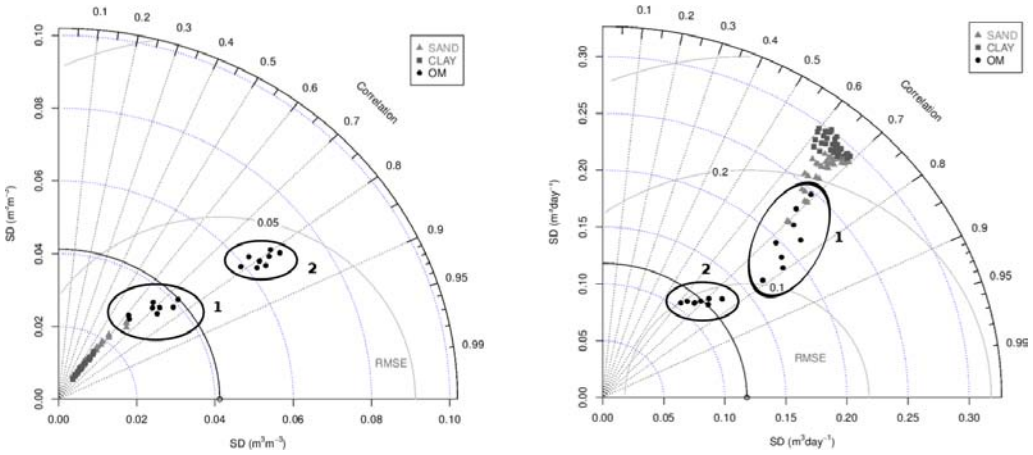
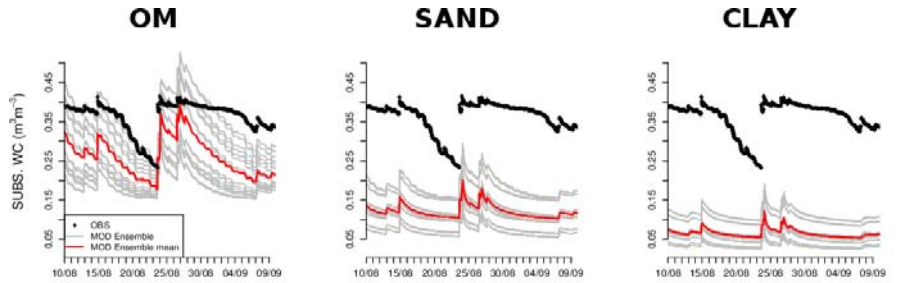


Fig. 4. Taylor diagrams showing the performance of three model ensembles differing in the hydrological calibration of the DRAINAGE layer (OM, SAND and CLAY) to model (left) the water content recorded at 77 mm depth in the green roof substrate and (right) the green roof daily outlet drainage. On each diagram, a dot is assigned to each of the 96 models. One can read R on the right-hand side of each quadrant, SD radially (SD_{OBS} is shown by a black quadrant, at 0.041 $m^3\,m^{-3}$ for water content and 0.12 $m^3\,day^{-1}$ for drainage), and the centred RMSE on grey semicircles centred on the observations' SD. The ideal model that would fit the observations is represented by the black circle ($R = 1$; RMSE = 0; SD = SD_{OBS}).



OM	min	max	mean
R	0.61	0.82	**0.78**
RMSE	0.04	0.18	**0.11**
MBE	- 0.18	0.002	- **0.10**

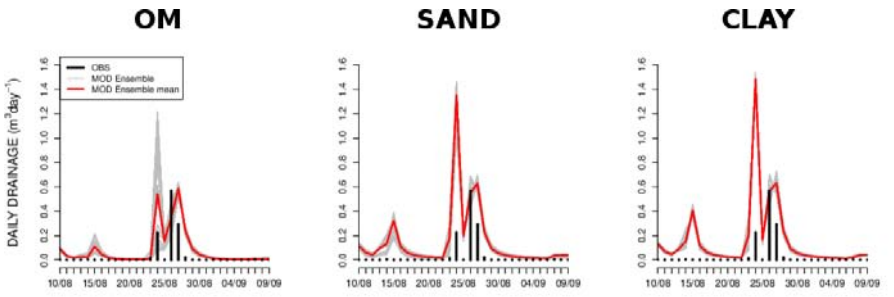
SAND	min	max	mean
R	0.54	0.66	**0.59**
RMSE	0.18	0.30	**0.24**
MBE	- 0.30	- 0.18	- **0.24**

CLAY	min	max	mean
R	0.53	0.58	**0.57**
RMSE	0.25	0.33	**0.30**
MBE	- 0.33	- 0.25	- **0.30**

Fig. 5. Comparison of the three ensemble simulations OM, SAND and CLAY with regard to their ability to model substrate water content over the calibration period (10 August 2011–9 September 2011). Graphs represent the evolution of the water content with time for each ensemble, while the tables gather their respective scores. R is the correlation coefficient (–), RMSE the root-mean-square error and MBE the mean bias error ($m^3\,m^{-3}$).

CLAY ensembles) or the outlet drainage (0.10 $m^3\,day^{-1}$ versus 0.23 and 0.26 for the SAND and CLAY ensembles). Even with the best ensemble simulations, GREENROOF tends to underestimate the water content in the substrate, while overestimating the drainage collected at the green roof base. The stopper in place at the base of the green roof might explain part of this positive bias since some of the water drained from the substrate and the drainage layer is retained at the green roof base instead of being evacuated towards the roof outlet. In addition, the model always simulates a "background" drainage" even when none is observed, which contributes to this positive bias.

Finally, the best calibration ensemble obtained for the drainage layer – whose texture, porosity and hydrological behaviour are complex – displays hydrological characteristics which are all typical of the behaviour of organic matter (peat): high porosity and saturated hydraulic conductivity matched to a low b coefficient (according to Lawrence and



OM	min	max	mean
R	0.61	0.79	**0.77**
RMSE	0.09	0.20	**0.10**
PBE	47	227	**121**
CBE	0.5	2.6	**1.4**

SAND	min	max	mean
R	0.63	0.70	**0.68**
RMSE	0.17	0.25	**0.23**
PBE	204	343	**310**
CBE	2.3	3.9	**3.5**

CLAY	min	max	mean
R	0.60	0.69	**0.65**
RMSE	0.25	0.27	**0.26**
PBE	331	344	**337**
CBE	3.7	3.9	**3.8**

Fig. 6. Comparison of the three ensemble simulations OM, SAND and CLAY with regard to their ability to model daily outlet drainage over the calibration period (10 August 2011–9 September 2011). Graphs represent the evolution of the outlet drainage with time for each ensemble, while the tables gather their respective scores. R the correlation coefficient (–), RMSE the root-mean-square error ($m^3\,day^{-1}$), PBE the mean bias error (%) and CBE the bias error cumulated over the entire calibration period (m^3). For reference, the total outlet drainage observed over this period of time equals 1.1 m^3.

Slater, 2008). This information is an interesting outcome because it allows for one to relate the hydrological behaviour of expanded clay granules to a better known soil component. This best calibration ensemble will next be used to evaluate the GREENROOF model hydrological and thermal performances over the remaining time series.

4.6 Evaluation of GREENROOF hydrological and thermal performances

4.6.1 Hydrological performance

The evolution of the substrate water content and the green roof drainage over the entirety of the time series available are presented in Fig. 7 for the OM ensemble calibrations and the two OM subsets to illustrate their discrepancies in relation to that of their statistical scores (Table 5) calculated over the evaluation period running from 10 September to 29 November 2011.

Starting with the substrate water content, GREENROOF scores over the evaluation period are similar (RMSE and MBE) or even better (R, SD) than those of the OM ensemble mean over the calibration period (Fig. 5). Looking at its temporal evolution, Fig. 7 (top) reveals a water content that is more underestimated at the beginning of the evaluation period (until 5 October) than later on, while the overall dynamics are quite good. This behaviour seems to be in the continuity of the underestimated water status which established at the end of the calibration exercise (between 27 August and 9 September). As highlighted previously, Fig. 7 shows two different hydrological regimes corresponding to the two subsets identified in Fig. 4 (1 and 2), with subset 2 clearly presenting better scores than subset 1 (Table 5). This is illustrated by better R (0.86 compared to 0.71), MBE (-0.05 compared to $-0.16\,m^3\,m^{-3}$) and RMSE values (0.06 compared to $0.16\,m^3\,m^{-3}$), despite a higher SD ($0.05\,m^3\,m^{-3}$) than subset 1 and observations ($0.02\,m^3\,m^{-3}$ for both). The better scores of subset 2 are explained by a higher porosity of the substrate (0.674 instead of $0.411\,m^3\,m^{-3}$ for subset 1), which is the only different hydrological characteristic between the two subsets. Indeed, the subset 2 higher porosity allows for a higher water content to be reached within the substrate matrix when it is saturated.

The better scores of subset 2 for simulating the water content of the substrate logically provides better scores as well for simulating the amount of water discharged at the base of the green roof, with a much better PBE (61 % against 192 % for subset 1) and similar RMSEs (0.07 and $0.06\,m^3\,day^{-1}$) despite a weaker correlation (0.66 against 0.83). Overall, evaluation scores for the drainage are acceptable and generally better than those over the calibration period even if the model overestimates the drainage most of the time. As mentioned previously, the background drainage always simulated by the model explains a large part of the error on the accumulated drainage, i.e. 1.2 and 0.5 m^3 for subsets 1 and 2, respectively, over the evaluation period (for cumulated bias errors of 4.2 and 2.3 m^3, respectively).

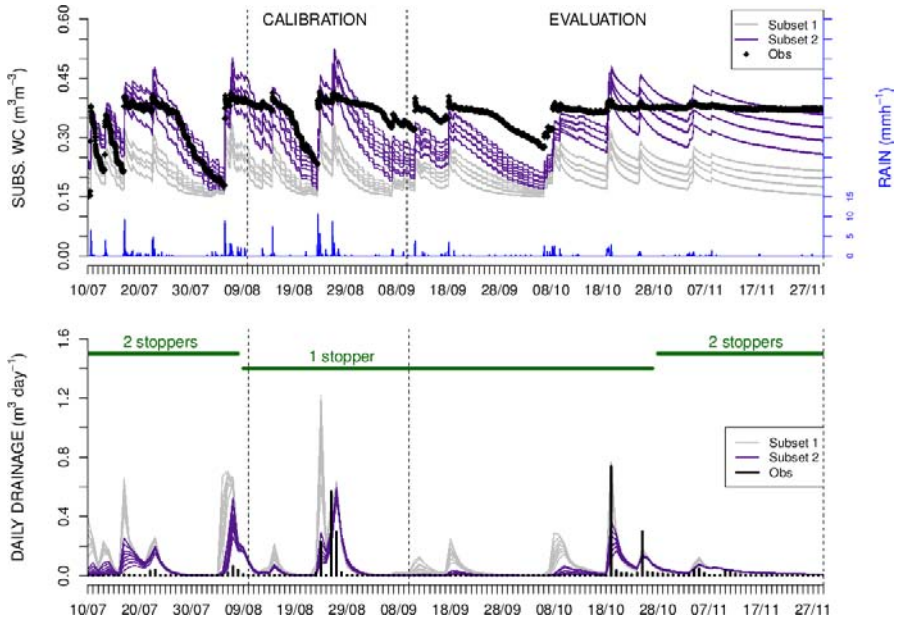


Fig. 7. Evolution between 10 July 2011 and 29 November 2011 of SUBSTRATE water content (top) and daily outlet DRAINAGE (bottom), as observed and simulated by the GREENROOF OM ensemble. Rain amount recorded during the experiment is represented by blue bars (right-hand-side axis on top graph).

Table 5. Statistical scores for the simulations of the OM ensemble over the evaluation time period (R the correlation coefficient, RMSE the root-mean-square error, MBE the mean bias error, PBE the mean bias error expressed in percentages, CBE the bias error estimated on the variable accumulated over the period, and SD the standard deviation). Score units depend on the variable analysed.

	SUBS. WATER CONTENT				OUTLET DRAINAGE				SUBS. TEMPERATURE				DRAIN. LAYER TEMPERATURE			
SCORES	R	RMSE	MBE	SD	R	RMSE	PBE	CBE	R	RMSE	MBE	SD	R	RMSE	MBE	SD
UNIT	–		$m^3\ m^{-3}$		–	$m^3\ day^{-1}$	%	m^3	–		°C		–		°C	
OM mean	0.86	0.11	−0.10	0.04	0.81	0.06	127	3.3	0.91	4.32	2.68	6.92	0.89	3.69	1.10	6.73
OM min	0.50	0.04	−0.01	0.02	0.48	0.05	32	1.9	0.88	3.59	2.25	6.35	0.85	2.90	0.69	6.16
OM max	0.87	0.18	−0.18	0.06	0.88	0.08	246	5.0	0.92	5.29	3.23	7.63	0.92	4.74	1.64	7.49
S1 mean	0.71	0.16	−0.16	0.02	0.83	0.06	192	4.2	0.90	4.85	2.99	7.31	0.87	4.25	1.39	7.13
S2 mean	0.86	0.06	−0.05	0.05	0.66	0.07	61	2.3	0.92	3.81	2.37	6.53	0.91	3.15	0.81	6.36
OBS				0.02								4.54				4.25

4.6.2 Thermal performance

The evolution of recorded and simulated green roof temperatures is presented in Fig. 8. Whether at the bottom of the substrate (at 96 mm) or the drainage layer (at 148 mm), the temperatures estimated by GREENROOF demonstrate a good correlation with those observed (respectively 0.91 and 0.89 for the OM ensemble mean, Table 5). By contrast, even if the model is able to capture seasonal variations, the temperatures simulated by GREENROOF as well as their daily amplitudes are greater than that observed. This corresponds to an MBE of 2.68 and 1.10 °C for the substrate and the drainage layers, respectively, and an RMSE of 4.32 and 3.69 °C. This overestimation of soil temperature is coherent with the underestimation of water content in the substrate layer since the effective thermal properties of the soil matrix are calculated according to Peters-Lidard et al. (1998) based on the dry thermal properties shown in Table 3, as well as the porosity and the water content of the soil matrix. Eventually, an underestimated water content will generate lower thermal conductivity and heat capacity than in reality, with a consequent increase in the soil matrix temperature. This impact has been evaluated on one of the best OM simulations by forcing the effective thermal characteristics of the substrate to those that it would have at field capacity: depending on the substrate moisture status in the initial simulation, this effect only contributes to a cooling in temperatures of 0.5 to 1.5 °C. This implies that other processes might be responsible for the temperature bias and the higher amplitudes of the temperature

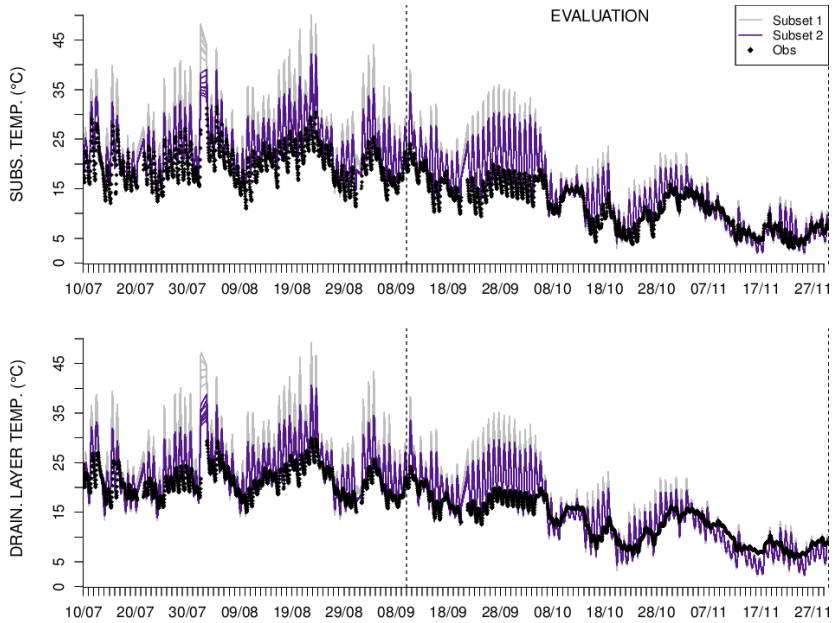


Fig. 8. Evolution between 10 July 2011 and 29 November 2011 of SUBSTRATE (top) and DRAINAGE layer (bottom) temperatures, as observed and simulated by the GREENROOF OM ensemble.

simulated in the substrate. It may originate directly from the initialization of the dry thermal characteristics themselves or from the simulation of the surface energy fluxes. So far, the analysis of the amplitude and the partitioning of simulated sensible and latent heat flux does not highlight any incoherence with the meteorological forcings experienced by the green roof, but another case study with longer time series and surface flux data would be needed to study these aspects and improve the model. Finally, as expected by its better performance in modelling substrate water content, the OM subset 2 performs slightly better at simulating substrate temperatures than subset 1, as shown by Fig. 8 and Table 5, with better RMSE and MBE values than subset 1. This results in better temperature scores for the subset 2 in the drainage layer. Eventually the analysis of the two OM subsets suggests that a porosity of 0.674 instead of 0.411 $m^3\,m^{-3}$ for the substrate is a more appropriate value for modelling this case study plot with GREENROOF.

5 Conclusions and perspectives

A parameterization called GREENROOF for simulating extensive green roofs across the cities has been developed within TEB, which is consistent with the modular architecture of SURFEX. While the natural surface scheme ISBA-DF simulates the transfers of heat and water within the natural compartments of the green roof, TEB handles transfers within artificial layers of the green roof and the structural roof. The GREENROOF module consists of the two-way coupling of these two models via the heat flux which establishes between the natural and artificial roof layers in contact and their respective temperatures. A vertical green roof design as well as two greening options (grass or sedum lawn) are available. GREENROOF is evaluated for a case study – an experimental green roof plot located in the northeast of France. Initially, a calibration exercise is realized in order to identify the soil type that best describes the hydrological behaviour of the soil-forming materials used for the drainage layer of the green roof plot. Calibration results show that the hydrological behaviour of expanded clay granules is closest to the behaviour of peat, which is an important indication for the modelling community as drainage layers are not generally simulated by existing green roof models. After calibration, results show that GREENROOF performs well in reproducing the dynamics of both the outlet drainage and the water content within the substrate, with a tendency to overestimate drainage and underestimate water content. The differences between modelled and observed water contents do not impact too much the simulation of temperatures, which presents satisfactory statistical scores. Nonetheless, on this case study plot, GREENROOF tends to overestimate soil temperatures and their amplitudes. Due to the thermal inertia of the soil layers, the temperature of the drainage layer is the least biased, which allows for a good thermal coupling with the artificial/structural roof layers. Considering the results of this study, the future developments of GREENROOF should

include the analysis of experimental green roof plots, providing complete records including surface flux data, as well as plots with a retention layer instead of a drainage layer.

Since the experimental plot studied (extensive, sedum lawn, typical substrate and drainage layer materials) is a type of green roof that is frequently implemented on urban buildings, the hydrological characteristics highlighted via this case study are retained to simulate green roofs at the scale of cities. Thanks to the coupled developments of the GREENROOF module and the building energy model (BEM, Bueno et al., 2012) within TEB, impact studies are currently in progress to assess the potential of green roofs (and associated water resources) as a sustainable adaptation strategy for cities in terms of indoor thermal comfort and energy consumption, as well as urban heat island mitigation if coupled to an atmospheric model. Also, through the various options currently available in ISBA, other impacts of green roofs could be studied at the scale of cities, such as, for example, their potential for carbon dioxide sequestration.

Code availability

The GREENROOF module has been implemented within the version 7.3 of the SURFEX platform. For further details, including how to obtain a copy of the source code, see http://www.cnrm.meteo.fr/surfex/.

Appendix A

Fitting *b* coefficient of the water retention curve to observations

A1 Method

The *b* coefficient is involved in a formulation implemented in ISBA (hence called the GREENROOF module) which connects the water potential to the water content in a soil matrix derived by Clapp and Hornberger (1978):

$$\frac{\psi}{\psi_{\mathrm{SAT}}} = \left(\frac{\mathrm{wc}}{\mathrm{wc}_{\mathrm{SAT}}}\right)^{-b}, \tag{A1}$$

where ψ (m) is the water potential for a specific water content wc ($\mathrm{m}^3\,\mathrm{m}^{-3}$), ψ_{SAT} (m) is the water potential at saturation corresponding to the water content at saturation (i.e. the porosity) $\mathrm{wc}_{\mathrm{SAT}}$ ($\mathrm{m}^3\,\mathrm{m}^{-3}$), and *b* is an empirical coefficient, which must be estimated. This formulation when plotted for a soil is called the water retention curve. Following Eq. (A1), the *b* coefficient can be estimated, if observations are available, as the opposite of the slope of the water retention curve expressed as

$$\mathrm{LOG}_{10}\left(\frac{\psi}{\psi_{\mathrm{SAT}}}\right) = -b \times \mathrm{LOG}_{10}\left(\frac{\mathrm{wc}}{\mathrm{wc}_{\mathrm{SAT}}}\right). \tag{A2}$$

Note that for applications of ISBA to natural soils, the *b* coefficient does not need to be user-calibrated because it is estimated within the model after pedotransfer functions based on user-input soil texture (sand and clay fractions). The case of green roof soil-forming materials is different because sand and clay fractions are not really appropriate to characterize them. Hence, for the substrate of the green roof studied for which water contents and matrix potentials were recorded between July and November 2011, the *b* coefficient can be estimated.

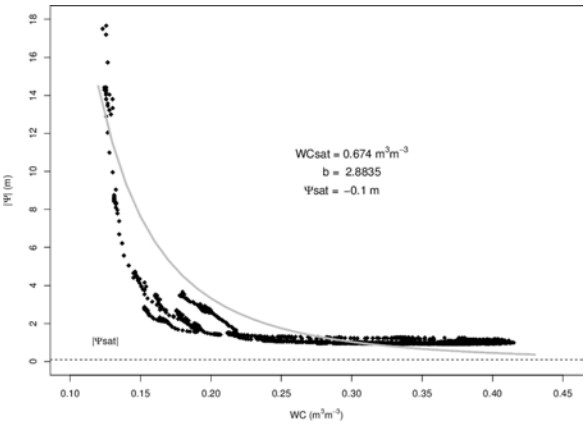


Fig. A1. Fit of water retention curve coefficient and matrix potential at saturation to observations when porosity $= 0.674\,\mathrm{m}^3\,\mathrm{m}^{-3}$.

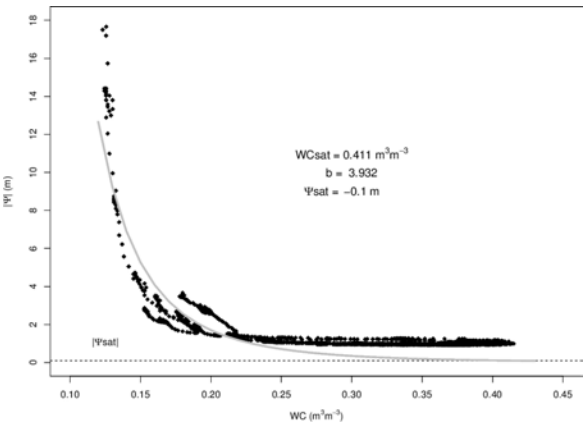


Fig. A2. Fit of water retention curve coefficient and matrix potential at saturation to observations when porosity $= 0.411\,\mathrm{m}^3\,\mathrm{m}^{-3}$.

A2 Fitting *b* coefficients for the case study green roof substrate

The *b* coefficient has been estimated based on Eq. (A2) using a linear regression for two compatible combinations of porosity and saturated water potential tested in the calibration exercise, respectively $0.674\,\mathrm{m}^3\,\mathrm{m}^{-3}$ with -0.1 m for the first combination and $0.411\,\mathrm{m}^3\,\mathrm{m}^{-3}$ with -0.1 m for the second

combination. For the first combination, the linear regression resulted in a fitted b coefficient of 2.9. The same treatment for the second combination (Fig. A2) resulted in a fitted b coefficient of 3.9. The two resulting water retention curves are displayed in Figs. A1 and A2, showing the agreements between the b fitted theoretical curves and the observed curves. For both combinations, the agreement is acceptable, but the Clapp and Hornberger (1978) formulation does not seem able to reproduce the tail of the observed water retention curve – when water content is above 0.20/0.25 $m^3\,m^{-3}$. Also, the second combination appears better than the first at reproducing the inflexion of the observed curve, although it does not capture the points with the lowest water contents/greatest matrix potentials. However, the functioning of water potential probes can be well altered in dry conditions because of the rough texture (and the resulting lack of contact) of the soil-forming material of the green roof substrate. This may question the validity of the high water potential recorded on that green roof plot.

Acknowledgements. The results presented in this publication are the outcome of two research projects: MUSCADE (Modélisation Urbaine et Stratégie d'adaptation au Changement climatique pour Anticiper la Demande et la production Énergétique, ANR-09-VILL-0003) and VegDUD (Rôle du végétal dans le Développement Urbain Durable, ANR-09-VILL-0007). We are grateful for the expertise and support provided by Aaron Boone and Bertrand Decharme (CNRM-GAME) on the ISBA-DF model.

Edited by: D. Lunt



The publication of this article is financed by CNRS-INSU.

References

ACERMI [Association pour la CERtification des Matériaux Isolants: CSTB-LNE]: CERTIFICAT ACERMI No. 04/003/323, Licence no. 04/003/323, 2009.

Alexandri, E. and Jones, P.: Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment: Comparison with experimental results, Build. Environ., 42, 2835–2849, doi:10.1016/j.buildenv.2006.07.004, 2007.

ARGEX: available at: http://www.argex.eu/en/products/characteristics.html (last access: 24 February 2012), 2012.

Bass, B. and Baskaran, B.: Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas, Report no NRCC-46737, Edited by National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Ottawa (Canada), 2003.

Bass, B., Krayenhoff, E. S., Martilli, A., Stull, R. B., and Auld, H.: The impact of green roofs on Toronto's urban heat island, in: Proceedings of the First North American Green Roof Conference: Greening Rooftops for Sustainable Communities, 20–30 May, Chicago, Toronto (Canada), Cardinal Group, 292–304, 2003.

Berghage, R., Beattie, D., Jarrett, A., Thuring, C., and Razaei, F.: Green Roofs for Stormwater Runoff Control, Report no EPA/600/R-09/026, February 2009, edited by: the National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US Environment Protection, Agency, Cincinnati, OH 45268, 2009.

Berndtsson, J. C., Bengtsson, L., and Jinno, K.: Runoff water quality from intensive and extensive vegetated roofs, Ecol. Eng., 35, 369–380, 2009.

BING [Federation of European Rigid Polyurethane Foam Associations]: Thermal insulation materials made of rigid polyurethane foam (PUR/PIR), Properties – Manufacture, Report no 1, 6 October, 2006, available at: http://www.excellence-in-insulation.eu/site/fileadmin/user_upload/PDF/Thermal_insulation_materials_made_of_rigid_polyurethane_foam.pdf, last access: 27 October 2013.

Boone, A.: Modélisation des processus hydrologiques dans le schéma de surface ISBA: Inclusion d'un reservoir hydrologique, du gel et modélisation de la neige, PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2000.

Boone, A., Masson, V., Meyers, T., and Noilhan, J.: The influence of the inclusion of soil freezing on simulations by a soil-vegetation-atmosphere transfer scheme, J. Appl. Meteorol., 39, 1544–1569, 2000.

Bouzouidja, R.: Caractérisation du substrat d'une toiture végétalisée, Master's thesis, University of Lorraine, Nancy, France, 2010.

Bouzouidja, R., Lacroix, D., Séré, G. and Claverie, R.: Experimental determination of hydrological parameters of green roofs, Build. Environ., in preparation, 2012.

Bueno, B., Pigeon, G., Norford, L. K., Zibouche, K., and Marchadier, C.: Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme, Geosci. Model Dev., 5, 433–448, doi:10.5194/gmd-5-433-2012, 2012.

Carter, T. and Butler, C.: Ecological impacts of replacing traditional roofs with green roofs in two urban areas, Cities Environ., 1, 1–17, 2008.

Castleton, H. F., Stovin, V., Beck, S. B. M., and Davison, J. B.: Green roofs; building energy savings and the potential for retrofit, Energ. Buildings, 41, 1582–1591, 2010.

Clapp, R. B. and Hornberger, G. M.: Empirical equations for some soil hydraulic properties, Water Resour. Res., 14, 601–604, 1978.

CRITT Horticole [Centre régional pour l'Innovation et le Transfert Technologique Horticole]: Définition et mesure du LAI, Intégration de la résistance stomatique (RS) dans la formule de l'ETP, Unpublished report, 2012.

Decharme, B., Boone, A., Delire, C., and Noilhan, J.: Local evaluation of the Interaction between Soil Biosphere Atmosphere soil multilayer scheme using four pedotransfer functions, J. Geophys. Res., 116, D20126, doi:10.1029/2011JD016002, 2011.

Del Barrio, E. P.: Analysis of the green roofs cooling potential in buildings, Energ. Buildings, 27, 179–193, 1998.

de Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Meunier, F., Bousquet, P., Tréméac, B., Merchat, M., Poeuf, P., and Marchadier, C.: How much air conditioning can increase air temperatures for

a city like Paris (France)?, Int. J. Climatol., 33, 210–227, doi:10.1002/joc.3415, 2013.

Diak, G. R., Bland, W. L., Mecikalski, J. R., and Anderson, M. C.: Satellite-based estimates of longwave radiation for agricultural applications, Agr. Forest Meteorol., 103, 349–355, doi:10.1016/S0168-1923(00)00141-6, 2000.

Doya, M., Briottet, X., Djedjig, R., and Ouldboukhitine, S.: Description des mesures VEGDUD du 23/09/2011, Unpublished report, 2011.

Durham, A. K., Rowe, D. B., and Rugh, C. L.: Effect of watering regimen on chlorophyll fluorescence and growth of selected green roof plant taxa, HortScience, 41, 1623–1628, 2006.

EEA: European Environment Agency: Urban adaptation to climate change in Europe, Challenges and opportunities for cities together with supportive national and European policies, EEA Report no 2/2012, ISSN 1725-9177, 2012.

Falienor: Résultats de l'analyse de substrat de toiture végétalisée No 1807676 – 14-F TOITURE par le Laboratoire SAS, Issued on 09/03/2010, 2010.

Farouki, O. T.: Thermal properties of soils, Ser. on Rock and Soil Mech., 11, 136 pp., Trans. Tech. Publ., Clausthal-Zellerfled, Germany, 1986.

Feng, C., Meng, Q., and Zhang, Y.: Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs, Energ. Buildings, 42, 959–965, 2010.

Foster, J., Lowe, A., and Winkelman, S.: The value of green infrastructure for urban climate adaptation, Published by the Center for Clean Air Policy, Washington DC, USA, February 2011, 2011.

Getter, K. L. and Rowe, D. B.: The role of extensive green roofs in sustainable development, HortScience, 41, 1276–1285, 2006.

Giguère, M.: Mesures de lutte aux îlots de chaleur urbains. Revue de literature, Direction des risques biologiques, environnementaux et occupationnels, Institut National de Santé Publique, Gouvernement du Québec, Juillet 2009, 2009.

Gill, S. E., Handley, J. F., Ennos, A. R., and Pauleit, S.: Adapting cities for climate change: the role of the green infrastructure, Built Environ., 33, 115–133, 2007.

Hamdi, R. and Masson, V.: Inclusion of a Drag Approach in the Town Energy Balance (TEB) Scheme: Offline 1D Evaluation in a Street Canyon, J. Appl. Meteorol. Clim., 47, 2627–2644, doi:10.1175/2008JAMC1865.1, 2008.

Hilten, R. N., Lawrence, T. M., and Tollner, E. W.: Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D, J. Hydrol., 358, 288–293, 2008.

Jacquet, S.: Performance énergétique d'une toiture végétale au centre-ville de Montréalm Résumé de mémoire, Centre d'Ecologie Urbaine de Montréal, ISBN 978-2-9810129-8-2., available at: http://www.ecologieurbaine.net/node/1214, 2011.

Jaffal, I., Ould-Boukhitine, S.-E., and Belarbi, R.: A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance, Renew. Energ., 43, 157–164, 2012.

Jarvis, P.: The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Biol. Sci., 273, 593–610, 1976.

Jim, C. Y.: Effect of vegetation biomass structure on thermal performance of tropical green roof, Landscape Ecol. Eng., 8, 173–187, doi:10.1007/s11355-011-0161-4, 2011.

Jim, C. Y. and He, H.: Coupling dynamics with meteorological conditions in the green roof ecosystem, Ecol. Eng., 36, 1052–1063, 2010.

Jim, C. Y. and Peng, L. L. H.: Weather effect on thermal and energy performance of an extensive tropical green roof, Urban For. Urban Gree., 11, 73–85, 2011.

Jim, C. Y. and Tsang, S. W.: Modeling the heat diffusion process in the abiotic layers of green roofs, Energ. Buildings, 43, 1341–1350, 2011.

Kalzip®: Kalzip low U-value roof system – achieving 0.10 W/m2/K, Product review, 2010, available at: http://www.kalzip.com/PDF/uk/Kalzip-low-U-value-system.pdf, last access: 27 October 2013.

Kumar, R. A. and Kaushik, S. C.: Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings, Build. Environ., 40, 1505–1511, 2005.

Lawlor, G., Currie, B. A., Doshi, H., and Wieditz, I.: Green roofs: a resource manual for municipal policy makers, Report 65255, Published by Canada Mortgage and Housing Corporation, May 2006, 2006.

Lawrence, D. M. and Slater, A. G.: Incorporating organic soil into a global climate model, Clim. Dynam., 30, 145–160, 2008.

Lazzarin, R. M., Castellotti, F., and Busato, F.: Experimental measurements and numerical modelling of a green roof, Energ. Buildings, 37, 1260–1267, 2005.

Leca®: Declaration of technical specifications BS EN 13055-1 for lightweight aggregate, Issued on 01-01-2009, 2009.

Leca®: available at: http://www.leca.co.uk/33755 (last access: 24 February 2012), 2012.

Lemonsu, A. and Masson, V.: Simulation of a summer urban breeze over Paris, Bound.-Lay. Meteorol., 104, 463–490, 2002.

Lemonsu, A., Grimmond, C. S. B., and Masson, V.: Modeling the surface energy balance of the core of an old Mediterranean city: Marseille, J. Appl. Meteorol., 43, 312–327, 2004.

Lemonsu, A., Bélair, S., Mailhot, J., and Leroyer, S.: Evaluation of the Town Energy Balance Model in Cold and Snowy Conditions during the Montreal Urban Snow Experiment 2005, J. Appl. Meteorol. Climatol., 49, 346–362, 2010.

Lemonsu, A., Pigeon, G., Marchadier, C., and Salagnac, J.-L.: Research report for the VURCA project, Scénarios du bâti & simulations, No ANR-08-VULCN-013 VURCA, 47 pp., 2011.

Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., and Pearlmutter, D.: Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas, Geosci. Model Dev., 5, 1377–1393, doi:10.5194/gmd-5-1377-2012, 2012.

Masson, V.: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, Bound.-Lay. Meteorol., 94, 357–397, 2000.

Masson, V., Champeaux, J. L., Chauvin, F., Meriguet, C., and Pigeon, G.: ECOCLIMAP: a global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models, J. Climate, 16, 1261–1282, 2003.

Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouyssel, F., Brousseau, P., Brun, E., Calvet, J.-C., Carrer, D., Decharme, B., Delire, C., Donier, S., Essaouini, K., Gibelin, A.-L., Giordani, H., Habets, F., Jidane, M., Kerdraon, G., Kourzeneva, E., Lafaysse, M., Lafont, S., Lebeaupin Brossier, C., Lemonsu, A., Mahfouf, J.-F., Marguinaud, P., Mokhtari, M., Morin, S., Pigeon, G., Sal-

gado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V., and Voldoire, A.: The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes, Geosci. Model Dev., 6, 929–960, doi:10.5194/gmd-6-929-2013, 2013.

Mentens, J., Raes, D., and Hermy, M.: Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century?, Landscape Urban Plan., 77, 217–226, 2006.

Mualem, Y.: A new model to predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, Water Resour. Res., 12, 513–522, 1976.

Nardini, A., Andri, S., and Crasso, M.: Influence of substrate depth and vegetation type on temperature and water runoff mitigation by extensive green roofs: shrubs versus herbaceous plants, Urban Ecosyst., 15, 697–708, doi:10.1007/s11252-011-0220-5, 2012.

Noilhan, J. and Planton, S.: A simple parameterization for land surface processes for meteorological models, Mon. Weather Rev., 117, 536–549, 1989.

Oberndorfer, E., Lundholm, J., Bass, B., Coffman, R. R., Doshi, H., Dunnett, N., Gaffin, S., Kohler, M., Liu, K. K. Y., and Rowe, B.: Green Roofs as Urban Ecosystems: Ecological Structures, Functions, and Services, BioScience, 57, 823–833, 2007.

Ochs, F., Heidemann, W., and Müller-Steinhagen, H.: Effective thermal conductivity of the insulation of high temperature underground thermal stores during operation, in: Proceedings of the Ecostock 2006 conference, Richard Stockton College, New Jersey, USA, 31 May–2 June 2006, 2006.

Offerle, B., Grimmond, C. S. B., and Fortuniak, K.: Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central European city centre, Int. J. Climatol., 25, 1405–1419, 2005.

Ouldboukhitine, S.-E., Belarbi, R., Jaffal, I., and Trabelsi, A.: Assessment of green roof thermal behaviour: a couple heat and mass transfer model, Build. Environ., 46, 2624–2631, doi:10.1016/j.buildenv.2011.06.021, 2011.

Palla, A., Gnecco, I., and Lanza, G.: Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof, J. Hydrol., 379, 193–204, 2009.

Palla, A., Gnecco, I., and Lanza, G.: Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic models of a green roof, Hydrol. Process., 26, 73–84, 2012.

Penney, J.: Climate change adaptation in the city of Toronto. Lessons for Great Lakes communities. Clean Air Partnership, Toronto, Ontario, Canada, December 2008, available at: http://www.cleanairpartnership.org/files/Climate%20Change%20Adaptation%20in%20the%20City%20of%20Toronto%20-%20Lessons%20for%20Great%20Lakes%20Communities%20%28Penney,%20J.%202008%29.pdf (last access: 27 October 2013), 2008.

Peters-Lidard, C. D., Blackburn, E., Lian, X., and Wood, E. F.: The effect of soil thermal conductivity parameterization on surface energy fluxes and temperatures, J. Atmos. Sci., 55, 1209–1224, doi:10.1175/1520-0469(1998)055<1209:TEOSTC>2.0.CO;2, 1998.

Pigeon, G., Moscicki, M. A., Voogt, J. A., and Masson, V.: Simulation of fall and winter surface energy balance over a dense urban area using the TEB scheme, Meteorol. Atmos. Phys., 102, 159–172, 2008.

Prata, A. J.: A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the Surface, Q. J. R. Meteorol. Soc., 122, 1127–1151, 1996.

RECTICEL®: available at: http://www.recticelinsulation.fr/nos-produits/powerline/#donnees_techniques (last access: 1 June 2012), 2012.

Rosenzweig, C., Solecki, W. D., Parshall, L., Lynn, B., Cox, J., Goldberg, R., Hodges, S., Gaffin, S., Slosberg, R. B., Savio, P., Dunstan, F., and Watson, M.: Mitigating New York City's Heat Island. Integrating Stakeholder Perspectives and Scientific Evaluation, B. Am. Meteorol. Soc., 90, 1297–1312, 2009.

Sailor, D. J.: A green roof model for building energy simulation programs, Energ. Buildings, 40, 1466–1478, 2008.

SILRES®: available at: www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/6528_EN.pdf (last access: 24 February 2012), 2012.

Simunek, J., Voel, T., and Van Genuchten, M. Th.: The SWMS_2D code for simulating water flow and solute transport on two-dimensional variably saturated media, Version 1.21., Research report No 132, US Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California, 197 pp., 1994.

Simunkek, J., Van Genuchten, M. Th., and Sejna, M.: The HYDRUS_1D Software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat and multiple solutes in variably-saturated media, Version 3.0, HYDRUS Software Series 1. Dept. of Environmental Science, University of California Riverside, Riverside, California, USA, 240 pp., 2005.

Sinclair: available at: http://www.william-sinclair.co.uk/industrial/products/expanded_clay (last access: 24 February 2012), 2012.

SOPREMA®: SOPRALENE® FLAM JARDIN, Fiche technique No DT-10/005_FR CE, 2012a.

SOPREMA®: SOPRALENE® FLAM 180, Fiche technique No DT-09/086_FR CE, 2012b.

Taylor, K. E.: Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram, J. Geophys. Res., 106, 7183–7192, 2001.

USEPA: Reducing Urban Heat Islands: Compendium of Strategies, Green Roofs, 26 pp., available at: http://www.epa.gov/hiri/mitigation/greenroofs.htm, 2008.

Van Genuchten, M. Th.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, Soil Sci. Soc. Am. J., 44, 892–898, 1980.

Van Woert, N. D., Rowe, D. B., Andresen, J. A., Rugh, C. L., and Xiao, L.: Watering regime and green roof substrate design affect Sedum plant growth, HortScience, 40, 659–664, 2005.

Voyde, E., Fassman, E., and Simcock, R.: Hydrology of an extensive living roof under sub-tropical climate conditions in Auckland, New Zealand, J. Hydrol., 394, 384–395, 2010.

Wark, C. G. and Wark, W. W.: Green roof specifications and standards. Establishing an emerging technology, The Construction Specifier, 56, August 2003, n0 8, available at: www.proenviroconstruction.com/pdf/GreenRoof.pdf, 2003.

Wolf, D. and Lundholm, J.T.: Water uptake in green roof microcosms: effects of plant species and water availability, Ecol. Eng., 33, 179–186, 2008.

Yu, C. and Zheng, C.: HYDRUS: software for flow and transport modeling in variably saturated media, Ground Water, 48, 787–791, 2010.

CHAPITRE 6

Méthodologie pour l'évaluation de stratégies de végétalisation pour le confort estival

Contents

6.1 Construction des scénarios 108
6.1.1 Leçons tirées de projets de recherche récents 109
6.1.2 Choix des stratégies de végétalisation 113
6.2 Simulation des scénarios de végétalisation 115
6.2.1 Deux périodes de simulation pour deux types d'analyse 115
6.2.2 Configuration des simulations 115
6.2.3 Nouvelle paramétrisation pour l'arrosage de la végétation 118
6.2.4 Cartes d'occupation du sol spécifiques à chaque scénario 124
6.3 Choix des indicateurs pour évaluer les stratégies simulées 126
6.3.1 Indicateurs de confort thermique 127
6.3.2 Indicateurs d'efficacité énergétique 128
6.3.3 Indicateurs hydrologiques 129

L'évaluation de stratégies de végétalisation a été réalisée par la simulation de scénarios construits à partir des résultats d'études menées à Météo France et à partir de conclusions relevées dans la littérature. Cet exercice est réalisé dans le cadre du projet MUSCADE présenté au Chap. 3) et s'appuie donc sur la méthodologie qui a été mise en place dans ce projet (voir Annexe C). Ces scénarios de végétalisation sont donc évalués pour le domaine d'étude du projet MUSCADE, qui est l'agglomération parisienne.
Contrairement aux autres scénarios de MUSCADE qui sont des scénarios prospectifs à l'horizon de la fin du 21ième siècle et qui simulent, outre l'expansion de la ville au cours du temps en réponse à la dynamique démographique, une combinaison de mesures d'adaptation pour des échéances futures (scénarios climatiques futurs), ces scénarios, concentrés uniquement sur les stratégies de végétalisation et simulés pour les conditions climatiques actuelles (pour s'affranchir de l'évolution de la ville) relèvent davantage de l'étude de sensibilité.

Ils ont pour but de répondre à un ensemble de questions :

- *Quels sont les bénéfices respectifs et combinés de différentes stratégies de végétalisation en termes de confort et de consommation d'énergie ?*
  Notamment, quels sont les bénéfices et inconvénients respectifs de l'augmentation de la végétation de pleine terre et en toiture ?

- *Est-ce qu'une toiture végétalisée permet de diminuer la demande de climatisation en été ?*
  Au point de remplacer la climatisation ?
  Faut-il qu'elle soit arrosée en été pour présenter un intérêt ?

- *A partir de quel pourcentage de couverture végétale voit-on des effets sensibles sur le confort et la consommation d'énergie ?*

- *Et enfin, quelles sont les consommations d'eau associées aux différentes stratégies de végétalisation ?*

Ce chapitre présente d'abord les choix implémentés dans les scénarios de végétalisation(Section 6.1). Il se poursuit par une description détaillée des caractéristiques de simulation (Section 6.2) avant de présenter les indicateurs finalement choisis pour l'analyse des performances des scénarios (Section 6.3).

6.1 Construction des scénarios

L'analyse de l'état de l'art des résultats et limitations de trois études réalisées récemment à Météo France m'a permis d'identifier (i) les options de végétalisation intéressantes en termes d'adaptation ainsi que (ii) les améliorations que je pouvais apporter au modèle pour les simuler.

6.1.1 Leçons tirées de projets de recherche récents

Trois études numériques ont été menées recémment à Météo France afin d'étudier les impacts de différentes stratégies d'adaptation, y compris la végétalisation urbaine, pour l'amélioration du confort thermique et/ou de la consommation énergétique liée à l'usage de la climatisation en contexte de canicule. Il s'agit des études EPICEA (Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne, Desplat et al. (2012)), VURCA (Vulnérabilité URbaine aux épisodes Caniculaires et stratégies d'Adaptation, ANR Viguié et al. (2013)) et plus récemment EUROMED2 (Bidet, 2013). Les deux premières ont pour cas d'étude Paris, la dernière un quartier de Marseille. Tandis que le contexte de canicule était simulée au travers de la canicule 2003 dans les études EPICEA et EUROMED2, l'étude VURCA a analysé différentes classes de canicules futures, extraites des projections climatiques.
Ces stratégies ont été simulées avec le modèle TEB, couplé avec le modèle atmosphérique MESO-NH (Lafore et al., 1998; Stein et al., 2000). Ces trois études ont été réalisées avec des versions de TEB différentes dans lesquelles la description de la climatisation des bâtiments ainsi que les indicateurs pour évaluer les impacts des différentes stratégies étaient plus ou moins détaillés (Table 6.1).

	Version de TEB	**Objectif**	**Indicateur**
EPICEA	TEB-Veg	Confort ext.	Temp. de l'air à 2 m
VURCA	TEB-Veg-BEM	Confort ext. et int.	Nbre d'heures passées en stress thermique
		Energie	Consommation par la climatisation
EUROMED2	TEB-Veg-BEM	Confort ext.	Temp. de l'air à 2 m

Table 6.1 – *Les différents objectifs d'étude et versions de TEB (Chap. 3) des projets EPICEA, VURCA et EUROMED2 (dans l'ordre chronologique de leur réalisation)*

D'une manière générale, la construction de scénarios de végétalisation réalistes est un exercice difficile car il existe peu de bases de données haute résolution pour décrire la végétation urbaine. Ainsi, l'augmentation de la couverture végétale de la ville (Paris) ou du quartier (Marseille) a été réalisée dans ces trois études de façon différente en fonction des objectifs respectifs des études et des échelles spatiales associées :

1. dans VURCA, par une approche tranchée qui consistait à imposer 10 % de végétation au minimum dans chaque maille du domaine (résolution spatiale de 1 km), quite à déconstruire pour construire plus loin ou densifier l'habitat existant, avec pour conséquence un accroissement de la couverture végétale principalement dans Paris intra-muros ;
2. dans EPICEA, par une approche plus réaliste implémentée à une résolution spatiale plus fine (250 m), par la végétalisation de 50 % des rues de Paris (intra-muros) de largeur supérieure à 15 m, avec de la végétation de taille basse ou moyenne (de type pelouse et arbustes) ;
3. dans EUROMED2, par une approche plus fine en cohérence avec l'aménagement d'un quartier (résolution spatiale de 125 m), par la création d'espaces verts et jardins à hauteur de 2 à 26 % de la surface de la maille (principalement sous forme de pelouse, et avec des arbres dans des ratios variables), ainsi que par la création d'un parc urbain arboré de 16 ha (composé à 56 % de pelouse et arbustes, 22 % d'arbres et 22 % de sol nu), avec en son centre la mise à jour d'un ruisseau souterrain.

Les résultats marquants de ces études sont énoncés ci-après :

1 - Des leviers d'action existent pour améliorer le confort extérieur et intérieur en cas de canicule et les bénéfices sont plus élevés s'ils sont combinés

Ces leviers d'action, mis en évidence au travers des différentes études, sont : l'amélioration des performances énergétiques des bâtiments, la modification des propriétés radiatives des toits et des murs et un usage raisonné de la climatisation (ces trois mesures sont regroupées sous le terme de *bâtiments vertueux* par la suite), ainsi que l'augmentation des espaces verts, et dans une moindre mesure l'humidification des chaussées.

VURCA et EPICEA ont montré que les effets de ces leviers d'action variaient en fonction de l'heure de la journée et de la localisation, et qu'ils étaient plus importants si les leviers d'action étaient combinés.

La combinaison de tous les leviers testés dans EPICEA (augmentation et arrosage des espaces verts + modification des propriétés radiatives des bâtiments + humidification des chaussées) a généré une diminution de l'intensité de l'ICU de 1 à 2 °C, avec des baisses de température pouvant aller localement jusqu'à 6 °C. Dans VURCA, la combinaison de trois leviers d'action (bâtiments vertueux + usage modéré de la climatisation + ville plus verte + arrosage des espaces verts) simulée pour une canicule future moyenne, permet de réduire la consommation d'énergie liée à la climatisation de 60 % et de gagner 2 h 15 de plus par jour de confort en extérieur (FIGURE 6.1 de gauche).

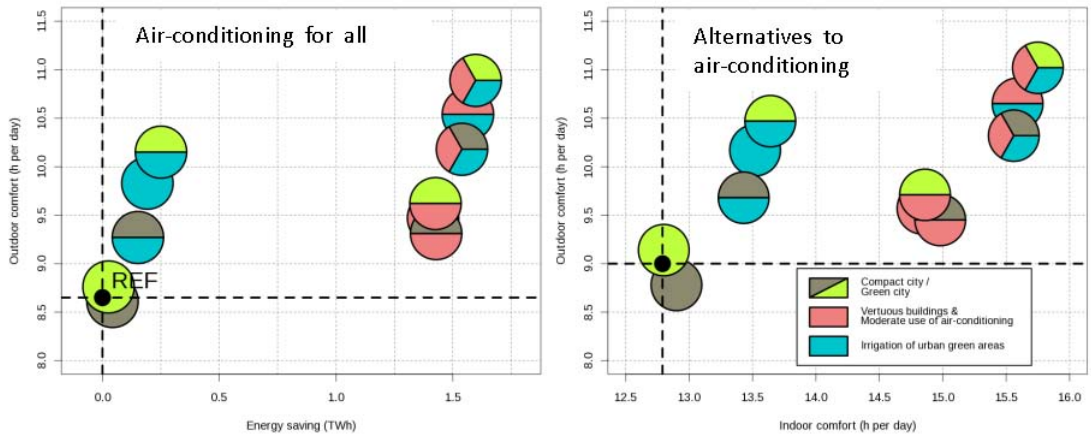


FIGURE 6.1 – *Impacts des différents leviers d'action évalués dans l'étude VURCA (Viguié et al., 2013), en termes de confort extérieur (ordonnée) et d'économie d'énergie pour les scénarios climatisés (gauche, abscisse) et de confort intérieur pour les scénarios non climatisés (droite, abscisse), par rapport à un scénario de référence*

2 - L'utilisation de la climatisation semble incontournable pour assurer un confort thermique acceptable

La simulation de mesures alternatives à la climatisation dans l'étude VURCA, dont les résultats sont présentées sur la FIGURE 6.1 (droite), montre que la combinaison optimale de mesures alternatives (augmentation des espaces verts + arrosage + bâtiments vertueux) ne peut pas se susbtituer totalement à l'usage de la climatisation. En effet, sans climatisation dans les bâtiments, la combinaison optimale de mesures alternatives permet de gagner 3 heures de confort par jour en intérieur mais 1/3 de la journée est quand même passée en stress thermique élevé (i.e. avec un indice de confort supérieur à 32°C).

3 - La végétation est une mesure d'adaptation efficace seulement si elle est arrosée C'est une conclusion des études EPICEA et VURCA. Elle s'explique par le fait que non arrosée, la végétation ne peut pas jouer son rôle de régulateur thermique par le biais de l'évapotranspiration. Ce résultat, illustré au travers de l'étude EPICEA sur la FIGURE 6.2, fait émerger une autre problématique, celle de la consommation d'eau (donc de la ressource en eau). Dans ces deux études, l'arrosage est simulé de façon très simple : le contenu en eau des réservoirs de sols est forcé à 50 % afin que les plantes ne soient jamais en situation de stress hydrique et qu'elles puissent ainsi évapotranspirer, ce afin d'évaluer l'impact maximal de la végétation sur le micro-climat urbain.

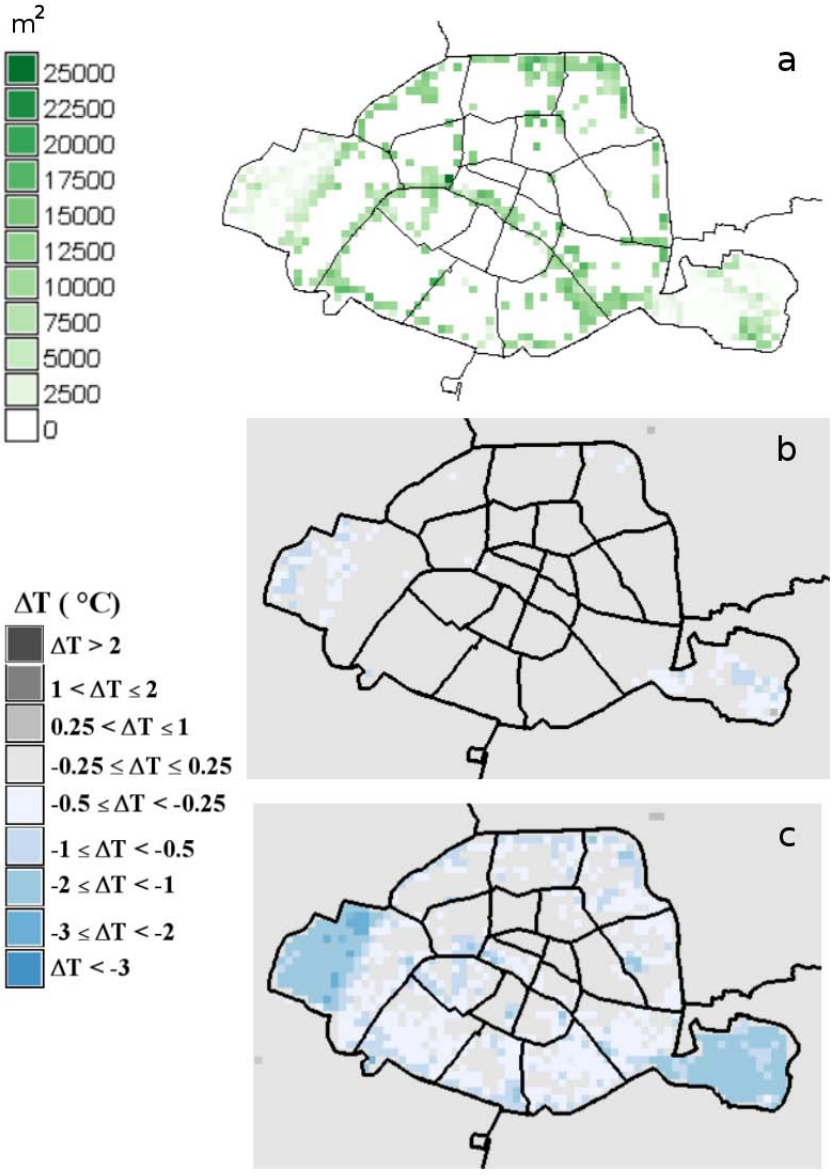


FIGURE 6.2 – *Anomalie de température moyenne nocturne à 2 m générée par l'augmentation de végétation dans les rues de Paris intra-muros (a) - cas sans arrosage (b) et cas avec arrosage (c) pendant la canicule 2003. Source : EPICEA (Desplat et al., 2012)*

4 - La création de parcs urbains est efficace pour diminuer la température localement

C'est un résultat qui a été mis en évidence par l'étude EUROMED2 (Bidet, 2013) qui a étudié les impacts respectifs à fine échelle de plusieurs mesures, notamment la végétalisation, sur le micro-climat d'un quartier de Marseille, en vue de son ré-aménagement (FIGURE 6.3 (a) et (b)). Parmi les mesures évaluées, la création du parc a un effet important sur le rafraîchissement des températures (entre - 2.5 et - 4 °C en moyenne), effet qui peut être amplifié s'il est combiné avec la présence d'un ruisseau (entre - 3 et - 6 °C) FIGURE 6.3 (d)). Par contre, cet effet, qui est en moyenne plus marqué la nuit que le jour (avec un maximum entre 1h et 5h du matin), est très localisé, avec un rayon d'influence sur les quartiers alentours ne dépassant pas les 100 m, comme le montre la FIGURE 6.3 (c). Si la création d'*îlots de fraicheur* est recherchée, alors les parcs urbains sont une bonne solution pour l'amélioration du confort extérieur de jour comme de nuit. Par contre, ce type d'aménagement n'a qu'un effet limité dans l'espace. Pour un effet mieux réparti, même si plus faible, mieux vaut distribuer la végétation sur l'ensemble du territoire.

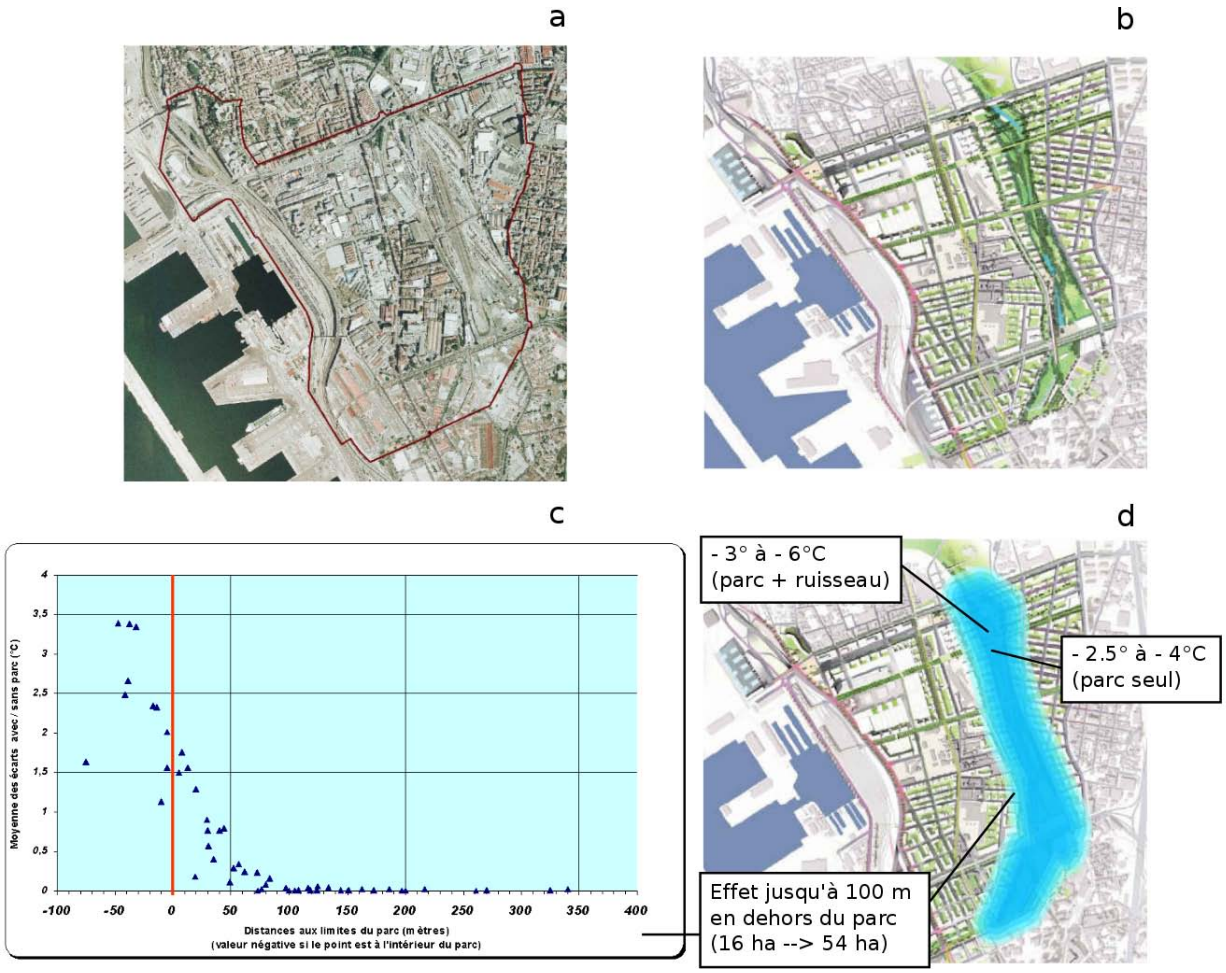


FIGURE 6.3 – *Influence relativement localisée d'un parc urbain dans le cadre du projet de réaménagement EUROMED2 à Marseille. Source : Bidet (2013)*

6.1.2 Choix des stratégies de végétalisation

Même si des études empiriques, comme on l'a vu au Chap. 2, mettent en évidence l'intérêt de la végétation pour améliorer le climat localement, il est difficile d'en tirer des recommandations pratiques à l'attention des décideurs quant à *où*, *combien* et *quel type de végétation* implanter à l'échelle d'une ville. Les méthodes numériques basées sur la simulation de plusieurs stratégies de déploiement de la végétation permettent d'évaluer, par rapport à des critères ou indicateurs d'intérêt (section 6.3), lesquelles sont les plus intéressantes.
J'ai donc construit mes scénarios en retenant les stratégies de végétalisation efficaces identifiées dans les études précédentes et en incorporant les recommandations exprimées dans la littérature au travers d'études empiriques. Certaines caractéristiques de la végétalisation de la ville sont fixes alors que d'autres varient, générant ainsi un ensemble de scénarios (répertoriés dans la TABLE 6.2) permettant d'évaluer la sensibilité de la ville en termes de confort climatique/thermique et de consommation d'énergie à différentes stratégies de végétalisation.

Premièrement, hormi deux scénarios, la climatisation, mesure indispensable au confort intérieur même en présence de mesures alternatives (*leçon 3*), est généralisée à tous les bâtiments. Pour être en cohérence avec la démarche vertueuse que représente la végétalisation de la ville, une utilisation raisonnée de la climatisation est imposée dans tous les scénarios par l'application d'une température de consigne de 26°C, en accord avec la règlementation technique 2012 (RT2012).

Deuxièmement, aux vues de la littérature (voir Chap. 2) et de l'étude EUROMED2 (*leçon 4*), il apparaît plus efficace (et aussi plus démocratique) de répartir la végétation sur l'ensemble de la ville. Cette stratégie est appliquée dans les scénarios de deux façons : par l'installation de toitures végétalisées extensives (TVE) et par l'augmentation de la végétation de pleine terre.
Pour ce qui est des TVE, elles sont implémentées seulement sur les bâtiments de faible hauteur (suite aux conclusions de Ng et al. (2012)) et pour lesquels l'architecture ou la règlementation le permettraient. Parmi les types de bâtiments simulés dans TEB (Annexe C), cela exclut les bâtiments haussmanniens pour des questions d'esthétique et les tours de bureaux pour leur inefficacité. Restent donc les bâtiments de faible hauteur, à toit plat ou présentant une faible pente, c'est-à-dire les bâtiments individuels et collectifs et les hangars.
Afin d'augmenter la végétation au sol, un inventaire est tout d'abord réalisé à partir de la carte initiale de l'agglomération parisienne établi dans MUSCADE (Annexe C) pour répertorier les surfaces qui ne sont ni de la nature, ni de l'eau, ni du bâti, ni de la voirie. Dans une ville réelle, cela correspond aux trottoirs, parkings, places, rond-points, etc... que je qualifie de *potentiellement disponibles* pour la végétation. Dans les scénarios de végétalisation du sol (scénarios *VEG* de la TABLE 6.2), une fraction de ces surfaces disponibles est donc récupérée pour être transformée en espaces verts, tandis que le reste est traité comme la voirie.
L'intérêt de parcs urbains (*leçon 4*) combinés à ces scénarios pourrait être évalué, mais il sort du cadre de l'étude de sensibilité que je me suis fixé. Ce genre de scénario prospectif trouvera plus sa place dans le cortège des scénarios intégrés de MUSCADE.

Une troisième stratégie, inspirée par les résultats d'EPICEA et VURCA (*leçon 2*) et généralisée à tous les scénarios, consiste à arroser de façon systématique l'ensemble de la végétation de pleine terre en été (espaces verts publics, jardins privés) mais selon un protocole plus réaliste. La paramétrisation mise en place pour cet arrosage est présentée plus loin dans ce chapitre.

Finalement, pour étudier l'impact de stratégies relevées dans la littérature comme ayant des effets différents (voir Chap. 2), j'ai choisi de faire varier dans mes scénarios :

- le type de dispositif végétal implémenté, en simulant trois dispositifs : végétation basse à moyenne (pelouse et arbustes), arbres, et toitures végétalisées
- la fraction de couverture végétale (par le biais de trois taux de végétalisation différents)
- le recours ou non à l'arrosage pour les toitures végétalisées

Les scénarios résultant de ces combinaisons sont présentés dans la Table 6.2.

Climatisation	**% des surfaces de sol disponibles végétalisées et type de végétation**	**TVE**	**Irrigation TVE**	**Scénario**
Bureaux	-	-	-	REF
Bureaux	-	✓	-	TVE
Généralisée	-	-	-	AC
Généralisée	-	✓	-	AC-TVE
Généralisée	-	✓	✓	AC-TVEirr
Généralisée	25 % répartis en : 100 % pelouse et arbustes	-	-	AC-V25
Généralisée	50 % répartis en : 100 % pelouse et arbustes	-	-	AC-V50
Généralisée	75 % répartis en : 100 % pelouse et arbustes	-	-	AC-V75
Généralisée	25 % répartis en : 60 % pelouse et arbustes 40 % arbres	-	-	AC-V25*
Généralisée	50 % répartis en : 60 % pelouse et arbustes 40 % arbres	-	-	AC-V50*
Généralisée	75 % répartis en : 60 % pelouse et arbustes 40 % arbres	-	-	AC-V75*
Généralisée	75 % répartis en : 60 % pelouse et arbustes 40 % arbres	✓	✓	AC-V75*-TVEirr

Table 6.2 – *Scénarios permettant d'évaluer l'impact des différentes options de végétalisation*

Dans les scénarios *V-25-50-75*, respectivement 25 %, 50 % ou 75 % des surfaces au sol disponibles sont récupérés et transformés en espaces verts, ce qui correspond à l'échelle de la ville, à une augmentation respective de 11, 22 et 34 % de la totalité de la végétation urbaine, avec des variations locales plus élevées. L'option peu réaliste de verdir 100 % des surfaces disponibles n'a pas été simulée.

6.2 Simulation des scénarios de végétalisation

6.2.1 Deux périodes de simulation pour deux types d'analyse

Deux types d'analyse sont réalisées afin d'évaluer l'efficacité des stratégies de végétalisation à l'échelle de la ville :

1. Dans un premier temps, l'efficacité des scénarios de végétalisation pour l'amélioration du confort climatique et de la consommation d'énergie des étés futurs est évaluée, à l'instar de l'étude CLIM2 présentée au Chap. 4, au travers de l'étude de la canicule 2003 (8 - 13 août). Pour ce faire, une simulation est réalisée entre le 1er janvier et le 31 août 2003 afin de permettre une période de spin-up d'au moins sept mois pour les variables hydrologiques avant l'étude de la canicule.

2. Dans un second temps, l'impact de ces scénarios est évalué à l'échelle de l'année entière. Pour cela, une simulation sur une période de 11 ans (1998-2008) est réalisée, la première année servant de spin-up pour l'équilibre des variables hydrologiques. Ainsi, il est possible de quantifier, mensuellement ou bien par saison, sur une série de 10 ans, les indicateurs de confort, d'énergie et d'hydrologie, et ainsi d'évaluer quels sont les impacts des mesures d'adaptation principalement imaginées pour répondre aux enjeux estivaux sur le reste de l'année.

6.2.2 Configuration des simulations

Cette étude d'évaluation de l'impact de scénarios de végétalisation sur l'agglomération parisienne étant réalisée dans le cadre du projet MUSCADE, la configuration générale pour leurs simulations (domaine simulé et version de TEB utilisée) est celle établie pour ce projet. Elle est décrite Annexe C. En résumé, dans MUSCADE, le tissu de bâti urbain simulé est décrit par cinq typologies de bâtiments qui sont les bâtiments Haussmanniens, les bâtiments collectifs, les maisons individuelles, les tours de bureaux et les hangars (pour décrire les bâtiments commerciaux et agricoles). A ces types de bâti sont associés, en fonction de leurs dates de construction, des caractéristiques radiatives et thermiques (Annexe C), ainsi que des usages (résidentiel, bureau, commercial, industriel/agricole) qui permettent d'activer ou non certains équipements (comme la climatisation ou le chauffage) en fonction d'un calendrier d'occupation.

Domaine de simulation

Le domaine de simulation correspond donc à celui établi dans MUSCADE. Relativement étendu pour permettre l'expansion spatiale de la ville dans les scénarios prospectifs de MUSCADE, c'est un domaine carré de 100 km de côté centré sur la ville Paris, qui compte 10 000 points de grille de résolution spatiale 1 km. Il s'étend de 1.702 à 3.055°E en longitude et de 48.405 à 49.312°N en latitude, couvrant Paris intra-muros, la totalité de la Petite Couronne et une partie de la Grande Couronne. La résolution spatiale des données descriptives de la surface en entrée du modèle est de 250 m, mais afin de réduire les coûts de simulation, elles sont agrégées à la résolution spatiale de 1 km en conservant les typologies de bâtiments majoritaires dans chaque maille de 1 km et en moyennant les données géométriques du bâti. Les limites de ce domaine sont illustrées sur la carte de la Figure 6.4.

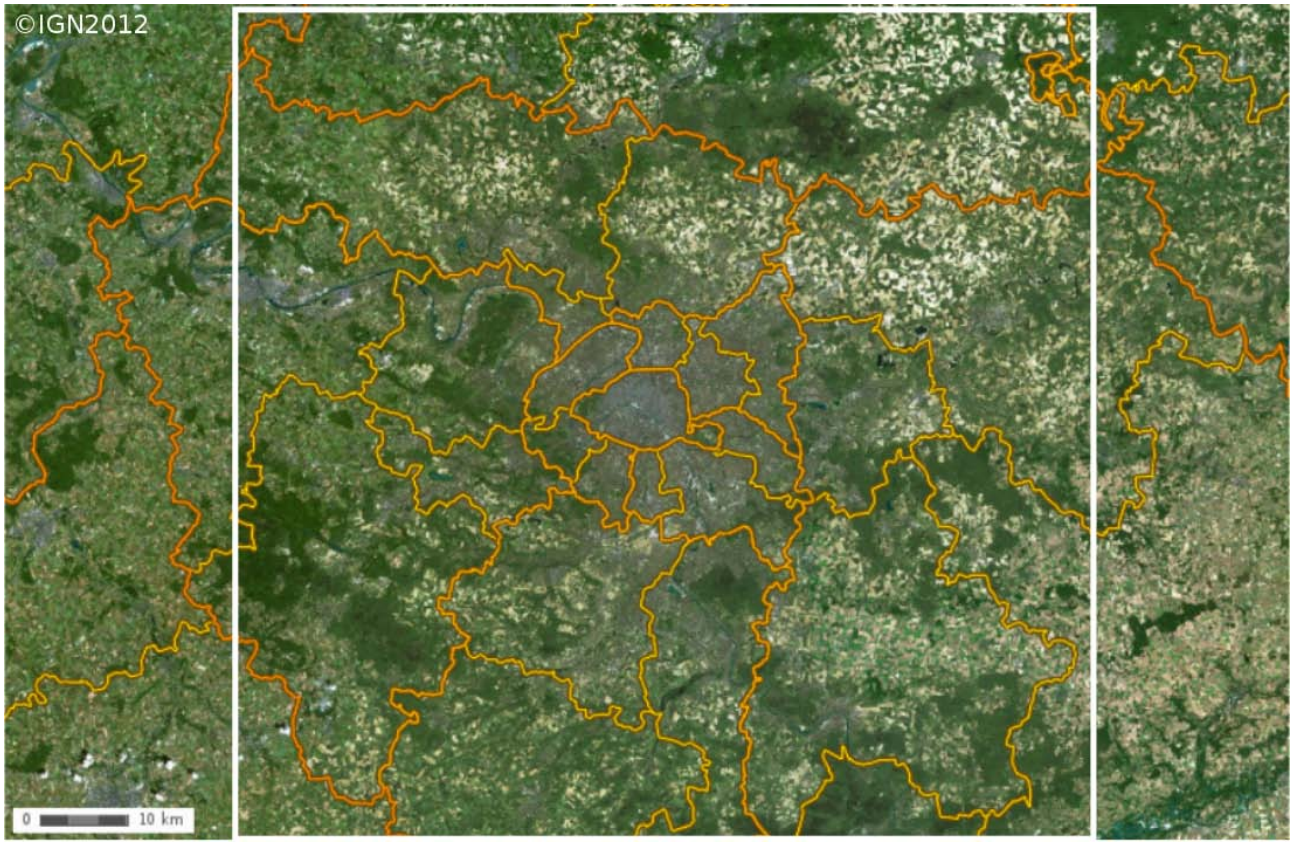


FIGURE 6.4 – *Domaine de simulation MUSCADE (encadré blanc). Source : www.geoportail.gouv.fr/mentions-legales*

Version de TEB utilisée

La configuration des modèles utilisés pour la simulation des scénarios de végétalisation, basée sur la configuration MUSCADE, est décrite en Annexe C dans la section C.1. Dans cette configuration, les paramétrisations détaillées de TEB pour la végétation (**Veg** avec la nouvelle paramétrisation **GREENROOF**), l'énergétique du bâtiment (**BEM**), et le confort thermique (**UCTI**), ainsi que le calcul dynamique de l'îlot de chaleur urbain (**UHI**) sont activées. Finalement, une nouvelle paramétrisation a été développée pour permettre une représentation plus réaliste de l'arrosage pratiqué en ville. Elle est décrite dans le paragraphe suivant.

Caractéristiques des TVE et de la végétation de pleine terre

Les TVE simulées en toiture consistent en une pelouse de sédum (dont les caractéristiques sont établies au Chap. 5 dans la TABLE 2 de l'article), un substrat de 10 cm et une couche de drainage de 5 cm. L'exercice de calibration de GREENROOF, décrit au même chapitre a permis de retenir un jeu de caractéristiques hydriques et thermiques pour des couches de substrat et de drainage typiques des TVE. Celles-ci sont rappelées dans la TABLE 6.3.
Pour la végétation de pleine terre, les caractéristiques des deux types de végétation simulés (pelouse/arbustes et/ou arbres) sont répertoriées dans la TABLE 6.4.

	Couche de substrat	**Couche de drainage**
Porosité (m^3 m^{-3})	0.674	0.900
Conductivité hydraulique à la saturation (m s^{-1})	2.16 10^{-3}	3.32 10^{-3}
Potentiel matriciel à la saturation (m)	- 0.100	- 0.010
Coefficient b (-)	3.9	2.7
Teneur en eau à la capacité au champ (m^3 m^{-3})	0.37	0.37
Teneur en eau au point de flétrissement (m^3 m^{-3})	0.15	0.15
Conductivité thermique du sol sec (W m^{-1} K^{-1})	0.15	0.09
Capacité calorifique du sol sec (J m^{-3} K^{-1})	1 342 000	331 500

TABLE 6.3 – *Caractéristiques des sols des TVE utilisées pour tous les scénarios de MUSCADE*

	Pelouse/arbustes	**Arbres**
Fraction de végétation qui recouvre le sol (-)	0.95	0.95
LAI (-)*	0.5/0.5/0.5/1/2/2/2/2/2/2/1/1	0.5/0.5/0.5/1/2/3/3/3/3/2/1/1
Albédo IR (-)	0.3	0.25
Albédo VIS (-)	0.1	0.05
Emissivité (-)	0.97	0.97
Conductance stomatique minimum (s m^{-1})	40	150
Hauteur des arbres (m)	-	10

TABLE 6.4 – *Caractéristiques des deux types de végétation de pleine terre simulés. * Le LAI évolue mensuellement (les valeurs indiquées sont celles de janvier à décembre).*

Choix des équipements des bâtiments et initialisation de BEM

Dans MUSCADE, il est possible de tenir compte de l'évolution technologique des bâtiments (matériaux et équipements). Un certain nombre de paramètres décrivant le niveau technologique du bâti, notamment le type et la performance des équipements des bâtiments, sont à choisir parmi une liste d'options disponibles dans TEB afin d'initialiser les paramétrisations qui les décrivent dans le BEM.

Le niveau technologique que j'ai choisi pour la simulation des scénarios de végétalisation correspond à celui du scénario dit *vertueux* de MUSCADE pour être en cohérence avec l'aspect vertueux des mesures de végétalisation. Certains paramètres ont toutefois été choisis différents, comme le coefficient de performance des climatiseurs (COP) auquel j'ai imposé une valeur plus actuelle (2.5) que vertueuse (5).
La TABLE 6.5 rappelle les processus/équipements représentés dans BEM et les valeurs auxquelles elles ont été initialisées dans les scénarios de végétalisation.

Equipement	**Paramètre descriptif**	**Valeur (Usage du bâti)**
Charges internes	Flux	5 W m^{-2} (Résidentiel)
		14 W m^{-2} (Bureaux, Commercial, Industriel)
	Fraction de chaleur latente	20 % (Résidentiel)
		10 % (Bureaux, Commercial, Industriel)
Chauffage	Temp. de consigne	21 °C (*vertueuse*)
Climatisation	Temp. de consigne	26 °C (*vertueuse*)
	Performance (COP)	2.5
Protection solaire	Active	Brise-soleil (Bureaux)
		Volets (Résidentiel)
	Facteur solaire	0.120 m (Bureaux)
		0.025 m (Résidentiel)
Ventilation sanitaire	Type	VMC
	Taux de renouvellement d'air	0.7 vol h^{-1}
Sur-ventilation	Active	Résidentiel
	Type d'ouverture	Naturelle et automatique
	Taux de renouvellement d'air	Calculé par TEB

TABLE 6.5 – *Caractéristiques des équipements des bâtiments communes à tous les scénarios*

6.2.3 Nouvelle paramétrisation pour l'arrosage de la végétation

Choix des systèmes d'arrosage urbains

Plusieurs dispositifs d'arrosage semblent co-exister dans les villes, des systèmes d'arrosage *intégrés automatiques* aux arrosages *manuels* ou *véhiculés* laissés à l'appréciation des arroseurs, jardiniers, ou particuliers. Il est par conséquent difficile de dresser un état de l'art des pratiques d'arrosage en ville, d'autant plus qu'elles sont rarement documentées. Ceci étant, deux systèmes semblent relativement répandus :

— les réseaux d'irrigation par aspersion classique (sprinklers ou asperseurs, FIGURE 6.5)
— les dispositifs d'irrigation par goutte à goutte (en surface ou enterrés, FIGURE 6.6)

Les premiers, qui reproduisent le phénomène naturel de la pluie tout en maîtrisant l'intensité et la hauteur de la précipitation, sont bien adaptés à l'arrosage des espaces verts en pleine terre ; ils nécessitent des conditions de pression moyenne à forte (de 3 à 6 bars). Les seconds consistent à apporter régulièrement et de façon localisée au niveau du sol ou des racines, la juste quantité d'eau dont la plante a besoin. Les plus utilisés sont les goutteurs intégrés et les goutteurs en ligne qui permettent de délivrer l'eau à faible débit (0.5 à 2 bars), dans des conditions de régime turbulent.

En toiture, ces deux systèmes semblent relativement répandus et la société SOPREMA (2011) recommande de moduler les fréquences et débits d'arrosage en fonction du climat local, comme l'indique la FIGURE 6.7. La végétation étant plus exposée au vent en toiture qu'au sol, et donc rapidement soumise au stress hydrique, les systèmes de goutteurs me semblent plus appropriés. Ils présentent l'avantage de minimiser les pertes d'eau par évaporation directe depuis le feuillage, et leur faible débit devrait permettre de réduire les pertes d'eau par ruissellement et percolation dans les couches de sol des toitures.

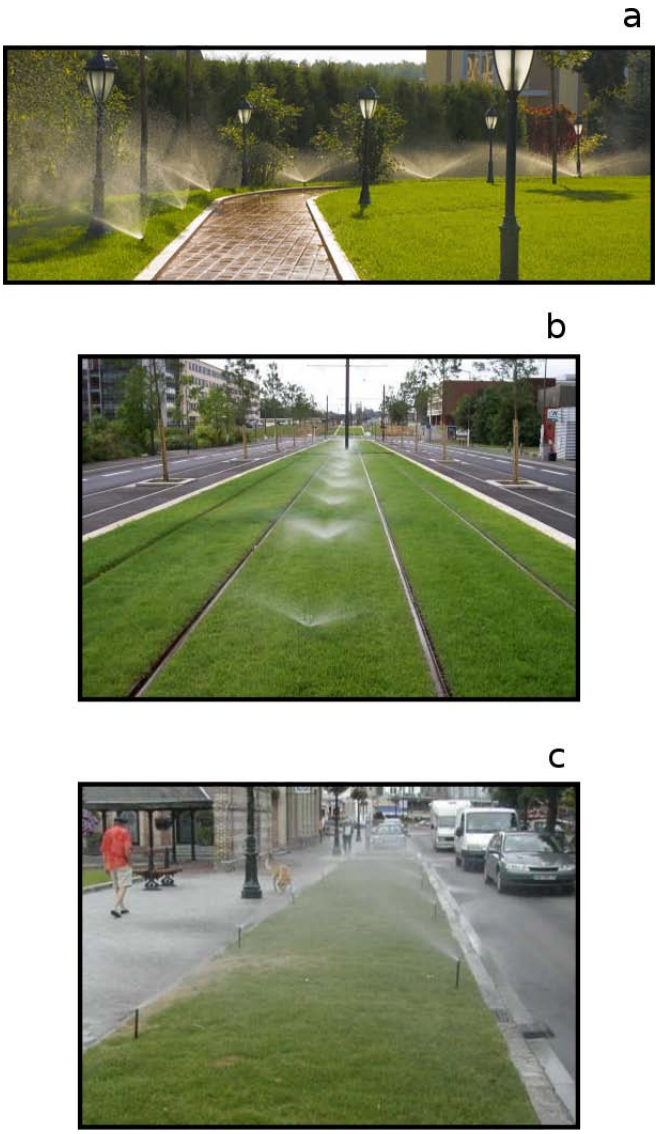


FIGURE 6.5 – *Exemples de réseaux d'asperseurs installés en milieu urbain, dans un square (a), sur des lignes de tranway (b), dans une rue (c). Source : www.sirev.fr*



FIGURE 6.6 – *Exemple de goutteurs en ligne installés pour une toiture végétalisée (Source : sirev.fr)*

Pour les espaces verts urbains de pleine terre, même si des réseaux de goutteurs sont installés (notamment au pied des arbres), ce sont les systèmes d'irrigation par aspersion classique qui sont les plus répandus actuellement pour la végétation basse ou de taille moyenne (pelouses et buissons) .

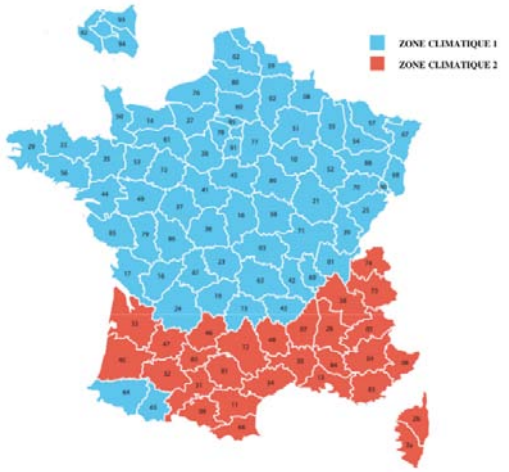


FIGURE 6.7 – *Zones climatiques considérées pour l'arrosage des TVE, d'après SOPREMA (2011)*

Sur la France, en zone climatique nord (en bleu), SOPREMA (2011) recommande un arrosage des TVE une fois par quinzaine de juin à août seulement en cas de sécheresse (deux semaines consécutives sans pluies significatives) alors qu'en zone sud (en rouge) un arrosage estival systématique de mai à septembre, une fois par semaine est préconisé.

Dans les deux cas, des apports de 15, 25 et 30 L m^{-2} sont conseillés selon l'épaisseur du substrat de culture (respectivement 8, 12 et 15 cm) et des goutteurs préconisés (avec des débits de l'ordre de 10 m^3 h^{-1} pour 4 bars de pression).

Finalement, les options d'irrigation que j'ai choisies ici pour décrire l'arrosage de la végétation urbaine dans TEB pour l'agglomération parisienne sont les suivantes :

- l'arrosage n'est activé que pendant les mois d'été (de juin à août) ;
- il est géré par des systèmes automatiques qui permettent de contrôler des volumes et fréquences d'arrosage pré-établis, afin d'assurer une gestion raisonnée de l'eau ;
- l'irrigation des toitures végétalisées extensives est effectuée par des dispositifs de goutteurs installés en surface ;
- l'irrigation des espaces verts de pleine terre est assurée par des réseaux d'aspersion classique.

Présentation de la paramétrisation

Concrètement, les systèmes d'aspersion sont paramétrés dans TEB-Veg par modification de la quantité de précipitations qui est apportée aux espaces verts de pleine terre selon :

$$P_{global} = P + (Irrig \times \frac{24}{\Delta t_{Irrig}}) = P_{feuillage} + P_{sol} \tag{6.1}$$

où P, le taux de précipitations naturelles, *Irrig* celui qui serait apporté par l'irrigation en continu, et leur somme P_{global}, sont exprimés en kg m^{-2} s^{-1}. Le terme Δt_{Irrig} permet de répartir le taux d'arrosage continu sur une durée d'irrigation à choisir (exprimée en h). Notons que dans le modèle **TEB-Veg**, une fraction de cette quantité d'eau est ensuite interceptée par le feuillage ($P_{feuillage}$), alors que le reste est directement reçu par le sol (P_{sol}).

Contrairement aux asperseurs, les goutteurs installés en surface pour l'irrigation des toitures végétalisées modifient seulement l'apport d'eau pour le sol. Par conséquent, dans le modèle, cet apport d'eau est réalisé au moment où le bilan est fait de la quantité d'eau qui atteint le sol (Equation 6.1), après interception par la végétation (2 ° terme) et ruissellement depuis les plantes (3 ° terme), au travers d'un taux d'irrigation *Irrig* (kg m^{-2} s^{-1}) et d'une durée d'irrigation à déterminer (Δt_{Irrig} exprimée en h).

$$P_{sol} = P_{nat} - f_{veg} P_{nat} + R_{veg} + Irrig \times \frac{24}{\Delta t_{Irrig}} \tag{6.2}$$

Les choix des taux d'irrigation et des fréquences et durées d'arrosage sont présentés ci-après.

Choix des volumes et des calendriers d'arrosage

Mon objectif est de paramétrer dans TEB une gestion raisonnée de l'arrosage urbain, qui permette de maximiser l'utilisation de l'eau par les plantes et ainsi générer du confort thermique par le biais de leur évapotranspiration. Pour cela, on peut jouer sur trois paramètres : l'heure de la journée à laquelle l'arrosage est déclenchée, sa durée, ainsi que le volume total d'eau apportée. Une étude de sensibilité a donc été réalisée pour déterminer au mieux ces paramètres, en simulant avec TEB-Veg+GREENROOF la météorologie de l'année 2003.

Que ce soit en toiture ou en pleine terre, il est préférable d'arroser en dehors des périodes d'apports solaires élevés, donc plutôt en fin de journée et tôt le matin. Le choix étant fait d'une fréquence d'arrosage quotidienne, trois programmes d'arrosage différents, de durées respectives 3 h (tard le soir), 6 h (tard le soir et tôt le matin) et 8 h (la nuit) en supposant des faibles débits, ont été testés (Figure 6.8), afin d'optimiser l'utilisation de l'eau par les plantes (en maximisant pour les TVE les pertes par ruissellement et percolation) et maximiser leur pouvoir évapotranspirant, .

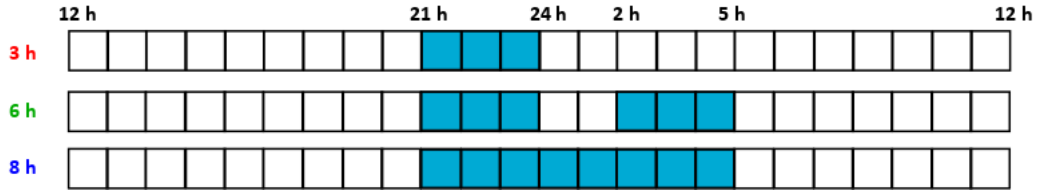


Figure 6.8 – *Trois programmes d'arrosage testés pour l'arrosage automatique de la végétation urbaine*

J'ai utilisé les recommandations de SOPREMA (2011) en accord avec l'épaisseur de substrat paramétrée dans GREENROOF (10 cm), pour déduire un taux d'irrigation idéal pour les TVE de 25 L m^{-2} semaine^{-1} (ce qui correspond dans l'Equation 6.1 à un taux P_{irrig} d'environ 4 10^{-5} kg m^{-2} s^{-1}.

Pour le volume d'eau idéal à apporter aux espaces verts, je suis partie du volume d'irrigation idéal pour les TVE et j'ai vérifié par la simulation d'un des trois programmes d'arrosage, s'il y avait un intérêt à doubler ou tripler ce volume. Le volume initial ne montrant pas de limitation de l'évapotranspiration par rapport aux volumes doublés et triplés, j'en ai conclu que la teneur en eau du sol avec le volume initial n'était pas limitante pour le processus d'évapotranspiration piloté par les conditions climatiques environnantes. J'ai donc conservé pour les espaces verts le même volume d'arrosage que pour les TVE, et les trois programmes (Figure 6.8) ont été testés simultanément sur les espaces verts et TVE.

Les résultats obtenus sur les flux de chaleur latente (correlés au *pouvoir rafraichissant*) de la végétation sont présentés sur les FIGURES 6.9 et 6.10.

L'irrigation des espaces verts génère :

- une augmentation du latent de l'ordre de 100 W m^{-2} en milieu de journée, sans effet marqué du programme d'arrosage
- une augmentation du latent la nuit, au moment où l'on irrigue, de l'ordre de 50 W m^{-2}, avec une durée d'augmentation qui dépend de la durée d'arrosage, donc un effet supérieur pour les programmes de 8 et 6 h que pour celui de 3 h

  Ces rejets de chaleur latente sont potentiellement intéressants pour le rafraîchissement de la ville la nuit, qui constitue une période de récupération pour les habitants en cas de canicule.

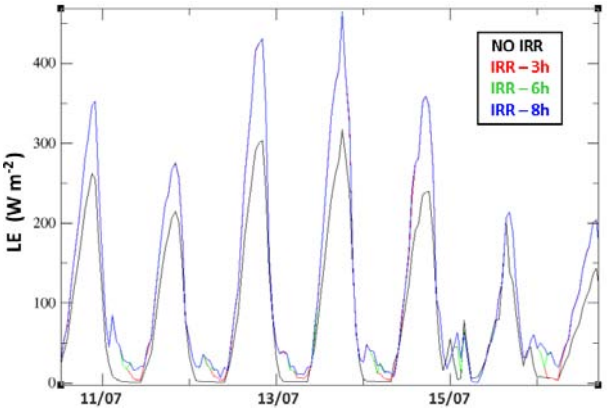


FIGURE 6.9 – *Flux de chaleur latente (W m^{-2}) simulés pour les espaces verts de pleine terre pour 6 journées de juillet 2003, sans (NO IRR) et avec irrigation pendant 3 h (IRR-3h), 6 h (IRR-6h) ou 8 h (IRR-8h)*

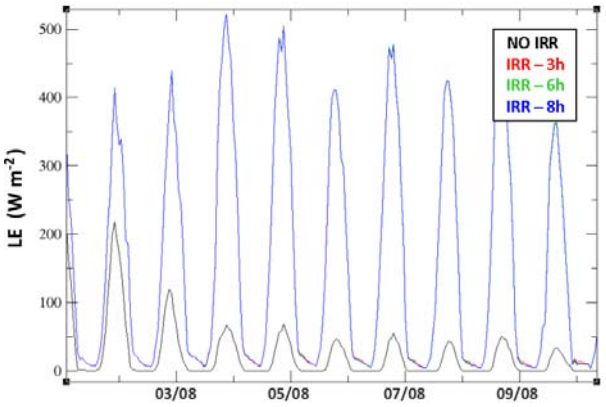


FIGURE 6.10 – *Flux de chaleur latente (W m^{-2}) simulés par les TVE pour 9 journées d'août 2003, sans (NO IRR) et avec irrigation pendant 3 h (IRR-3h), 6 h (IRR-6h) ou 8 h (IRR-8h)*

Pour les TVE, l'effet de l'irrigation sur le latent est plus marqué que pour les espaces verts de pleine terre (+ 300 à 400 W m^{-2} en moyenne) mais le programme d'irrigation semble avoir peu d'impact, du fait, je suppose, que l'apport d'eau au système est beaucoup plus élevé que pour les jardins en rapport à l'épaisseur du réservoir de sol et que par conséquent, la teneur en eau du sol reste suffisante pour évaporer plus longtemps.

Dans un second temps, afin d'optimiser l'utilisation de l'eau par les TVE, les quantités d'eau ruisselées (du fait de la percolation et du drainage à la sur-saturation) par les TVE soumises au différents programmes d'arrosage ont été comparées et sont présentées sur la FIGURE 6.11, ainsi que les cumuls estivaux dans la TABLE 6.6.

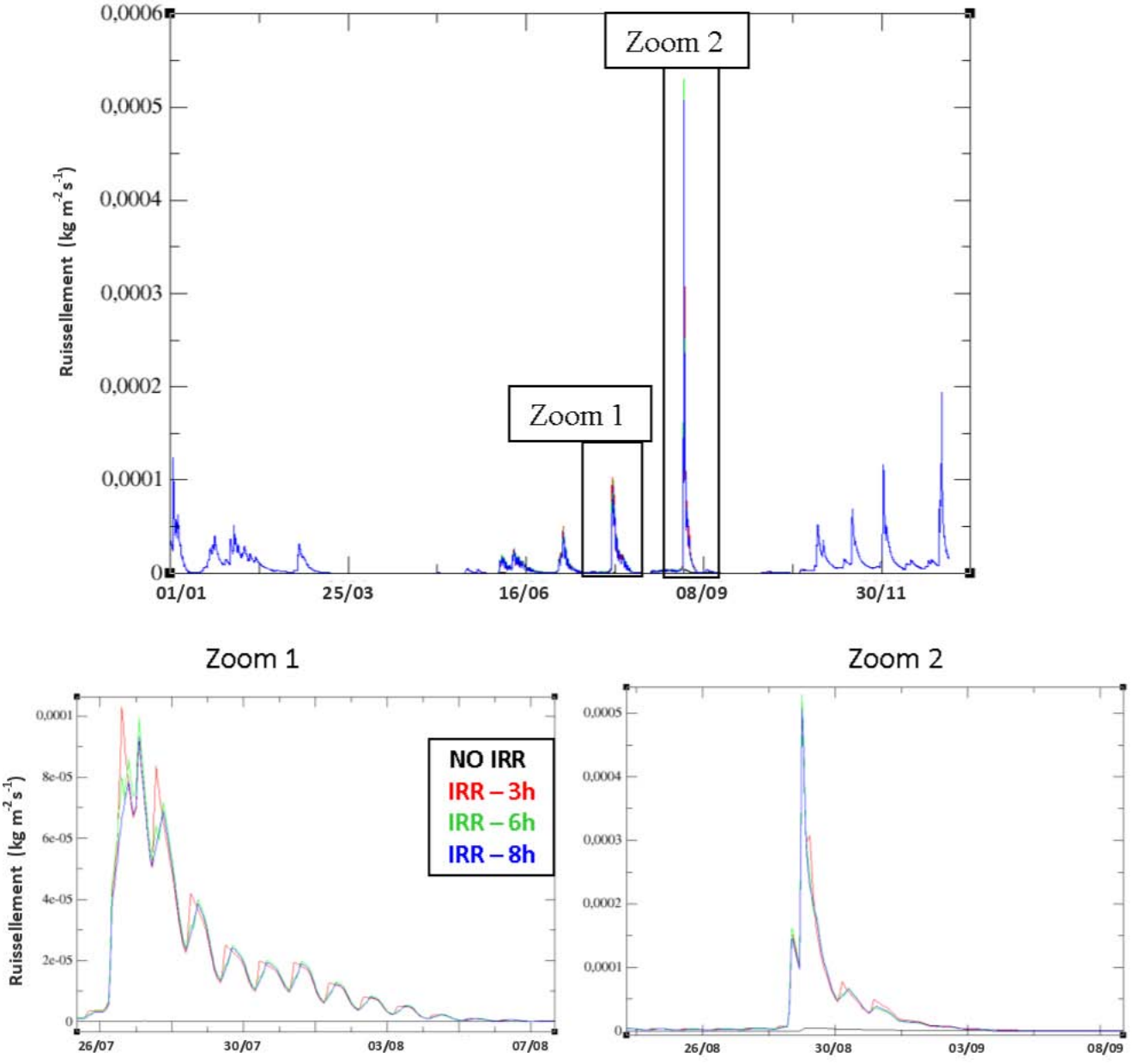


FIGURE 6.11 – *Quantités d'eau ruisselées par les TVE simulées pour 2003 (en kg m^{-2} s^{-1}), sans (NO IRR) et avec irrigation estivale pendant 3 h (IRR-3h), 6 h (IRR-6h) ou 8 h (IRR-8h)*

NO-IRRIG	IRRIG-3h	IRRIG-6h	IRRIG-8h
0.8	76.7	77.3	72.8

TABLE 6.6 – *Impact des trois programmes d'arrosage estival sur les quantités d'eau ruisselées par les TVE (en kg m^{-2}) en été*

Les quantitées d'eau ruisselées en été par les TVE sont supérieures quand celles-ci sont arrosées, montrant qu'une partie de l'eau est perdue par le substrat au cours de l'arrosage donc pour les plantes. La tendance du modèle GREENROOF à sur-estimer le ruissellement des TVE peut en partie expliquer ce résultat (Chap. 5).

En cumul estival, le programme d'arrosage nocturne sur 8 h est celui qui tend à minimiser sensiblement les pertes d'eau pendant l'arrosage. C'est ce que montrent aussi les deux zooms présentés sur la FIGURE 6.11 pour visualiser les impacts respectifs des programmes d'arrosage sur les pics de ruissellement estivaux, avec :

- un effet, et de l'irrigation, et de sa répartition horaire sur les pertes d'eau par ruissellement
- un ruissellement généralement plus rapide et plus fort quand l'apport d'eau est fourni en 3 h que quand il est réparti sur 6 ou 8h
- un ruissellement marginalement plus faible pour le programme d'arrosage nocturne de 8 h

Les résultats obtenus sur le pouvoir évapotranspirant de la végétation et sur les pertes d'eau en toitures m'ont amené à choisir un programme d'arrosage nocturne de 8 h pour l'ensemble de la végétation ($\Delta t_{irrig} = 8\ h$ dans les ÉQUATIONS 6.2 et 6.1) car il permet potentiellement de maximiser le confort nocturne tout en minimisant les pertes d'eau des toitures végétalisées.

6.2.4 Cartes d'occupation du sol spécifiques à chaque scénario

L'occupation du sol à l'échelle du domaine de simulation se répartit en surfaces naturelles, artificielles et espaces d'eau qui sont présentées sous forme de cartes 2D en ANNEXE C. Pour le schéma de ville TEB (surfaces urbanisées), l'occupation du sol est fractionnée en espaces bâtis, en espaces verts et en réseau de routes. Les fractions de ville et de bâti, qui ne sont pas modifiées par les scénarios de végétalisation, sont présentées sur la FIGURE 6.12 (respectivement a et b), ainsi que le type de bâtiment dominant en chaque point du tissu urbain (FIGURE 6.12 c). Celles d'espaces verts urbains de pleine terre (publics et privés) correspondant à la transformation partielle des surfaces urbaines disponibles évaluées dans les sept scénarios de végétalisation de pleine terre (listés dans la TABLE 6.2 sont présentées FIGURE 6.13.

La transformation de 25 % des surfaces disponibles en espaces verts dans les scénarios *VEG25* correspond à une augmentation de 11 % de la végétation urbaine totale à l'échelle du domaine

présenté FIGURE 6.13. Dans les cas 50 et 75 %, cela correspond à des augmentations respectives de 22 et 34 %.

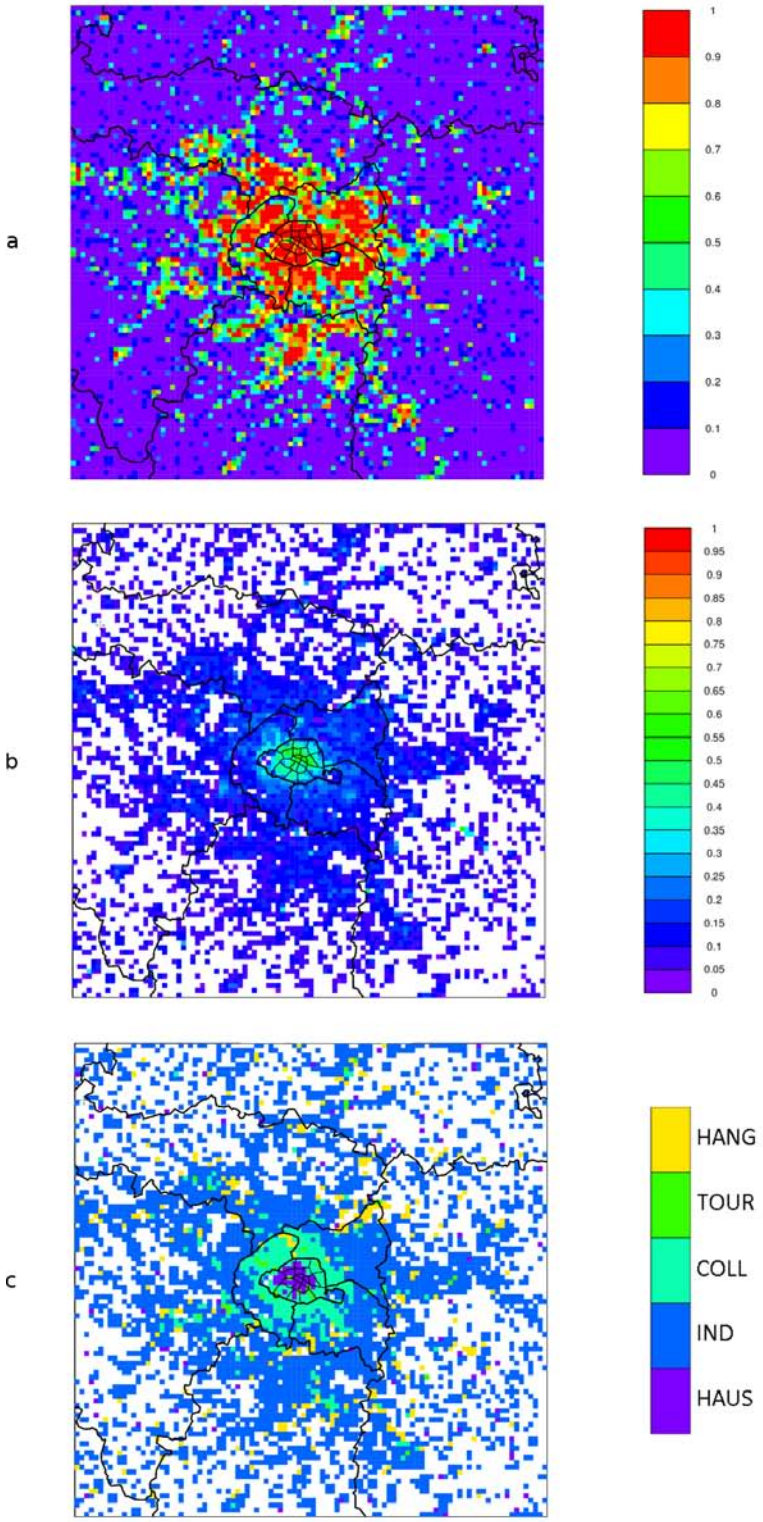


FIGURE 6.12 – *Fraction de la surface artificielle qualifiée d'urbaine (a), fraction de bâtiments au sein de la surface urbaine (b), et type de bâti associé (c), dans chaque maille du domaine de surface 250 par 250 m² (données communes à tous les scénarios de végétalisation)*

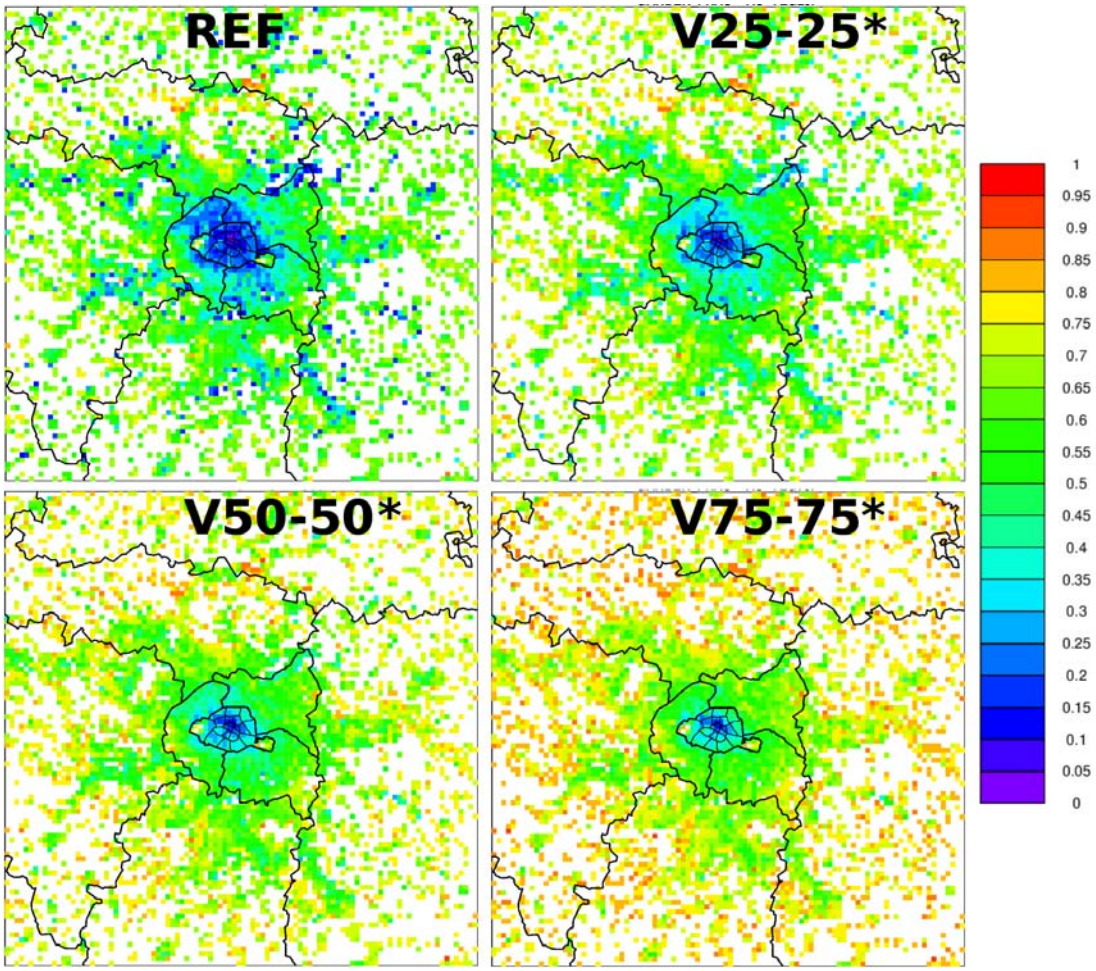


FIGURE 6.13 – *Cartes de la fraction de surface urbaine végétalisée pour la référence (REF) et les scénarios de végétalisation de pleine terre (V25-25*, V50-50*, V75-75*). Les zones blanches représentent les mailles du domaine non urbanisées.*

Cette méthode de reconquête de l'espace disponible par la végétation génère des variations notables de la fraction de végétation, même dans Paris intra muros et dans la Petite Couronne. Dans Paris intra-muros, cela s'illustre par des fractions passant de 0 - 0.25 (*REF*) à
0.1 - 0.3 (*VEG25-25**) puis 0.2 - 0.35 (*V50-50**), et 0.2 - 0.45 (*V75-75**), en dehors des Bois de Vincennes et de Boulogne.

De la même façon que pour le sol, l'occupation des toitures dans les scénarios *GR* peut être représentée en 2D par le biais de la fraction de toiture végétalisée (= 1) (FIGURE 6.14).

6.3 Choix des indicateurs pour évaluer les stratégies simulées

Trois types d'indicateurs sont utilisés pour évaluer les différentes stratégies de végétalisation. Aux indicateurs décrivant les performances thermo-énergétiques (déjà utilisés dans le projet VURCA) sont ajoutés deux indicateurs *hydrologiques*, le premier afin de chiffrer le coût de ces performances en termes de consommation d'eau, le second afin d'évaluer un bénéfice annexe de la végétation, à savoir celui de diminuer le ruissellement de surface.

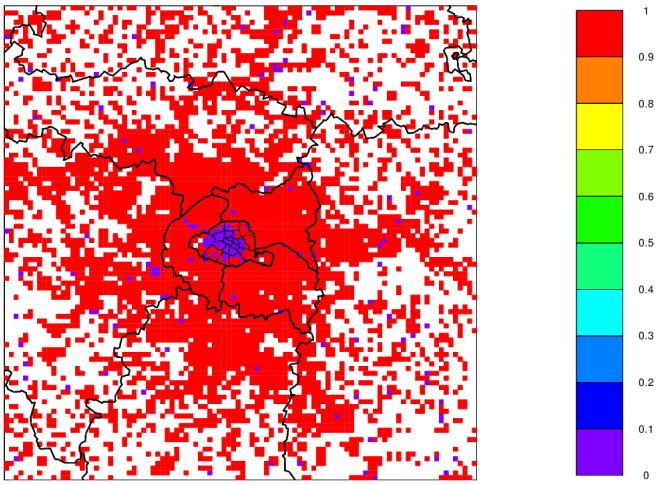


FIGURE 6.14 – *Carte indiquant en rouge la localisation des bâtiments dont les toitures sont végétalisées dans les scénarios avec TVE. Les zones blanches représentent les mailles du domaine où il n'y a pas de bâtiments.*

6.3.1 Indicateurs de confort thermique

Dans la majorité des scénarios simulés, l'usage et les caractéristiques de la climatisation et du chauffage sont identiques pour tous les types de bâtiments qui en disposent. Par conséquent, il est peu intéressant de s'intéresser au confort thermique intérieur qui est identique quelque soit le scénario, puisque piloté par les même caractéristiques. Par conséquent, mon analyse des performances respectives des différentes stratégies de végétalisation se concentre sur l'évaluation du confort extérieur. Celui-ci peut être évalué au travers de deux diagnostics directement calculés dans TEB, à savoir la température de l'air dans la rue (à 2 m) ainsi qu'une température ressentie qui détermine le niveau de confort thermique du corps humain (universal thermal climate index, UTCI, présenté au Chap. 3). Comme on l'a vu précédemment, cet UTCI peut être calculé dans TEB en fonction du micro-climat environnant (rayonnement, température et humidité de l'air, vent) pour trois types d'environnement : pour une personne à l'intérieur des bâtiments ou à l'extérieur à l'ombre ou à l'extérieur au soleil. Pour l'étude du confort extérieur, les deux UTCI extérieurs des différents scénarios seront utilisés pour calculer le nombre d'heures passées dans les différentes classes de stress thermique selon l'échelle physiologique présentée au Chap. 3 (Section 3.1.6) et rappelée FIGURE 7.7.

Echelle UTCI (°C)	Niveau de stress
au-dessus de + 46	Stress thermique extrême
+ 38 à + 46	Stress thermique très élevé
+ 32 à + 38	Stress thermique élevé
+ 26 à + 32	Stress thermique modéré
+ 9 à + 26	Pas de stress thermique

FIGURE 6.15 – *Echelle d'UTCI pour les niveaux de stress thermique associés aux températures élevées. Source : www.utci.org*

6.3.2 Indicateurs d'efficacité énergétique

Les indicateurs énergétiques calculés sont exprimés soit en quantité d'**énergie finale** (EF) c'est-à-dire effectivement consommée, soit en quantité d'**énergie primaire** (EP), c'est-à-dire disponible dans la nature avant les étapes de production, transformation, ou transport qui occasionnent des pertes. Cette dernière forme d'énergie, utilisée dans les diagnostics de performance énergétique (DPE) des bâtiments, permet de comparer les différentes stratégies d'adaptation par rapport aux objectifs énergétiques fixés pour les bâtiments dans le Grenelle de l'Environnement (FIGURE 6.16).

Finalement, les consommations d'énergie cumulées exprimées en Wh EF et en Wh EP m^{-2} de plancher sont calculées pour les deux types d'analyse (canicule et saisonnière). Un troisième indicateur, la puissance maximale journalière, est utilisé pour comparer les stratégies d'adaptation exclusivement en contexte de canicule :

Consommation d'énergie cumulée en $Wh\ EF$

La consommation d'énergie cumulée (EF_{cum}) pendant l'épisode de canicule ou bien chaque mois pour l'analyse saisonnière est calculée (en Wh EF) à partir des diagnostics de consommation énergétique cumulée pour la climatisation, et pour le chauffage qui sont stockés au pas de temps horaire (pour l'étude de la canicule) ou tri-horaire (pour les 11 ans de simulation) par le modèle. Cette consommation d'énergie est représentée soit sous forme de cartes 2D soit intégrée spatialement sur toute la ville, en pondérant par la densité de population, fournie par GENIUS (pour 2008) à la résolution de 250 m puis interpolée à la résolution de 1 km.

Consommation d'énergie cumulée en $Wh\ m^{-2}$ de plancher

Cette consommation d'énergie notée EP_{cum} est calculée de la même façon que EF_{cum} mais elle est rapportée à la surface de plancher (qui est calculée par le modèle en fonction de la hauteur et du type de chaque bâtiment) et exprimée en EP en faisant l'hypothèse que la totalité de l'énergie consommée est de l'énergie électrique. En France, on estime qu'en moyenne *2.58 kWh d'énergie primaire est nécessaire pour fournir 1 kWh d'électricité*, par conséquent, j'ai utilisé un coefficient de conversion de 2.58 pour passer de l'énergie finale simulée par le modèle à l'énergie primaire.

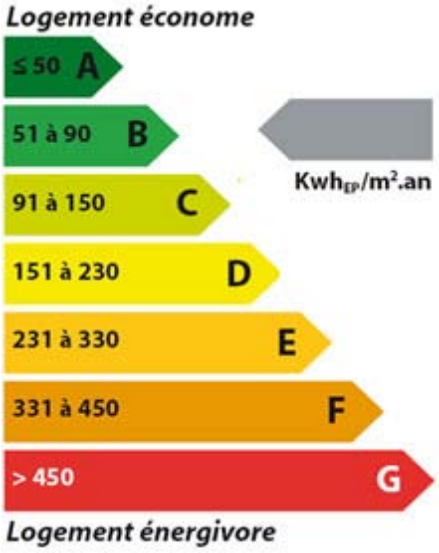


FIGURE 6.16 – *Etiquettes énergétiques du Grenelle*

Comme pour la consommation d'EF_{cum}, EP_{cum} peut-être représentée sous forme de cartes 2D ou

intégrée spatialement sur toute la ville. Les valeurs cumulées annuelles peuvent finalement être comparées aux étiquettes du Grenelle (FIGURE 6.16).

Puissance maximale journalière

Calculé pour comparer l'efficacité des scénarios de végétalisation en contexte de canicule, cet indicateur, noté P_{max}, correspond à la valeur instantanée maximale de la puissance consommée par la ville quotidiennement. Elle permet de quantifier le pic de consommation électrique atteint au cours de la canicule et donc la quantité d'EF maximale (en W) que la ville risque de devoir fournir à un instant donné en cas de canicule. Pour déterminer cette valeur, la consommation énergétique intégrée sur l'ensemble du domaine est calculée à chaque pas de temps de sortie du modèle (horaire) puis le maximum au cours de l'évènement est retenu.

6.3.3 Indicateurs hydrologiques

Deux indicateurs hydrologiques sont utilisés pour comparer les différentes stratégies simulées :

- la consommation d'eau associée à l'arrosage estival de la végétation urbaine de pleine terre et en terrasse, intégrée spatialement sur tout le domaine (A_{urb}, en m^3)
- le ruissellement de surface intégré spatialement sur l'ensemble du domaine et cumulé sur différentes périodes : quelques jours dans le cas de la canicule 2003, un mois dans le cas de l'étude saisonnière (R_{urb}, en m^3)

CHAPITRE 7

Performances des stratégies de végétalisation

Contents

7.1 Impact de la végétalisation sur le confort thermique extérieur . . . 133
7.1.1 Comparaison de la température de l'air dans les rues 133
7.1.2 Conséquences en termes de confort thermique 141
7.2 Impact de la végétalisation sur les consommations d'eau et d'énergie 150
7.3 Conclusions 153

L'objectif de l'étude présentée dans ce chapitre est d'analyser l'impact de plusieurs stratégies de végétalisation pour l'amélioration du confort climatique et de la consommation énergétique, dans un contexte de canicule. Ces stratégies varient en termes de type de végétation (pelouse avec ou sans arbres, sédums), de surface de végétation, et de sa localisation (au sol et/ou en toiture). La méthodologie générale de cette étude, présentée en détail au chapitre précédent et synthétisée sur la FIGURE 7.1, est basée sur la canicule du 8 au 13 août 2003.

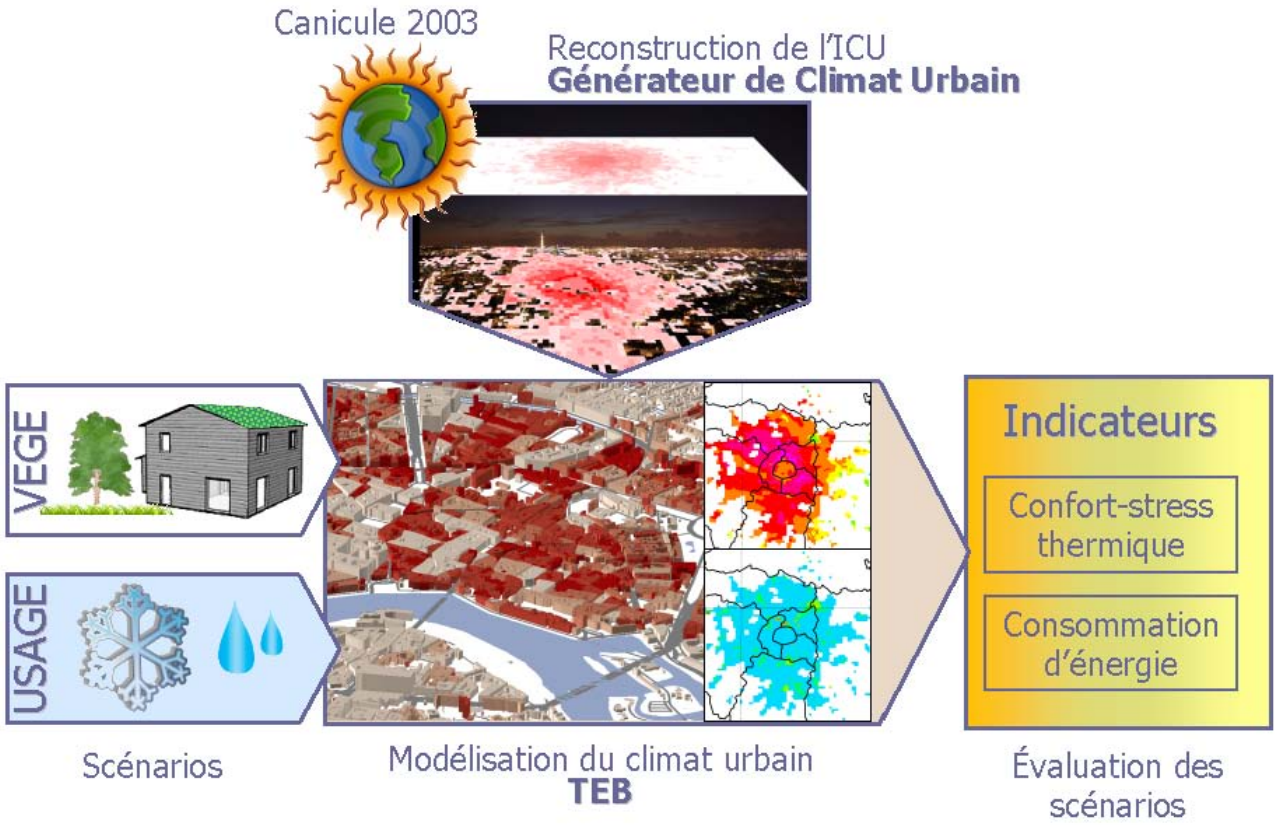


FIGURE 7.1 – *Méthodologie pour l'analyse des performances des différentes stratégies de végétalisation*

La majorité des scénarios mettant en jeu les différentes stratégies de végétalisation faisant l'hypothèse d'une climatisation généralisée pour assurer le confort thermique intérieur des habitants, l'évaluation du confort thermique engendré par les différentes stratégies s'est concentrée sur le confort thermique extérieur. Cet aspect a été évalué, dans le premier paragraphe de ce chapitre, en comparant pour les différents scénarios, les températures simulées dans les rues et les niveaux de confort thermique associés. Dans la deuxième partie, la consommation d'énergie due à l'usage de la climatisation pour maintenir le confort intérieur (le jour dans les bureaux, le reste de la journée dans les habitations) associé à chaque stratégie de végétalisation est évaluée et est mise en relation avec celle d'eau résultant des pratiques d'arrosage.

7.1 Impact de la végétalisation sur le confort thermique extérieur

7.1.1 Comparaison de la température de l'air dans les rues

Les impacts respectifs des scénarios de végétalisation sur la température de l'air sont évalués à partir des températures moyennes (T_{moy}), minimales (T_{min}) et maximales (T_{max}) journalières simulées pour les six jours de canicule à 2 m dans les rues de Paris. L'anomalie de température engendrée par chaque scénario *vert* en chaque point de grille du domaine est calculée, pour chaque jour de canicule, comme la différence entre la température simulée par le scénario et celle simulée par la simulation de référence, *REF* pour le scénario *TVE*, *AC* pour les scénarios verts climatisés. Pour comparer plus facilement les performances respectives de chaque scénario en contexte de canicule, ces anomalies journalières sont ensuite moyennées sur les six jours de canicule et présentées sous la forme de cartes 2D.

Impact de la végétation en toiture

L'impact de la végétalisation des toitures des bâtis Collectif, Individuel et Hangar, tel que défini au Chap. 6, sur les températures des rues est présenté sur la FIGURE 7.2. Trois résultats ressortent de l'analyse de ces anomalies de température :

— l'installation de TVE non arrosées (scénarios *TVE* ou *AC-TVE*) sur les toits de Paris génère une légère augmentation des températures nocturnes (de l'ordre de + 0.25°C) et un léger rafraîchissement des températures diurnes (de l'ordre de - 0.25°C) sur l'ensemble de l'agglomération parisienne ;

— **l'arrosage nocturne des TVE** (scénario *AC-TVEirr*) **permet un rafraîchissement diurne** sensiblement plus élevé **de l'ordre de - 0.25 à - 0.5°C**, qui varie en fonction du type de bâti, de - 0.25°C pour le bâti Individuel à - 0.5°C pour le bâti Collectif ;

— l'arrosage des TVE génère au centre de Paris (bâti Haussmannien sans TVE) un léger rafraîchissement nocturne (- 0.25°C).

Le réchauffement nocturne induit par l'implantation de TVE non arrosées provient essentiellement des différences d' albédos prescrits pour les toitures initiales concernées (0.2) et celui des sédums implantés sur les TVE (0.154). Les TVE absorbent donc plus de rayonnement incident et stockent plus de chaleur du fait de la plus grande épaisseur de la toiture par ajout de sol. En conséquence, une plus grande quantité de chaleur est restituée vers l'atmosphère la nuit par rayonnement IR. Quand les TVE sont arrosées, les même processus rentrent en jeu mais comme l'apport d'eau permet en journée des pertes de chaleur par évapotranspiration un peu plus conséquentes (entraînant un rafraîchissant sensiblement plus élevé en journée) que quand elles ne sont pas arrosées, la quantité de chaleur stockée en journée et ensuite restituée à l'atmosphère la nuit est moindre, entraînant même un rafraîchissement jusque dans les zones de bâti Haussmannien. Ce rafraîchissement au centre de la ville provient de la paramétrisation mise en place dans TEB-UHI pour la spatialisation dynamique du champ de température (voir Chap. 3 section 3.1.5).

Finalement, les scénarios *TVE* ou *AC-TVE* étant équivalents en termes de confort thermique extérieur, et le scénario *TVE* ne répondant pas au niveau de confort thermique intérieur nécessaire, la suite de l'analyse se concentre sur les scénarios de végétalisation avec climatisation généralisée (scénarios avec *AC*).

Impact de la végétation au sol

Les anomalies de températures générées par l'augmentation de végétation au sol (systématiquement arrosée) sont présentées sur les cartes des Figures 7.3 et 7.4. Ces scénarios engendrent, comme on s'y attendait, **un rafraîchissement plus marqué que celui engendré par la végétation en toiture** avec trois résultats notables :

1. Tout d'abord, le rafraîchissement nocturne et diurne n'ont pas la même ampleur selon le type de scénarios, avec un **rafraîchissement maximum observé en journée pour les scénarios avec ajout de végétation basse à moyenne** (*AC-V25/50/75*) **et la nuit pour ceux avec ajout de végétation de hauteur mixte (60 % basse à moyenne et 40 % d'arbres)**. Alors qu'il est logique que le rafraîchissement soit optimum en journée quand la végétation est photosynthétiquement active (et donc son pouvoir évapotranspirant à son maximum), comme c'est le cas quand on augmente la végétation basse dans les scénarios *AC-V25/50/75* (Figure 7.3), on obtient un rafraîchissement plus fort la nuit qu'en journée avec les scénarios *AC-V25/50/75** (avec arbres) qui s'explique par le calendrier d'arrosage et le type de végétation. En effet, quand les arbres sont arrosés, la nuit, une grande partie de l'eau interceptée par le feuillage et le sol est directement évaporée au moment de l'arrosage et n'est donc plus disponible en journée, générant moins de rafraîchissement. Ce phénomène se produit aussi pour la végétation basse, avec cependant moins d'ampleur du fait de la moindre surface d'interception du feuillage et des coefficients de transfert turbulents plus faibles rapport à la plus faible hauteur de la végétation.

2. Dans les deux types de végétation simulés au sol (avec et sans arbre), **le rafraîchissement observé est d'autant plus élevé que l'augmentation de surface végétalisée est importante**. Cela s'illustre par des rafraîchissements diurnes moyens (ΔT_{moy}, Figure 7.3) allant de 0 à - 0.25°C et à - 0.5°C localement pour *AC-V25*, de 0 à - 0.5°C et -1°C par endroits pour *AC-V50*, et de -0.25 à -2°C pour *AC-V75*. De la même façon (ΔT_{moy}, Figure 7.4), *AC-V25** génère un rafraîchissement diurne moyen de l'ordre de - 0.25/- 1°C, *AC-V50** de l'ordre de - 0.5/- 1°C et jusqu'à - 2°C par endroits, et *AC-V75** de l'ordre de - 0.5/- 2°C avec le rafraîchissement maximum dans les zones de bâti Collectif.

3. Ces résultats suggèrent que **pour des augmentations de surfaces végétalisées identiques, le pouvoir rafraîchissant de la végétation composée à 40 % d'arbres est plus efficace que celui de la végétation basse.**

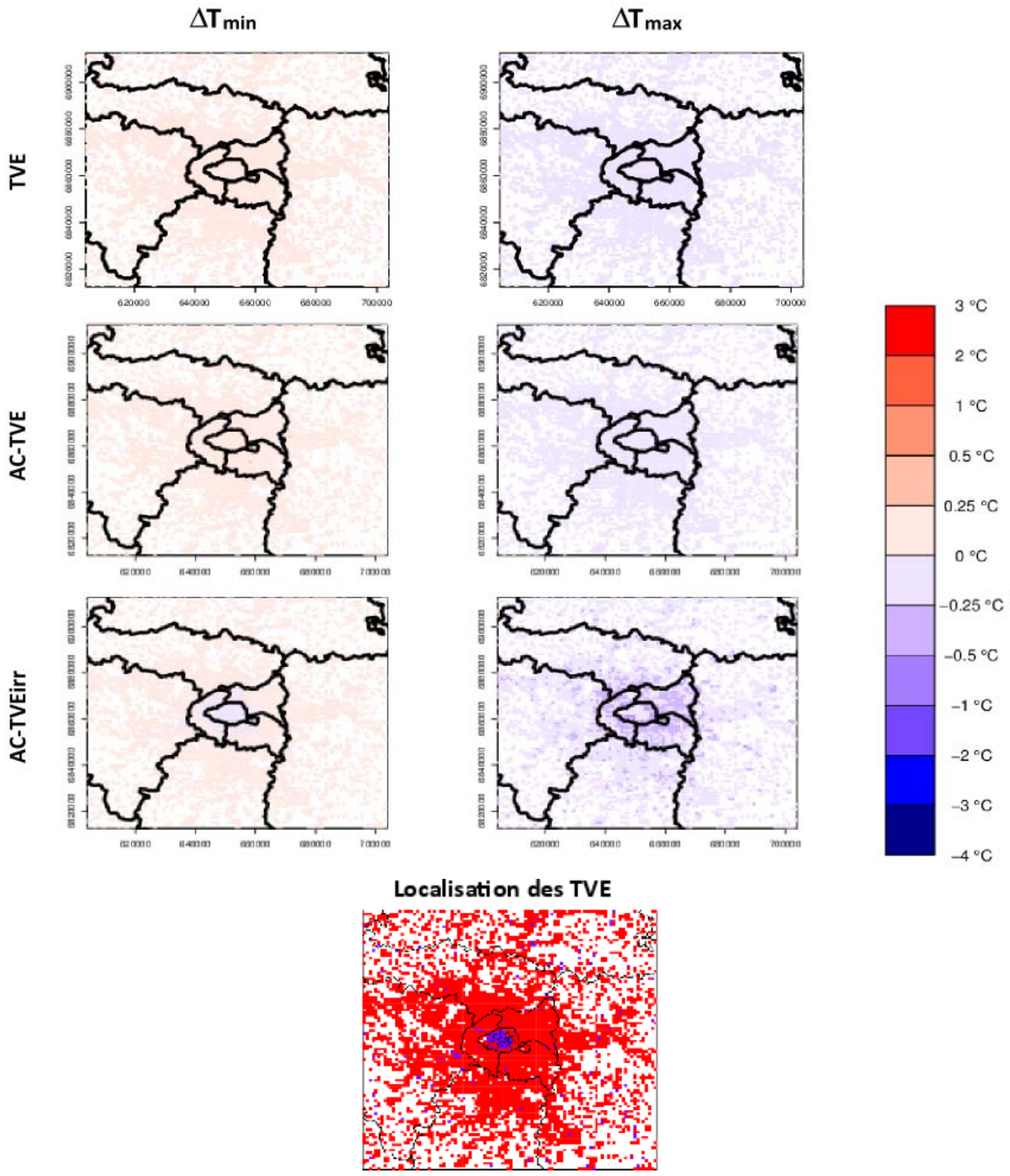


FIGURE 7.2 – *Impact des scénarios avec augmentation de la végétation en toiture (TVE, AC-TVE et AC-TVEirr) sur la température journalière moyenne, minimale et maximale pour un jour moyen représentatif des 6 jours de canicule 2003. Les points de maille dans lesquels les bâtiments sont équipés de TVE sont indiqués en rouge sur la carte du bas.*

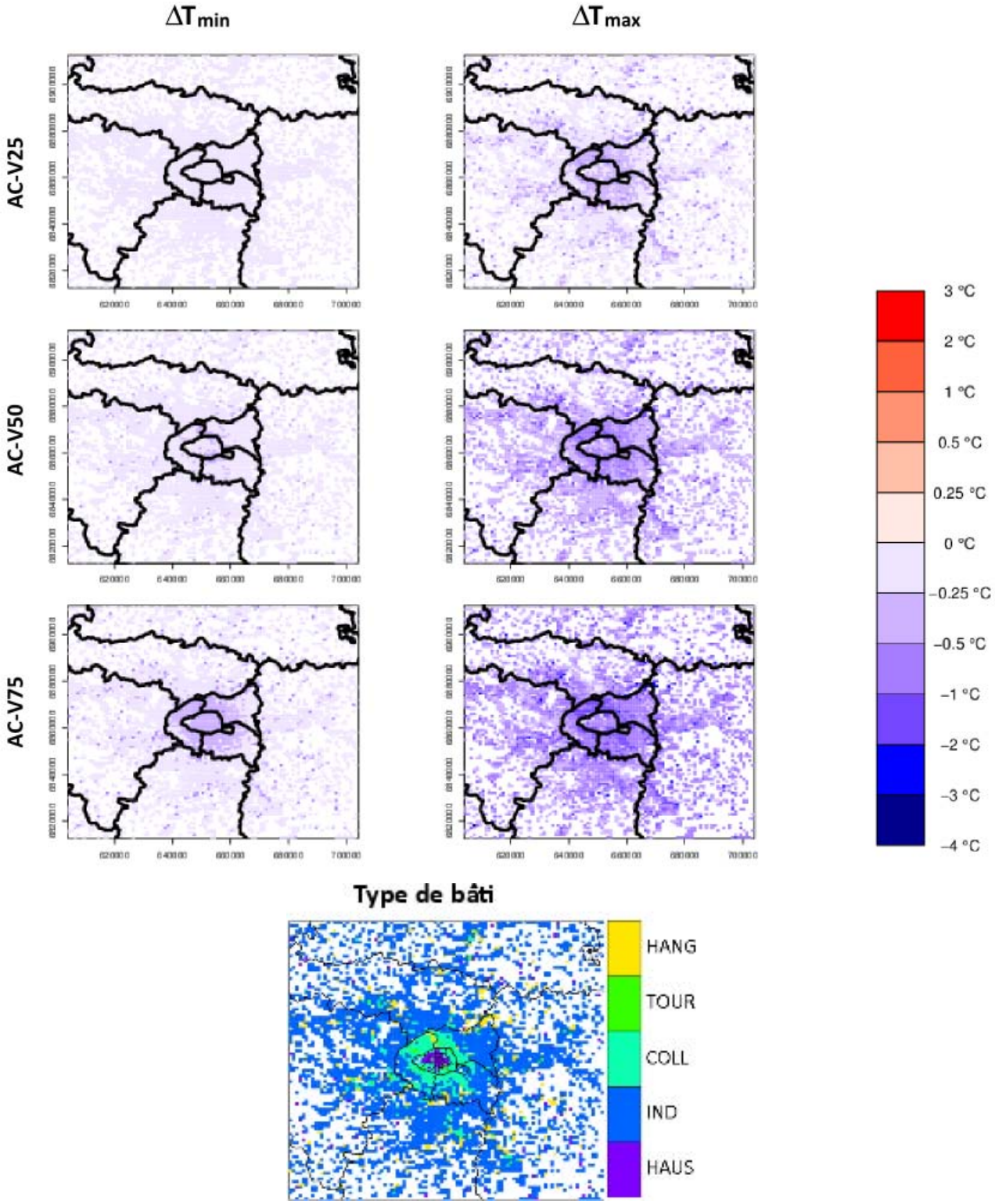


FIGURE 7.3 – *Impact des scénarios avec augmentation de la végétation au sol de type pelouse/arbustes (AC-V25, AC-V50 et AC-V75) sur la température journalière minimale et maximale pour un jour moyen représentatif des 6 jours de canicule 2003. Les différents types de tissus urbains présents dans le domaine sont rappelés dans la carte du bas.*

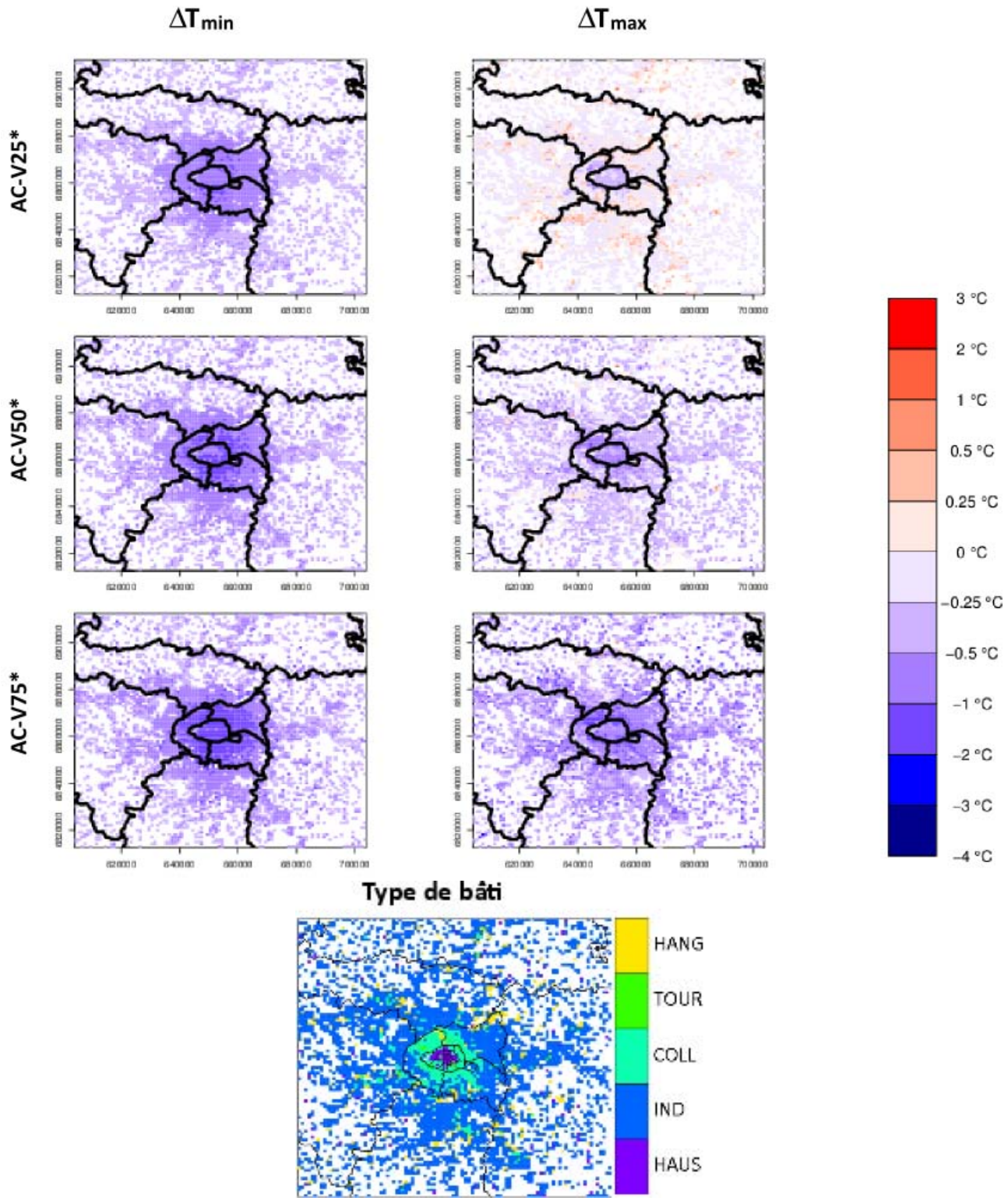


FIGURE 7.4 – *Impact des scénarios avec augmentation de la végétation au sol de type pelouse et arbres (AC-V25*, AC-V50* et AC-V75*) sur la température journalière minimale et maximale pour un jour moyen représentatif des 6 jours de canicule 2003. Les différents types de tissus urbains présents dans le domaine sont rappelés dans la carte du bas.*

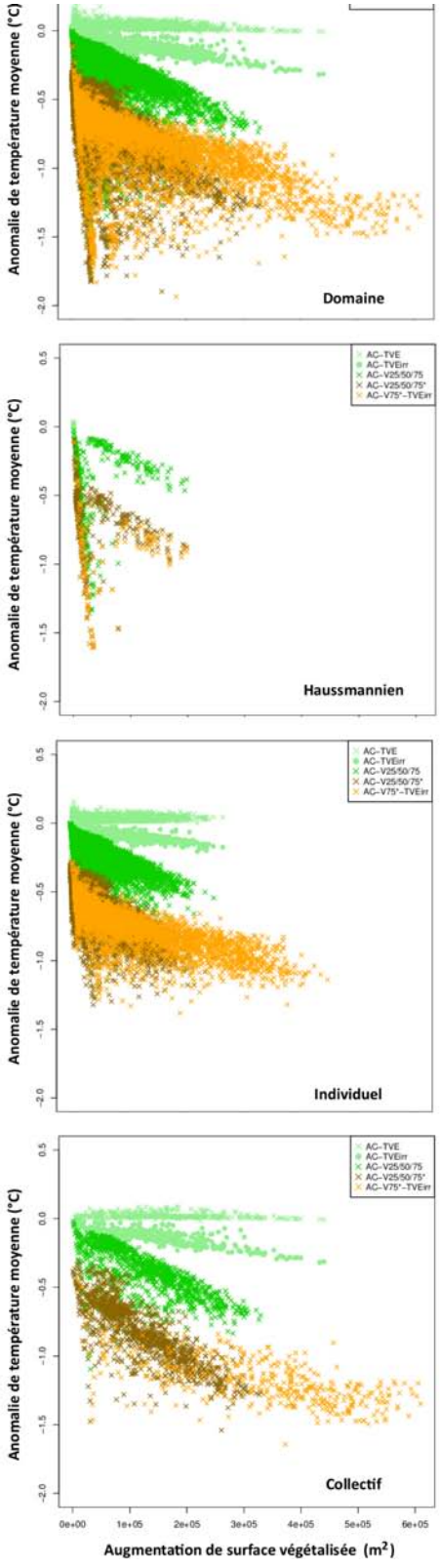


FIGURE 7.5 – *Relation entre l'augmentation de surface urbaine végétalisée et l'anomalie de température engendrée par chaque scénario*

Pratiquement, dans les scénarios, la surface de sol disponible à laquelle le taux de végétalisation de 25, 50 ou 75 % est appliqué est dépendante du type de tissu urbain et explique en partie la variabilité spatiale observée sur les cartes précédentes. Si on compare l'augmentation de surface urbaine végétalisée (estimée comme l'augmentation de surface de végétation au sol et en toiture) de chaque scénario avec l'anomalie de température moyenne correspondante en chaque point du domaine, on obtient les graphes de la FIGURE 7.5. Rappellons que les TVE ne sont pas installées sur les bâtiments Haussmannien.

Ces graphes permettent d'illustrer que l'augmentation de surface végétalisée est plus faible dans le tissu de bâti Haussmannien que dans les tissus de bâti Individuel et Collectif, ce dernier présentant les plus grandes augmentations de surfaces végétalisées.

Finalement, pour chaque type de bâti pris individuellement, on observe une relation à tendance linéaire entre l'augmentation de surface naturelle et l'anomalie de température journalière moyenne engendrée, qui semble dépendre du type de végétation (en toiture, arrosée ou non, 100 % basse ou avec 40 % d'arbres) mais peu du type de bâti.

Remarque : le décalage en ordonné observé pour les scénarios avec 40 % d'arbres (AC-VEG25/50/75) de provient du fait que dans le scénario qui sert ici de référence (AC), la végétation urbaine est supposée composée à 100 % de végétation basse. Ce décalage correspond à l'anomalie de température engendrée par la transformation de 40 % de la végétation basse initiale en arbres.*

Impact de la combinaison maximale de végétation

La combinaison maximale de végétation évaluée dans le scénario *AC-V75*-TVEirr* correspond à une augmentation d'environ 34 % de la surface de pleine terre végétalisée dans l'agglomération parisienne ainsi qu'à la couverture de toutes les toitures *végétalisables* de l'agglomération avec des TVE arrosées. Sachant que l'arrosage des TVE n'apporte qu'un très faible rafraîchissement des températures au niveau de la rue, les scénarios *AC-V75** et *AC-V75*-TVEirr* sont finalement relativement équivalents en termes de performances thermiques extérieures, comme le montre la Figure 7.6, même si par endroits la combinaison maximale apparaît sensiblement plus efficace à rafraîchir les rues.

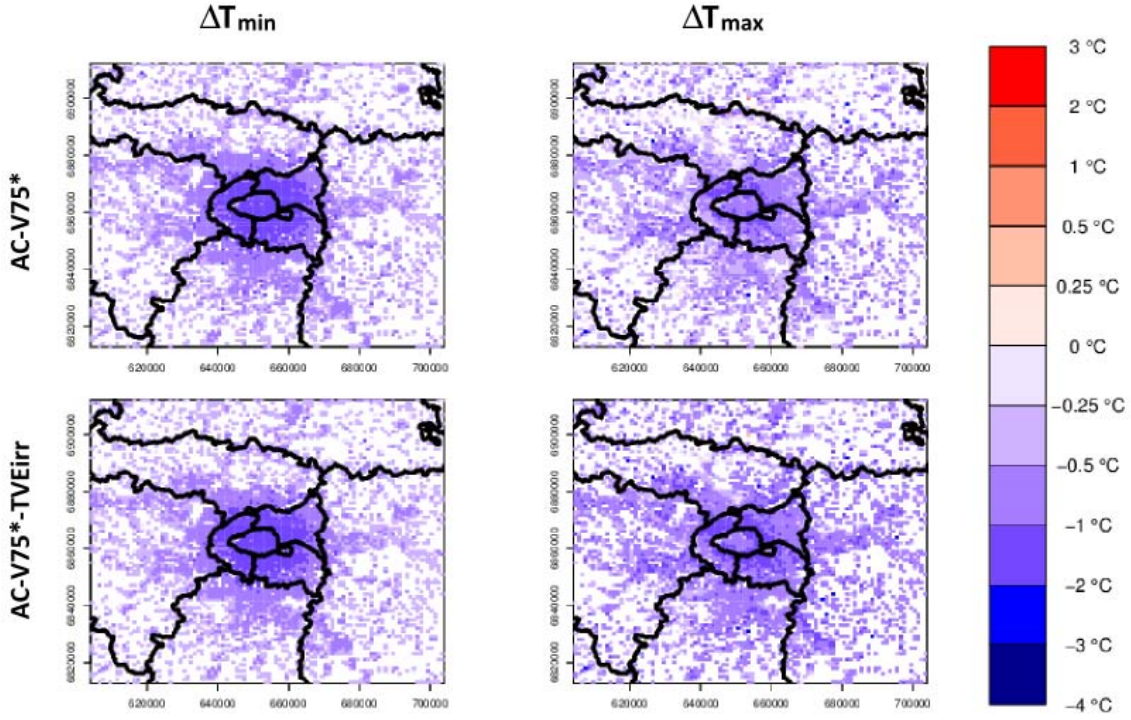


Figure 7.6 – *Comparaison des impacts des scénarios AC-V75* et AC-V75*-TVEirr sur les températures journalières minimale et maximale pour un jour moyen représentatif des 6 jours de canicule 2003*

Conclusions

Les impacts moyen, maximum et minimum de chaque scénario de végétalisation aggrégés sur l'agglomération parisienne (après pondération par la densité d'habitants de chaque maille) ont été calculés pour les températures journalières moyennes, minimales et maximales dans la rue à 2 m, sur l'ensemble des 6 jours de la canicule de 2003. Ces chiffres (Table 7.1), bien que lissés, sont néanmoins représentatifs de l'efficacité relative des scénarios à rafraîchir la température des rues, comme on l'a vu sur les cartes précédentes.
Comme attendu, les TVE n'ont que peu d'effet sur les températures à 2 m au niveau de la rue et ont besoin d'être arrosées pour ne pas provoquer au contraire leur réchauffement. Pour les stratégies de pleine terre, plus la couverture végétale urbaine est grande, plus ample est le rafraîchissement, et celui-ci est d'autant plus marqué qu'il y a des arbres. On observe aussi des effets différents entre le jour et la nuit, avec un effet maximum le jour pour les TVE et la végétation basse et inversement la nuit pour les stratégies mixtes arborées. En phase nocturne, 25 % de végétation mixte arborée

en plus apparaît plus efficace que 75 % de végétation basse en plus (- 0.72°C versus - 0.25°C sur la T_{min}). Finalement, la stratégie de végétalisation maximale est la plus efficace à rafraîchir les rues dans l'agglomération parisienne, en réduisant les températures journalières moyennes de 1°C en moyenne, avec des effets localement plus marqués pouvant aller jusqu'à - 3°C.

Impact	**moyen (°C)**	**maximum (°C)**	**minimum (°C)**
$\Delta T_{\mathbf{moy}}$			
AC-TVE	+0.03	+0.01	+0.05
AC-TVEirr	-0.12	-0.16	-0.09
AC-V25	-0.14	-0.17	-0.11
AC-V50	-0.29	-0.33	-0.21
AC-V75	-0.43	-0.49	-0.32
AC-V25*	-0.58	-0.75	-0.45
AC-V50*	-0.75	-0.91	-0.63
AC-V75*	-0.91	-1.06	-0.78
AC-V75*-TVEirr	-1.02	-1.16	-0.87
$\Delta T_{\mathbf{min}}$			
AC-TVE	+0.05	+0.01	+0.08
AC-TVEirr	-0.01	-0.04	+0.02
AC-V25	-0.09	-0.12	-0.05
AC-V50	-0.17	-0.23	-0.10
AC-V75	-0.25	-0.35	-0.15
AC-V25*	-0.72	-0.95	-0.58
AC-V50*	-0.82	-1.07	-0.67
AC-V75*	-0.92	-1.18	-0.75
AC-V75*-TVEirr	-0.94	-1.17	-0.78
$\Delta T_{\mathbf{max}}$			
AC-TVE	-0.04	-0.08	-0.00
AC-TVEirr	-0.24	-0.41	-0.14
AC-V25	-0.28	-0.39	-0.17
AC-V50	-0.54	-0.75	-0.32
AC-V75	-0.79	-1.09	-0.44
AC-V25*	-0.13	-0.44	0.28
AC-V50*	-0.46	-0.69	-0.10
AC-V75*	-0.75	-0.99	-0.42
AC-V75*-TVEirr	-0.96	-1.24	-0.64

TABLE 7.1 – *Impacts moyen, maximum et minimum de chaque scénario de végétalisation sur les températures journalières moyenne, minimale et maximale dans la rue à 2 m pendant les 6 jours de la canicule de 2003*

7.1.2 Conséquences en termes de confort thermique

Le confort des habitants en rapport avec les différentes stratégies de végétalisation est analysé en termes de *température ressentie*. Celle-ci est fonction, non seulement, de la température de l'air que l'on vient de discuter, mais aussi de l'humidité, du rayonnement, et du vent local simulés pour chaque scénario. Le modèle nous permet de simuler en chaque point de grille du domaine, pour toutes les heures de la canicule, et pour chaque scénario, les valeurs de ces températures ressenties pour des individus supposés soit à l'intérieur, soit à l'extérieur au soleil, soit à l'ombre (UTCI défini au Chap. 6).

A partir de ces valeurs de température ressentie et des seuils de stress thermique qui sont rappelés sur la FIGURE 7.7, il est possible de cumuler, pour ces trois individus, le nombre d'heures passées au moins dans chaque niveau de stress thermique, pour chaque jour de la canicule. J'ai effectué ce calcul pour chaque scénario de végétalisation et celui qui leur sert de référence (*AC*). Les cartes de la FIGURE 7.8 montrent le résultat de ce calcul pour l'exemple du scénario de référence. Elles permettent de visualiser simultanément la situation de stress thermique des individus à l'échelle de l'agglomération pendant la canicule avant la mise en place de stratégies de végétalisation.

Echelle UTCI (°C)	Niveau de stress
au-dessus de + 46	Stress thermique extrême
+ 38 à + 46	Stress thermique très élevé
+ 32 à + 38	Stress thermique élevé
+ 26 à + 32	Stress thermique modéré
+ 9 à + 26	Pas de stress thermique

FIGURE 7.7 – *Niveaux de stress thermique associés aux seuils de température ressentie, d'après le Glossary of Terms for Thermal Physiology (2003)*

NB : Le temps passé en stress thermique élevé subi par un individu à l'intérieur provient seulement du fait que les bâtiments à usage résidentiel, majoritaires dans le domaine de simulation (voir carte Annexe C), ne sont pas climatisés en journée. Les habitants sont dans un environnement climatisé la nuit sur leur lieu d'habitation, et en journée sur leur lieu de travail s'ils travaillent à l'intérieur. Cette hypothèse implique que le confort intérieur n'est pas critique et c'est pourquoi mon analyse se concentre sur le confort thermique d'individus vivant ou travaillant à l'extérieur en journée (encadré sur la FIGURE *7.8).*

Ces cartes mettent en évidence une forte hétérogénéité spatiale qui s'explique par la variabilité des variables climatiques, qui est elle-même une conséquence de l'hétérogénéité du tissu urbain. En effet, si on regarde la FIGURE 7.9, l'évolution du confort thermique au cours de chaque journée de la canicule, aggrégé spatialement pour chacun des trois types de tissu urbain les plus répandus dans l'agglomération (Individuel, Collectif et Haussmannien), on remarque que celui-ci est fortement dépendant de la morphologie du bâti. Plus la densité de bâtiments est élevée (Haussmannien, puis Collectif), plus ils stockent de la chaleur en journée (comparés à des bâtiments bas de type Individuel), pour la restituer la nuit, dégradant ainsi le confort nocturne. Ces différences relatives de confort thermique entre différents tissus urbains perdurent malgré l'augmentation de surface végétale urbaine simulée dans les scénarios de végétalisation, comme le montre la FIGURE 7.10 par l'exemple du scénario de végétalisation maximum (*AC-V75*-TVEirr*). Par contre, les stratégies de végétalisation permettent à certaines heures de passer dans des niveaux de stress thermique moins élevés, comme le montre la comparaison des FIGURES 7.9 et 7.10.

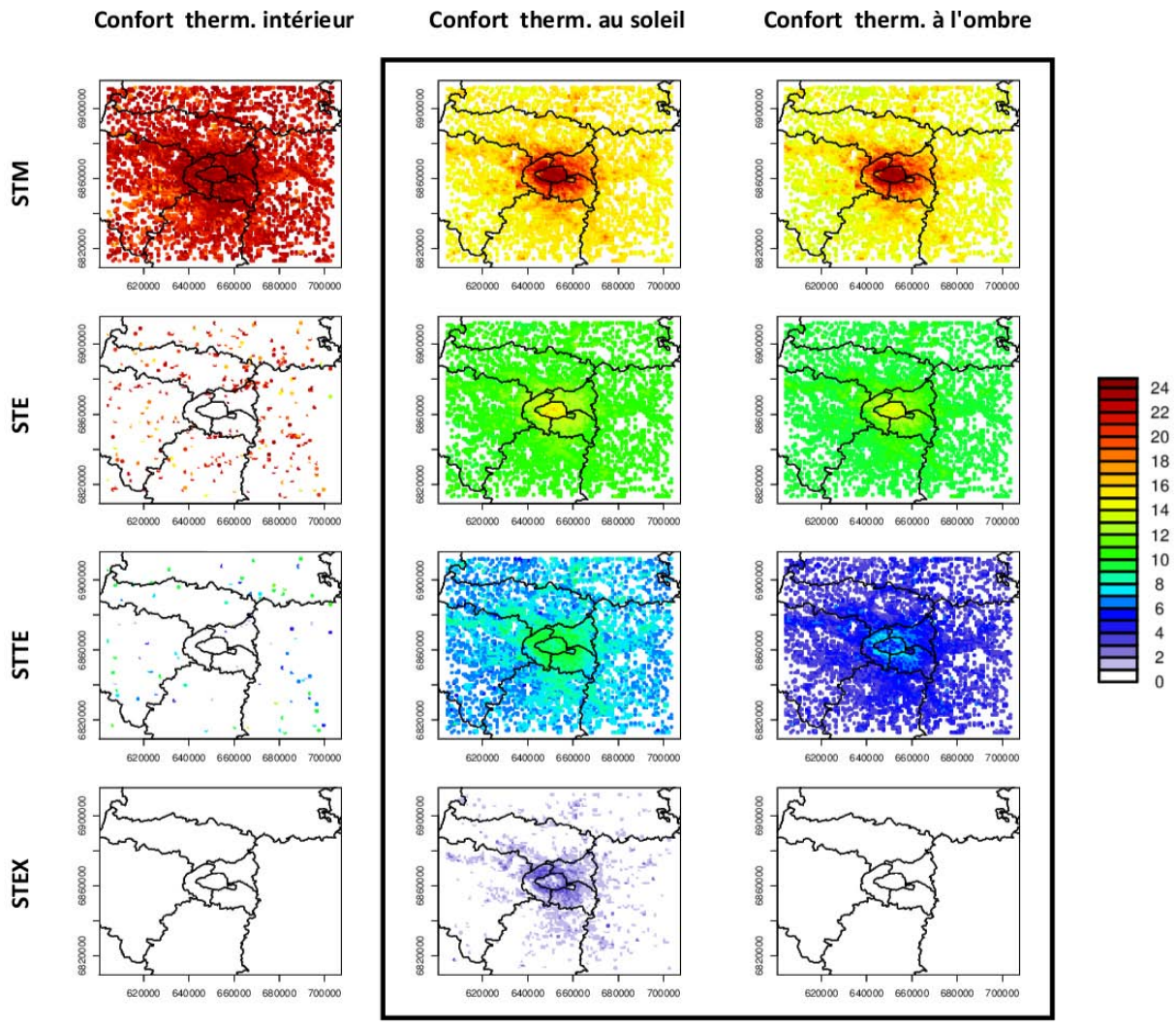


FIGURE 7.8 – *Nombre d'heures (sur 24 h) cumulées sur les 6 jours de la canicule 2003 (et rapportées à un jour moyen), passées au moins en condition de stress thermique (ST) modéré, élevé, trés élevé et extrême, pour des individus à l'intérieur, à l'extérieur au soleil et à l'ombre* ***pour la référence climatisée AC***

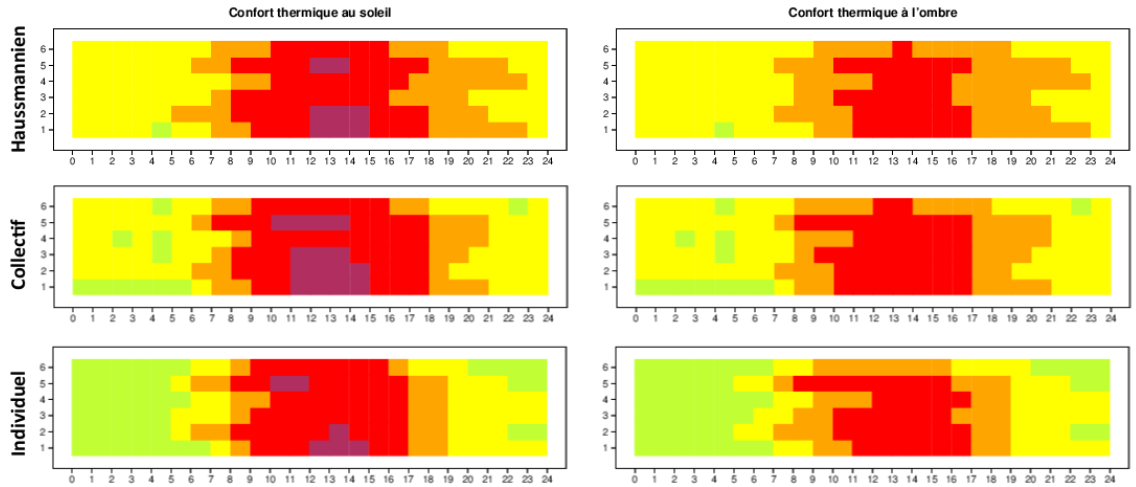


FIGURE 7.9 – *Evolution du niveau de confort ou stress thermique au cours de 24 h (en abscisse, en UTC) et pour les 6 journées de la canicule 2003 (en ordonnée), selon les seuils définis* FIGURE 7.7*, après intégration sur l'ensemble du domaine et pondération par la densité d'habitants, pour des individus au soleil (à gauche) ou à l'ombre (à droite) et le scénario climatisé de référence (AC)*

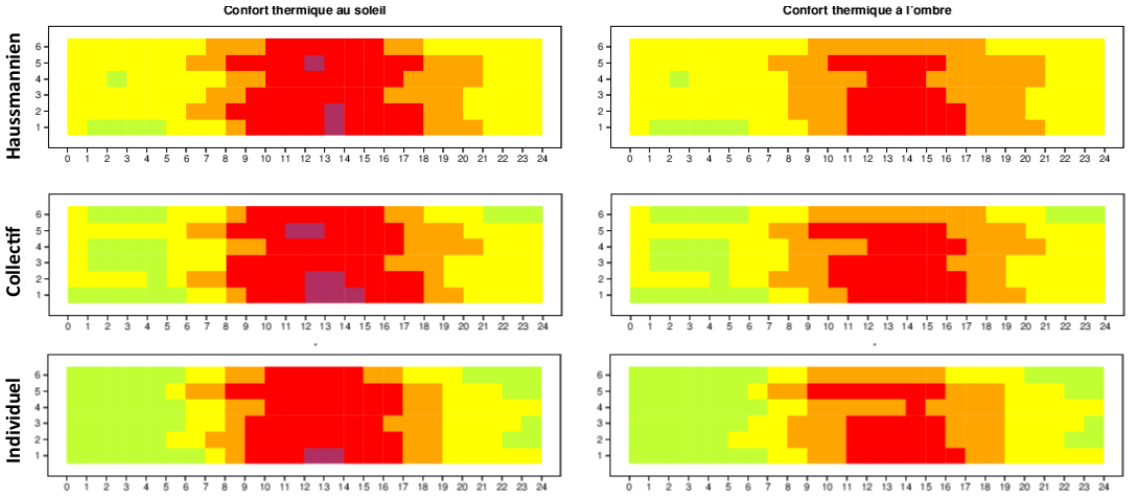


FIGURE 7.10 – *Evolution du niveau de confort ou stress thermique au cours de 24 h (en abscisse, en UTC) et pour les 6 journées de la canicule 2003 (en ordonnée), selon les seuils définis* FIGURE 7.7*, après intégration sur l'ensemble du domaine et pondération par la densité d'habitants, pour des individus au soleil (à gauche) ou à l'ombre (à droite) et le scénario de végétalisation maximum (AC-V75*-TVEirr)*

Pour faciliter la comparaison des impacts des différentes stratégies de végétalisation sur le confort thermique extérieur, j'ai finalement réalisé, pour chaque scénario, une agrégation spatiale du temps au moins passé dans les différents niveaux de stress thermique au cours des 16 heures de jour (où les individus étaient susceptibles d'être à l'extérieur, de 06-21 h locale (04-19 UTC). Cette aggrégation spatiale, pondérée par la densité d'habitants (pour donner du poids aux endroits les plus habités), me permet d'évaluer l'impact moyen à l'échelle de l'agglomération de chaque scénario sur le confort thermique extérieur, par la comparaison des nombres d'heures passées au moins dans chaque niveau de stress entre chaque scénario et la référence.

Compte tenu de l'ordre de grandeur des anomalies de température de l'air des rues engendrées par les scénarios de végétalisation, j'ai divisé chaque niveau de stress standard (FIGURE 7.7) en deux niveaux, ce qui m'a permis d'analyser l'impact moyen des scénarios au travers de 8 niveaux de confort/stress thermique comme l'indique la FIGURE 7.11. Les résultats sont présentés sur les FIGURES 7.12 pour l'ensemble du domaine et 7.13 pour chaque tissu urbain. Les chiffres précis ont été compilés pour supporter l'analyse des figures dans les TABLES 7.2 et 7.3 pour l'ensemble du domaine, et dans les TABLES 7.4 et 7.5 pour les trois types de tissus urbains les plus fréquents sur le domaine (Haussmannien, Collectif, et Individuel).

Echelle UTCI (°C)	Niveau de stress
au-dessus de + 46	Stress thermique extrême
+ 42 à + 46	Stress thermique très élevé 2
+ 38 à + 42	Stress thermique très élevé 1
+ 35 à + 38	Stress thermique élevé 2
+ 32 à + 35	Stress thermique élevé 1
+ 29 à + 32	Stress thermique modéré 2
+ 26 à + 29	Stress thermique modéré 1
+ 9 à + 26	Pas de stress thermique

FIGURE 7.11 – *Echelle des 8 niveaux de confort/stress thermiqueassociés aux seuils de température ressentie*

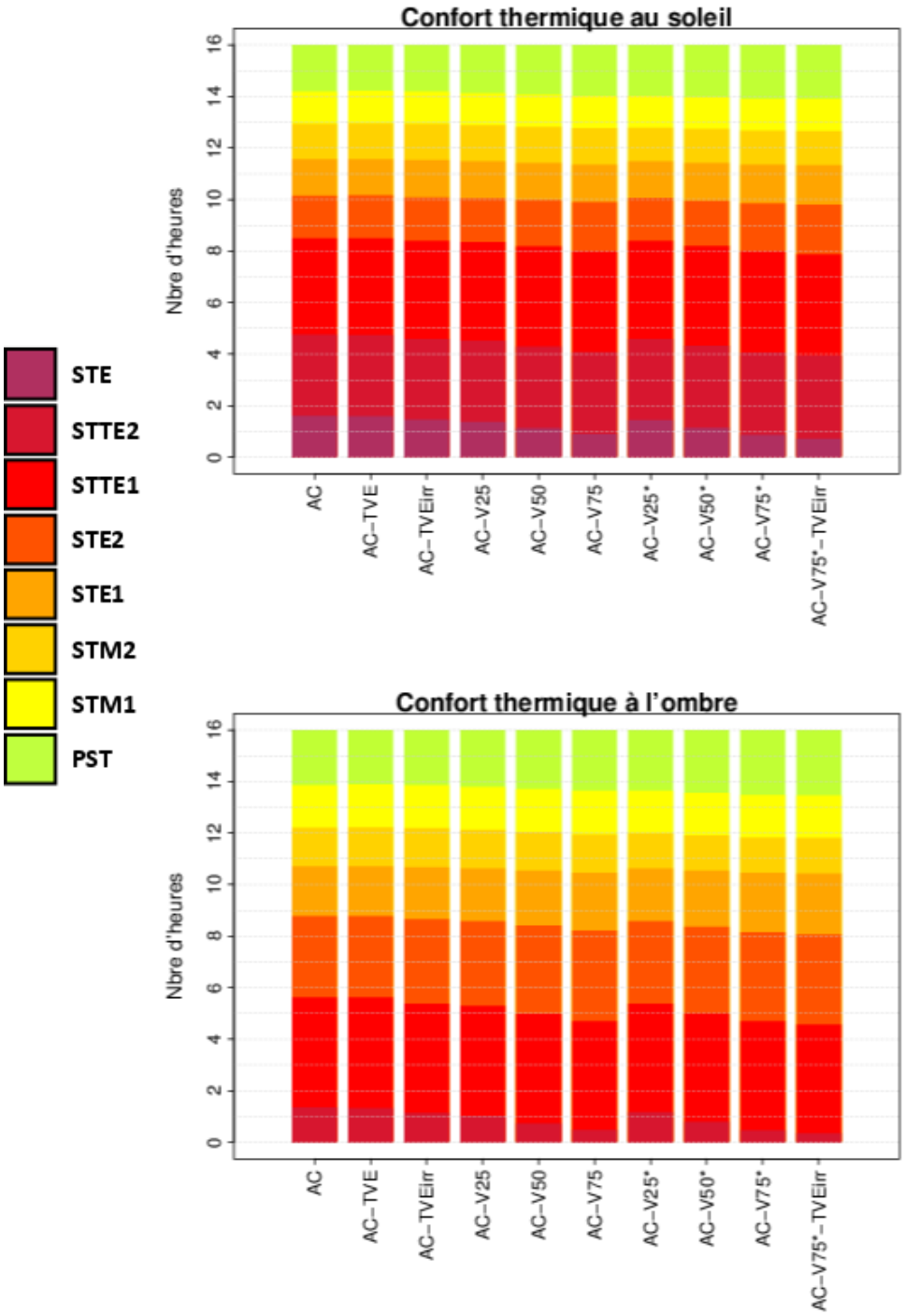


FIGURE 7.12 – *Répartition moyenne des 16 heures de jour (6h-21h) en confort ou stress thermique selon les seuils d'UTCI définis* FIGURE 7.11 *pour un individu au soleil (haut) ou à l'ombre (bas), après aggrégation sur l'**ensemble du tissu urbain** (pondérée par la densité d'habitants), pour chaque scénario*

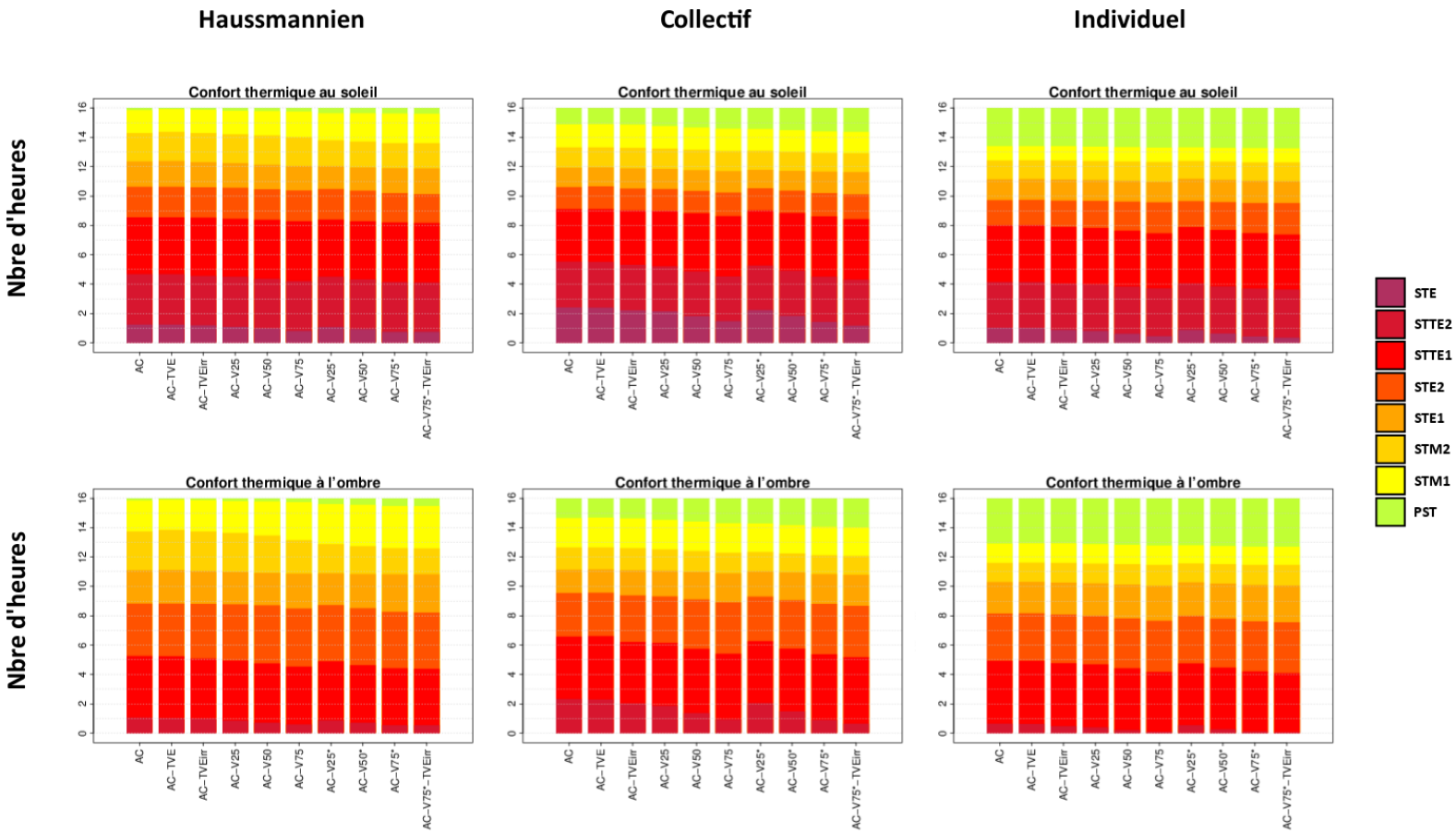


FIGURE 7.13 – *Répartition moyenne des 16 heures de jour (6h-21h) en confort ou stress thermique selon les seuils d'UTCI définis* FIGURE *7.11 pour un individu au soleil (haut) ou à l'ombre (bas), après aggrégation sur les* ***trois types de tissus urbains Haussmannien, Collectif et Individuel*** *(pondérée par la densité d'habitants), pour chaque scénario*

L'analyse des Tables 7.2 et 7.3 permet de dresser un certain nombre de conclusions, en cohérence avec les résultats obtenus précédemment sur les températures de l'air :

— Quelque soit le scénario, un **individu à l'ombre passe moins de temps en stress thermique qu'un individu au soleil**, avec par exemple, dans le cas du scénario *AC-V25*, environ 3 h de moins passées au moins en stress thermique trés élevé (STTE) et 1 h 22 de moins en stress thermique extrême (STEX). Surtout, **le fait d'être à l'ombre permet de ne jamais être en stress thermique extrême**, et ceci quel que soit le type de tissu urbain dans lequel on se trouve (Figure 7.9). La Figure 7.9 met aussi en évidence la pertinence des tissus urbains denses, avec des rues étroites (Haussmannien), pour assurer un confort thermique estival ;

— **Les TVE non arrosées n'ont aucun effet sur le confort thermique extérieur** ;

— Sans modifier le temps global passé en stress thermique, leur arrosage permet de diminuer marginalement celui passé en au moins en STTE à l'ombre (de 15 min) et en STEX au soleil (de 9 min). A noter que **les TVE arrosées apparaissent plus efficaces à améliorer le confort thermique extérieur dans le tissu Collectif que dans l'Individuel ou finalement le Haussmannien** du fait des rapports d'aspects inhérents à chaque type de bâti, avec une réduction du temps passé en STEX au soleil (Table 7.4) respectivement de 12, 9 et 3 min environ. Les performances des TVE arrosées implémentées dans les trois types de tissu suit presque la même logique à 'ombre (7.5), avec la meilleure performance du Collectif (moins 22 min passées en STTE) comparée à l'Haussmannien (moins 11 min) et l'Individuel (moins 9 min) ;

— **L'augmentation des surfaces végétalisées de pleine terre en ville améliore le confort thermique**, en augmentant le temps de confort et en réduisant celui passé dans les différents niveaux de stress thermique avec les effets les plus marqués sur les temps passés en STEX et en STTE. **Cet effet est d'autant plus marqué que la surface de végétation est élevée** : par exemple, pour les stratégies de végétation basse, quand on passe de *AC-V25* à *AC-V75*, la réduction de temps passé en STEX par rapport au scénario de référence *AC* passe respectivement de 14 à 43 min au soleil, et de 11 à 45 min en ce qui concerne le STTE à l'ombre (Tables 7.2 et 7.3) ;

— **Les espaces verts composés à 40 % d'arbres sont généralement plus efficaces pour améliorer le confort thermique que ceux composés à 100 % de végétation basse** : si on prend l'exemple d'un individu à l'ombre, le temps qu'il passe chaque jour de la canicule en confort thermique augmente de 5 et 14 min respectivement pour les scénarios *AC-V25* et *AC-V25** et de 14 et 23 min respectivement pour *AC-V75* et *AC-V75**(Tables 7.2 et 7.3). Les Tables 7.4 et 7.5 suggèrent aussi que les arbres sont plus efficaces dans le tissu Collectif, avec dans le cas du scénario *AC-V75**, 1 h de moins passée au moins en STEX au soleil que dans l'Individuel (36 min de moins) et le Haussmannien (30 min de moins). Ceci s'explique en partie par la plus grande augmentation de surface végétalisée dans le collectif que dans l'Individuel et le Haussmannien (Figure 7.5) et en partie par le rapport d'aspect inhérent à chaque tissu urbain ;

— Enfin, **la stratégie de végétation maximale est la plus efficace à améliorer le confort thermique** : elle permet de passer par jour et sur l'ensemble du domaine 17 min de plus au soleil et 24 min de plus à l'ombre sans stress thermique, et surtout de réduire de presque 1 heure le temps passé en STEX au soleil et de 1 h celui en STTE à l'ombre. Si on analyse son effet par type de tissu urbain (Figure 7.9 et Tables 7.4 et 7.5), on observe les mêmes tendances que précédemment, avec plus d'impact dans le tissu Collectif (avec 1h15 de moins passée en STEX au soleil) que dans l'Individuel (41 min de moins) et le Haussmannien (30 min de moins) ;

— Finalement, un individu au soleil passe moins de 1 heure en STEX en moyenne pendant la canicule à partir des scénarios *V75*, donc quand on augmente la surface de végétation urbaine globale de 34 %.

	STM	**STE**	**STTE**	**STEX**
AC	14:11	11:33	8:30	1:36
AC-TVE	14:12	11:34	8:30	1:35
AC-TVEirr	14:11	11:31	8:24	1:27
AC-V25	14:07	11:29	8:21	1:22
AC-V50	14:04	11:25	8:10	1:07
AC-V75	14:01	11:21	7:59	0:53
AC-V25*	14:00	11:29	8:23	1:25
AC-V50*	13:58	11:25	8:12	1:08
AC-V75*	13:54	11:21	7:59	0:51
AC-V75*-TVEirr	13:54	11:19	7:51	0:43

Table 7.2 – *Pour un **individu au soleil** et chaque scénario : temps moyen (en heures et minutes) passé en stress thermique pendant les 16 heures de jours (6h-21h LST) selon les seuils d'UTCI définis* Figure *7.7 (obtenu après intégration spatiale sur l'**ensemble du tissu urbain** et pondération par la densité d'habitants).*

	STM	**STE**	**STTE**	**STEX**
AC	13:51	10:42	5:37	-
AC-TVE	13:52	10:42	5:37	-
AC-TVEirr	13:51	10:40	5:22	-
AC-V25	13:46	10:37	5:17	-
AC-V50	13:42	10:31	4:58	-
AC-V75	13:37	10:27	4:42	-
AC-V25*	13:37	10:37	5:22	-
AC-V50*	13:33	10:32	5:00	-
AC-V75*	13:28	10:27	4:41	-
AC-V75*-TVEirr	13:27	10:25	4:33	-

Table 7.3 – *Pour un **individu à l'ombre** et chaque scénario : temps moyen (en heures et minutes) passé en stress thermique pendant les 16 heures de jours (6h-21h LST) selon les seuils d'UTCI définis* Figure *7.7 (obtenu après intégration spatiale sur l'**ensemble du tissu urbain** et pondération par la densité d'habitants).*

	STM	**STE**	**STTE**	**STEX**
Haussmannien				
AC	15:51	12:21	8:32	1:14
AC-TVE	15:54	12:23	8:32	1:15
AC-TVEirr	15:52	12:18	8:31	1:11
AC-V25	15:48	12:15	8:26	1:05
AC-V50	15:47	12:07	8:22	0:58
AC-V75	15:45	12:02	8:16	0:48
AC-V25*	15:38	12:01	8:24	1:04
AC-V50*	15:38	11:57	8:16	0:55
AC-V75*	15:37	11:54	8:12	0:45
AC-V75*-TVEirr	15:36	11:52	8:10	0:45
Collectif				
AC	14:52	11:55	9:06	2:25
AC-TVE	14:53	11:56	9:06	2:24
AC-TVEirr	14:51	11:53	9:01	2:13
AC-V25	14:46	11:51	8:59	2:08
AC-V50	14:40	11:46	8:49	1:49
AC-V75	14:34	11:42	8:37	1:28
AC-V25*	14:34	11:47	9:01	2:13
AC-V50*	14:29	11:43	8:50	1:49
AC-V75*	14:24	11:39	8:37	1:25
AC-V75*-TVEirr	14:22	11:37	8:25	1:10
Individuel				
AC	13:23	11:07	8:00	1:01
AC-TVE	13:24	11:08	8:01	1:00
AC-TVEirr	13:23	11:07	7:54	0:52
AC-V25	13:21	11:04	7:49	0:48
AC-V50	13:19	11:01	7:38	0:36
AC-V75	13:17	10:58	7:27	0:22
AC-V25*	13:18	11:10	7:53	0:52
AC-V50*	13:17	11:06	7:41	0:37
AC-V75*	13:15	11:01	7:28	0:25
AC-V75*-TVEirr	13:15	11:00	7:22	0:20

TABLE 7.4 – *Pour un **individu au soleil** et chaque scénario : temps moyen (en heures et minutes) passé en stress thermique pendant les 16 heures de jours (6h-21h LST) selon les seuils d'UTCI définis dans la FIGURE 7.7 (obtenu après intégration spatiale sur les trois types de tissus urbains les plus fréquents dans le domaine, **Haussmannien, Collectif et Individuel**, et pondération par les densités d'habitants respectives).*

	STM	STE	STTE	STEX
Haussmannien				
AC	15:51	11:06	5:15	-
AC-TVE	15:54	11:06	5:14	-
AC-TVEirr	15:52	11:03	5:04	-
AC-V25	15:48	10:58	4:57	-
AC-V50	15:46	10:54	4:44	-
AC-V75	15:43	10:52	4:32	-
AC-V25*	15:36	10:53	4:54	-
AC-V50*	15:33	10:50	4:38	-
AC-V75*	15:28	10:48	4:24	-
AC-V75*-TVEirr	15:28	10:48	4:22	-
Collectif				
AC	14:39	11:08	6:34	-
AC-TVE	14:40	11:08	6:36	-
AC-TVEirr	14:37	11:06	6:12	-
AC-V25	14:31	11:04	6:08	-
AC-V50	14:24	10:58	5:45	-
AC-V75	14:17	10:52	5:24	-
AC-V25*	14:17	11:01	6:15	-
AC-V50*	14:10	10:56	5:45	-
AC-V75*	14:03	10:50	5:22	-
AC-V75*-TVEirr	14:00	10:46	5:10	-
Individuel				
AC	12:55	10:17	4:55	-
AC-TVE	12:56	10:18	4:55	-
AC-TVEirr	12:55	10:15	4:46	-
AC-V25	12:52	10:12	4:40	-
AC-V50	12:49	10:07	4:25	-
AC-V75	12:46	10:03	4:10	-
AC-V25*	12:48	10:16	4:45	-
AC-V50*	12:45	10:10	4:27	-
AC-V75*	12:42	10:06	4:12	-
AC-V75*-TVEirr	12:42	10:04	4:05	-

TABLE 7.5 – *Pour un **individu à l'ombre** et chaque scénario : temps moyen (en heures et minutes) passé en stress thermique pendant les 16 heures de jours (6h-21h LST) selon les seuils d'UTCI définis dans la FIGURE 7.7 (obtenu après intégration spatiale sur les trois types de tissus urbains les plus fréquents dans le domaine, **Haussmannien, Collectif et Individuel**, et pondération par les densités d'habitants respectives).*

7.2 Impact de la végétalisation sur les consommations d'eau et d'énergie

Dans tous les scénarios, les espaces verts de pleine terre sont systématiquement arrosés en été, selon un calendrier et des volumes prédéfinis au Chap. 6. L'arrosage des TVE étant optionnel et les surfaces de végétation urbaines évoluant au cours des scénarios de végétalisation, il est intéressant de mettre en relation les bénéfices des différentes stratégies de végétalisation en termes de confort thermique avec leurs coûts respectifs en eau. Ceux-ci ont été calculés à l'échelle du domaine de simulation (Table 7.6) avant d'être comparés aux consommations d'énergie (Figure 7.14).

	A_{urb} (en Mm^3)			
Scénario	**TVE**	**Végétation au sol**	**Total**	**Variation/REF (%)**
REF	0	18.26	18.26	-
TVE	0	18.26	18.26	-
AC	0	18.26	18.26	-
AC-TVE	0	18.26	18.26	-
AC-TVEirr	5.24	18.26	23.50	29
AC-V25	0	20.31	20.31	11
AC-V50	0	22.35	22.35	22
AC-V75	0	24.39	24.39	34
AC-V25*	0	20.31	20.31	11
AC-V50*	0	22.35	22.35	22
AC-V75*	0	24.39	24.39	34
AC-V75*-TVEirr	5.24	24.39	29.63	62

Table 7.6 – *Consommation d'eau totale pour chaque scénario résultant de l'arrosage de la végétation urbaine sur l'ensemble du domaine pendant la canicule 2003 (8-13 août) et taux de variation par rapport au scénario de référence (AC ou REF)*

Ces variations sont relativement importantes et correspondent logiquement aux pourcentages d'augmentation de la surface de végétation urbaine globale de chaque scénario. Il est difficile de comparer ces valeurs, qui semblent a priori trés élevées à des valeurs connues de consommation d'eau. Citons deux ordres de grandeur pour comparaison : celui de la production du réseau non potable de la ville de Paris (intra-muros) destiné à l'arrosage des jardins publics qui est d'environ 77 000 m^3 j^{-1} (ce qui revient à 462 000 m^3 pour 6 jours) et celui du débit de la Seine en amont de Paris (200 m^3 s^{-1}), ce qui équivaut à 103 680 000 m^3 pour 6 jours. Comparées à ces chiffres, les consommations d'eau engendrées par les pratiques d'arrosage simulées et les augmentations de surfaces végétales urbaines des différents scénarios de végétalisation sont bien sûr beaucoup plus élevées que ce que peut fournir le réseau d'eau non potable de la ville de Paris, mais elles concernent cependant un domaine spatial beaucoup plus large. Elles équivalent finalement à 20 % (scénarios *V25*), 22 % (scénarios *V50*), 24 % (scénarios *V75*), 23 % (scénario *AC-TVE-irr*) et 29 % (scénario *AC-V75*-TVEirr*) du débit de la Seine.
Ces consommations d'eau élevées sont cependant propices à la réduction de la consommation énergétique, comme le montre la Figure 7.14 et les pourcentages indiqués dans la Table 7.7. Ces chiffres mettent en évidence que **l'installation de TVE, même non arrosée, ont un effet isolant qui permet de diminuer la consommation de climatisation nécessaire à la demande de confort intérieur**. **Leur arrosage** (scénario *AC-TVE-IRR*) **engendre une**

diminution conséquente de la consommation d'énergie, d'ailleurs comparable à celle engendrée par le scénario *AC-V75**. On remarque sur la FIGURE 7.14 qu'**à consommations d'eau égales, les arbres** (du fait qu'ils ont une gestion plus efficace de l'eau du sol) **permettent de diminuer davantage la consommation de climatisation que la végétation basse**, à tel point que les scénarios *AC-V75* et *AC-V25** présentent des réductions d'énergie comparables, ce qui est un résultat intéressant en termes d'aménagement urbain.

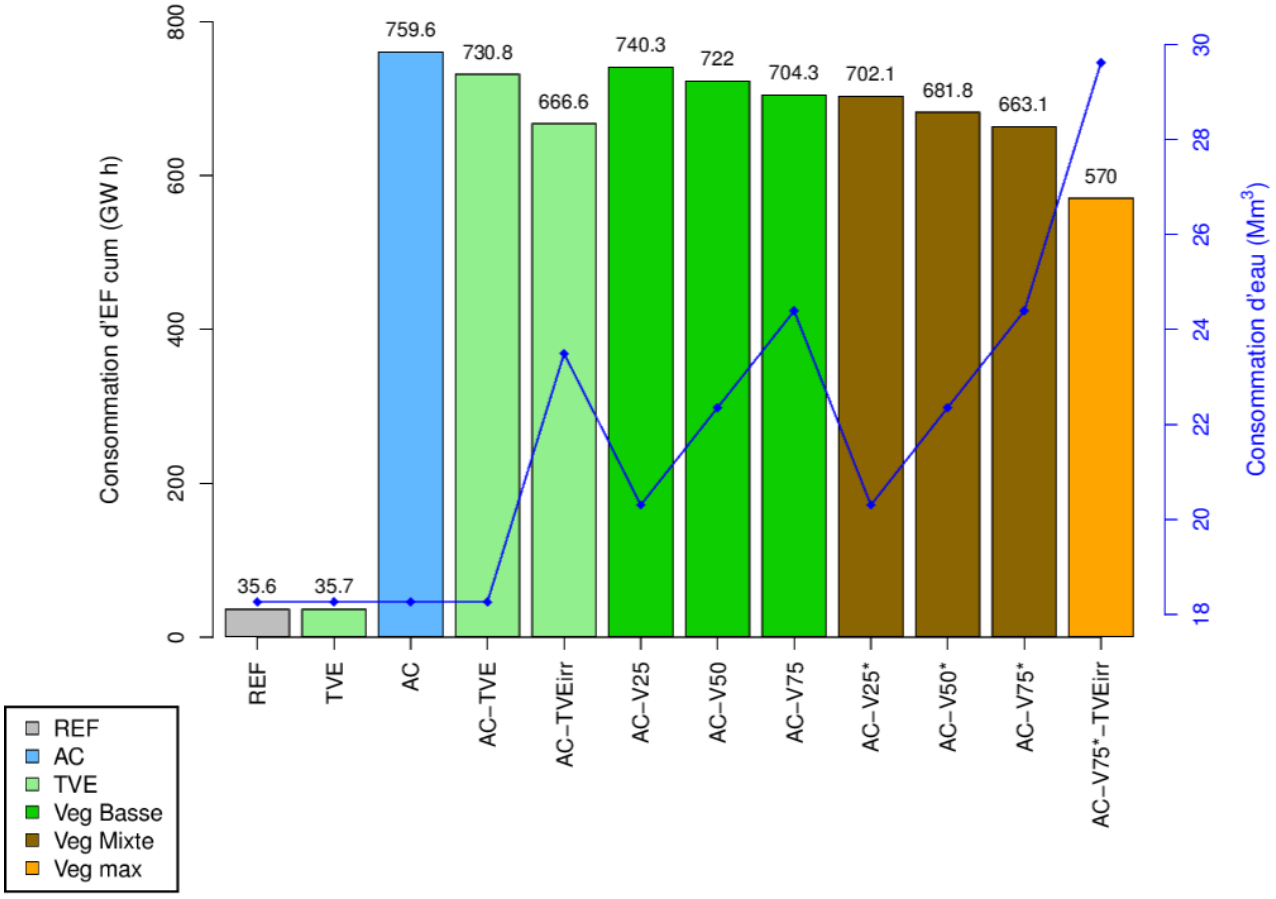


FIGURE 7.14 – *Consommations totales pour chaque scénario, d'énergie liée à l'usage de la climatisation (en ordonné à gauche), et d'eau liée à l'arrosage de la végétation urbaine (en ordonné à droite), intégré spatiallement et temporellement pendant les 6 jours de la canicule 2003*

Scénario	Variation d'EF_{cum}/AC (%)
AC-TVE	-4
AC-TVE-IRR	-12
AC-V25	-2
AC-V50	-5
AC-V75	-7
AC-V25*	-8
AC-V50*	-10
AC-V75*	-13
AC-V75*-TVE-IRR	-25

TABLE 7.7 – *Réduction de consommation énergétique engendrée par chaque scénario de végétalisation climatisé à l'échelle de l'agglomération au cours des 6 jours de la canicule 2003 (en % par rapport au scénario de référence climatisé AC)*

Après avoir analysé les impacts des différentes stratégies de végétalisation sur la consommation énergétique totale au cours de la canicule, j'ai souhaité analyser leur efficacité relative au cours du temps. En effet, pour chaque scénario, la puissance appelée du fait de l'usage de la climatisation évolue au cours des journées de la canicule en fonction du calendrier d'occupation des bâtiments et des forçages climatiques. Pour l'ensemble des scénarios, cette évolution temporelle suit les mêmes tendances que celle du scénario de référence climatisé *AC* (FIGURE 7.15), avec le maximum de puissance observé le 12 août, jour le plus chaud de la canicule.

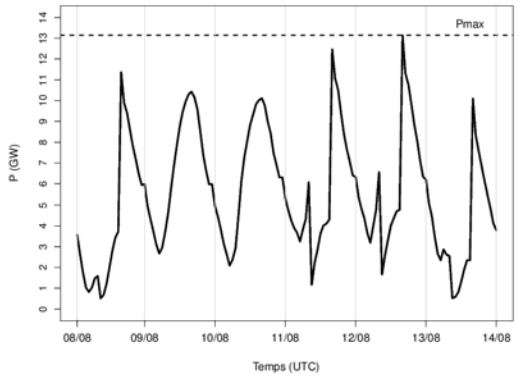


FIGURE 7.15 – *Evolution de la puissance engendrée par la demande de climatisation au cours des 6 journées de la canicule 2003 pour le scénario de référence climatisé AC*

Ce pic de puissance a été estimé pour chaque scénario de végétalisation afin de mesurer leurs impacts respectifs au plus fort de la demande énergétique, comme détaillé au Chap. 6. L'incidence des différentes stratégies sur le pic de puissance énergétique, présenté TABLE 7.8, varie selon les stratégies de végétalisation, en cohérence avec les tendances observées sur la consommation d'énergie E_{cum} (TABLE 7.7), mais dans des proportions sensiblement différentes. Celles-ci s'expliquent par la variabilité de l'efficacité de chaque type de végétation au cours de la journée du fait des processus d'évapotranspiration, comme on a pu le voir précédemment au cours de l'analyse des températures extérieures.

Scénario	**P_{max} (GW)**	**Variation de P_{max}/AC (%)**
REF	0.78	
TVE	0.78	
AC	13.14	
AC-TVE	11.97	-8.9
AC-TVEirr	11.43	-13.0
AC-V25	12.96	-1.4
AC-V50	12.78	-2.7
AC-V75	12.61	-4.0
AC-V25*	12.84	-2.3
AC-V50*	12.64	-3.8
AC-V75*	12.45	-5.3
AC-V75*-TVEirr	10.71	-18.5

TABLE 7.8 – *Puissance instantanée maximale relevée sur l'ensemble de l'agglomération parisienne (domaine de simulation) au cours de la canicule 2003 et taux de variation pour les scénarios avec climatisation généralisée par rapport au scénario AC*

Ainsi, **hormis le scénario de végétalisation maximale qui permet d'atteindre une réduction maximale du pic de puissance** de l'ordre de 18.5 % (ou encore 2.43 GW), **les scénarios les plus efficaces sont ceux avec TVE** avec des réductions de l'ordre de 13 % (1.71 GW) lorsqu'elles sont arrosés et 8.9 % (1.17 GW) quand elles ne le sont pas.

Finalement, la comparaison des chiffres obtenus pour les scénarios *AC-TVE* et *AC-TVEirr* nous permet d'évaluer les bénéfices énergétiques relatifs des pouvoirs isolants (processus dominant dans *AC-TVE*) et évapotranspirant (processus important dans *AC-TVEirr*) des TVE : l'arrosage des TVE fait gagner 1.71 GW au plus fort de la demande énergétique, contre 1.17 GW sans.

Viennent ensuite par ordre de performance décroissante, les scénarios de végétation de pleine terre arborés avec des réductions allant de 2.3 à 5.3 % (0.3 à 0.7 GW) selon l'augmentation de surface végétalisée, puis ceux de végétation basse avec des réductions comprises entre 0.18 et 0.53 GW. Finalement, ce sont les scénarios *AC-V75* et *AC-V50** qui engendrent des réductions de P_{max} équivalentes (Table 7.7). Le fait que les scénarios arborés soient moins efficaces à réduire le pic de puissance énergétique que ce à quoi l'on pourrait s'attendre s'explique en partie par le fait que leur efficacité à réduire les températures extérieures est maximale la nuit au moment de l'arrosage, comme on l'a vu précédemment.
Enfin, on note un effet cumulatif des scénarios de *TVE* et *AC-V75** sur E_{cum} et P_{max} car les TVE agissent plutôt sur la température des toits et la végétation arborée sur la température de l'air dans la rue.

Remarque : l'ordre de grandeur du pic de puissance relevé au cours de la canicule 2003 du fait de la climatisation des bâtiments (environ 13 GW) n'est pas trés élevé comparé à ceux qui peuvent être relevés en hiver lors d'épisodes trés froids (jusqu'à 90 GW). Il peut être assumé par le parc de réacteurs nucléaires Français actuels (58 réacteurs environ dont la puissance unitaire est d'environ 1 GW).

7.3 Conclusions

L'évaluation des performances des différentes stratégies de végétalisation que j'ai testées montre un effet de rafraîchissement sur les températures extérieures à 2 m qui varie spatialement du fait de l'hétérogénéité du tissu urbain et qui dépend du taux de couverture végétale, du type de végétation (pelouse ou arbres ou en toiture), ainsi que du dispositif d'arrosage mis en place pour le bon fonctionnement de la végétation. Cet effet est limité en ce qui concerne la végétalisation des toitures qui ont besoin, comme le reste de la végétation urbaine, d'être arrosées pour rafraîchir légèrement les rues (au mieux de - 0.5°C). L'augmentation de la couverture végétale au sol est plus efficace à rafraîchir les rues, avec un rafraîchissement d'autant plus élevé que l'augmentation de surface végétalisée est importante et que la proportion d'arbres est élevée. Les rafraîchissements obtenus varient entre - 0.5 et - 2°C selon les stratégies, et la combinaison de végétation maximale permet d'atteindre jusqu'à - 3°C localement. Ces résultats sont cohérents avec l'étude paramétrique réalisée par Ng et al. (2012) avec le modèle 3D *ENVI-met*, qui fonctionne à des résolutions spatiales et temporelles trés fines (respectivement 0.5-10 m et 10 s). Ng et al. (2012) ont notamment mis en évidence l'inefficacité des TVE à améliorer les températures dans les rues au niveau des piétons (d'autant plus que les bâtiments étaient élevés), ainsi qu'une meilleure efficacité des arbres à rafraîchir les températures que les pelouses, avec un rafraîchissement de l'ordre de 1°C à partir de 33 % de surface urbaine plantée avec des arbres.

Il est important de rappeler que les différences d'impacts observées dans cette étude entre les différentes stratégies de végétalisation de pleine terre proviennent principalement des différents taux de végétalisation simulés et des variations des taux d'évapotranspiration entre les types de

végétation basse (pelouse) et haute (arbres), car les effets d'ombrage des surfaces urbaines par les arbres ne sont pas actuellement pris en compte dans le modèle. On peut donc supposer que l'impact des stratégies arborées évalué dans cette étude est probablement sous-estimé par rapport à la réalité. De plus, on a vu que le timing et le mode d'arrosage des espaces verts de pleine terre implémentés dans ces scénarios avaient pour conséquence un rafraîchissement plus marqué la nuit que le jour pour les stratégies arborées, tendance qui serait susceptible d'évoluer avec des modalités d'arrosage différentes (systèmes goutte-à-goutte ou arrosage diurne).

Quoiqu'il en soit, le rafraîchissement des températures se traduit systématiquement par l'amélioration du confort thermique avec une réduction sensible du temps passé dans les différents niveaux de stress thermique, jusqu'à 1 heure de moins passée en stress thermique extrême pour un individu au soleil ou en stress thermique très élevé à l'ombre. A noter que l'effet des scénarios arborés sur le confort thermique à l'ombre est ici encore sous-estimé du fait que les effets d'ombrage engendrés par les arbres ne sont pas pris en compte dans le calcul des températures ressenties à l'ombre.

Contrairement à leur faible impact sur le confort thermique extérieur, les toitures végétalisées, du fait de leur pouvoir à la fois isolant pour le bâtiment et évapotranspirant, apparaissent comme une des solutions les plus efficaces pour réduire la consommation énergétique totale pour satisfaire les besoins en climatisation au cours de l'évènement de canicule (d'environ 12 %) et la plus efficace pour minimiser le pic de puissance appelée au plus chaud de la canicule (d'environ 13 %). On peut toutefois se demander si les TVE seraient réellement performantes par rapport à une amélioration de l'isolation en toiture par des moyens classiques. Sans prise en compte des effets d'ombrage et avec un arrosage nocturne, la stratégie arborée maximale permet d'atteindre une réduction de la consommation énergétique d'environ 13 % mais de la puissance maximale au plus fort de la canicule de seulement 5.3 %, du fait, probablement, du timing d'arrosage nocturne.

Au delà du type de végétation implémenté, les résultats de cette étude mettent en évidence une dépendance des effets de la végétation fortement liée au type et au timing d'arrosage. Formulé différemment, le type, l'heure et les volumes d'arrosage de la végétation urbaine devraient même permettre de piloter, dans une certaine mesure, l'amplitude et le timing de ses bénéfices, même si ces choix dépendent du but envisagé. Comme on l'a montré, les choix d'arrosage mis en place dans les scénarios arborés ont engendré les plus importants rafraîchissements de températures nocturnes pour des réductions assez limitées du pic de puissance énergétique en journée. Le choix final d'une stratégie plutôt qu'une autre dans un contexte donné, devra donc être réalisé, soit dans un but prioritaire (amélioration du confort thermique nocturne – pour les individus n'ayant pas accès à la climatisation, ou bien réduction maximale des pics de demande énergétique ?), soit comme un compromis. Aussi des stratégies complémentaires à la végétalisation pourraient être envisagées, comme l'arrosage des chaussées, mesure qui peut être efficace ponctuellement (projet EPICEA, Desplat et al., 2012) ou des infrastructures générant des effets d'ombrage dans la rue.

Quatrième partie

Impacts saisonniers

CHAPITRE 8

Impacts saisonniers des mesures de végétalisation

Contents

8.1 Impacts sur les températures à 2 m dans les rues 158
8.2 Impacts sur les consommations d'énergie 162
8.2.1 Variations annuelles et saisonnières d'EF_{cum} 162
8.2.2 Variations annuelles moyennes d'EP_{cum} 166
8.3 Impacts sur la gestion de l'eau urbaine 169
8.4 Conclusions 172

Si l'on veut inscrire les mesures d'adaptation des villes dans un cadre de développement durable, il est nécessaire de vérifier que les impacts des mesures d'adaptation imaginées pour répondre aux enjeux estivaux n'ont pas d'effets néfastes sur le reste de l'année. Aux résolutions spatiale (1 km) et temporelle (300 s) auxquelles j'ai travaillé avec le modèle TEB-Veg-BEM-UHI pour évaluer, en cas de canicule, les impacts de différentes stratégies de végétalisation sur le confort thermique et la consommation énergétique, il est possible, en raison du coût numérique acceptable, de quantifier ces mêmes impacts pour plusieurs années. C'est ce que ce chapitre se propose de faire par l'analyse saisonnière des impacts simulés pour une série climatique de dix ans (1999-2008). Les saisons considérées sont les saisons météorologiques : juin/juillet/août pour l'été, septembre/octobre/novembre pour l'automne, décembre/janvier/février pour l'hiver, et mars/avril/mai pour le printemps.

Pour faire suite aux analyses du Chap. 7, ce chapitre analyse l'impact des différentes mesures de végétalisation sur les températures extérieures et les aspects énergétiques liés à l'usage de la climatisation et du chauffage. Il aborde aussi la question de la gestion de l'eau au travers de la comparaison des quantités d'eau ruisselées par les surfaces urbaines et celles consommées pour l'arrosage estival.

8.1 Impacts sur les températures à 2 m dans les rues

L'analyse saisonnière des températures est réalisée au travers de la comparaison des moyennes, minimales et maximales journalières simulées dans les rues de l'agglomération parisienne pour la décennie 1999-2008. Pour chaque saison, les anomalies de température entre chaque scénario et la référence ont été calculées en chaque point du domaine, ainsi que leurs moyennes et écart-types inter-annuels, fournissant un jeu de cartes pour chaque scénario et chaque saison. Un jeu de cartes est présenté Figure 8.1 pour illustrer l'impact du scénario de végétalisation avec végétation basse *V75* sur les températures maximales diurnes pour chaque saison. Finalement afin de comparer plus facilement les impacts respectifs des stratégies de végétalisation, sur le même principe que ce qui a été présenté pour l'analyse de la canicule 2003, les moyennes et écart-types de ces cartes ont été intégrées spatialement, en pondérant par la densité d'habitants pour donner plus de poids aux valeurs les plus peuplées. Ces résultats ont été regroupés dans la Table 8.1.

— **en été**, pour l'ensemble des stratégies de végétalisation, on observe les mêmes tendances que celles mises en évidence pendant la canicule 2003, à savoir un rafraîchissement des températures extérieures, visible sur les températures maximales et moyennes, ainsi que sur les minimales à l'exception des scénarios avec toitures végétalisées (*TVE*), mais avec des amplitudes moindres ;

— quelque soit la saison et l'heure de la journée, les stratégies de végétation mixte arborée induisent en moyenne sur le domaine un rafraîchissement systématique des températures extérieures ;

— **en hiver**, on voit que les TVE et la végétation basse de pleine terre n'ont aucun effet sur le climat extérieur, quand les stratégies plus arborées induisent un rafraîchissement moyen de l'ordre du quart de degré à l'échelle du domaine. Cet effet est constant malgré l'augmentation de la densité de végétation. Le rafraîchissement est du principalement, à cette

période de l'année où les conditions ne sont pas réunies pour permettre la transpiration, à l'évaporation directe de l'eau interceptée par les arbres (fonction de l'épaisseur du feuillage qui est décrite dans le modèle au travers du *LAI*) et dans une moindre mesure de celle du sol. L'amplitude du rafraîchissement est donc fortement liée à la surface d'interception des arbres, elle-même en rapport avec le LAI, et le fait que celui-ci soit minimal en hiver (0.5), n'induit pas de changements significatifs de la surface totale d'interception même quand on augmente les surfaces naturelles, ce qui explique que le rafraîchissement simulé soit relativement identique pour les scénarios *V25-75**;

— même en dehors de la période estivale où l'on arrose, le rafraîchissement est plus marqué sur les surfaces mixtes arborées la nuit qu'en journée et du même ordre de grandeur pour les trois autres saisons (FIGURE 8.2);

— **aux inter-saisons** (automne et printemps), la végétation étant en partie photosynthétiquement active (et donc transpirante), on observe en journée des amplitudes de rafraîchissement différentes qui augmentent avec le taux de végétalisation (*V25* à *V75*) et dépendent du type de végétation (basse ou mixte arborée).

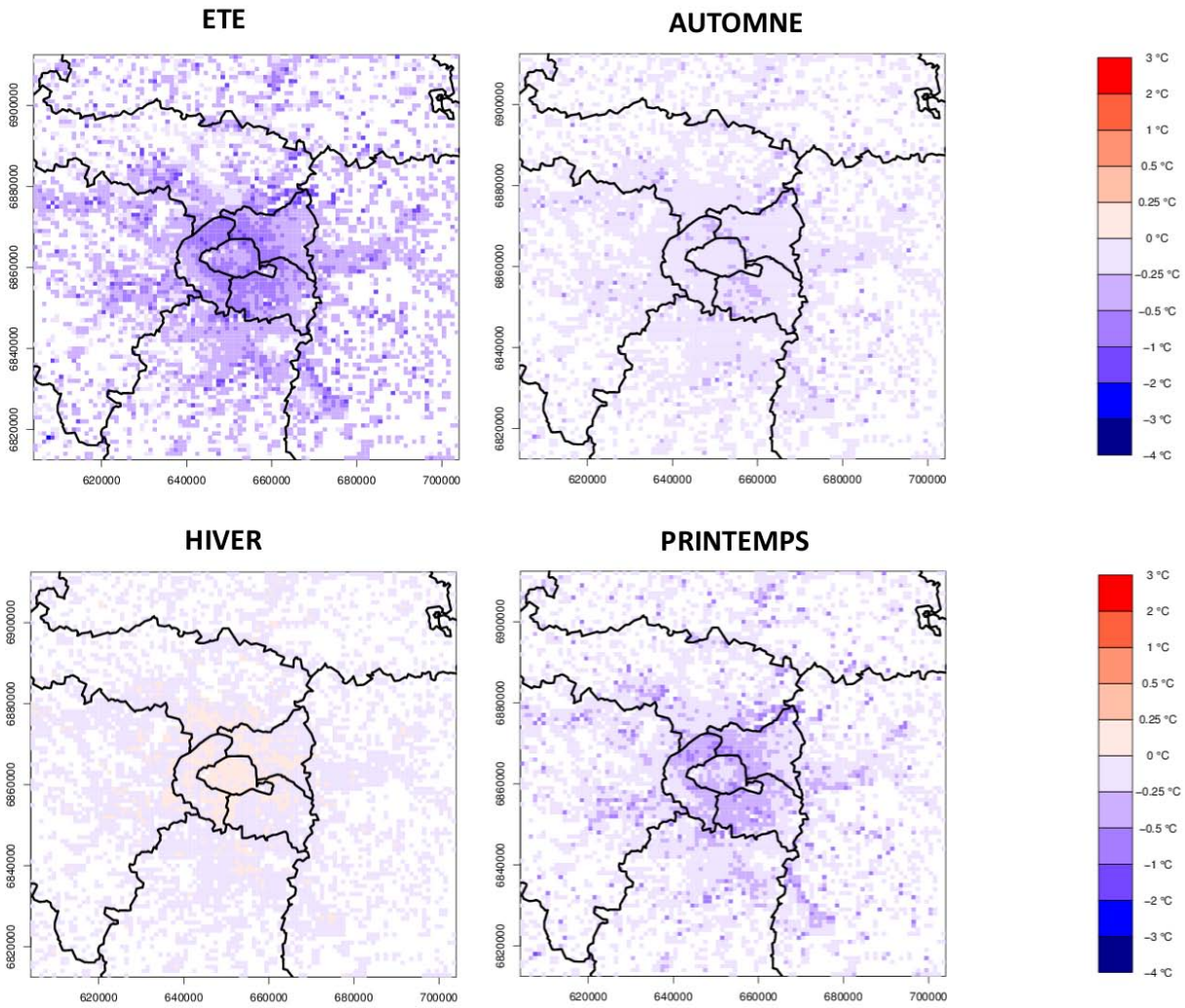


FIGURE 8.1 – *Impacts saisonniers moyens (en °C) du scénario AC-V75 sur les températures maximales diurnes dans la rue*

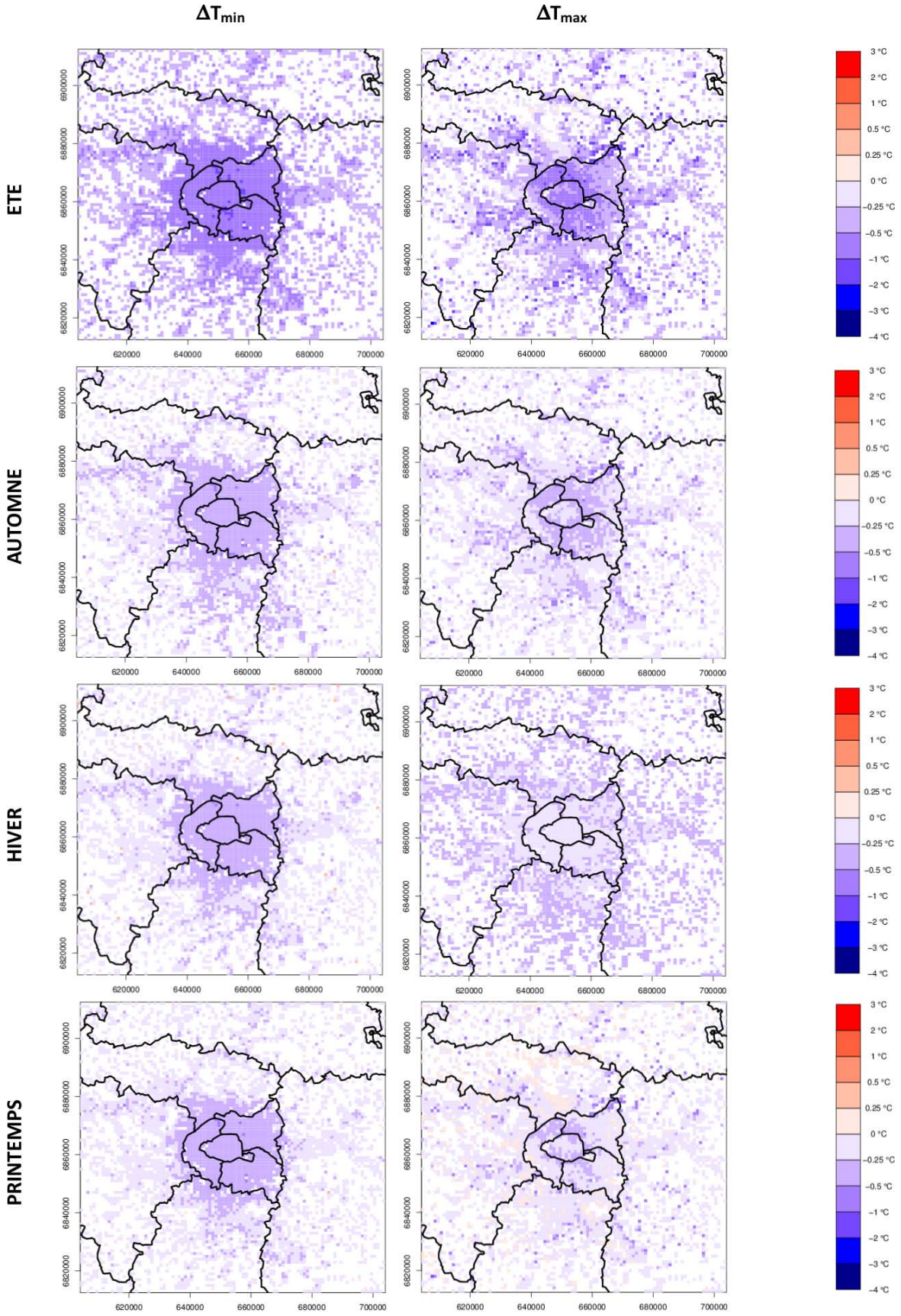


FIGURE 8.2 – *Impacts saisonniers moyens (en °C) du scénario AC-V75* (arboré) sur les températures minimales nocturnes (gauche) et maximales diurnes dans la rue (gauche)*

Scénario	ΔT_{moy}		ΔT_{min}		ΔT_{max}	
	Moy	σ	**Moy**	σ	**Moy**	σ
ETE						
AC-TVE	-0.01	0.01	0.06	0.01	-0.10	0.02
AC-TVEirr	-0.06	0.01	0.04	0.01	-0.19	0.02
AC-V25	-0.09	0.01	-0.05	0.01	-0.18	0.02
AC-V50	-0.17	0.02	-0.10	0.02	-0.35	0.03
AC-V75	-0.25	0.03	-0.14	0.03	-0.51	0.05
AC-V25*	-0.42	0.04	-0.66	0.06	-0.21	0.04
AC-V50*	-0.50	0.05	-0.71	0.07	-0.36	0.04
AC-V75*	-0.57	0.06	-0.75	0.08	-0.50	0.05
AC-V75*-TVEirr	-0.62	0.07	-0.71	0.08	-0.65	0.06
AUTOMNE						
AC-TVE	0.01	0.00	0.04	0.01	-0.04	0.01
AC-TVEirr	-0.00	0.00	0.04	0.01	-0.05	0.01
AC-V25	-0.02	0.00	-0.00	0.00	-0.05	0.01
AC-V50	-0.03	0.01	-0.01	0.01	-0.10	0.02
AC-V75	-0.05	0.01	-0.01	0.01	-0.14	0.02
AC-V25*	-0.19	0.02	-0.25	0.02	-0.15	0.04
AC-V50*	-0.22	0.02	-0.27	0.03	-0.21	0.03
AC-V75*	-0.24	0.02	-0.28	0.03	-0.25	0.03
AC-V75*-TVEirr	-0.25	0.02	-0.25	0.03	-0.30	0.03
HIVER						
AC-TVE	0.01	0.00	0.03	0.00	-0.01	0.01
AC-TVEirr	0.01	0.00	0.03	0.00	-0.01	0.01
AC-V25	0.01	0.00	0.01	0.00	-0.00	0.00
AC-V50	0.01	0.01	0.03	0.01	-0.00	0.01
AC-V75	0.02	0.01	0.04	0.01	0.00	0.01
AC-V25*	-0.22	0.02	-0.26	0.02	-0.19	0.03
AC-V50*	-0.23	0.02	-0.26	0.02	-0.20	0.03
AC-V75*	-0.23	0.02	-0.27	0.03	-0.21	0.04
AC-V75*-TVEirr	-0.22	0.02	-0.24	0.02	-0.22	0.04
PRINTEMPS						
AC-TVE	-0.00	0.01	0.06	0.01	-0.09	0.02
AC-TVEirr	-0.00	0.01	0.06	0.01	-0.09	0.02
AC-V25	-0.03	0.00	-0.00	0.00	-0.10	0.01
AC-V50	-0.07	0.01	-0.01	0.00	-0.20	0.02
AC-V75	-0.10	0.01	-0.01	0.01	-0.29	0.03
AC-V25*	-0.15	0.03	-0.26	0.04	0.00	0.06
AC-V50*	-0.19	0.03	-0.28	0.04	-0.08	0.05
AC-V75*	-0.23	0.03	-0.30	0.04	-0.16	0.05
AC-V75*-TVEirr	-0.23	0.03	-0.25	0.04	-0.25	0.06

TABLE 8.1 – *Impacts (Moy) et écart-type (σ) moyens de chaque scénario de végétalisation (climatisé) sur les températures journalières moyennes, minimales et maximales dans la rue à 2m au cours de saisons moyennes (1999-2008).*

8.2 Impacts sur les consommations d'énergie

Les effets d'ombrage de la végétation sur les surfaces urbaines ne sont pas actuellement pris en compte dans le modèle. Les effets sur la consommation énergétique des bâtiments, telle que simulée par le modèle sont, en ce qui concerne les scénarios de végétalisation de pleine terre, directement liés à la modification de la température et de l'humidité de l'air du micro-climat résultant du pouvoir évapo-transpirant de la végétation. En ce qui concerne les TVE, ces effets sont le résultat combiné de leur pouvoir évapotranspirant et isolant.

8.2.1 Variations annuelles et saisonnières d'EF_{cum}

La Figure 8.3 présente l'impact moyen au cours de la décennie étudiée (1999-2008) des différents scénarios de végétalisation sur la consommation d'énergie finale annuelle aggrégée à l'échelle du tissu urbain. L'effet le plus marqué à l'échelle de l'année est sans conteste celui des TVE, qu'elles soient arrosées ou non (en moyenne - 5 148 GW h, ce qui correspond à une diminution relative de - 6 %), ce qui démontre encore une fois l'importance de leur pouvoir isolant tout au long de l'année. L'augmentation des surfaces végétales de pleine terre, comme elle agit sur la consommation énergétique des bâtiments de façon indirecte (modification des conditions climatiques environnantes), a quant à elle des effets limités mais qui varient avec le type de végétation : la végétation basse engendre une diminution de la consommation d'énergie, qui est cependant très marginale (de l'ordre de - 0.1 à - 0.3 %) alors que la végétation mixte arborée génère une sur-consommation d'énergie (de l' ordre de l'ordre de + 1.3 %), principalement liée à la sur-consommation de chauffage du fait du rafraîchissement engendré par ce type de végétation à toutes les saisons (Table 8.1.

Les valeurs saisonnières des consommations d'énergie des bâtiments obtenues respectivement pour le chauffage et la climatisation sont synthétisées dans la Table 8.2. Etant donné que dans la configuration MUSCADE, le chauffage et la climatisation sont activés tout au long de l'année dès lors que les températures de consigne prescrites (respectivement 19°C et 26°C) sont dépassées, il est possible d'observer de faibles consommations de climatisation aux inter-saisons et de chauffage en été quand les nuits sont fraîches. Les consommations simulées et reportées Table 8.2 montrent qu'**en temps présent, la consommation d'énergie annuelle moyenne à l'échelle du bassin parisien est principalement liée au chauffage** (à 99.4 %) contre seulement 0.6 % seulement imputable à la climatisation.

Finalement, l'analyse des effets saisonniers des différentes stratégies de végétalisation (Table 8.2 et Figure 8.4) montre que :

— **En été, toutes les stratégies de végétalisation permettent de réduire la consommation énergétique des bâtiments** qui est principalement liée à l'usage de la climatisation, avec des effets de la végétation au sol plus limités que ceux de la végétation en toiture puisqu'ils sont indirects. Cependant ces scénarios qui rafraîchissent les températures extérieures déclenchent davantage l'usage du chauffage dans les bâtiments que dans le scénario de référence (effet marqué pour les scénarios arborés) ;

— **Quelque soit la saison, les TVE sont les plus performantes pour diminuer la consommation d'énergie**, y compris quand la végétation n'est pas évapo-transpirante

(pouvoir isolant). Finalement, du fait de l'arrosage estival, une partie du gain de consommation observé en été (climatisation) est perdu à l'automne par une légère hausse de la demande de chauffage. Les performances énergétiques des TVE, qui varient au cours des saisons, correspondent à - 2 500 GW h en hiver (- 4.5 %), environ - 1 500 GW h au printemps (- 8 %), - 200 à - 300 GW h en été (- 23 à -28 % respectivement sans et avec arrosage estival) et environ - 1 323 GW h à l'automne (- 7.6 %) ;

— **Les stratégies arborées n'ont des effets bénéfiques que sur la consommation énergétique liée à la climatisation**, donc principalement en été. **Leur impact sur la consommation de climatisation** (qui n'est pas visible sur la FIGURE 8.4 qui intègre climatisation et chauffage) **est conséquent : il est comparable à celui des TVE non irriguées pour le scénario *AC-V25** (respectivement - 13.8 et - 15 %) et à celui des TVE irriguées pour le scénario *AC-V75** (respectivement - 24 et - 22.8 %)**. Pour les stratégies de végétation basse, il faut atteindre la couverture végétale maximale (*AC-V75*) pour obtenir un effet presque équivalent à celui des TVE non irriguées (- 13 %).

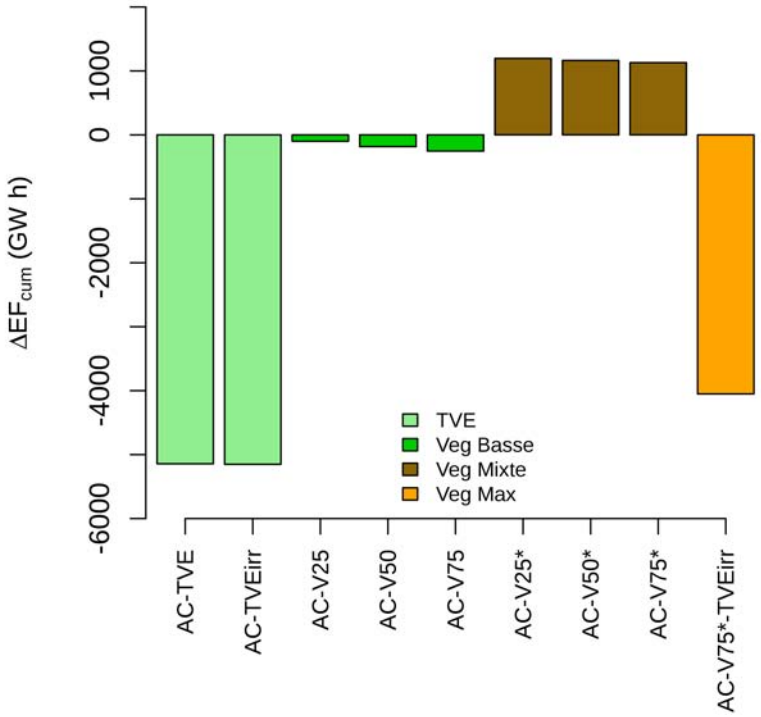


FIGURE 8.3 – *Différences ou anomalies d'EF_{cum} annuelles moyennes entre chaque scénario de végétalisation et la référence (AC, 86 449 GW h) après intégration spatiale sur l'ensemble du domaine et moyenne sur la décennie 1999-2008*

	HIVER				PRINTEMPS				ETE				AUTOMNE				AN
	Clim		Chauf		Clim		Chauf		Clim		Chauf		Clim		Chauf		Total
Scénario	**Moy**	σ	**Moy**	σ	**Moy**	σ	**Moy**	σ	**Moy**	σ	**Moy**	σ	**Moy**	σ	**Moy**	σ	**Moy**
AC	0	0	51 637	5 181	14	12	16 450	3 053	492	505	213	109	16	17	17 626	2 630	86 449
AC-TVE	0	0	49 334	4 968	11	9	15 132	3 065	424	457	118	75	13	14	16 273	2 516	81 305
AC-TVEirr	0	0	49 334	4 968	11	9	15 132	3 065	374	407	131	77	12	12	16 303	2 521	81 297
AC-V25	0	0	51 569	5 182	13	11	16 451	3 044	469	486	217	111	15	16	17 614	2 631	86 348
AC-V50	0	0	51 511	5 184	13	10	16 453	3 034	448	468	222	112	14	16	17 605	2 632	86 265
AC-V75	0	0	51 462	5 187	12	10	16 456	3 025	428	451	226	113	13	15	17 599	2 634	86 196
AC-V25*	0	0	52 128	5 191	15	13	16 871	3 133	418	449	268	130	14	16	17 930	2 642	87 645
AC-V50*	0	0	52 087	5 195	14	12	16 898	3 129	398	431	273	131	13	15	17 930	2 644	87 613
AC-V75*	0	0	52 049	5 200	14	11	16 920	3 124	380	414	277	132	12	14	17 927	2 646	87 578
AC-V75*-TVEirr	0	0	49 732	4 991	10	8	15 601	3 142	283	327	178	96	9	10	16 584	2 538	82 397

TABLE 8.2 – *Impacts (Moy) et écart-type (σ) moyens de chaque scénario de végétalisation climatisé sur les consommations d'énergie saisonnières et annuelles à l'échelle du domaine (EF_{cum}, en GWh) du fait de la climatisation (Clim) et du chauffage (Chauf) des bâtiments, pour la decénnie 1999-2008*

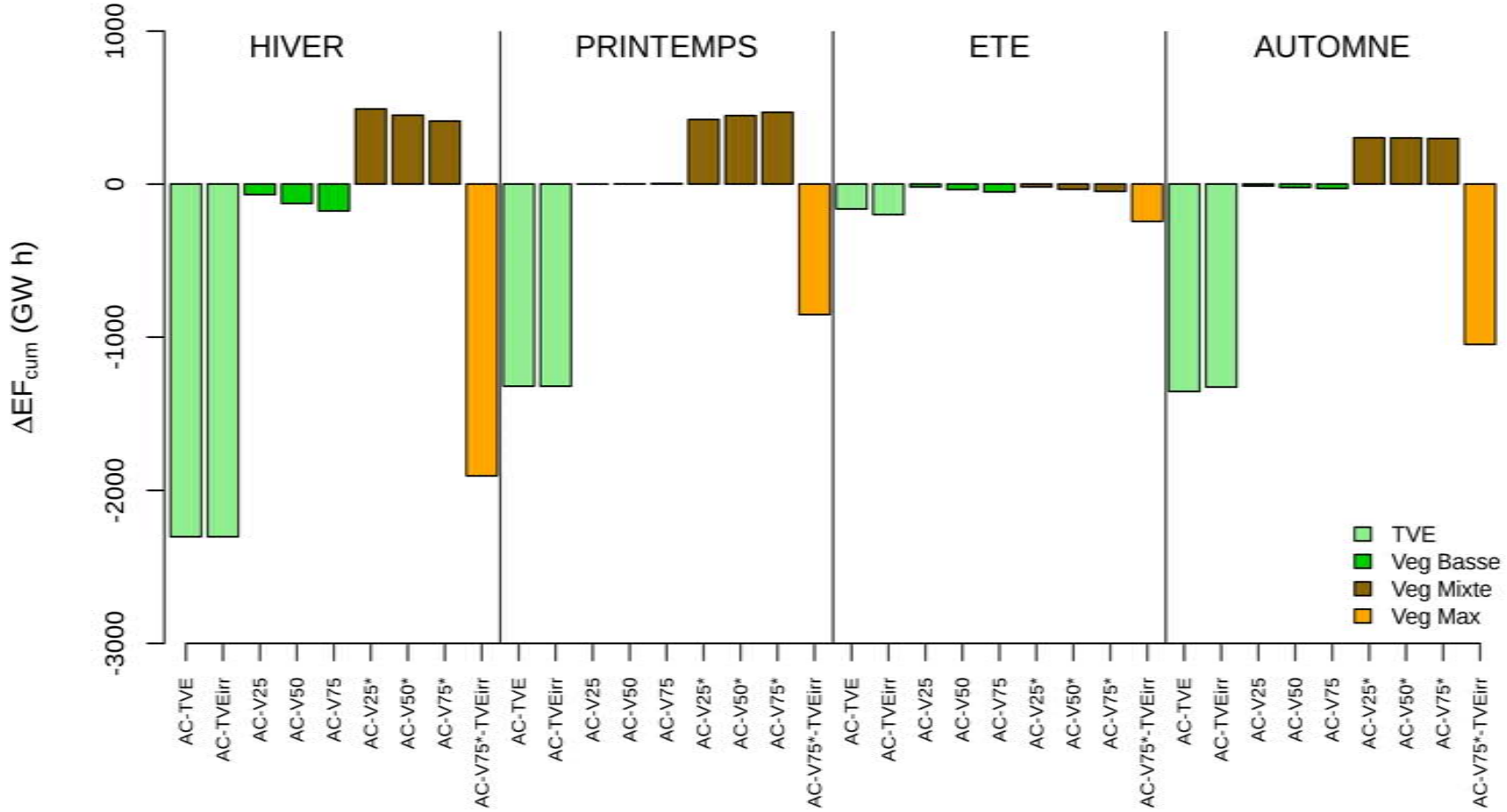


FIGURE 8.4 – *Différences ou anomalies d'EF_{cum} saisonnières moyennes entre chaque scénario de végétalisation et la référence (AC) après intégration spatiale sur l'ensemble du domaine et moyenne sur la décennie 1999-2008*

8.2.2 Variations annuelles moyennes d'EP_{cum}

Les chiffres précédents ont décrit les performances énergétiques des différentes stratégies de végétalisation à l'échelle de tout le tissu urbain et pour les différentes saisons. Il est aussi intéressant d'étudier la variabilité de ces performances à l'échelle des différents types de bâti. Cette approche est donc étudiée dans ce paragraphe avec comme indicateur l'énergie primaire à l'échelle annuelle exprimée selon les classes énergétiques du Grenelle. Les résultats de cette analyse sont synthétisés dans la TABLE 8.3 pour l'ensemble du domaine et les trois tissus de bâtis dominants du domaine (*Haussmannien*, *Collectif* et *Individuel*).

Scénario	Domaine	Haussmannien	Collectif	Individuel
AC	201	105	140	266
AC-TVE	186	97	130	246
AC-TVEirr	186	97	130	246
AC-V25	200	105	140	266
AC-V50	200	105	140	265
AC-V75	200	105	140	265
AC-V25*	203	106	142	269
AC-V50*	203	106	142	269
AC-V75*	203	106	141	268
AC-V75*-TVEirr	187	98	131	248

TABLE 8.3 – *Consommations énergétiques annuelles moyennes des bâtiments, calculées pour la décennie 1999-2008 en énergie primaire (EPcum, en kWh m^{-2} de plancher) pour le scénario de référence et chaque scénario de végétalisation*

On remarque pour le scénario de référence *AC* que la consommation annuelle moyenne dans le tissu Haussmannien est inférieure à celle dans du tissu Collectif, elle-même inférieure à celle du tissu de bâti Individuel alors que l'isolation respective de ces bâtiments va croissant (cf caractéristiques thermiques prescrites, répertoriées en Annexe C). Les hypothèses avancées pour expliquer ce résultat inattendu sont une combinaison des effets du type de bâti (caractéristiques des matériaux), de la densité de bâti, et du climat extérieur auquel ces bâtiments sont exposés (donc de leur situation géographique dans le domaine), en lien donc avec la structure spatiale des températures (ICU). L'îlot de chaleur urbain en hiver permettrait au centre de Paris une moindre consommation de chauffage pour des bâtiments pourtant moins bien isolés. Inversement, à l'extérieur de Paris, des bâtiments modernes (bâti Individuel) mieux isolés présenteraient des consommations énergétiques plus élevées. Ces consommations ont pu être comparées à celles présentées par J-M Gary dans PREDAT (2012) pour l'Haussmannien (80 kWh m^{-2} an^{-1}) et les maisons individuelles (entre 350 kWh m^{-2} an^{-1} pour une construction des années 1960 et 140 kWh m^{-2} an^{-1} pour les années 2000) et ceux de Pigeon et al. (2012) (89 kWh m^{-2} an^{-1} pour l'Haussmannien et 133 kWh m^{-2} an^{-1} pour le Collectif), et ont donc des ordres de grandeur respectivement comparables à celles de ces deux auteurs.

La FIGURE 8.5 présente la carte d'EP_{cum} pour trois scénarios de toitures végétalisées.

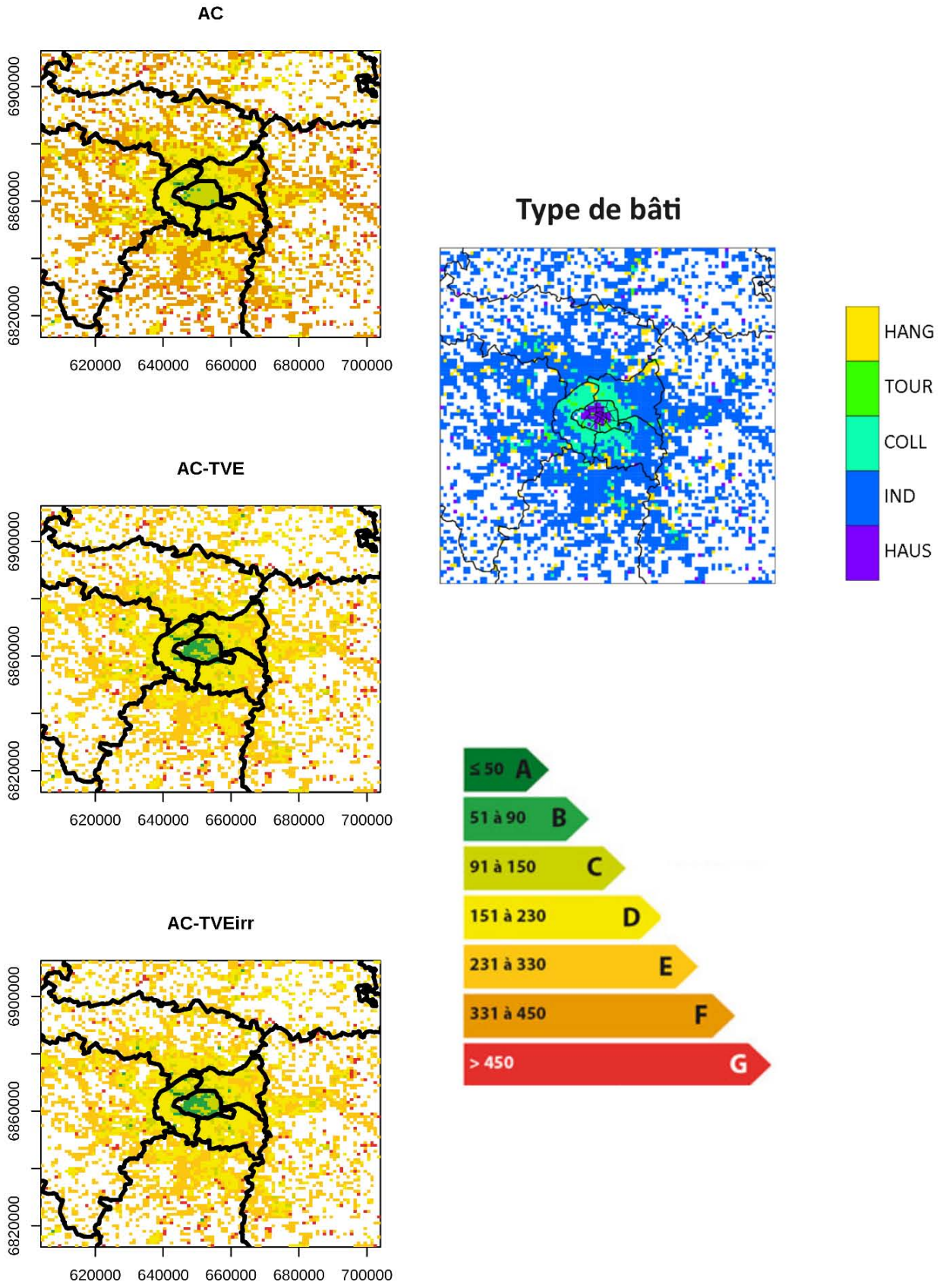


FIGURE 8.5 – *Carte d'EP_{cum} pour les scénarios avec toitures végétalisées : AC, AC-TVE et AC-TVEirr*

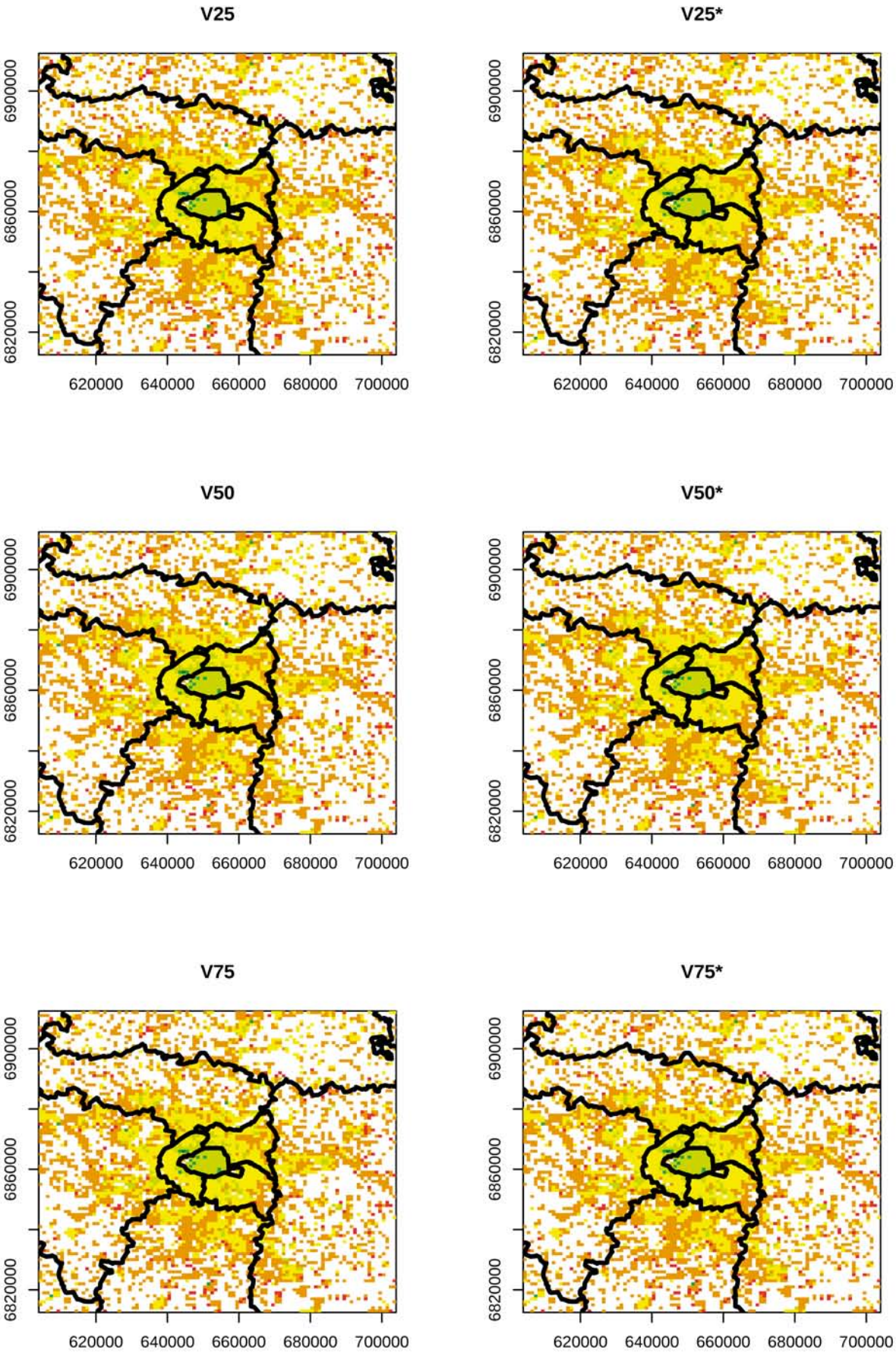


FIGURE 8.6 – *Carte d'EP_{cum} pour les scénarios de végétation basse V25-75 (gauche) et de végétation haute arborée V25-75* (droite). Légende identique à celle de la* FIGURE *8.5*

On voit que les TVE entraînent une diminution d'EP_{cum} suffisante pour faire basculer certains bâtiments dans des classes énergétiques plus performantes : au centre de Paris, certains bâtiments passent de la classe C à B (types Collectif et Haussmannien), en périphérie de la classe F à E (type Individuel). En contraste, la FIGURE 8.6 montre que les scénarios de végétalisation au sol, qui n'agissent qu'indirectement sur l'énergétique du bâtiment, ne modifient pas la performance des bâtiments, comme le confirment les chiffres de la TABLE 8.3, qui montreraient même une tendance des stratégies mixtes arborées à augmenter EP_{cum} par rapport au scénario de référence. Les performances chiffrées des TVE en termes d'EP_{cum} sont relativement homogènes pour les trois tissus de bâtis étudiés, avec - 7.6 % dans l'Haussmannien, - 7.1 % dans le Collectif, et - 7.5 % dans l'Individuel. L'impact relativement marqué bien qu'indirect des TVE sur le tissu Haussmannien reste étonnant.

8.3 Impacts sur la gestion de l'eau urbaine

Les scénarios que nous avons étudiés ont un impact sur le bilan d'eau de la ville. Cette section quantifie l'impact de la végétalisation sur l'eau perdue par ruissellement et consommée par arrosage. Le ruissellement simulé par le modèle comprend trois composantes :

- le ruissellement des toitures ;
- le ruissellement des rues ;
- et une composante plus limitée provenant des jardins.

Sur les surfaces imperméables des toitures et des rues, le ruissellement correspond à la quantité d'eau de pluie interceptée qui n'est pas évaporée. Pour les surfaces naturelles urbaines, il provient d'un équilibre hydrique plus complexe qui est piloté par les capacités des sols à infilter l'eau, et aussi pour les TVE à leur pouvoir de rétention/stockage.

Quantités d'eau ruisselées

Nos résultats de simulation mettent en évidence un ruissellement nul provenant des surfaces naturelles urbaines de pleine terre, quelque soit le scénario simulé. Par conséquent, les chiffres discutés par la suite proviennent exclusivement des contributions de ruissellement des rues et des toitures. La TABLE 8.4 présente les cumuls de ruissellement annuel et saisonniers pour les différents scénarios, ainsi que les cumuls saisonniers moyens des précipitations prescrites sur la décennie 1999-2008. D'un point de vue saisonnier, le ruissellement est uniformément distribué sur l'année, avec un petit minimum au printemps et un maximum en automne. On remarque une grande variabilité inter-annuelle sur la décennie étudiée, avec des valeurs d'écarts-types correspondant à 30-40 % des valeurs moyennes.

Le ruissellement annuel est notablement diminué par les différentes stratégies de végétalisation, avec une performance généralement supérieure des stratégies de pleine terre sur les TVE, avec une réduction du ruissellement respectivement de 11, 22 et 33 % pour les scénarios de végétation basse (*AC-V25-50-75*), qui correspond au taux d'augmentation de la surface totale de végétation urbaine simulés dans ces scénarios. Les scénarios arborés engendrent des réductions du ruissellement similaires, et la combinaison maximale de végétation (*AC-V75*-TVEirr*) la réduction maximale (- 35 %).

L'analyse saisonnière (Table 8.4 et Figure 8.7) montre un effet très positif des TVE sur le ruissellement au printemps (- 18 %) et en été (lorsqu'elles ne sont pas arrosées, - 26 %), ainsi qu'un effet légèrement négatif en hiver (+ 4 %) quand les sols des TVE sont peut-être déjà trés chargés en eau et que les pertes d'eau par évapotranspiration sont très limitées par les conditions micro-climatiques et l'inactivité des plantes, et en été quand elles sont irriguées (+ 7 %). Ces résultats mettent en évidence que le volume d'eau déterminé pour l'arrosage des TVE, pour éviter le stress hydrique en contexte de canicule est probablement sur-évalué pour des conditions climatiques moins extrêmes et il serait intéressant de le ré-ajuster. Ceci étant, étant donné que la paramétrisation développée pour la simulation des TVE (TEB-GREENROOF) a démontré sa tendance à surestimer le ruissellement en sortie de toiture (Chap. 5), il est possible que le potentiel de rétention des toitures soit pour l'instant sous-estimé. Pour les stratégies de végétation de pleine terre, les performances saisonnières sont à l'instar des performances annuelles, de - 11, -22, et - 33 %.

Précipitations (mm)	169		169		177		188		703
	HIVER		**PRINTEMPS**		**ETE**		**AUTOMNE**		**AN**
Scénario	**Moy**	σ	**Moy**	σ	**Moy**	σ	**Moy**	σ	**Moy**
AC	103.20	26.60	95.53	28.64	112.45	35.90	114.81	33.04	425.99
AC-TVE	107.59	26.92	78.01	24.27	83.50	31.36	101.36	33.46	370.46
AC-TVEirr	107.59	26.92	78.01	24.27	120.55	37.28	103.18	34.43	409.33
AC-V25	91.81	23.68	85.09	25.49	100.25	31.96	102.23	29.43	379.38
AC-V50	80.47	20.76	74.66	22.36	88.05	28.02	89.67	25.82	332.85
AC-V75	69.19	17.85	64.26	19.22	75.84	24.08	77.13	22.23	286.42
AC-V25*	94.87	24.04	86.76	25.84	101.64	32.15	104.18	30.05	387.45
AC-V50*	83.18	21.08	76.14	22.66	89.24	28.19	91.38	26.37	339.94
AC-V75*	71.44	18.12	65.48	19.48	76.80	24.22	78.54	22.69	292.26
AC-V75*-TVEirr	76.08	18.47	48.27	15.63	87.06	26.06	67.33	24.23	278.74

Table 8.4 – *Quantités d'eaux ruisselées par saison et par an en moyenne (et écart-type) en ville (en Mm3) et pour chaque scénario, calculées par aggrégation spatiale sur la totalité du domaine urbain des ruissellements sur les surfaces de voiries, toitures et espaces verts de pleine terre. Les précipitations saisonnières moyennes au cours de la décennie étudiée (1999-2008) sont indiquées pour référence.*

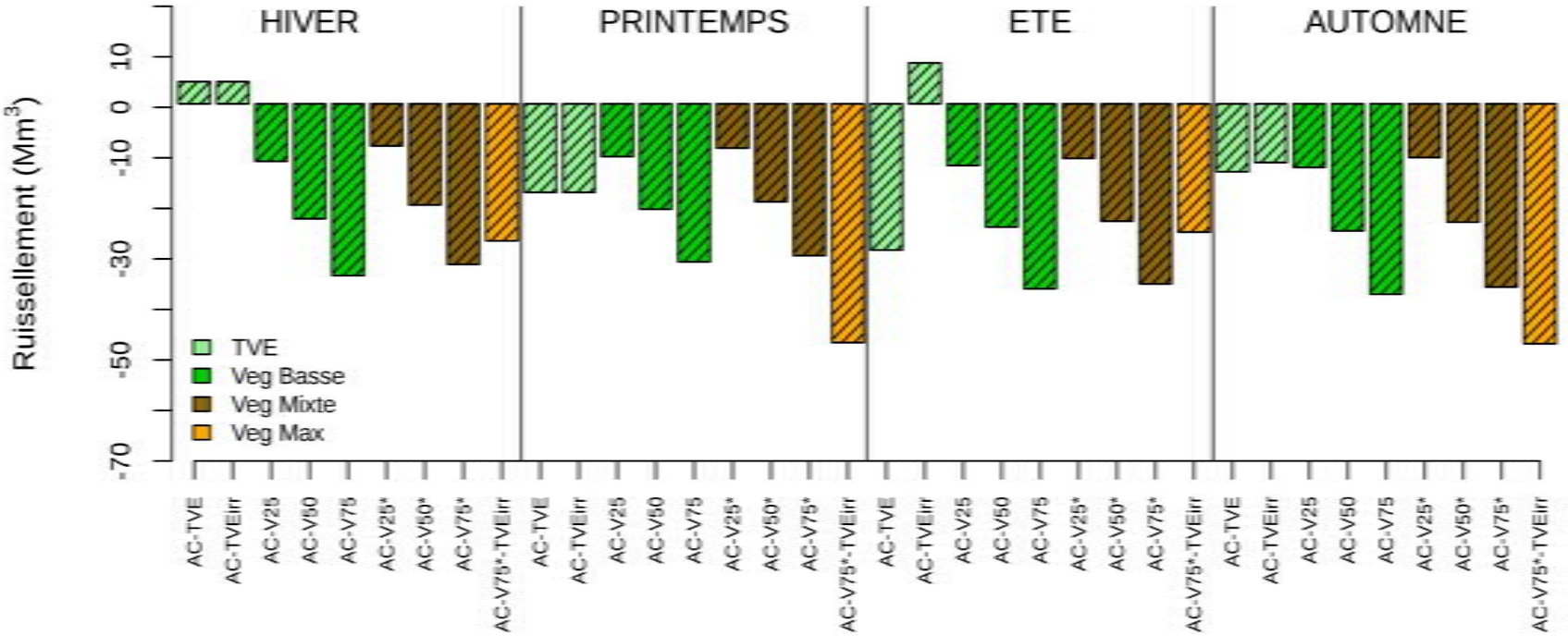


FIGURE 8.7 – *Différences ou anomalies de quantitées d'eau ruisselées sur les surfaces urbaines en moyenne pour chaque saison et chaque scénario de végétalisation et la référence (AC) et après intégration spatiale sur l'ensemble du domaine et moyenne sur la décennie 1999-2008*

Consommation d'eau pour l'arrosage estival de la végétation urbaine

L'arrosage de la végétation étant automatique (fréquence et volume imposés), il est identique pour chaque année de la décennie étudiée. Les cumuls des volumes d'arrosage pour les TVE, la végétation de pleine terre et l'ensemble de la végétation urbaine sont présentés dans la TABLE 8.5.

	A_{urb} (en Mm^3)		
Scénario	**TVE**	**Végétation au sol**	**Total**
AC	0.00	282.31	282.31
AC-TVE	0.00	282.31	282.31
AC-TVEirr	80.48	282.31	362.79
AC-V25	0.00	314.23	314.23
AC-V50	0.00	346.15	346.15
AC-V75	0.00	378.07	378.07
AC-V25*	0.00	314.23	314.23
AC-V50*	0.00	346.15	346.15
AC-V75*	0.00	378.07	378.07
AC-V75*-TVEirr	80.48	378.07	458.55

TABLE 8.5 – *Consommations d'eau associées à l'irrigation estivale de la végétation urbaine de l'ensemble du domaine, pour chaque scénario (en Mm^3)*

Ces résultats mettent en évidence que les pertes d'eau par ruissellement s'équilibrent avec la consommation d'arrosage dans le cas des TVE irriguées et des scénarios *V25*, ce qui suggère que le ruissellement annuel moyen, s'il était stocké à l'échelle de la ville, pourrait subvenir aux besoins d'arrosage en été. Au-delà (scénarios *V50-75*), la consommation d'eau est supérieure au ruissellement annuel moyen. La connaissance des volumes respectifs des pertes d'eau par ruissellement et des ressources en eau nécessaires pour l'arrosage est essentiel dans la planification de la gestion de l'eau urbaine à l'échelle de l'année.

8.4 Conclusions

Nous avons montré que les TVE ont des impacts positifs principalement sur la consommation énergétique des bâtiments et sur la gestion des eaux pluviales. Leurs performances énergétiques, liées à leur effet isolant tout au long de l'année et à leur pouvoir évapo-transpirant en été, varient avec les conditions climatiques saisonnières. On peut noter toutefois que leurs performances énergétiques estivales, qui sont peu marquées en absolu dans le contexte de simulation du climat présent parisien (contribution du chauffage dominant) pourrait s'amplifier en climat futur. Leur efficacité à gérer les eaux pluviales sont variables selon les saisons, avec dans nos simulations une contre-performance en hiver, qu'on prête à la fois à la saturation des sols et à la tendance du modèle à trop drainer l'eau dans le sol des TVE. Ces performances pourraient être améliorées, non seulement par le raffinement du modèle actuel, mais surtout par la mise en place de couches de rétention en partie basse des TVE, qui permettraient une meilleure régulation des eaux pluviales interceptées.

En climat présent, l'augmentation des surfaces végétales au sol a un impact très limité, voire négatif, sur la consommation d'énergie qui est principalement liée au chauffage (du fait qu'elle

rafraîchit l'environnement urbain) mais est très performante en termes de gestion des eaux pluviales. Comme aucun des évènements pluvieux de la décennie simulée n'a généré de ruissellement en surface, les réductions du ruissellement urbain global engendrées par ces mesures sont estimées proportionnelles au taux d'augmentation des surfaces végétalisées du sol urbain.

Aussi, dans la version actuelle du modèle TEB utilisé pour cette analyse saisonnière, l'hypothèse est faite que la totalité des surfaces artificielles sont connectées au réseau. Par conséquent 100 % de l'eau ruisselée est récupérée par le réseau. En réalité, une partie est captée par les surfaces naturelles. Il sera donc important d'améliorer la représentation de ce processus de redistribution de l'eau ruisselée dans le modèle par une meilleure description de l'hydrologie urbaine. Une meilleure description des transferts hydriques dans TEB permettra aussi à plus long terme de simuler l'effet de systèmes de drainage urbains alternatifs (SUDS en anglais pour Sustainable Urbain Drainage Systems) pour diminuer le ruissellement de surface en ville, comme les noues végétalisées, les revêtements de chaussées poreux, etc... à l'échelle de la ville.

En termes d'aménagement urbain, il serait intéressant d'approfondir l'intérêt d'implémenter géographiquement une mesure de végétalisation plutôt qu'une autre (au sol ou en toiture ? végétation basse ou arborée ?) ou des mesures combinées, en tenant compte des besoins et objectifs des agglomérations. Par exemple, la ville de Paris, afin de limiter les rejets d'eaux unitaires dans le milieu naturel (Seine), en plus de chercher à réguler les débits des pluies dans le réseau souterrain, envisage des solutions permettant, en amont du réseau, un abattement volumique des premières pluies. Compte tenu de la carte des bassins versants urbains et des particularités du réseau souterrain, une gestion zonale de ces pluies a été envisagée (Nezeys, 2013), avec notamment des solutions *sans regret* de type végétal comme les jardins de pluie ou les toitures végétalisées. En effet, les toitures végétalisées, même si leurs performances peuvent être discutées sous des climats différents, peuvent être des solutions intéressantes au centre des villes où la densité de bâti, élevée, laisse peu de place aux scénarios de végétalisation de pleine terre. Enfin, des trames vertes constituées par des espaces verts de petite taille (là où la densité de bâti est élevée) distribués sur l'ensemble du tissu urbain, et de plus grande taille localement comme des parcs et bien des bois péri-urbains, pourraient contribuer à améliorer la gestion des eaux pluviales de façon efficace, tout en améliorant le confort estival. En climat présent, il reste que ces stratégies rafraîchissantes tout au long de l'année, engendrent une augmentation de la consommation de chauffage. Aux vues des projections climatiques futures (Chap. 2), cet effet négatif devrait toutefois s'amenuiser.

CHAPITRE 9

Conclusions et perspectives

Les objectifs de la thèse consistaient dans un premier temps à améliorer la représentation de la végétation urbaine dans le modèle de canopée urbaine TEB et, dans un second temps, d'utiliser ces nouvelles représentations et celles développées en parallèle au laboratoire pour évaluer les impacts de la climatisation et de la végétalisation comme mesures d'adaptation de la ville aux changements climatiques pour améliorer le confort thermique de la population et la consommation énergétique de la ville.

Conclusions

Afin d'améliorer la prise en compte dans le modèle TEB de la végétation urbaine, j'ai développé une paramétrisation pour la modélisation de toitures végétalisées extensives, baptisée GREENROOF. Cette paramétrisation permet de décrire des toitures réalistes composées de végétation (sédum ou gazon), du compartiment de sol associant une couche de substrat et une couche de drainage, ainsi que de matériaux isolants ou d'étanchéité qui sont souvent ajoutés à l'installation de ce type de dispositif sur le toit structural. Cette paramétrisation est basée sur le couplage des modèles TEB et ISBA de SURFEX. Elle permet de décrire de façon détaillée, pour l'échelle de la ville, les échanges d'énergie, d'eau et de quantité de mouvement avec l'atmosphère, ainsi que les échanges thermiques avec les bâtiments porteurs et le ruissellement d'eau en sortie de toiture. Ce ruissellement pourra à terme être connecté au réseau d'eau urbain dans une future version de TEB. GREENROOF a été calibré grâce à une parcelle d'étude située au CETE de l'Est de Nancy avec lequel une collaboration fructueuse a été établie. Cet exercice de calibration a permis d'identifier des valeurs de caractéristiques hydrauliques typiques pour les sols complexes des toitures végétalisées que le modèle ISBA ne peut pas calculer. Une attention particulière a été portée sur le fonctionnement de la couche de drainage, montrant qu'il se rapprochait de celui d'un sol organique. Il s'agit d'un résultat intéressant et nouveau car peu d'études ont tenté de caractériser le fonctionnement hydrologique de cette couche de sol. L'évaluation de GREENROOF

sur cette même parcelle pour la simulation des températures et teneurs en eau du sol, ainsi que des débits d'eau en sortie de toiture, a été réalisée sur une période de trois mois, de septembre à novembre 2011. Les résultats obtenus démontrent une bonne capacité de GREENROOF à modéliser la dynamique de toutes les variables évaluées. Ils mettent aussi en évidence une tendance du modèle à sous-estimer les teneurs en eau du sol des toitures et à surestimer le ruissellement en sortie de toiture d'environ 33 %. Le modèle présente de bons résultats pour la simulation des températures avec un biais moyen de 2.3°C pour celle du substrat et 0.7°C pour celle de la couche de drainage, avec toutefois une amplitude de variations supérieure à celle observée sur la parcelle d'étude. Compte-tenu des difficultés à simuler les transferts hydriques au sein des couches de sol, mi-naturelles, mi-synthétiques, de ce type de dispositif végétal, ces résultats sont encourageants. Il sont d'ailleurs comparables à des résultats obtenus sur le même site à partir d'HYDRUS, modèle hydrologique à haute résolution.

Afin de permettre un fonctionnement optimal de la végétation, une description des pratiques d'arrosage en ville, que j'ai cherchée à rendre la plus réaliste possible, a été intégrée au modèle TEB, afin de permettre l'arrosage systématique des espaces verts en été et de tester des scénarios d'arrosage pour les toitures végétalisées. Il est désormais possible dans TEB de spécifier un protocole d'arrosage pour la végétation au sol (par asperseurs) et pour les toitures végétalisées (sous forme de goutte à goutte) en précisant les plages horaires et les taux d'irrigation.

Dans le cadre du projet CLIM2, j'ai évalué par des simulations couplées de TEB avec le modèle atmosphérique MESO-NH l'impact de différents systèmes et demandes de climatisation sur le micro-climat extérieur de la ville de Paris et sous les conditions météorologiques de la canicule 2003. Cette étude, dans laquelle la climatisation est mise en place pour assurer le confort thermique intérieur (avec dans le cas de nos simulations, une température de consigne de 26°C) a mis en évidence que toutes les formes de climatisation qui rejettent de la chaleur (sèche ou humide) dans l'atmosphère génèrent une augmentation de la température des rues au niveau des piétons. L'augmentation de la température est d'ailleurs proportionnelle à la puissance des rejets de chaleur sensible dans l'atmosphère. Pour un scénario de climatisation présent, l'augmentation de température est de l'ordre de 0.5°C. Pour un scénario futur (2020-2030) avec un développement massif de la climatisation, elle s'élèverait à 2°C environ. Ce travail démontre non seulement que cette mesure d'adaptation n'est efficace que pour le confort intérieur mais permet aussi de quantifier l'impact de cette mesure sur le micro-climat urbain, et ce pour différents systèmes de climatisation.

Différentes stratégies de végétalisation ont ensuite été évaluées dans le cadre du projet MUSCADE : des stratégies de pleine terre avec végétalisation de 25 %, 50 % et 75 % des surfaces de trottoirs, parkings et places partout où cela était possible dans la ville (soit avec de la végétation basse, soit avec une végétation mixte composée à 40 % d'arbres), des stratégies de végétation en toiture (avec ou sans arrosage), ainsi qu'une combinaison maximale de végétation. Ces mesures ont été évaluées conjointement à une utilisation vertueuse de la climatisation (température de consigne de 26°C, conforme à la RT 2012, et similaire à celle prescrite dans l'étude CLIM2), considérée comme une mesure sans laquelle le confort thermique à l'intérieur ne peut être assuré. Cette étude se place une nouvelle fois dans le contexte de la ville de Paris et la canicule 2003, afin d'évaluer les performances de la végétation dans des conditions estivales extrêmes. J'ai simulé ces scénarios en utilisant une configuration de simulation qui avait été mise en place dans le projet MUSCADE et qui m'a permis d'utiliser une version très complète de TEB en mode forcé.

Les résultats de simulation montrent que les toitures végétalisées n'ont, soit aucun effet sur la température dans les rues au niveau des piétons, soit un effet minime (au mieux de 0.5°C) quand elles sont arrosées. L'augmentation de la couverture végétale au sol est plus efficace à rafraîchir les rues, avec un rafraîchissement d'autant plus élevé que le taux de végétalisation est important et que la proportion d'arbres est élevée. Ces différences d'impacts entre végétation basse et arborée proviennent principalement des différences de densité foliaire et donc des variations des taux d'évapotranspiration entre les deux types de végétation car les effets d'ombrage des arbres sur les surfaces urbaines ne sont pas actuellement pris en compte dans le modèle. Les rafraîchissements obtenus varient entre - 0.5 et - 2°C selon les stratégies, et le scénario de végétalisation maximale (augmentation de 33 % de la surface globale de végétation et installation massive de toitures végétalisées irriguées sur les bâtiments collectifs et individuels) permet d'atteindre jusqu'à - 3°C localement. L'effet de rafraîchissement est aussi plus marqué la nuit que le jour pour les stratégies arborées, ces différences provenant du choix que j'ai fait en termes de plage horaire et mode d'arrosage (la nuit, par asperseurs). Le rafraîchissement des températures se traduit systématiquement par l'amélioration du confort thermique avec une réduction sensible du temps passé dans les différents niveaux de stress thermique, jusqu'à 1 heure de moins passée en stress thermique extrême pour un individu au soleil ou en stress thermique très élevé à l'ombre pour le scénario de végétalisation maximale. La prise en compte des effets d'ombrage des arbres devraient logiquement améliorer les bénéfices des stratégies arborées en termes de confort thermique. Enfin, l'analyse des impacts des différents tissus urbains montre un effet net de la forme urbaine sur les conditions de confort, avec un confort extérieur meilleur dans le tissu Haussmannien dont la forme permet de limiter les apports solaires et ainsi le réchauffement des rues en journée.

Contrairement à leur faible impact sur le confort thermique extérieur, les toitures végétalisées, du fait de leur pouvoir à la fois isolant pour le bâtiment et évapotranspirant, apparaissent comme une des solutions les plus efficaces pour réduire la consommation énergétique liée à l'usage de la climatisation au cours de la canicule : elles permettent de diminuer d'environ 12 % la consommation totale d'énergie sur la durée de la canicule et de 13 % la demande maximale au plus chaud de la canicule. Une réduction équivalente de consommation énergétique totale n'est atteinte que pour la stratégie maximale arborée, qui du fait de l'arrosage nocturne, est beaucoup moins performante que les toitures végétalisées sur le pic de consommation. Ces résultats étaient prévisibles du fait que la végétation au sol n'a qu'un effet indirect sur la consommation énergétique via le rafraîchissement des températures extérieures. Ces simulations ont aussi démontré qu'une augmentation faible de végétation arborée avait autant d'impact sur la consommation énergétique qu'une augmentation élevée de végétation basse, en lien avec les rafraîchissements respectifs que ces deux solutions génèrent.
Ces performances tant sur l'amélioration du confort thermique extérieur que sur la consommation énergétique ont toutefois un coût en eau considérable qu'il convient de comparer aux apports d'eau que la ville peut recevoir au cours des autres saisons sous forme de précipitations. En supposant que le ruissellement de surface engendré au cours de l'année sur l'ensemble des surfaces urbaines puisse être stocké afin d'assurer l'arrosage estival de la végétation urbaine, le ruissellement annuel moyen, estimé à partir de dix ans de simulation, permettrait d'assurer l'arrosage complet de la végétation urbaine uniquement pour le scénario de toitures végétalisées et pour les scénarios d'augmentation minimum de végétation de pleine terre. Quand on augmente trop la couverture de végétation en ville, la diminution de ruissellement annuel engendrée ne permet plus de couvrir les besoins en eau pour l'arrosage en été, suggérant que la ressource en eau devrait

être trouvée ailleurs. Il serait intéressant dans le futur de vérifier ces résultats avec une version de TEB qui permettrait une description explicite des processus hydrologiques dans le sous-sol urbain.

Finalement, l'impact estival moyen des stratégies de végétalisation estimé sur dix ans montre des tendances similaires à celles observées pendant la canicule, mais de moindre ampleur. L'augmentation de végétation engendre en général une diminution des températures extérieures tout au long de l'année, plus marquée pour la végétation arborée, ce qui donne lieu à une légère surconsommation d'énergie sur l'année (de 1 % environ). Le pouvoir isolant des toitures végétalisées permet quant à lui une économie d'énergie annuelle d'environ 7% qui démontre encore les performances supérieures des toitures végétalisées sur la végétation de pleine terre en termes de réduction de consommation énergétique.

L'analyse comparée des impacts des scénarios d'adaptation par la climatisation et par la combinaison de climatisation et végétalisation dans les deux études présentées montre qu'en période de canicule, avec des conditions de confort intérieur équivalentes (température de consigne à 26°C), les mesures de végétalisation évaluées sont capables de contrebalancer l'augmentation de température engendrée par les rejets de chaleur de la climatisation et même de rafraîchir l'environnement extérieur, permettant d'améliorer le confort thermique dans la rue. En climat présent, les consommations énergétiques étant principalement liées à l'usage du chauffage, l'impact annuel des stratégies de pleine terre n'est pas forcément intéressant, mais pourrait le devenir en climat futur, sachant que le réchauffement global entraîne une diminution significative de la consommation d'énergie pour le chauffage en hiver et inversement, une augmentation en été pour la climatisation.

Perspectives

Afin d'être en mesure d'évaluer des mesures d'adaptation plus variées en termes de dispositifs végétaux, il serait utile de disposer de paramétrisations pour les façades végétalisées, ainsi que d'une paramétrisation des effets radiatifs et dynamiques induits par la présence d'arbres dans les rues. Plus complexes à mettre en place que les toitures végétalisées, les façades végétalisées n'ont pas connu le même succès que les premières. Elles sont encore peu mises en œuvre dans les villes, et finalement peu étudiées et documentées. Cependant, des travaux découverts à la dernière conférence sur le climat urbain (Dublin, 2012) m'ont suggéré des pistes pour le développement de ce dispositif dans TEB. En première approche, Futcher et al. (2012) ont choisi de simuler l'impact des façages végétalisées dans EnergyPlus en appliquant un coefficient de transmittance pour modifier le rayonnement solaire reçu par les façades. Honjo et al. (2012) ont étudié une façade végétalisée expérimentale et en a déduit un bilan radiatif très simple dans lequel il a fixé le flux de chaleur latente à 10 % du rayonnement net. Pour TEB, il serait selon moi judicieux d'implémenter ce dispositif végétal de manière itérative, en simulant les processus physiques en jeu, principalement l'interception du rayonnement, l'évapotranspiration et la modification de l'écoulement d'air en façade, les uns après les autres, en se basant sur la littérature qui décrit chaque processus spécifiquement. Une paramétrisation plus détaillée de ce dispositif végétal pourrait s'inspirer des conclusions des travaux de Malys (2013) réalisés pour la modélisation des interactions thermiques à très fine échelle entre les murs et la végétation en façade dans le cadre du projet VegDUD.

Quant aux arbres de rue, maintenant que TEB permet de fixer l'orientation des rues canyon et de dissocier le traitement des deux murs, la prise en compte d'arbres dans le bilan radiatif du canyon urbain pourrait s'inspirer de celle que Lee et Park (2008) ont mis en place dans leur modèle VUCM (Vegetated Urban Canopy Model) qui fait des hypothèses similaires à TEB.
Parallèlement aux travaux présentés dans ce manuscrit, j'ai aussi mis en place un volet expérimental, qui a été intégré à la campagne de plus grande envergure de VegDUD (FLUXSAP2012), et qui a permis de collecter un jeu de données relativement complet d'observations dans un jardin arboré en zone résidentielle : variables micro-climatiques classiques, composantes visible et infra rouge du bilan radiatif global, au-dessus du jardin et en-dessous du houppier de l'arbre, mesures des flux turbulents dans le jardin, ainsi que des températures, teneurs en eau et potentiels hydriques du sol. L'analyse de ces données est en cours et permettra non seulement d'étudier les processus radiatif à micro-échelle entre l'arbre et le bâti, mais aussi de disposer d'un jeu de données complet pour évaluer les aspects radiatifs de cette future paramétrisation *arborée* du modèle de canopée urbaine. Une autre approche pour évaluer cette future paramétrisation serait de la comparer à des simulations réalisées avec un modèle de transfert radiatif 3D comme le modèle DART (Gastellu-Etchegorry et al., 2008).

Enfin, il serait intéressant de tester si un modèle à double porosité pour les sols complexes des toitures végétalisées donnerait de meilleures estimations des ruissellements que la version actuelle de GREENROOF. Les futurs développements de GREENROOF devraient à mon sens incorporer la simulation de couche de rétention pour simuler ce type de toiture de façon plus réaliste pour les climats secs. Des collaborations sont en cours (Université de Western Ontario et CETE d'Ile-de-France) qui devraient permettre d'évaluer de nouveaux développements sous des climats différents.

Une description détaillée du sous-sol urbain et de son hydrologie sont en cours de développement. Cette paramétrisation permettra une évaluation plus réaliste des transferts hydrologiques urbains ainsi qu'une meilleure prédiction des performances respectives de différentes mesures d'adaptation aux évènements extrêmes. De fait, pour l'évaluation des stratégies de végétalisation en climat futur, il me semble qu'il sera plus approprié de travailler à l'échelle de l'évènement extrême, comme l'ont fait Gill et al. (2007) pour la ville de Manchester (UK).

Sur la thématique de la gestion de l'eau urbaine, il me semblerait intéressant d'étudier des stratégies alliant végétation et gestion durable de l'eau (Water Sensitive Urban Design ou WSUD) comme celles proposées par Coutts et al. (2013).
Finalement, il sera possible à l'avenir de s'intéresser à d'autres fonctions de la végétation comme son potentiel à séquestrer le carbone pour établir le bilan carbone des villes, grâce aux options déjà disponibles dans TEB-Veg.

ANNEXE A

Influence of air conditioning management on Paris street temperatures

Applied Energy 95 (2012) 102–110

Contents lists available at SciVerse ScienceDirect

Applied Energy

journal homepage: www.elsevier.com/locate/apenergy

Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures

Brice Tremeac [a,*], Pierre Bousquet [a], Cecile de Munck [b], Gregoire Pigeon [b], Valery Masson [b], Colette Marchadier [b], Michele Merchat [c], Pierre Poeuf [c], Francis Meunier [a]

[a] Laboratoire de Génie des Procédés pour l'Environnement, l'Energie et la Santé (LGP2ES – EA21), Cnam-Cemagref, IFFI, case 331, 292 rue Saint-Martin, 75141 Paris Cedex 03, France
[b] CNRM/GAME, Météo France, 42 Avenue Gaspard Coriolis, Toulouse Cedex 31057, France
[c] Climespace, 185 rue de Bercy, Paris 75012, France

ARTICLE INFO

Article history:
Received 14 September 2011
Received in revised form 6 February 2012
Accepted 8 February 2012
Available online 13 March 2012

Keywords:
Air conditioning
Heat island mitigation
Urban heat island
Paris heat wave

ABSTRACT

Projections of future climate suggest increases in extreme temperatures particularly in mid latitudes. In addition, the effect of heat waves, which are becoming a major "summer killer", is exacerbated in urban areas owing to the heat island effect. Air conditioning (*A*/*C*) is a key parameter for health problems in case of heat waves since, on one hand, it reduces mortality but, on the other hand, depending on the heat management, it can increase street temperature therefore increasing the air cooling demand. Results of a meso-scale meteorological model (MESO-NH), coupled to an urban energy balance model including a simplified building model (TEB), are used. Simulations based on a realistic spatial cartography of air-cooled chillers and cooling towers in the city of Paris and surroundings have been performed. The simulation period corresponds to the extreme heat wave in Paris: 9–13 August 2003. Five scenarios will be discussed: firstly a baseline without air-conditioning (NO-AC scenario); secondly the actual situation including individual air dry coolers, wet cooling towers and an urban cooling network relying on free-cooling (water-cooled *A*/*C* with the river Seine) (REAL scenario). A third scenario will assume that all the heat is rejected as sensible heat in the atmosphere (DRY AC scenario). Two other scenarios correspond to a prospective where *A*/*C* is doubled. Scenario 4 assumes that all the heat is rejected as sensible heat in the atmosphere (DRY ACx2 scenario). On the opposite, scenario 5 assumes that all the heat is rejected underground or in the river Seine (NOREJ scenario). Results show that *A*/*C* affects the UHI depending on its management. A detailed analysis on selected districts shows that the local temperature variation resulting from heat island is proportional to the sensible heat rejected locally by *A*/*C*, indicating that a clever *A*/*C* management is all the more important to provide comfort and to mitigate heat island. Moreover, the incidence of the sky view factor is also discussed.

© 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Air temperatures in densely built urban areas are higher than the temperatures of the surrounding rural country, and this phenomenon is known as "heat island". The urban heat island phenomenon results from the altered nature of urban land use (asphalt pavement, buildings) and energy consumption related to human activity (residences and commercial buildings, transportations, industries). For example, in Athens, the mean heat island intensity exceeds 10 °C but in the very central Athens area, the heat island intensity may reach 15 °C [1].

Heat wave impact on mortality, especially in densely areas in big cities, is a major issue and the National Weather Service, in US, claims that heat wave is becoming a "major killer". In France, the 2003 heat wave killed 14,802 persons [2]. Tan et al. [3] studied the 1998 and 2003 heat waves impacts on mortality in Shanghai. Interestingly, the authors note that the mortality was much more pronounced during the 1998 heat wave although the 2003 one was slightly warmer than the 1998s. Amongst the reasons for less mortality in 2003, the authors note that there was an increase in air-conditioning use, larger living spaces and a higher coverage of urban green space. Between 1998 and 2003, the number of air conditioners in Shanghai jumped from 68.6 to 135.8 per 100 households. In that case, the authors claim that air conditioning (*A*/*C*) undoubtedly lessens heat stress, protecting large portions of the population from the heat wave.

This heat island results not only in an increase in the ambient temperature but presents also other important consequences such as a modification of the energy consumption in buildings. For example, in Athens, the peak electricity load for cooling in summer is tripled due to a cooling demand which is doubled and to the COP

* Corresponding author. Tel.: +33 (0)1 58 80 85 65; fax: +33 (0)1 40 27 25 95.
E-mail address: brice.tremeac@cnam.fr (B. Tremeac).

0306-2619/$ - see front matter © 2012 Elsevier Ltd. All rights reserved.
doi:10.1016/j.apenergy.2012.02.015

of the chillers which is reduced up to 25%. On the opposite, energy consumption for residential heating in winter is reduced up to 30–50% [1]. Smog production is observed in summer in some cities like Los Angeles where, at temperatures above 35 °C, practically all days are smoggy [4].

However, the role of *A*/*C* on heat waves is subject to controversy. On one hand, it protects from heat stress inhabitants who are in coolers spaces but, on the other hand, it can contribute, depending on the *A*/*C* management, to increase the street temperature if air-source *A*/*C*, which discards condensing heat into the air, is used. Due to that effect, several authors [5,6] suggest to use ground-source or water (river, lake or sea) cooled *A*/*C* so as to evacuate the condensing heat elsewhere than into the air.

Last but not least, there exists two trends which could contribute to UHI extension. The first one is global warming which suggests that within a few decades, the extreme temperatures observed in France during the August 2003 heat wave should no more be an exception. The second trend is the emergence of many mega cities, favourable to UHI, in countries like China. It is the reason why UHI mitigation corresponds to an important present challenge. Some authors developed numerical models to understand the influence of air-conditioning on air temperature. Wen and Lian [7] developed a box model to quantitatively determine the rise in outdoor air temperature caused by using domestic air conditioners in Wuhan, China. The variation in temperature may reach 2.56 °C. Hsieh et al. [8] discussed the penalty of heat rejection to the cooling load during the night-time, in Taipei city. The temperature rise obtained through numerical modelling, was found to reach 1.89 °C. In Tokyo, the heat resulting from air conditioners usage increased the air temperature by 1–2 °C or more on weekdays, in the office district [9].

These results demonstrate the importance of considering the heat resulting from energy consumption with air-conditioning on the energy balance.

Beside individual *A*/*C*, there are urban cooling networks that manage the heat rejection differently, as is the case for Climespace in Paris which use either wet cooling towers or the river Seine. The present paper presents the consequences of such managements on the street temperatures in Paris in the case of the severe heat wave which occurred in August 2003. First some results on global influence of air conditioning in Paris and the 25 km surroundings are presented and secondly a local analysis is performed for some district within inner Paris.

2. Methodology

MESO-NH, a meso-scale meteorological model developed by Lafore et al. [10] and Stein et al. [11] was used to reproduce meteorological conditions for the 2003 heat wave (9–13 August). The exchanges of energy (momentum, convection, radiation) are computed using a tiling approach splitting the surface between 4 major types of land use that are natural or agricultural covers, seas, inland water and urban areas. For the latter surfaces, the Town Energy Balance (TEB) is used [12]. It is a single layer urban canopy model that has been evaluated on various cities and climate [13–15]. Within TEB, the urban landscape is simplified as an isotropic network of street canyons. TEB simulates exchanges of momentum, heat and water for three generic surfaces: road, wall and roof that interacts directly for radiative fluxes and with the street canyon air volume for convection fluxes. Implementation of *A*/*C* within TEB was based on the heat released by *A*/*C* and an indoor target temperature of 26 °C for buildings with *A*/*C* (Fig. 1). The other inputs for the model are the surface building fraction, the ratio between the buildings' height and the streets width (H/W), the building height, the thermal and radiative properties of roads, walls and roofs. The simulations realised

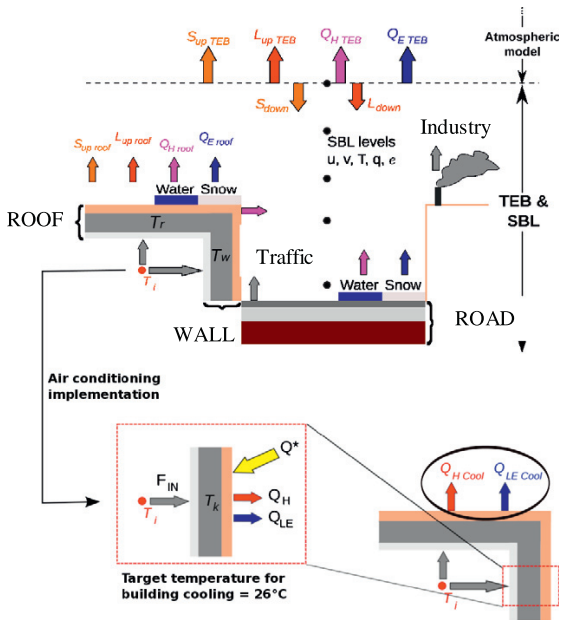


Fig. 1. Simplified description of TEB model implemented with *A*/*C* [13].

for this study use specific parameters computed for the urban area of Paris by the Urban planning agency of Paris-APUR, Agence Parisienne d'Urbanisme-from digital maps. For example, Fig. 2 presents the H/W parameters for the streets of Paris. This parameter, used in the model to calculate the road and wall sky view factors, is critical for the computation of the solar and infrared radiation trapping inside the canyon. It can be observed some high values in the city centre of Paris or in building office area like La Défense in the northwest of the city whereas this number decreases in the suburbs areas.

For the estimation of heat released, *A*/*C* systems can be classified in three categories:

(1) Evaporative cooling towers discharging latent waste heat to air. Their inventory was facilitated by the legal requirement imposed on them to declare their power and localisation to the authorities due to the sanitary hazard that they might carry. In terms of heat discharge, the waste heat is assumed partitioned into 95% latent heat and 5% sensible heat (based on the manufacturers' data).

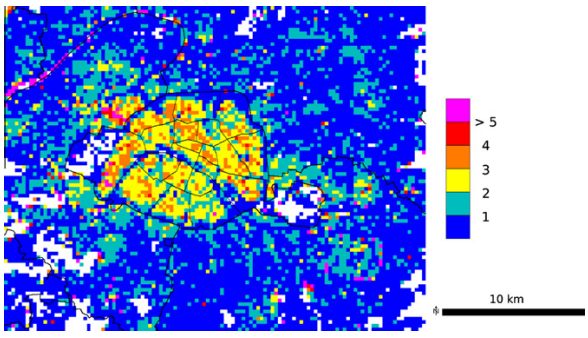


Fig. 2. Ratio between the buildings' height and the streets width (H/W).

(2) Large dry cooling towers (data centre, commercial centre, hotels...). The estimation of the heat released was undertaken based on a visual inventory via open source satellite images for roof condensers.
(3) Small dry cooling systems (from 6 to 70 kW per unit). Visual inventory of these small condensers was first carried out within inner Paris on a sub-sample of five districts (ground surfaces between 742.10^3 and 260.10^3 m^2) representative in building type and dwellings or business diversity, using both open source satellite images for roof condensers and Google Street View for front condensers. The cooling power of the small dry condensers observed yielded two levels (i.e. baseline ratio) of dry waste heat intensity for these five districts: 8 and 34 W/m^2_{land}.

After this inventory, a baseline ratio is assigned to each grid cell of the simulation domain: for a residential mesh, the low ratio is assigned and the high ratio for a business district, for example. Then, the waste heat associated with the large dry cooling towers was added to each grid cell according to the number and the power of the installations observed during the visualisation phase. Then, in addition to the sources of AC waste heat themselves, the thermal discharge of the power transformers supplying the AC systems was accounted for amounting to 3% of the electrical power requested by the AC systems identified. This is the REAL scenario.

Another present-time scenario is the DRY AC scenario: all the heat released is converted to sensible heat. The overall heat released over the simulation domain is the same as for the REAL scenario.

Two other scenarios correspond to a future situation where *A*/*C* is doubled : one assumes that all the heat is rejected as sensible heat in the atmosphere (DRY ACx2 scenario), the other, on the contrary, even if based on the DRY ACx2 scenario, assumes that all the heat is rejected underground or in the river Seine (NOREJ scenario).

For the DRY ACx2 scenario, to avoid a non-realistic case, a heat rejection limit of 126 W/m^2_{floor} (corresponding to a ratio of 90 W_{cold}/m^2_{floor}) is imposed into the model. Furthermore, the 10.32 GW of sensible heat reject is distributed with 68% in Paris and 32% outside of central Paris.

All scenarios are compared to a baseline (NO-AC scenario) referring to a situation without air-conditioning.

This paper presents and analyses some results of this model. All validations, boundary conditions and sensitivity tests are presented in [16].

3. Results

3.1. Global impact on street temperatures

When compared to the NO-AC scenario without *A*/*C*, the three scenarios considered in Fig. 3 show an increase in 2 m street temperatures which is greater at night than during day time. Compared to the NO-AC, temperature elevation at night in Paris is about 0.5 °C, 1 °C and 2 °C for the REAL, DRY AC and DRY ACx2 scenarios respectively. The average temperature variation is about +0.25 °C, +0.5 °C and +1 °C outside of Paris.

As expected, temperature in central Paris is more influenced by *A*/*C* than outside, due to a strong concentration of air-conditioned buildings in Paris. The future projection scenario (DRY ACx2) impacts wider zones in the city.

3.2. Impact on urban heat island (UHI)

Fig. 4 represents for a cross section an average night-time street temperature profile for four scenarios including the baseline (NO-AC). This figure shows the influence of air-conditioning on the heat island in Paris, especially on the spatial expansion and the intensity. For the NO-AC scenario UHI amplitude reaches 3.75 °C and it increases to 4.5 °C for DRY AC and 5.5 °C for DRY ACx2.

For the REAL scenario corresponding to an actual situation of the air-conditioning development in Paris and its surroundings, the amplitude of the UHI is not modified notably compared to the baseline. However, this scenario shows that *A*/*C* still influences the temperature profile with an increase in temperature in the hottest areas in central Paris.

3.3. Local variation of street temperatures

Figs. 3 and 4 show that UHI is not at all constant. To analyse the impact of *A*/*C* on local street temperature variation some districts within inner Paris have been selected to look at the influence of the local management of *A*/*C* on the street temperatures: type of air-conditioning (dry or wet unit, individual or connected to the Climespace network, the urban cooling network in Paris), density of *A*/*C*, type of buildings... For a local comparison of the influence of AC management, four meshes of 250 × 250 m^2 localised in four different districts in central Paris are studied. Descriptions of these meshes for the REAL scenario can be found below (Table 1).

Fig. 5 presents local variations of air temperatures at 2 m during 5 days in August 2003 for meshes *A*, *B C* and *D* respectively and for the four scenarios. For all districts (i.e. meshes), the maximum temperature variation is around the 11 August 2003 and reaches up to +3.5 °C for the mesh *B* and the DRY ACx2 scenario.

For mesh *A*, with a low *A*/*C* ratio, the impact of *A*/*C* is not marked except on the 11 August afternoon at 16 pm, with a maximum of +1.5 °C (DRY ACx2 scenario). For REAL and DRY AC scenario, figure shows some small negative values (less than 1 °C). This result could be associated with the natural variability of temperature and especially the turbulence (different positions of the convection cells between baseline and scenario creating occasionally colder zones).

In the case of mesh *B* with high density of dry air *A*/*C*, the temperature increases in the REAL case reaches 2.3 °C and not be much affected by the DRY AC management but the DRY ACx2 case would yield a strong enhancement of the local temperatures. In that case, *A*/*C* management without heat rejection in the ambient air (NOREJ) results with a small mitigation of the heat island (negative effect on the temperature variation). Compared to mesh *B*, mesh D, with higher heat releases, have an average temperature during the 5 days higher than *B* but the maximum temperature is quite similar than *B* for all scenarios.

For mesh *C*, the large part of district cooling present in the REAL scenario avoids the temperature increase which is observed with the DRY scenario. Consequently the districts which can use district cooling are less affected by heat waves than those which use air cooled *A*/*C*.

In districts with a lot of air-conditioned buildings, if all buildings use units discharging dry waste heat to air, temperatures could be impacted and should increase between 0.7 °C and 2.5 °C. The impact could be as high as 3.5 °C/4 °C for the DRY ACx2 scenario.

For all meshes, the NOREJ scenario (buildings are air-conditioned and *A*/*C* waste heat is released to ground or the Seine river) cancels temperature increase and, punctually and locally, decreases air temperatures and slightly the heat island.

From the total 9000 meshes (250 × 250 m^2) in Paris simulation domain, 12 have been selected for a local analysis. Over the heat wave period, the maximum temperature difference (ΔT_{max}) between the daily average temperature of a scenario and that of the reference was extracted for each mesh and each scenario. Taking these 12 meshes with 3 scenarios with heat rejection due

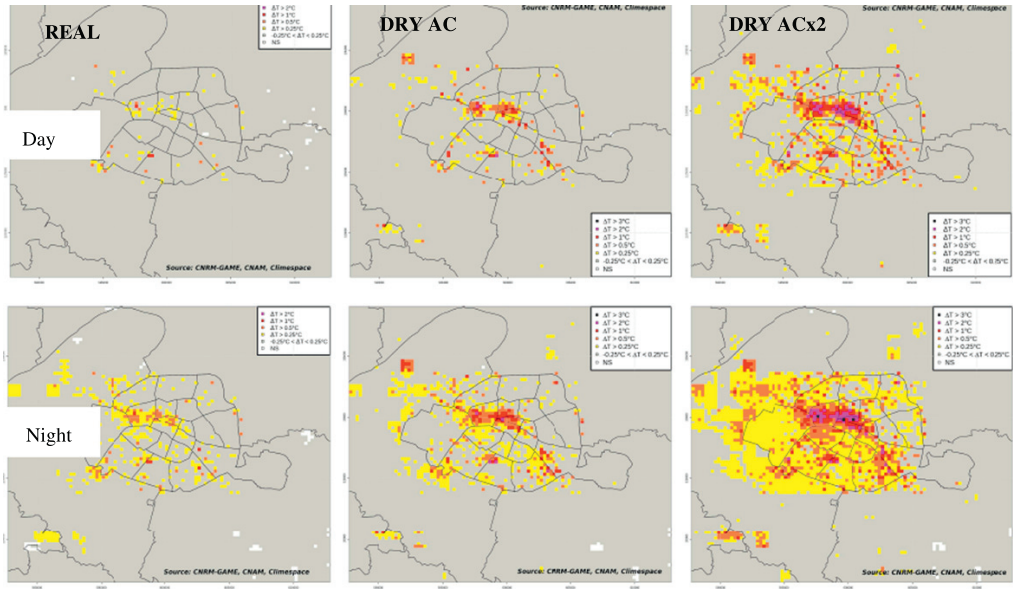


Fig. 3. Average variation of temperature at 2 m for 3 *A*/*C* scenarios at daytime and night-time [16].

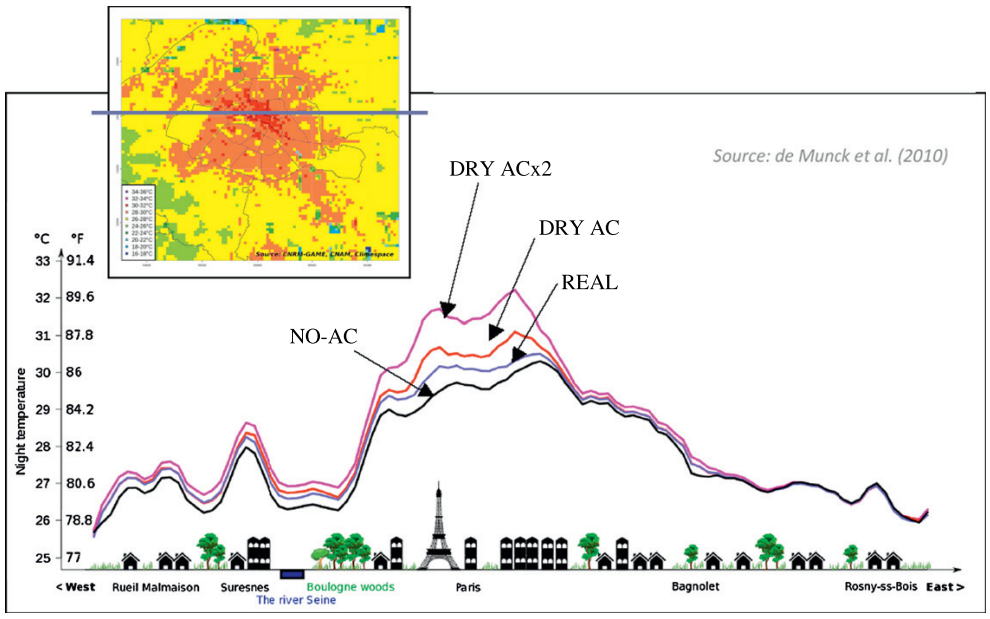


Fig. 4. Temperature profiles at night-time for a West-to-East cross section [16].

to *A*/*C*, 36 points were obtained. Results of that maximum temperature difference (ΔT_{max}) are presented in Fig. 6 for each mesh under each scenario.

Interestingly, a linear variation of the temperature increase due to *A*/*C* versus the sensible heat rejection is obtained. This tends to prove that the local street temperature increase due to *A*/*C* depends, to the first order, on the heat rejection. Note that for zero heat rejection, we do not get zero temperature increase. This could prove that, in densely areas, even without heat rejection due to *A*/*C*, a mesh experiences a temperature increase due to the next meshes where *A*/*C* may exist.

Calculated as a function of the ground surface, the ratio of maximal street temperature variation is about: 5K m^2_{land} kW^{-1}_{heat}. Kikegawa et al. [17] reported temperature differences, in Tokyo, due to *A*/*C* reaching 0.6 or 1.15 °C depending on the sky view factor. More recently Kikegawa et al. [18] claim that the sensitivity of downtown air temperature, in Tokyo and Osaka, to anthropogenic heat is 7–9 K m^2_{land} kW^{-1}_{heat} which is of the same order of magnitude as the 5K m^2_{land} kW^{-1}_{heat} reported herein. In the model developed herein, the heat is assumed to be rejected on the roof (which corresponds to the most important fraction of heat released by *A*/*C* in Paris) but Kikegawa et al. [5] note that when the heat is rejected to

Table 1
Description of the studied meshes (250 × 250 m^2).

	Localisation	Main description	Sensible/latent heat releases (kW)	*A*/*C* ratio (W_{heat}/m^2_{floor}; W_{heat}/m^2_{land})	$\%_{power}$ of buildings connected to the Climespace network
Mesh *A*	North East	Residential	549/427	6.5; 9	0
Mesh *B*	West Paris	Commercial district, top-of-the-range hotels	6131/1843	24.9; 98	<1%
Mesh *C*	Centre	Commercial district, museum	580/926	5.7; 9	91
Mesh *D*	North West	Business	20628/8620	81; 330	0

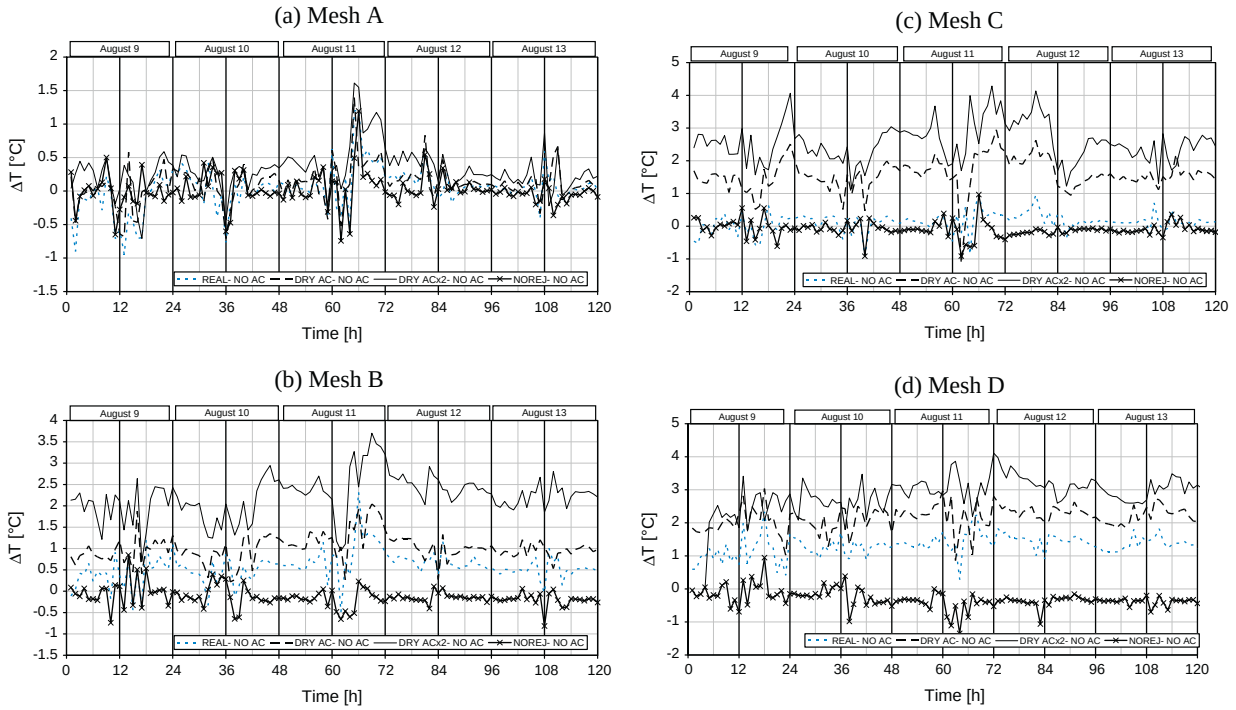


Fig. 5. Local temperature variation between each *A*/*C* scenario and the baseline for mesh *A* (a), *B* (b), *C* (c) and *D* (d).

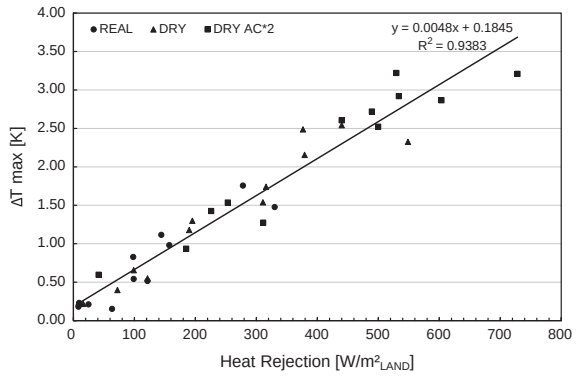


Fig. 6. Variation of local temperature as a function of sensible heat rejection for a subset of 12 meshes.

the ground levels rather than from the rooftop, the daily surface-air temperature increases by 0.62 °C. This could explain the difference between the results herein and the data by Kikegawa et al. on the sensitivity of air temperature to anthropogenic heat.

The analysis of the results shown on Figs. 4 and 6 suggest that in the NO-AC scenario, the UHI is mainly due to the impact of the urban structure (including the disappearance of green spaces) whereas, in the other scenarios, the heat rejected plays a major role. The results show that the extra UHI due to heat rejected by *A*/*C* may be as high or even more than the structural UHI when air cooled *A*/*C* is intensively used. This proves the challenge for a clever *A*/*C* management to avoid UHI pockets intensification in districts with a high *A*/*C* level.

Four typical meshes have been selected to present their relative hourly street temperature variation, in the REAL scenario (Fig. 7), and their average excess temperature due to *A*/*C* (Fig. 8) during the heat wave period. As observed on Fig. 6, the trend for the temperature swing is the same for all the meshes but the relative temperature swing between day and night is not the same for the four meshes and it can reach and even overpass 15 °C. For all the meshes, the minimum temperature during night time goes through a maximum on the same night during the heat wave peak. The meshes *A*, *B* and *D* experience a smaller temperature swing than mesh *C*.

On Fig. 9, the average excess temperature due to *A*/*C*, for day time and night time on periods of 12 h, is now presented for each

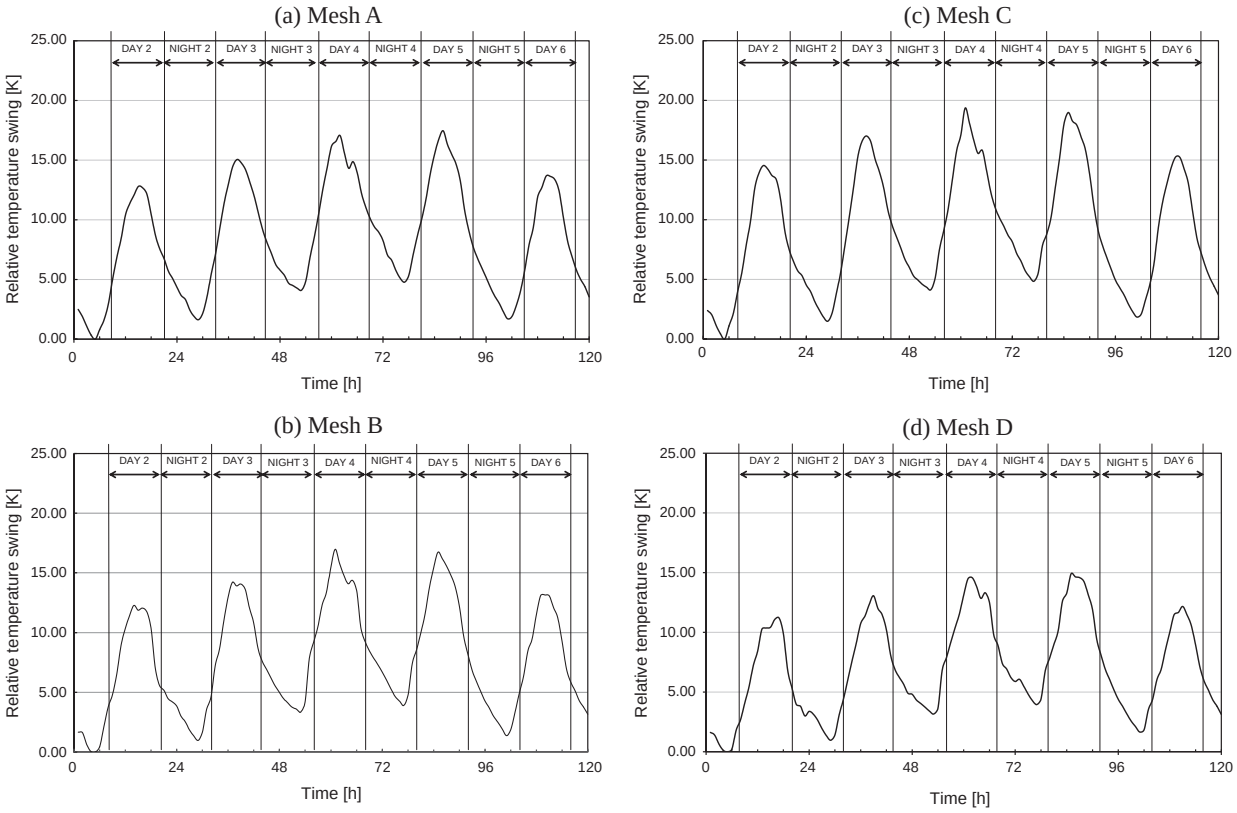


Fig. 7. Relative hourly temperature swing deduced from the REAL scenario for meshes *A* (a), *B* (b), *C* (c) and *D* (d).

mesh as the temperature difference between a given scenario and the reference scenario. Doing so, the main focus is put on the effect of the *A*/*C* management as it was performed on Fig. 6. In the mesh D where *A*/*C* is very important, the sensible heat released by *A*/*C* is high (330 W/m^2_{land} in the REAL scenario). The temperature increase spans between 1.5 (REAL) and 3.5 °C (DRY ACx2). On the contrary, mesh A corresponds to a residential popular district where very little *A*/*C* exists (9 W/m^2_{land} sensible heat rejected in the REAL scenario). The temperature increase is very small, between .3 (REAL) and .7 °C (DRY ACx2). Mesh *C* corresponds to case where district cooling represents more than 90% of the *A*/*C*. With district cooling, the REAL scenario does not show significant temperature increase with respect to the NO-AC scenario because the sensible heat released is very low. But, when the condensing heat is rejected into the mesh, as depicted by the DRY scenario, a temperature increase between 1.5 °C and 3 °C, with respect to the reference, is observed.

Note that in meshes *B* and *C* , the temperature increase due to the heat rejected due to *A*/*C* is higher during the night as should be expected from the analysis presented on Fig. 3 whereas in mesh *A* and *D* there is no significant difference between day and night.

From Fig. 8, we can deduce the local augmentation of temperature between $t = 36$ h and $t = 72$ h, which seems important for health (Table 2). As expected influence of DRY ACx2 scenario is higher than the other scenarios. Mesh D, with a large heat release is not more affected than mesh *A*. Influence of architecture or urbanism could explain this.

From those data, important conclusions can be drawn:

- The local street temperature increase is strongly, and linearly, dependent on the sensible heat released through *A*/*C* and UHI pockets do exist.
- Dry air cooling *A*/*C* represents a strong penalty in districts where *A*/*C* is highly used since it induces temperature increase which can reach 2.5 °C in the DRY scenario.
- Areas where district cooling is mainly used are not subject to significant temperature increase due to *A*/*C* preventing UHI pockets.

In Fig. 6 some dispersion on the points was observed and in Fig. 7, it was noted that the temperature swing between day and night differed significantly depending on the meshes. The influence of other parameters than heat rejection was analysed to find if some could play a role. Herein, the influence of the sky view factor (SVF) is reported. SVF indicates the relationship between the visible area of the sky and the area covered by urban structures and is dependant of the ratio H/W (Fig. 2). For that purpose, the temperature swings observed in Fig. 7 were analysed in more detail. The temperature swing between the average temperature of a half day and that of the following half day has been extracted and is presented on Figs. 9–11, for three different sequences during the heat wave, versus the sky view factor of the mesh (which varies from 0.126 to 0.68 for the 12 meshes). Note that the information contained in those figures differs strongly of that contained in Figs. 6 and 7. In the previous figures, the temperature difference was that existing between the scenario with *A*/*C* under study and the reference one without *A*/*C*. That means that the existing temperature swing of the reference case was subtracted. Therefore, effects due to parameters like architecture or urbanism were excluded. On the opposite, the results shown, in the REAL case, on Figs. 9–11 include not only the effect of heat released by *A*/*C* but also the characteristics of the mesh (architecture, urbanism, etc.). For the 4 meshes under study, all the scenarios yield typical similar results

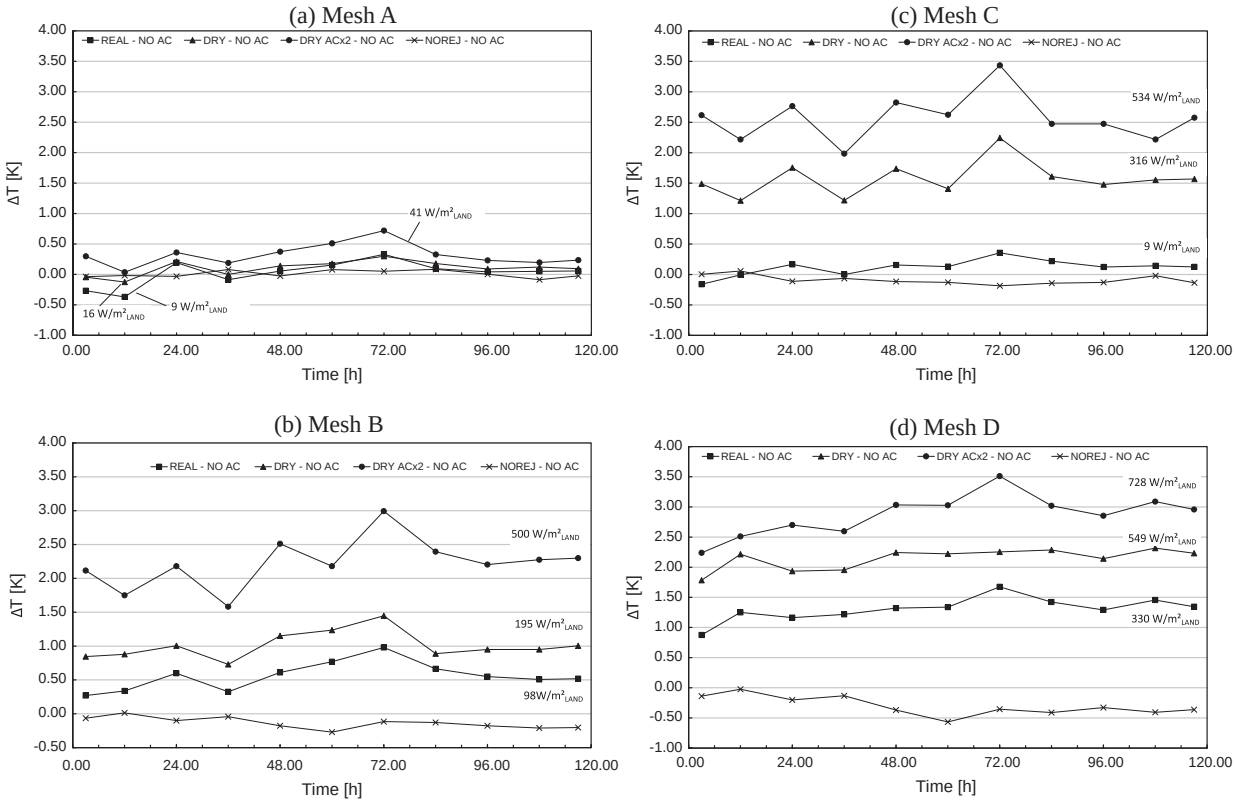


Fig. 8. 12 h-average temperature difference between each scenario with *A*/*C* and the reference without *A*/*C* for meshes *A* (a), *B*(b), *C*(c) and *D*(d).

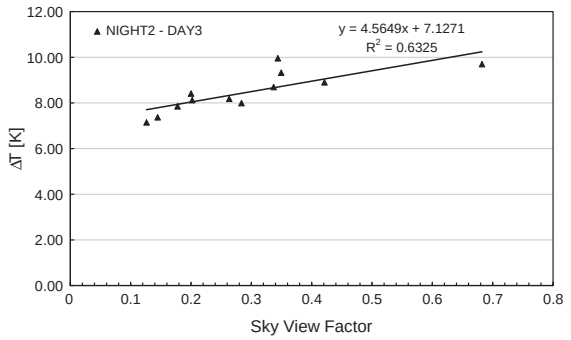


Fig. 9. Absolute temperature swing between the average temperature of the second night and the third day of the heat wave for the REAL scenario and the12 meshes versus their sky view factor.

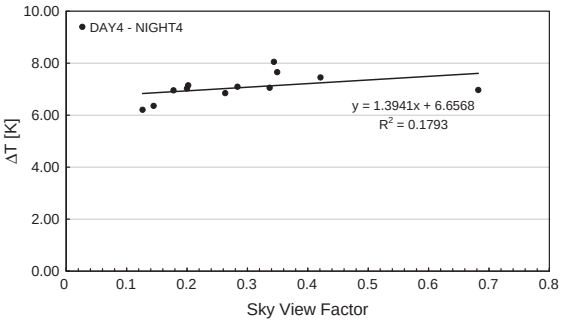


Fig. 10. Absolute temperature swing between the average temperature of the fourth day and the fourth night of the heat wave for the REAL scenario and the12 meshes versus their sky view.

Table 2
Variation of local temperature difference between time 36 and time 72 h. for the four meshes.

	REAL – NO AC	DRY – NO AC	DRY ACx2 – NO AC
Mesh *A*	0.42	0.30	0.53
Mesh *B*	0.65	0.72	1.41
Mesh *C*	0.35	1.02	1.45
Mesh *D*	0.46	0.30	0.91

as those reported herein on Figs. 9–11 for the REAL scenario. The temperature swing between day and night increases linearly versus the sky view factor from 8 °C to 10 °C at the beginning (Fig. 9) or 8 °C to 12 °C at the end (Fig. 11) of the heat wave. It is reduced to 7 °C and does not show any significant dependence on the sky view factor when the heat wave is the strongest (Fig. 10).

Coming back to Fig. 7, the temperature swing was noted to be smaller for mesh D. The explanation could be that the sky view factor of mesh *D* equals to 0.126 is smaller than that of meshes *A*, *B* and *C* which equals respectively to 0.263, 0.202 and 0.349.

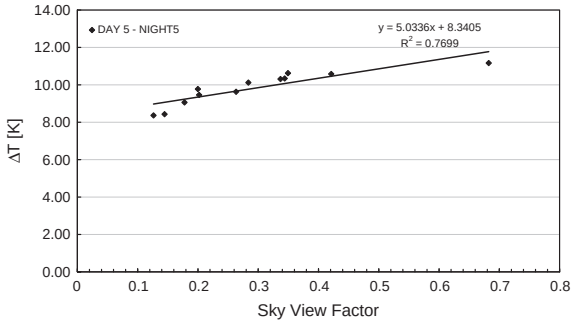


Fig. 11. Absolute temperature swing between the average temperature of the fifth day and the fifth night of the heat wave for the REAL scenario and the12 meshes versus their sky view.

Results shown on Figs. 9–11 tend to prove that the urban characteristic of the mesh plays a role, as well as heat released, on the temperature increase and confirms that the sky view factor is a pertinent parameter to take into account for UHI. Areas with higher sky view factor experience higher temperature swings, which is favourable for the health. But when the effect of the heat wave is the highest, the influence of the sky view factor seems to be reduced.

The NOREJ scenario whose results are shown for the four selected meshes on Fig. 8 corresponds to the case when the heat released by *A*/*C* is the same as in the DRY ACx2 scenario except that, now, the heat is rejected elsewhere than in the air (in Paris, it can be underground or in the river Seine). In that case, the air temperature is found to be less than in the reference scenario for all meshes except mesh *A* where very little *A*/*C* does exist so that the external cooling load of the buildings is negligible and does not interact with the street. For mesh *B*, influence of *A*/*C* without discharging to air, is marginal. But for meshes *B* and D, NOREJ *A*/*C* results in a slight cooling with respect to the reference scenario without *A*/*C*. For mesh D, the maximum cooling effect reaches −0.5 °C as depicted on Fig. 8 and −0.25 °C for mesh *B*.

Although small, according to the model, that effect does exist and contributes to mitigate slightly UHI. Interestingly, the mitigation effect is more important in areas where intensive *A*/*C* with heat released elsewhere than into the air is used. Obviously, district cooling rejecting condensing heat in a river or underground (or using the heat for domestic hot water) could be the appropriate technology to reach that goal of slightly cooling the city through *A*/*C*.

4. Conclusion

Heat waves will be reinforced due to climate change. In France, more probably, the temperatures observed during the August 2003 heat wave will be very frequent after 2050. Therefore, the need for *A*/*C* in large cities will be required to protect populations sensible to heat stress since it is proven that *A*/*C* can contribute to reduce mortality during heat waves. However, it is, as well, known that *A*/*C* can reinforce UHI. Therefore a clever management of *A*/*C* constitutes an important present challenge.

This study, based on a model using actual meteorological data [15], shows that, in Paris, the global UHI depends on the heat released by the *A*/*C* management. Moreover, this study also shows that, in densely areas, the local temperature variation due to *A*/*C* depends linearly on the sensible heat rate released by *A*/*C*. In districts where air cooled *A*/*C* is very intensive, the extra UHI due to *A*/*C* may be of the same order of magnitude as the structural UHI. This proves the importance of the challenge of a clever *A*/*C* management to avoid extra UHI.

In densely areas, dry air cooling *A*/*C* with heat rejection into the air represents a bad solution since it contributes to increase strongly the temperature creating UHI pockets. The districts more affected are those where the *A*/*C* is strongly developed. Doubling *A*/*C* as compared to the present situation, should produce, in some areas, local temperature increases due to *A*/*C* which should reach 2.5 °C. The districts where very little dry air cooling *A*/*C* exist are far less affected but, nevertheless, are a little affected (a few 0.1 °C) through coupling with nearby districts with dry air cooling *A*/*C*.

Wet towers *A*/*C* represent a much better solution than dry air cooling from the point of view of temperature variation since the sensible heat released is small, but the problem of Legionella must not be neglected.

However, the best solution is undoubtedly ground source or water cooled *A*/*C* in which the heat is released elsewhere than into the air (NOREJ scenario). Some cases of that technology do exist, in Paris for example where the river Seine is used for district cooling by Climespace. With the NOREJ scenario, *A*/*C* should contribute to slightly mitigate heat wave. The mitigation should be higher in areas where *A*/*C* is more developed.

The influence of the sky view factor has also be noted. A high sky view factor is more favourable for the existence of large temperature swings between day and night which is favourable for health. However, during the warmest period of the heat wave, the influence of the sky view factor on temperature swing seemed to disappear.

In this work, the impact on energy consumption due to *A*/*C* was not addressed but further studies will develop this point since it is known that energy consumption due to *A*/*C* increases when the street air temperature increases [5,16]. Therefore, another advantage to dissipate the heat of condensation elsewhere than into the air will be energy saving.

References

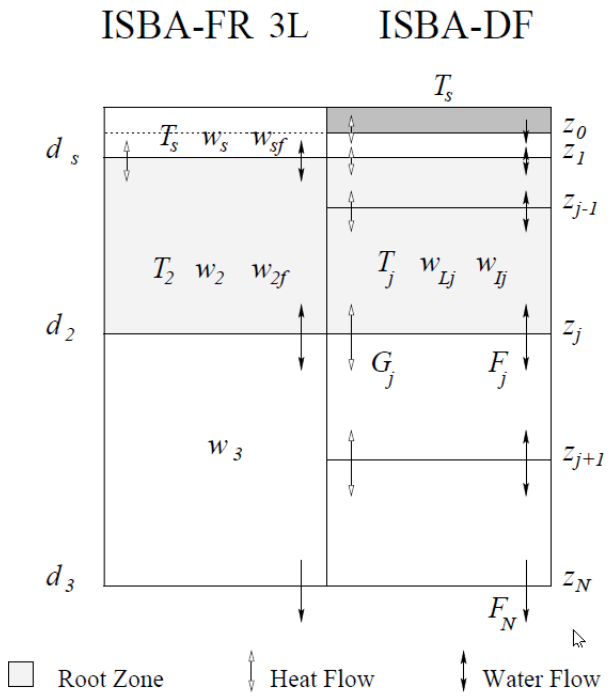
[1] Santamouris M, Papanikolaou N, Licada I, Koronakis I, Georgakis C, Argiriou A, et al. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. Sol Energy 2001;70(3):201–16.
[2] Billiard F. Europe's heat waven. Int J Refrig 2004;27(1):1–3.
[3] Tan J, Zheng Y, Song G, Kalkstein LS, Kalkstein AJ, Tang X. Heat wave impacts on mortality in Shangai, 1998 and 2003. Int J Biometeorol 2007;51:193–200.
[4] Akbari H, Pomerantz M, Taha H. Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. Sol Energy 2001;70(3):295–310.
[5] Kikegawa Y, Genchi Y, Kondo H, Hanaki K. Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings energy-demand. Appl Energy 2003;76:449–66.
[6] Meunier F. Oasis effect to mitigate heat island. In: 22nd international congress of refrigeration (ICR 2007 Beijing China). Paper ICR 07-E2-205; 2007.
[7] Wen Y, Lian Z. Influence of air conditioners utilization on urban thermal environment. Appl Therm Eng 2009;29(4):670–5.
[8] Hsieh C-M, Aramaki T, Hanaki K. The feedback of heat rejection to air conditioning load during the nighttime in subtropical climate. Energy Build 2007;39:1175–82.
[9] Ohashi Y, Genchi Y, Kondo H, Kikegawa Y, Yoshikado H, Hirano Y. 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. J Appl Meteorol Climatol 2007;46:66–81.
[10] Lafore JP, Stein J, Asencio N, Bougeault P, Ducrocq V, Duron J, et al. The Méso-NH atmospheric simulation system. Part I: adiabatic formulation and control simulation. Ann Geophys 1998;16:90–109.
[11] Stein J, Richard E, Lafore J, Pinty J, Asencio N, Cosma S. High -resolution non-hydrostatic simulations of flash-flood episodes with grid-nesting and ice-phase parametrization. Meteorol Atmos Phys 2000;72:101–10.
[12] Masson V. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models. Bound-Lay Meteorol 2000;94:357–97.
[13] Masson V, Grimmond CSB, Oke TR. Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities. J Appl Meteorol 2002;41:1011–26.
[14] Lemonsu A, Grimmond CSB, Masson V. Modeling the surface energy balance of the core of an old mediterranean city: Marseille. J Appl Meteorol 2004;43:312–27.

[15] Pigeon G, Moscicki MA, Voogt JA, Masson V. Simulation of fall and winter surface energy balance over a dense urban area using the TEB scheme. Meteorol Atmos Phys 2008;102:159–71.
[16] de Munck C, Pigeon G, Masson V, Marchadier C, Meunier F, Tremeac B, et al. How much air conditioning can increase air temperatures for a city like Paris (France)? Int J Climatol 2012. doi:10.1002/joc.341.
[17] Kikegawa Y, Genchi Y, Kondo H, Hanaki K. Impacts of city-block-scale countermeasures against urban heat-island phenomena upon a building's energy-consumption for air-conditioning. Appl Energy 2006;83:649–68.
[18] Kikegawa Y, Ohashi Y, Ihara T, Kondo H. Observed and simulated interactions between electricity consumption and urban surface air temperatures in downtown Tokyo and Osaka. 91st American Meteorological Society Annual Meeting; 2011.

ANNEXE B

Présentation d'ISBA-DF pour la modélisation des toitures végétalisées

Compte tenu de l'hétérogénéité texturale des différentes couches des TVE (substrat et couches de drainage/rétention), la nature et l'amplitude des transferts, surtout hydrologiques, varient énormément selon la verticale. Il est donc nécessaire de représenter dans le modèle de TVE cette hétérogénéité verticale. C'est justement ce que permet la version diffusive d'ISBA, appelée **ISBA-DF** (Boone et al., 2000). Grâce à une description de l'hétérogénéité verticale du sol mais aussi du profil racinaire de la végétation (voir FIGURE B.1), ce qui est un raffinement supplémentaire dans la paramétrisation déjà détaillée d'ISBA de l'évapotranspiration (voir paragraphe suivant).



T_S est la température de surface
T_j est la température du sol
$w_L j$ est la teneur en eau liquide
$w_I j$ est la teneur en eau solide
G_j est le flux de chaleur
F_j est le flux d'eau liquide

T_j, $w_L j$, $w_I j$, G_j et F_j sont évalués à chaque niveau z_j. F_N est le drainage à la base de la dernière couche de sol

FIGURE B.1 – *Discrétisation verticale du sol dans deux versions d'ISBA : la version standard ISBA-FR-3L et la version ISBA-DF. Source : Boone (2000)*

Avec ISBA-DF, les transferts de chaleur et de masse dans le sol sont simulés par les équations :

$$c_g \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial G}{\partial z} + \Phi \tag{B.1}$$

$$\frac{\partial w_L}{\partial t} = -\frac{\partial F}{\partial z} - \frac{\Phi}{L_f \rho_w} - \frac{S_L}{\rho_w} \qquad (w_{min} \leq w_L \leq w_{sat}) \tag{B.2}$$

$$\frac{\partial w_I}{\partial t} = -\frac{\Phi}{L_f \rho_w} - \frac{S_I}{\rho_w} \qquad (0 \leq w_I \leq w_{sat} - w_{min}) \tag{B.3}$$

Dans ces équations de transferts verticaux, G est le flux de chaleur vertical (J m^{-2} s^{-1}), F est le flux vertical d'eau (m s^{-1}), Φ (J m^{-3} s^{-1}) est un terme source ou puits de chaleur associé aux changements de phase entre solide et liquide, et S_L (évapotranspiration, flux latéral) et S_I (sublimation) des termes sources ou puits pour l'eau liquide et la glace (kg m^{-3} s^{-1}), et z (m) la profondeur du sol positive vers le bas.
Les variables d'état sont T la température du sol (K) et w_L et w_I qui représentent les teneurs en eau volumique liquide et équivalente en glace (m^3 m^{-3}). Ainsi, la teneur en eau volumique totale est :

$$w = w_L + w_I \tag{B.4}$$

et la teneur en eau liquide évolue dans le modèle entre une teneur minimum (w_{min}) et la teneur à saturation. Finalement c_g est la capacité thermique totale du sol (J m^{-3} K^{-1}), L_f est la chaleur latente de fusion de l'eau, et ρ_w sa densité.
La condition à la limite supérieure est fournie par un bilan d'énergie classique :

$$c_S \frac{\partial T_S}{\partial t} = Q^* + H - LE - G_0 \tag{B.5}$$

où Q^* est le rayonnement net, H est le flux de chaleur sensible, LE le flux de chaleur latente, et G_0 le flux de chaleur à la surface. Dans le cas des TVE, la condition à la limite inférieure en température (flux considéré comme nul à z_N) est remplacée par le flux de chaleur estimé entre le toit du bâtiment structural et la couche à z_N (Chap. 5).

Dans la version d'ISBA-DF, les flux de chaleur G de l'Equation B.6 et d'eau liquide F de l'Equation B.2 sont calculés pour chaque couche de profondeur z_j par des équations de diffusion. Celle décrivant le flux de chaleur suit une loi de Fourier classique et celle pour le flux d'eau liquide suit une loi de Darcy :

$$G_j = \overline{\lambda}_j \frac{T_j - T_{j+1}}{\Delta \overline{z}_j} \tag{B.6}$$

$$F_j = -k \frac{\partial}{\partial z}(\psi + z) - D_{\nu\psi} \frac{\partial \psi}{\partial z} + K_d \tag{B.7}$$

Dans l'Equation B.7, le premier terme exprime le transfert d'eau liquide, le second terme représente le transfert d'eau sous forme de vapeur et le troisième terme le drainage de fond. Contrairement à beaucoup de schémas de surface, cette formulation de flux à partir des potentiels hydriques permet de tenir compte des gradients verticaux de propriétés hydrauliques du sol.

Le couplage entre les transferts hydriques et thermiques est réalisé au niveau du calcul des caractéristiques thermiques effectives du sol utilisées dans les EQUATIONS B.1 et B.6. Ces dernières évoluent au cours du temps et sont calculées pour chaque couche à partir des caractéristiques intrinsèques du sol à sec et de la teneur en eau du sol, pour la capacité calorifique suivant Peters-Lidard et al. (1998) (EQUATION B.8) et pour la conductivité thermique selon Farouki (1986) (EQUATION B.9) :

$$c_g = (1 - w_{sat})c_{soil} + w_L c_L + w_I c_I \tag{B.8}$$

$$\lambda_j = K_e \lambda_{sat} + (1 - K_e)\lambda_{dry} \tag{B.9}$$

où K_e est le nombre de Kersten, qui dépend du degré de saturation de la couche de sol à la profondeur z_j (donc de sa teneur en eau liquide), λ_{dry} la conductivité thermique du sol sec et λ_{sat} la conductivité thermique saturée qui est elle-même calculée à partir d'une relation empirique reliant les conductivités thermiques de la matière solide (λ_{soil}), de la glace (λ_I), et de l'eau liquide (λ_L) :

$$\lambda_{sat} = \lambda_{soil}^{(1-w_{sat})} \lambda_I^{w_{sat}(1-w_L/w)} \lambda_L^{w_{sat}(w_L/w)} \tag{B.10}$$

Toutes les caractéristiques intrinsèques du sol, thermiques et hydrauliques, qui sont utilisées dans les équations précédentes, sont estimées directement dans ISBA à partir de la texture du sol via des fonctions de *pédotransfert* et des équations pronostiques qui sont détaillées, ainsi que les équations précédentes, dans Boone (2000) et Decharme et al. (2011).
En résumé, en termes de modélisation des processus hydrologiques, qui est le point le plus critique en ce qui concerne les TVE, ISBA-DF est capable de prédire le ruissellement de surface, les transferts verticaux d'eau dus aux gradients d'humidité, les transferts dus aux changements de phase, ainsi que le drainage à la base de la colonne de sol considérée, ce qui constitue un bon niveau de détails pour la modélisation des TVE aux échelles spatiales et temporelles envisagées.

ANNEXE C

Configuration MUSCADE

Contents

C.1 Configuration de modèles 196
C.2 Caractéristiques des bâtiments 198
C.3 Données physiographiques 207

C.1 Configuration de modèles

La configuration MUSCADE présentée succintement ci-après a été établie par l'ensemble des partenaires du projet MUSCADE (Chap. 3), parallèllement à mes travaux de thèse. La génération d'une carte actuelle décrivant l'occupation du sol parisien (domaine d'étude présenté au Chap. 6) a été réalisée par des outils numériques à partir de données terrain réelles, afin de simuler ultérieurement l'expansion de Paris dans les décennies à venir (objectifs de MUSCADE). Mon travail de thèse s'est basé sur la carte de Paris en temps présent qui a été établie par le biais de deux modèles, GENIUS et SURFEX.

Génération de la carte d'occupation du sol et des types de bâti par GENIUS

Basé sur une description de la ville issue des bases de données à haute résolution spatiale disponibles (BD Topo 2008), le modèle GENIUS (Bonhomme, 2012) développé dans le cadre de la thèse de Marion Bonhomme (LRA-GRECAU, Laboratoire de Recherche en Architecture, partenaire du projet MUSCADE) permet de représenter la ville par un ensemble de 8 îlots morphologiques décrivant l'hétérogénéité du tissu de bâti urbain (Pavillonnaire Continu et Discontinu, Immeuble Continu, Discontinu et de Grande hauteur, Centre Ancien, Bâtiment d'activité, et Monuments historiques), et ceci avec une bonne résolution (250 m), comme l'illustre la Figure C.4.

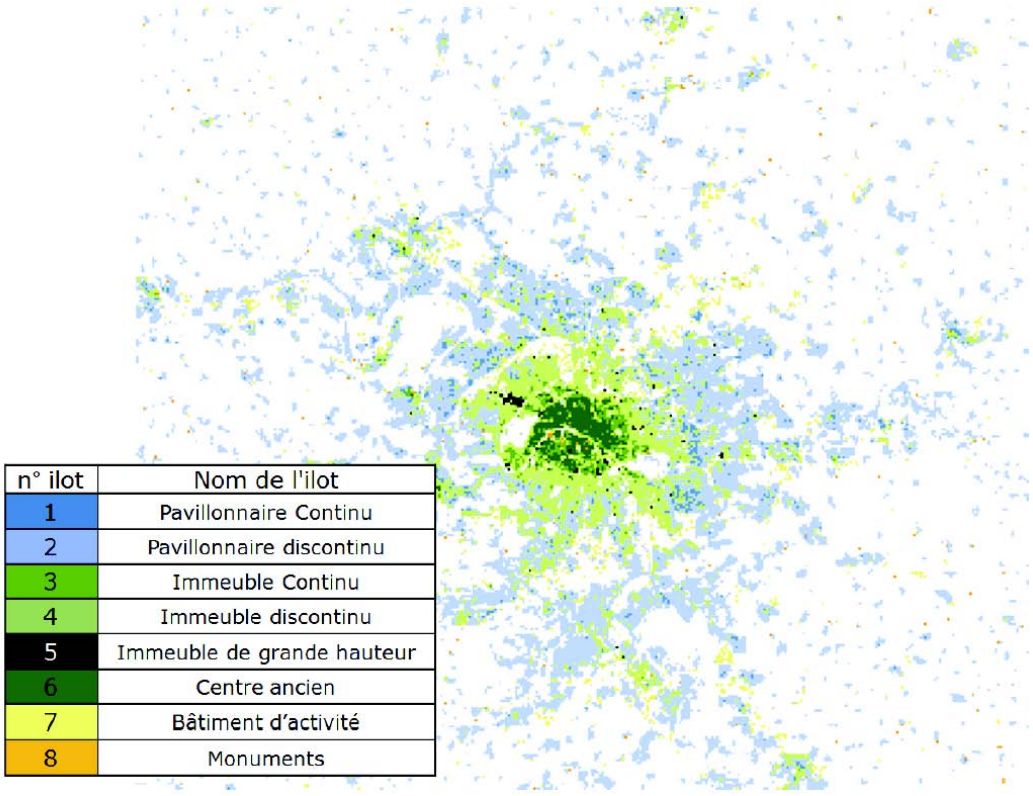


Figure C.1 – *Carte d'îlots morphologiques types obtenue pour Paris et son agglomération avec GENIUS (Bonhomme, 2012)*

Pour plus de détails sur les hypothèses et la validation de cette méthodologie/carte, se reporter au rapport de Bonhomme (2012).

Adaptation des données GENIUS pour la plateforme SURFEX

Ces 8 îlots morphologiques sont ensuite traduits en types de bâti pour SURFEX (Haussmannien, Individuel, Collectif, Tour de bureaux, Hangar, Masson et al., 2013), d'après la table de correspondance de la FIGURE C.2. 5 types d'usage (Résidentiel, Bureau, Industriel, Agricole, Commercial) associés à ces types de bâti SURFEX complètent cette représentation afin de moduler l'usage d'équipements comme le chauffage, la climatisation, ou l'inflitration en fonction de calendriers d'occupation (fonction des jours de la semaine et heures de la journée) spécifiques à chaque usage de bâtiments. La cohérence entre ces différentes typologies est synthétisée dans la table de correspondance présentée FIGURE C.2. C'est finalement à partir des 5 types des types de bâti SURFEX et des dates de construction des bâtiments disponibles en sortie de GENIUS qu'est établie la nature des matériaux qui composent les bâtiments (toits, murs, fenêtres, plancher) et les caractéristiques radiatives et thermiques associées (section C.2) qui sont prescrites en entrée de SURFEX.

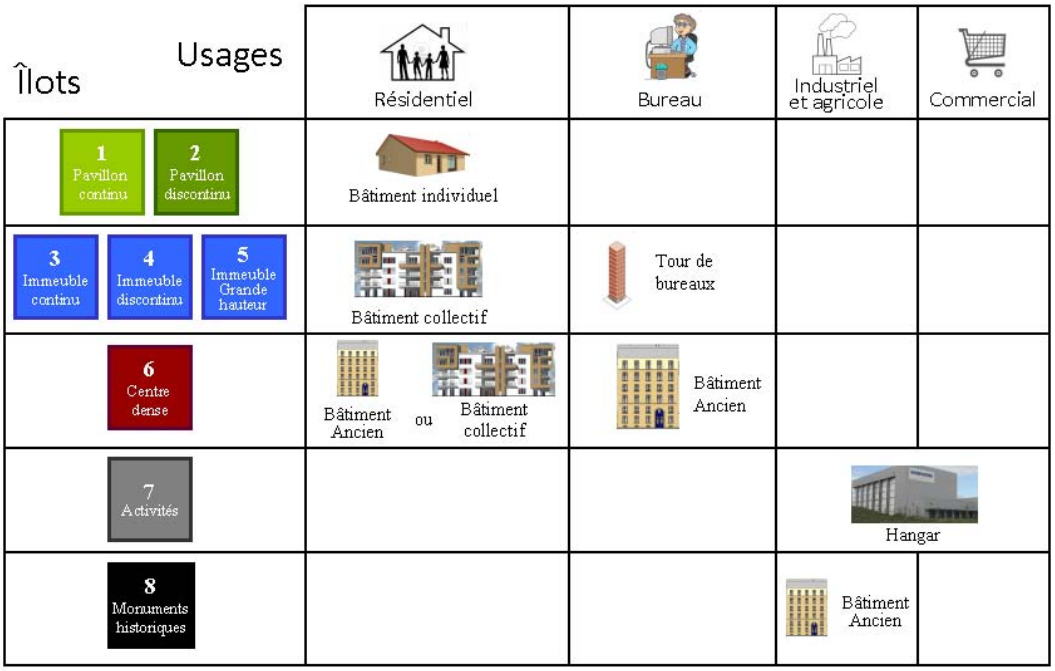


FIGURE C.2 – *Table de correspondance entre les types d'îlots morphologiques de GENIUS, et les types et usages de bâti pour SURFEX, d'après Marchadier (2013)*

Finalement, les surfaces urbanisées sont traitées dans SURFEX par une version trés détaillée du modèle de canopée urbaine TEB (Veg-BEM-UHI-UTCI) qui permet de reproduire l'îlot de chaleur urbain en mode forcé (UHI) ainsi que l'évaluation de la vulnérabilité des villes en termes de confort et de demande énergétique grâce aux récents développements de (Lemonsu et al., 2012) (Veg), de (Bueno et al., 2012) (BEM), et de Pigeon (2011) (UTCI) présentés au Chap. 3. Pour des raisons de coût numérique, les données d'entrée fournies à la résolution de 250 m par GENIUS sont aggrégées à 1 km par SURFEX en début de simulation, en conservant la typologie de bâti dominante (et donc ses caractéristiques radiatives et thermiques) et les caractéristiques géométriques de bâti moyennes. Les cartes des données physiographiques ainsi obtenues (à la résolution de 1 km) sont présentées ci-après dans la section C.3.

C.2 Caractéristiques des bâtiments

Les caractéristiques présentées ci-après sont extraites du rapport de Marchadier (2013).

CONSTRUCTION DES SCENARIOS MUSCADE
« Bâti, Technologies & Usages »

A. PARAMETRES DESCRIPTIFS DES BATIMENTS

Valeurs extraites du fichier excel Parametres_Bati_Scenarios_V2.0. xls du 04/03/2013

Auteur : Marchadier C.

A1. Type de matériaux

Bâtiments anciens Haussmanniens (Paris)

Element (1)	Element (2)	<1900	1901-1917	1918-1944	1945-1974	1975-1999	2000-2011
ENVELOPPE	Vitrage	simple vitrage				double vitrage	
MUR	Couche 1 (Ext)	Calcaire / Pierre					
MUR	Couche 2 (Milieu)						
MUR	Couche 3 (Milieu)						
MUR	Couche 4 (Int)	Platre					
PLANCHER	Inferieur	bois platre					
PLANCHER	Milieu						
PLANCHER	Superieur	parquets bois					
TOITURE	Exterieur	zinc					
TOITURE	Interieur	platre					
TOITURE	Milieu	Charpente et voligeage					

Bâtiments collectifs

Element (1)	Element (2)	<1900	1901-1917	1918-1944	1945-1974	1975-1999	2000-2011
ENVELOPPE	Vitrage	simple vitrage				double vitrage	
MUR	Couche 1 (Ext)	Calcaire	Platre et sable	Brique	Enduit ciment et sable		
MUR	Couche 2 (Milieu)		Pierre ferme		Beton	Beton	
MUR	Couche 3 (Milieu)					Isolant	
MUR	Couche 4 (Int)	Platre					
PLANCHER	Inferieur	materiau mineral					
PLANCHER	Milieu						
PLANCHER	Superieur						
TOITURE	Exterieur	étanchéité					
TOITURE	Interieur	beton arme					
TOITURE	Milieu	espace d_air				isolant	

Bâtiments individuels

Element (1)	Element (2)	<1900	1901-1917	1918-1944	1945-1974	1975-1999	2000-2011
ENVELOPPE	Vitrage	simple vitrage				double vitrage	
MUR	Couche 1 (Ext)	Calcaire	Platre et sable	Terre cuite	Enduit ciment et sable		
MUR	Couche 2 (Milieu)		Calcaire	Brique	Beton		
MUR	Couche 3 (Milieu)		Calcaire		Beton	Isolant	
MUR	Couche 4 (Int)	Platre					
PLANCHER	Inferieur	materiau mineral					
PLANCHER	Milieu						
PLANCHER	Superieur						
TOITURE	Exterieur	tuiles sur charpente					
TOITURE	Interieur	plâtre					
TOITURE	Milieu	espace d_air				isolant	

ITE : Isolation Thermique par l'extérieur

Tours de bureaux

Element (1)	Element (2)	<1900	1901-1917	1918-1944	1945-1974	1975-1999	2000-2011
ENVELOPPE	Vitrage	simple vitrage				double vitrage	
MUR	Couche 1 (Ext)	Calcaire	Platre / platre et sable	Brique	Enduit ciment et sable		
MUR	Couche 2 (Milieu)		Calcaire		Beton	Beton	
MUR	Couche 3 (Milieu)					Isolant	
MUR	Couche 4 (Int)	Platre					
PLANCHER	Inferieur	materiau mineral					
PLANCHER	Milieu						
PLANCHER	Superieur						
TOITURE	Exterieur	terrasses					
TOITURE	Interieur	beton arme					
TOITURE	Milieu	espace d_air				isolant	

Hangars

Element (1)	Element (2)	<1900	1901-1917	1918-1944	1945-1974	1975-1999	2000-2011
ENVELOPPE	Vitrage	simple vitrage				double vitrage	
MUR	Couche 1 (Ext)	enduit mineral				bardage acier	
MUR	Couche 2 (Milieu)	brique			beton arme	Isolant	
MUR	Couche 3 (Milieu)					acier	
MUR	Couche 4 (Int)	Platre					
PLANCHER	Inferieur	materiau mineral				acier	
PLANCHER	Milieu						
PLANCHER	Superieur					materiau synthese	
TOITURE	Exterieur	tuiles				couverture métallique	
TOITURE	Interieur	charpente bois				charpente acier	
TOITURE	Milieu					isolant	

A2. Paramètres de structure et enveloppe

Bâtiments anciens Haussmanniens (Paris)

Elen	Elem	Parametre - Unite	<1900	1901-1917	1918-1944	1945-1974	1975-1999	2000-2011
ENVELOPPE								
	Vitrage							
		Facteur solaire m (-)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5
		Surface fenetre /surface facade (-)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
		U-factor (W.m-2.K-1)	6	6	6	6	3,5	2,3
TOITURE								
	Exterieur							
		Albedo ([1])	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2736	2736	2736	2736	2736	2736
		Conductivite (W.m-1.K-1)	110	110	110	110	110	110
		Emissivite ([1])	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
		Epaisseur d (m)	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008	0,0008
	Interieur							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	800	800	800	800	800	800
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
		Epaisseur d (m)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	Milieu							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	900	900	900	900	900	900
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
		Epaisseur d (m)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15

Elen	Elem	Parametre - Unite	<1900	1901-1917	1918-1944	1945-1974	1975-1999	2000-2011
MUR								
	Couche 1 (Ext)							
		Albedo ([1])	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2000	2000	2000	2000	2000	2000
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
		Emissivite ([1])	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
		Epaisseur d (m)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	Couche 2 (Milieu)							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2000	2000	2000	2000	2000	2000
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
		Epaisseur d (m)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	Couche 3 (Milieu)							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2000	2000	2000	2000	2000	2000
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
		Epaisseur d (m)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
	Couche 4 (Int)							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	700	700	700	700	700	700
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		Epaisseur d (m)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
PLANCHER								
	Inferieur							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	800	800	800	800	800	800
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
		Epaisseur d (m)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Milieu							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	800	800	800	800	800	800
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
		Epaisseur d (m)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Superieur							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	900	900	900	900	900	900
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
		Epaisseur d (m)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Bâtiments collectifs

Elen	Elem	Parametre - Unite	<1900	1901-1917	1918-1944	1945-1974	1975-1999	2000-2011
ENVELOPPE								
	Vitrage							
		Facteur solaire m (-)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5
		Surface fenetre /surface facade (-)	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
		U-factor (W.m-2.K-1)	6	6	6	6	3,5	2,3
TOITURE								
	Exterieur							
		Albedo ([1])	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2100	2100	2100	2100	2100	2100
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
		Emissivite ([1])	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
		Epaisseur d (m)	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
	Interieur							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2300	2300	2300	2300	2300	2300
		Conductivite (W.m-1.K-1)	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
		Epaisseur d (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
	Milieu							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	75	75	75	75	75	75
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
		Epaisseur d (m)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,1
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,29	0,29	0,29	0,29	2,86	2,86

Elen	Elem	Parametre - Unite	<1900	1901-1917	1918-1944	1945-1974	1975-1999	2000-2011
MUR								
	Couche 1 (Ext)							
		Albedo ([1])	0,4	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2000	1600	1600	1800	1800	1800
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,4	0,8	0,8	1	1	1
		Emissivite ([1])	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
		Epaisseur d (m)	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03	0,03
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,01	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03
	Couche 2 (Milieu)							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2000	2200	1480	2200	2200	2200
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,4	1,7	1,2	1,65	1,65	1,65
		Epaisseur d (m)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,2	0,2
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,11	0,09	0,13	0,09	0,12	0,12
	Couche 3 (Milieu)							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2000	2200	1480	2200	51	51
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,4	1,4	1,15	1,75	0,04	0,04
		Epaisseur d (m)	0,15	0,15	0,13	0,1	0,04	0,08
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,11	0,11	0,11	0,06	1	2
	Couche 4 (Int)							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	700	700	700	700	700	700
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		Epaisseur d (m)	0,03	0,03	0,03	0,02	0,015	0,013
PLANCHER								
	Inferieur							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2200	2200	2200	2200	2200	2200
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
		Epaisseur d (m)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Milieu							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2200	2200	2200	2200	2200	2200
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
		Epaisseur d (m)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Superieur							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2200	2200	2200	2200	2200	2200
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
		Epaisseur d (m)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Bâtiments individuels

Elem	Elem	Parametre - Unite	<1900	1901-1917	1918-1944	1945-1974	1975-1999	2000-2011
ENVELOPPE								
	Vitrage							
		Facteur solaire m (-)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5
		Surface fenetre /surface facade (-)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
		U-factor (W.m-2.K-1)	6	6	6	6	3,5	2,3
TOITURE								
	Exterieur							
		Albedo ([1])	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	1600	1600	1600	1600	1600	1600
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1	1	1	1	1	1
		Emissivite ([1])	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
		Epaisseur d (m)	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025
	Interieur							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	800	800	800	800	800	800
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
		Epaisseur d (m)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
	Milieu							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	75	75	75	75	75	75
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
		Epaisseur d (m)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,15
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,29	0,29	0,29	0,29	1,43	4,29

Elem	Elem	Parametre - Unite	<1900	1901-1917	1918-1944	1945-1974	1975-1999	2000-2011
MUR								
	Couche 1 (Ext)							
		Albedo ([1])	0,4	0,4	0,25	0,4	0,4	0,4
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2000	1600	1600	1800	1800	1800
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,4	0,8	0,8	1	1	1
		Emissivite ([1])	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
		Epaisseur d (m)	0,05	0,05	0,03	0,04	0,03	0,03
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,04	0,06	0,04	0,04	0,03	0,03
	Couche 2 (Milieu)							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2000	2200	1480	2200	2200	2200
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,4	1,7	1,2	1,65	1,65	1,65
		Epaisseur d (m)	0,15	0,15	0,15	0,11	0,17	0,17
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,11	0,09	0,13	0,07	0,1	0,1
	Couche 3 (Milieu)							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2000	2200	1480	2200	51	51
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,4	1,4	1,15	1,75	0,04	0,04
		Epaisseur d (m)	0,15	0,15	0,13	0,04	0,04	0,08
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,11	0,11	0,11	0,02	1	2
	Couche 4 (Int)							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	700	700	700	700	700	700
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		Epaisseur d (m)	0,03	0,03	0,03	0,02	0,015	0,013
PLANCHER								
	Inferieur							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2200	2200	2200	2200	2200	2200
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
		Epaisseur d (m)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Milieu							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2200	2200	2200	2200	2200	2200
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
		Epaisseur d (m)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Superieur							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2200	2200	2200	2200	2200	2200
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
		Epaisseur d (m)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Tours de bureaux

Elen	Elem	Parametre - Unite	<1900	1901-1917	1918-1944	1945-1974	1975-1999	2000-2011
ENVELOPPE								
	Vitrage							
		Facteur solaire m (-)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5
		Surface fenetre /surface facade (-)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
		U-factor (W.m-2.K-1)	6	6	6	6	3,5	2,3
TOITURE								
	Exterieur							
		Albedo ([1])	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2100	2100	2100	2100	2100	2100
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
		Emissivite ([1])	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
		Epaisseur d (m)	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
	Interieur							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2300	2300	2300	2300	2300	2300
		Conductivite (W.m-1.K-1)	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3
		Epaisseur d (m)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
	Milieu							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	75	75	75	75	75	75
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035	0,035
		Epaisseur d (m)	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,1
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,29	0,29	0,29	0,29	2,86	2,86

Elen	Elem	Parametre - Unite	<1900	1901-1917	1918-1944	1945-1974	1975-1999	2000-2011
MUR								
	Couche 1 (Ext)							
		Albedo ([1])	0,4	0,4	0,25	0,4	0,4	0,4
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2000	1600	1600	1800	1800	1800
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,4	0,8	0,8	1	1	1
		Emissivite ([1])	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
		Epaisseur d (m)	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,01	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03
	Couche 2 (Milieu)							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2000	2200	1480	2200	2200	2200
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,4	1,7	1,2	1,65	1,65	1,65
		Epaisseur d (m)	0,1	0,15	0,15	0,15	0,2	0,2
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,07	0,09	0,13	0,09	0,12	0,12
	Couche 3 (Milieu)							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2000	2200	1480	2200	51	51
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,4	1,4	1,15	1,75	0,04	0,04
		Epaisseur d (m)	0,1	0,25	0,13	0,035	0,04	0,08
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,07	0,18	0,11	0,02	1	2
	Couche 4 (Int)							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	700	700	700	700	700	700
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		Epaisseur d (m)	0,03	0,03	0,03	0,02	0,015	0,013
PLANCHER								
	Inferieur							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2200	2200	2200	2200	2200	2200
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
		Epaisseur d (m)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Milieu							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2200	2200	2200	2200	2200	2200
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
		Epaisseur d (m)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
	Superieur							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2200	2200	2200	2200	2200	2200
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65	1,65
		Epaisseur d (m)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02

Hangars

Elem	Elem	Parametre - Unite	<1900	1901-1917	1918-1944	1945-1974	1975-1999	2000-2011
ENVELOPPE								
	Vitrage							
		Facteur solaire m (-)	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5
		Surface fenetre /surface facade (-)	0	0	0	0	0	0
		U-factor (W.m-2.K-1)	6	6	6	6	3,5	2,3
TOITURE								
	Exterieur							
		Albedo ([1])	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,5
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	1600	1600	1600	1600	3500	3500
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1	1	1	1	50	50
		Emissivite ([1])	0,8	0,8	0,8	0,8	0,3	0,3
		Epaisseur d (m)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,001	0,001
	Interieur							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	900	900	900	900	3500	3500
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,13	0,13	0,13	0,13	50	50
		Epaisseur d (m)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,38	0,38	0,38	0,38	0,001	0,001
	Milieu							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	900	900	900	900	75	75
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,035	0,035
		Epaisseur d (m)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,15
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,38	0,38	0,38	0,38	2,86	4,29

Elem	Elem	Parametre - Unite	<1900	1901-1917	1918-1944	1945-1974	1975-1999	2000-2011
MUR								
	Couche 1 (Ext)							
		Albedo ([1])	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	1800	1800	1800	1800	3500	3500
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1	1	1	1	50	50
		Emissivite ([1])	0,9	0,9	0,9	0,9	0,5	0,5
		Epaisseur d (m)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,001	0,001
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,00	0,00
	Couche 2 (Milieu)							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	1480	1480	1480	2200	75	75
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,2	1,2	1,2	1,65	0,035	0,035
		Epaisseur d (m)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,025	0,025
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,08	0,08	0,08	0,06	0,71	0,71
	Couche 3 (Milieu)							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	1480	1480	1480	2200	3500	3500
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,2	1,2	1,2	1,65	50	50
		Epaisseur d (m)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,03	0,03
		Resistance thermique (m2.K.W-1)	0,08	0,08	0,08	0,06	0,0006	0,0006
	Couche 4 (Int)							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	700	700	700	700	700	700
		Conductivite (W.m-1.K-1)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
		Epaisseur d (m)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
PLANCHER								
	Inferieur							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2200	2200	2200	2200	3500	3500
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,65	1,65	1,65	1,65	50	50
		Epaisseur d (m)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,02	0,02
	Milieu							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2200	2200	2200	2200	3500	3500
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,65	1,65	1,65	1,65	50	50
		Epaisseur d (m)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,02	0,02
	Superieur							
		Chaleur specifique C (kJ.m-3.K-1)	2200	2200	2200	2200	400	400
		Conductivite (W.m-1.K-1)	1,65	1,65	1,65	1,65	0,1	0,1
		Epaisseur d (m)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,005	0,005

C.3 Données physiographiques

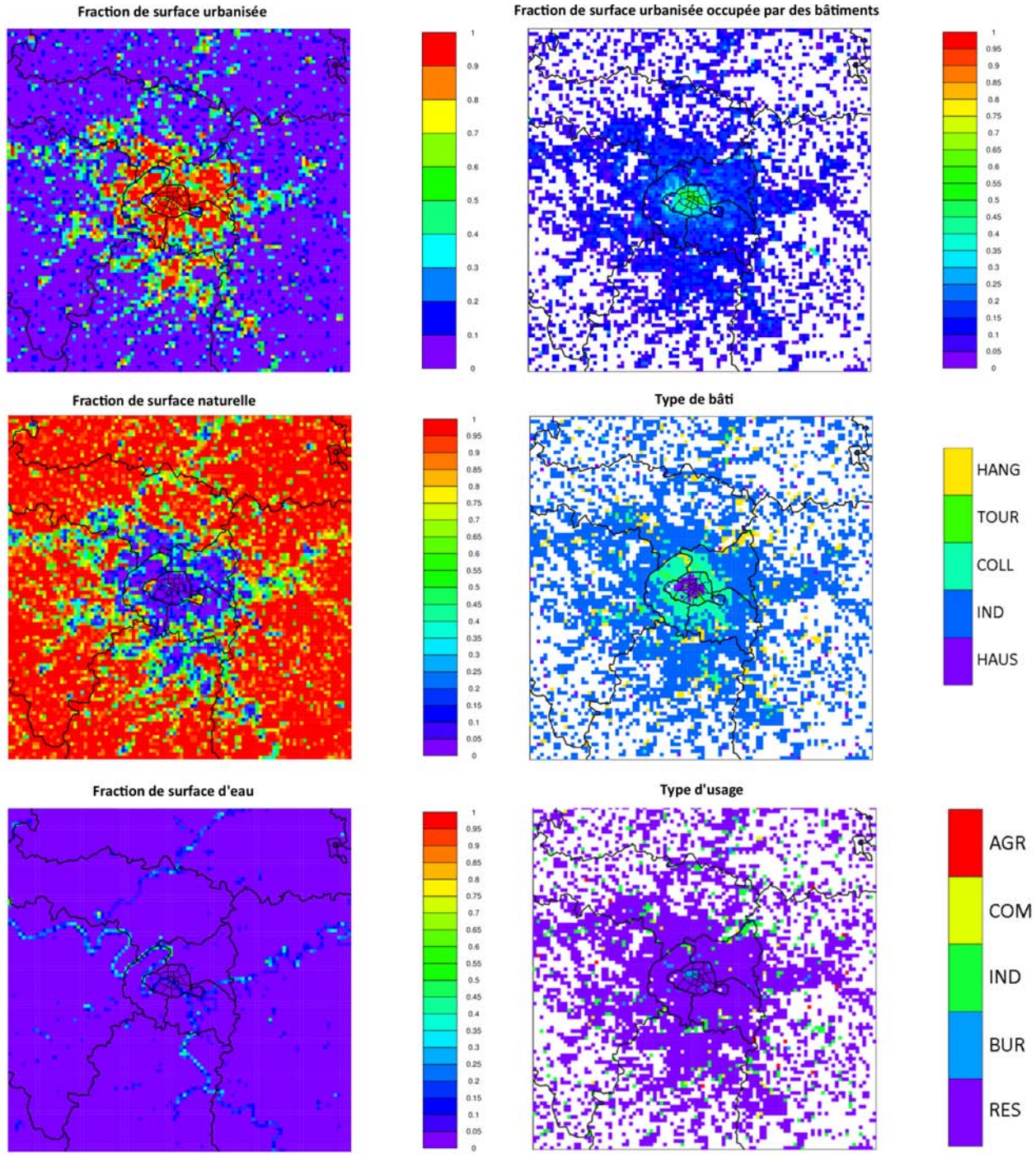


FIGURE C.3 – *Cartes représentant au sein de chaque maille de 1 km^2 du domaine de simulation, la fraction de surface urbanisée, de surface naturelle et d'eau, la fraction de surface urbanisée bâtie et le type de bâti et d'usage correspondant*

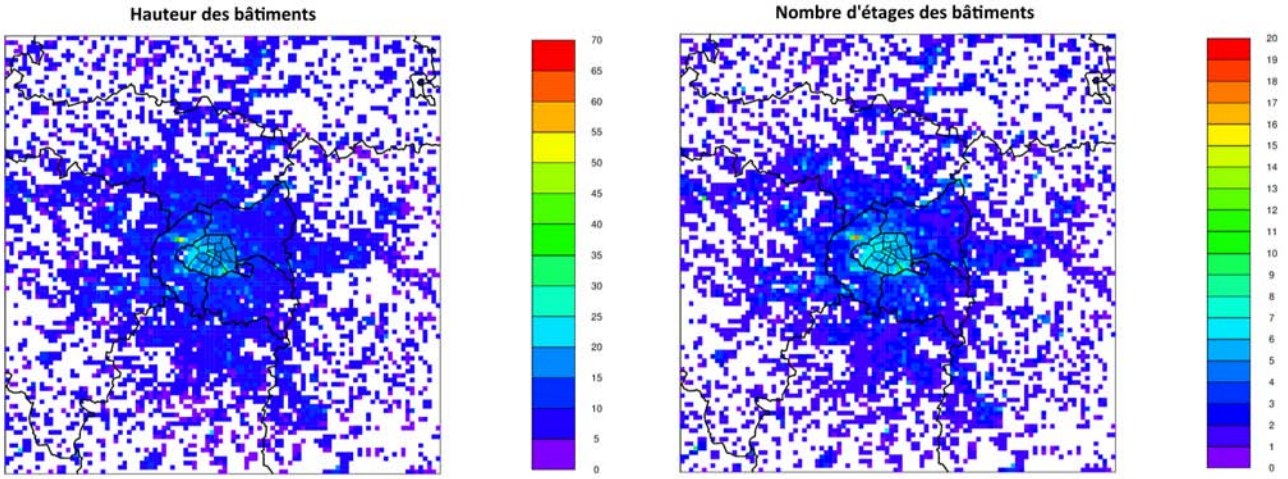


FIGURE C.4 – *Cartes représentant au sein de chaque maille de 1 km^2 du domaine de simulation, la hauteur et le nombre d'étages des bâtiments*

Références bibliographiques

Adnot, J. 2003a, *Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners. Study for the D.G. Transportation-Energy (DGTREN) of the Commission of the EU . Ed. ARMINES. Final report, vol 1, April 2003.*

Adnot, J. 2003b, *Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners. Study for the D.G. Transportation-Energy (DGTREN) of the Commission of the EU . Ed. ARMINES. Final report, vol 3, April 2003.*

Alexandri, E. et P. Jones. 2007, «Developing a one-dimensional heat and mass transfer algorithm for describing the effect of green roofs on the built environment : Comparison with experimental results», *Building and environment*, vol. 42, n° 8, p. 2835–2849.

Alexandri, E. et P. Jones. 2008, «Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates», *Building and Environment*, vol. 43, n° 4, p. 480–493.

Anquetil, V. 2011, *TYPO 5 : la végétation des scénarios alternatifs. Chapitre 1. Evolution des formes de végétation dans la ville durable : approche historique et perspectives. Mars 2011.*

APUR. 2012, *Les îlots de chaleur urbains à Paris. Phase 1. Décembre 2012.*

Barradas, V. 1991, «Air temperature and humidity and human comfort index of some city parks of mexico city», *International Journal of Biometeorology*, vol. 35, n° 1, p. 24–28. Cited By (since 1996)24.

Bass, B. et B. Baskaran. 2003, «Evaluating Rooftop and Vertical Gardens as an Adaptation Strategy for Urban Areas», cahier de recherche Report no. NRCC-46737, National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Ottawa (Canada).

Bass, B., E. S. Krayenhoff, A. Martilli, R. B. Stull et H. Auld. 2003, «The impact of green roofs on toronto's urban heat island», dans *Proceedings of the First North American Green Roof Conference : Greening Rooftops for Sustainable Communities*, p. 292–304.

Beaulant, A., A. Lemonsu, S. Somot et V. Masson. 2012, «Future heat waves over paris metropolitan area», dans *National Security and Human Health Implications of Climate Change*, édité par H. J. S. Fernando, Z. KlaiÄ‡ et J. McCulley, NATO Science for Peace and Security Series

C : Environmental Security, Springer Netherlands, ISBN 978-94-007-2429-7, p. 135–145, doi :10.1007/978-94-007-2430-3_12. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-94-007-2430-3_12.

Bessemoulin, P., N. Bourdette, P. Courtier et J. Manach. 2004, «La canicule d'août 2003 en France et en Europe», *La Météorologie*, vol. 46, p. 25–33.

Bidet, Y. 2013, *Etude de l'impact météorologique de l'aménagement Euromed 2 en période de canicule. Rapport final de l'étude résultant du partenariat Météo-France - Euroméditerranée Rapport final de l'étude résultant du partenariat Météo-France - Euroméditerranéeeptembre 2013.*

Bonan, G. B. 2002, *Ecological climatology : concepts and applications.*, Cambridge University Press.

Bonhomme, M. 2012, *Etapes de développement de GENIUS. Rapport de projet. 20 août 2012.*

Boone, A. 2000, *Modélisation des processus hydrologiques dans le schéma de surface ISBA : Inclusion d'un reservoir hydrologique, du gel et modelisation de la neige* , thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France.

Boone, A., V. Masson, T. Meyers et J. Noilhan. 2000, «The influence of the inclusion of soil freezing on simulations by a soil-vegetation-atmosphere transfer scheme», *Journal of Applied Meteorology*, vol. 39, n° 9, p. 1544–1569.

Bordeaux. 2011, *La charte des paysages de la ville de Bordeaux. URL de la Mairie de Bordeaux visité le 23/02/2011.* URL http://www.bordeaux.fr/p8351.

Bowler, D. E., L. Buyung-Ali, T. M. Knight et A. S. Pullin. 2010, «Urban greening to cool towns and cities : A systematic review of the empirical evidence», *Landscape and urban planning*, vol. 97, n° 3, p. 147–155.

Bröde, P., D. Fiala, K. Błażejczyk, I. Holmér, G. Jendritzky, B. Kampmann, B. Tinz et G. Havenith. 2012, «Deriving the operational procedure for the universal thermal climate index (utci)», *International journal of biometeorology*, vol. 56, n° 3, p. 481–494.

Bueno, B., J. Hidalgo, G. Pigeon, L. Norford et V. Masson. 2013, «Calculation of air temperatures above the urban canopy layer from measurements at a rural operational weather station», *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 52, n° 2, p. 472–483.

Bueno, B., L. Norford, G. Pigeon et R. Britter. 2011, «Combining a detailed building energy model with a physically-based urban canopy model», *Boundary-layer meteorology*, vol. 140, n° 3, p. 471–489.

Bueno, B., G. Pigeon, L. Norford, K. Zibouche et C. Marchadier. 2012, «Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme», *Geosci. Model Dev.*, vol. 5, doi :10.5194/gmd-5-433-2012, p. 433–448.

Bueno-Bartholomei, C. L. L. 2003, «How much does the change of species of trees affect their solar radiation attenuation ?», dans *Proceedings of the Fifth International Conference on Urban Climate, Lodtz, Poland.*

Canouï-Poitrine, F., E. Cadot et A. Spira. 2006, «Excess deaths during the august 2003 heat wave in paris, france», *Revue d'épidémiologie et de santé publique*, vol. 54, n° 2, p. 127–135.

Castleton, H., V. Stovin, S. Beck et J. Davison. 2010, «Green roofs ; building energy savings and the potential for retrofit», *Energ. Buildings*, vol. 41, p. 1582–1591.

Chang, C.-R., M.-H. Li et S.-D. Chang. 2007, «A preliminary study on the local cool-island intensity of taipei city parks», *Landscape and Urban Planning*, vol. 80, n° 4, p. 386–395.

Claridge, N. et L. Edwards. 2012, «Green roof technology - research, design and implementation of a green roof at the university of Canterbury», *UC sustainability research scholarship Report*, p. 37.

Cleugh, H. et T. Oke. 1986, «Suburban-rural energy balance comparisons in summer for vancouver, bc», *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 36, n° 4, p. 351–369.

Colombert, M. et P. Boudes. 2012, «Adaptation aux changements climatiques en milieu urbain et approche globale des trames vertes. hors-série. mai 2012», *VertigO*, vol. 12.

Coutts, A. M., N. J. Tapper, J. Beringer, M. Loughnan et M. Demuzere. 2013, «Watering our cities the capacity for water sensitive urban design to support urban cooling and improve human thermal comfort in the australian context», *Progress in Physical Geography*, vol. 37, n° 1, p. 2–28.

Crawley, D. B., L. K. Lawrie, F. C. Winkelmann, W. F. Buhl, Y. J. Huang, C. O. Pedersen, R. K. Strand, R. J. Liesen, D. E. Fisher, M. J. Witte et al.. 2001, «Energyplus : creating a new-generation building energy simulation program», *Energy and Buildings*, vol. 33, n° 4, p. 319–331.

de Munck, C., A. Lemonsu, R. Bouzouidja, V. Masson et R. Claverie. 2013b, «The GREENROOF module (v7.3) for modelling green roof hydrological and thermal performances within TEB», *Geoscientific Model Development*.

de Munck, C., G. Pigeon, V. Masson, F. Meunier, P. Bousquet, B. Tréméac, M. Merchat, P. Poeuf et C. Marchadier. 2013, «How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France ?», *International Journal of Climatology*, vol. 33, p. 210–227.

Decharme, B., A. Boone, C. Delire et J. Noilhan. 2011, «Local evaluation of the Interaction between Soil Biosphere Atmosphere soil multilayer diffusion scheme using four pedotransfer functions», *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, vol. 116, n° D20, doi :10.1029/2011JD016002, p. n/a–n/a, ISSN 2156-2202. URL http://dx.doi.org/10.1029/2011JD016002.

Del Barrio, E. P. 1998, «Analysis of the green roofs cooling potential in buildings», *Energy and Buildings*, vol. 27, n° 2, p. 179–193.

Déqué, M., D. Rowell, D. Lüthi, F. Giorgi, J. Christensen, B. Rockel, D. Jacob, E. Kjellström, M. De Castro et B. van den Hurk. 2007, «An intercomparison of regional climate simulations for europe : assessing uncertainties in model projections», *Climatic Change*, vol. 81, n° 1, p. 53–70.

Descartes, G. 2009, *Consultation internationale de recherche et de développement sur le Grand Pari de l'agglomération parisienne. Rapport final.* . URL http://www.legrandparis.net/actualitedetail/82/DESCARTES_Livret_chantier_1_2.pdf.

Desplat, J., R. Kounkou-Arnaud, A. Lemonsu, V. Masson et J. Salagnac. 2012, *Etude Pluridisciplinaire des Impacts du Changement climatique à l'Echelle de l'Agglomération parisienne. Rapport final du projet. Octobre 2012.*

Eumorfopoulou, E. et D. Aravantinos. 1998, «The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in greece», *Energy and Buildings*, vol. 27, nº 1, p. 29–36.

Eumorfopoulou, E. et K. Kontoleon. 2009, «Experimental approach to the contribution of plant-covered walls to the thermal behaviour of building envelopes», *Building and Environment*, vol. 44, nº 5, p. 1024–1038.

Farouki, O. T. 1986, *Thermal properties of soils*, Trans Tech Pub., Rockport, MA.

Feng, C., Q. Meng et Y. Zhang. 2010, «Theoretical and experimental analysis of the energy balance of extensive green roofs», *Energy and buildings*, vol. 42, nº 6, p. 959–965.

Fiala, D., G. Havenith, P. Bröde, B. Kampmann et G. Jendritzky. 2012, «Utci-fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation», *International journal of biometeorology*, vol. 56, nº 3, p. 429–441.

Futcher, J., P. Hernandez, L. Chebel Labaki et O. Fernandes. 2012, «Managing cooling loads by the appropriate application of greening facades», ICUC 8, 8th International conference on Urban climate,August, 6-10, 2012, Dublin, IRL.

Gaffin, S., C. Rosenzweig, L. Parshall, D. Beattie, R. Berghage, G. O'Keeffe et D. Braman. 2010, «Energy balance modeling applied to a comparison of white and green roof cooling efficiency», *Green Roofs in the New York Metropolitan Region Research Report*, p. 7.

Gastellu-Etchegorry, J.-P., Y. Auda, E. Martin, A. Brut, V. Demarez, E. Grau, J. Rubio, N. Benech, C. Suere, A. S. Pierre et al.. 2008, «Dart : modèle physique 3d d'images de télédétection et du bilan radiatif de paysages urbains et naturels», *Revue Télédétection*, vol. 8, nº 3, p. 159–167.

Georgi, N. et K. Zafiriadis. 2006, «The impact of park trees on microclimate in urban areas», *Urban Ecosystems*, vol. 9, nº 3, p. 195–209. Cited By (since 1996)18.

Gill, S. 2006, *Climate change and urban greenspace*, thèse de doctorat, University of Manchester, UK.

Gill, S., J. Handley, A. Ennos et S. Pauleit. 2007, «Adapting cities for climate change : the role of the green infrastructure», *Built Environment (1978-)*, p. 115–133.

Giorgi, F. 2006, «Climate change hot-spots», *Geophysical Research Letters*, vol. 33, nº 8, doi : 10.1029/2006GL025734, p. n/a–n/a, ISSN 1944-8007. URL http://dx.doi.org/10.1029/2006GL025734.

Hallegatte, S., J.-C. Hourcade et P. Ambrosi. 2007, «Using climate analogues for assessing climate change economic impacts in urban areas», *Climatic change*, vol. 82, nº 1-2, p. 47–60.

Hamdi, R. et V. Masson. 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*, vol. 47, nº 10, p. 2627–2644.

Haoues-Jouve, S. et co auteurs. 2009, *Appel à projets PIRVE 2008. Formes urbaines, modes d'habiter et climat urbain dans le péri-urbain toulousain. Projet exploratoire de recherche interdisciplinaire.*

Harazono, Y., S. Teraoka, I. Nakase et H. Ikeda. 1991, «Effects of rooftop vegetation using artificial substrates on the urban climate and the thermal load of buildings», *Energy and buildings*, vol. 15, n° 3, p. 435–442.

Hidalgo, J., V. Masson et L. Gimeno. 2010, «Scaling the daytime urban heat island and urban-breeze circulation», *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 49, n° 5, p. 889–901.

Hilten, R. N., T. M. Lawrence et E. W. Tollner. 2008, «Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D», *Journal of Hydrology*, vol. 358, n° 3, p. 288–293.

Honjo, T., K. Umeki, R. Hirota et K. Toba. 2012, «Simulation of energy balance of vertical green wall», ICUC 8, 8th International conference on Urban climate,August, 6-10, 2012, Dublin, IRL.

Hsieh, C.-M., T. Aramaki et K. Hanaki. 2007, «The feedback of heat rejection to air conditioning load during the nighttime in subtropical climate», *Energy and Buildings*, vol. 39, n° 11, p. 1175–1182.

Hémon, D. et E. Jougla. 2004, «Surmortalité liée à la canicule d'août 2003. rapport remis au ministre de la santé et de la protection sociale. 26 octobre 2004», cahier de recherche, Institut National de la santé et de la recherche médicale.

IPCC. 2007, *Climate change 2007 : synthesis report, core writing team. In : Pachauri RK, Reisinger A (eds) IPCC, Geneva, Switzerland.*

Jacquet, S. 2011, *Performance énergétique d'une toiture végétale au centre-ville de Montréal. Résumé de mémoire.* URL http://www.ecologieurbaine.net/node/1214.

Jaffal, I., S.-E. Ouldboukhitine et R. Belarbi. 2012, «A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance», *Renewable Energy*, vol. 43, p. 157–164.

Jim, C. et S. Tsang. 2011, «Modeling the heat diffusion process in the abiotic layers of green roofs», *Energy and Buildings*, vol. 43, n° 6, p. 1341–1350.

Kasmin, H., V. Stovin et E. Hathway. 2010, «Towards a generic rainfall-runoff model for green roofs», *Water science and technology*, vol. 62, n° 4, p. 898.

Kikegawa, Y., Y. Genchi, H. Yoshikado et H. Kondo. 2003, «Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands», *Applied Energy*, vol. 76, n° 4, p. 449–466.

Kjelgren, R. et T. Montague. 1998, «Urban tree transpiration over turf and asphalt surfaces», *Atmospheric Environment*, vol. 32, n° 1, p. 35–41.

Kontoleon, K. et E. Eumorfopoulou. 2010, «The effect of the orientation and proportion of a plant-covered wall layer on the thermal performance of a building zone», *Building and environment*, vol. 45, n° 5, p. 1287–1303.

Kumar, R. et S. Kaushik. 2005, «Performance evaluation of green roof and shading for thermal protection of buildings», *Building and Environment*, vol. 40, n° 11, p. 1505–1511.

Lafore, J., J. Stein, N. Asencio, P. Bougeault, V. Ducrocq, J. Duron, C. Fischer, P. Héreil, P. Mascart, V. Masson, J. Pinty, J. Redelsperger, E. Richard et J.-G. de Arellano. 1998, «The Méso-NH atmospheric simulation system. Part I : adiabatic formulation and control simulation», *Annales Geophysicae*, vol. 16, p. 90–109.

Landsberg, H. E. 1981, *The urban climate*, Academic press.

Lazzarin, R., F. Castellotti et F. Busato. 2005, «Experimental measurements and numerical modelling of a green roof», *Energy and Buildings*, vol. 37, p. 1260–1267.

Lee, S.-H. et S.-U. Park. 2008, «A vegetated urban canopy model for meteorological and environmental modelling», *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 126, n° 1, p. 73–102.

Lemonsu, A., S. Bélair, J. Mailhot et S. Leroyer. 2010, «Evaluation of the town energy balance model in cold and snowy conditions during the montreal urban snow experiment 2005», *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 49, n° 3, p. 346–362.

Lemonsu, A., C. Grimmond et V. Masson. 2004, «Modeling the surface energy balance of the core of an old mediterranean city : Marseille», *Journal of Applied Meteorology*, vol. 43, n° 2, p. 312–327.

Lemonsu, A., R. Kounkou-Arnaud, J. Desplat, J.-L. Salagnac et V. Masson. 2013, «Evolution of the parisian urban climate under a global changing climate», *Climatic change*, vol. 116, n° 3-4, p. 679–692.

Lemonsu, A., V. Masson, L. Shashua-Bar, E. Erell et D. Pearlmutter. 2012, «Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas», *Geosci. Model Dev.*, vol. 5, p. 1377–1393.

Liangmei, H., L. Jianlong, Z. Dehua et Z. Jiyu. 2008, «A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of nanjing, china», *Building and Environment*, vol. 43, n° 1, doi :http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.11.025, p. 7 – 17.

Lyon. 2002, *Charte de l'arbre urbain du grand Lyon.*

Malys, L. 2009, *Modélisation climatique des façades végétales : caractéristqiues radiatives des couvertures végétales des façades. Mémoire de master.*

Malys, L. 2013, *Évaluation des impacts directs et indirects des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments* , thèse de doctorat, CERMA, Ecole Nationale Supérieure d'Architecture, Nantes.

Marchadier, C. 2013, *Construction des scénarios MUSCADE. Bâti, technologies et usages. Rapport de projet. Mars 2013.*

Marseille. 2002, *Code de l'arbre. Juillet 2002.*

Martens, R., B. Bass et S. S. Alcazar. 2008, «Roof-envelope ratio impact on green roof energy performance», *Urban Ecosystems*, vol. 11, n° 4, p. 399–408.

Masson, V. 2000, «A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models», *Boundary-layer meteorology*, vol. 94, n° 3, p. 357–397.

Masson, V., L. Gomes, G. Pigeon, C. Liousse, V. Pont, J.-P. Lagouarde, J. Voogt, J. Salmond, T. Oke, J. Hidalgo et al.. 2008, «The canopy and aerosol particles interactions in toulouse urban layer (capitoul) experiment», *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 102, n° 3-4, p. 135–157.

Masson, V., C. Grimmond et T. R. Oke. 2002, «Evaluation of the town energy balance (teb) scheme with direct measurements from dry districts in two cities», *Journal of applied meteorology*, vol. 41, n° 10, p. 1011–1026.

Masson, V., P. L. Moigne, E. Martin, S. Faroux, A. Alias, R. Alkama, S. Belamari, A. Barbu, A. Boone, F. Bouyssel et al.. 2013, «The surfexv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes», *Geoscientific Model Development*, vol. 6, n° 4, p. 929–960.

Masson, V. et Y. Seity. 2009, «Including atmospheric layers in vegetation and urban offline surface schemes», *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 48, n° 7, p. 1377–1397.

Meehl, G. A. et C. Tebaldi. 2004, «More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century», *Science*, vol. 305, n° 5686, doi :10.1126/science.1098704, p. 994–997. URL http://www.sciencemag.org/content/305/5686/994.abstract.

Mentens, J., D. Raes et M. Hermy. 2006, «Green roofs as a tool for solving the rainwater runoff problem in the urbanized 21st century ?», *Landscape and urban planning*, vol. 77, n° 3, p. 217–226.

Moisselin, J., M. Schneider, C. Canellas et O. Mestre. 2002, «Les changements climatiques en france au xxe siècle : étude des longues séries homogénéisées de données de température et de précipitations», *La Météorologie*, vol. 38, p. 45–56.

Montpellier. 1996, *Charte de l'arbre urbain. Mai 1996.*

Mueller, E. et T. Day. 2005, «The effect of urban ground cover on microclimate, growth and leaf gas exchange of oleander in phoenix, arizona», *International Journal of Biometeorology*, vol. 49, n° 4, p. 244–255. Cited By (since 1996)19.

Météo France, a. 2004, «Bilan météorologique de la canicule d'août 2003», *Dossier de presse du 17 février 2004.*

Nezeys, A. 2013, «Un zonage pluvial pour paris : réintégrer les eaux pluviales dans le grand cycle de l'eau», NOVATECH 2013, 23-27 juin 2013, Lyon, France.

Ng, E., L. Chen, Y. Wang et C. Yuan. 2012, «A study on the cooling effects of greening in a high-density city : An experience from hong kong», *Building and Environment*, vol. 47, p. 256–271.

Noilhan, J. et P. Planton. 1989, «A simple parameterization of land surface processes for meteorological models», *Monthly Weather Review*, vol. 117, p. 536–849.

Nowak, D. J. 2000, «The effects of urban trees on air quality», *USDA Forest Service*, vol. 4.

Nyuk Hien, W., T. Puay Yok et C. Yu. 2007, «Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate», *Building and Environment*, vol. 42, n° 1, p. 25–54.

Nîmes. 2011, *URL de la Mairie de Nîmes visité le 23/02/2011*. URL http://www.nimes.fr/index.php?id=508.

Offerle, B., C. Grimmond et K. Fortuniak. 2005, «Heat storage and anthropogenic heat flux in relation to the energy balance of a central european city centre», *International Journal of Climatology*, vol. 25, n° 10, p. 1405–1419.

Ohashi, Y., Y. Genchi, H. Kondo, Y. Kikegawa, H. Yoshikado et Y. Hirano. 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*, vol. 46, n° 1, p. 66–81.

Oke, T. 1988, «The urban energy balance», *Progress in Physical Geography*, vol. 12, n° 4, doi :10.1177/030913338801200401, p. 471–508. URL http://ppg.sagepub.com/content/12/4/471.short.

Oke, T. R. 1987, *Boundary layer climates*, Methuen.

Oke, T. R., J. Crowther, K. McNaughton, J. Monteith et B. Gardiner. 1989, «The micrometeorology of the urban forest [and discussion]», *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, vol. 324, n° 1223, p. 335–349.

Onmura, S., M. Matsumoto et S. Hokoi. 2001, «Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens», *Energy and Buildings*, vol. 33, n° 7, p. 653–666.

Ouldboukhitine, S.-E., R. Belarbi, I. Jaffal et A. Trabelsi. 2011, «Assessment of green roof thermal behavior : a coupled heat and mass transfer model», *Building and Environment*, vol. 46, n° 12, p. 2624–2631.

Palla, A., I. Gnecco et L. Lanza. 2009, «Unsaturated 2D modelling of subsurface water flow in the coarse-grained porous matrix of a green roof», *Journal of Hydrology*, vol. 379, n° 1, p. 193–204.

Palla, A., I. Gnecco et L. Lanza. 2012, «Compared performance of a conceptual and a mechanistic hydrologic models of a green roof», *Hydrological Processes*, vol. 26, n° 1, p. 73–84.

Peters-Lidard, C., E. Blackburn, X. Liang et E. Wood. 1998, «The effect of soil thermal conductivity parameterization on surface energy fluxes and temperatures», *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 55, n° 7, p. 1209–1224.

Pigeon, G. 2011, «Computation of a thermal comfort index in the teb urban canopy model», Technical Report for the VURCA Project, ANR-08-VULN-013-0x/VURCA.

Pigeon, G., A. Lemonsu, V. Masson et J. Hidalgo. 2008a, «De l'observation du micro-climat urbain à la modélisation intégrée de la ville», *La Météorologie*, vol. 62, p. 39–47.

Pigeon, G., M. A. Moscicki, J. A. Voogt et V. Masson. 2008b, «Simulation of fall and winter surface energy balance over a dense urban area using the teb scheme», *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 102, n° 3-4, p. 159–171.

Pigeon, G., K. Zibouche et B. Bueno. 2012, «Development and evaluation of a comprehensive energy model in teb», ICUC 8, 8th International conference on Urban climate,August, 6-10 August, 2012, Dublin, IRL.

Potchter, O., P. Cohen et A. Bitan. 2006, «Climatic behavior of various urban parks during hot and humid summer in the mediterranean city of tel aviv, israel», *International Journal of Climatology*, vol. 26, n° 12, p. 1695–1711. Cited By (since 1996)24.

Prata, A. 1996, «A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface», *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 122, n° 533, p. 1127–1151.

PREDAT. 2012, *Climat et projet urbain. Influences du changement climatique sur les modes de production de l'urbain. Cahier des territoires n9. Décembre 2012. Séminaire du 7 oct. 2011. Publication du PREDAT Midi-Pyrénées.*

Roberts, S. M., T. R. Oke, C. Grimmond et J. A. Voogt. 2006, «Comparison of four methods to estimate urban heat storage», *Journal of applied meteorology and climatology*, vol. 45, n° 12, p. 1766–1781.

Rosenzweig, C. et W. D. Solecki. 2001, «Climate change and a global city learning from new york», *Environment : Science and Policy for Sustainable Development*, vol. 43, n° 3, doi : 10.1080/00139150109605128, p. 8–18. URL http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00139150109605128.

Rosenzweig, C., W. D. Solecki, L. Parshall, B. Lynn, J. Cox, R. Goldberg, S. Hodges, S. Gaffin, R. B. Slosberg, P. Savio et al.. 2009, «Mitigating New York city's heat island», *Bull Am Meteorol Soc*, vol. 90, n° 9, p. 1297–1312.

Sailor, D. 2008, «A green roof model for building energy simulation programs», *Energy and buildings*, vol. 40, n° 8, p. 1466–1478.

Salager, S. 2007, *Etude de la rétention d'eau et de la consolidation de sols dans un cadre thermo-hydro-mécanique*, thèse de doctorat, Université de Montpellier 2, Sciences et Techniques du Languedoc,.

Salamanca, F., A. Martilli, M. Tewari et F. Chen. 2011, «A study of the urban boundary layer using different urban parameterizations and high-resolution urban canopy parameters with wrf», *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 50, n° 5, p. 1107–1128.

Shashua-Bar, L. et M. Hoffman. 2000, «Vegetation as a climatic component in the design of an urban street. an empirical model for predicting the cooling effect of urban green areas with trees», *Energy and Buildings*, vol. 31, n° 3, p. 221–235.

Shashua-Bar, L., D. Pearlmutter et E. Erell. 2009, «The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate», *Landscape and Urban Planning*, vol. 92, n° 3, p. 179–186.

Simunek, J., K. Huang et M. T. Van Genuchten. 1994, «The SWMS_2D code for simulating water flow and solute transport in three-dimensional variably-saturated media, Version 1.21, Research report No. 132», cahier de recherche, US Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.

Simunek, J., M. T. Van Genuchten et M. Sejna. 2005, «The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media, Version 3.0, HYDRUS Software Series 1.», cahier de recherche, Dept. of Environmental Science, University of California Riverside, Riverside, California, USA.

SOPREMA. 2011, *Fiche générale d'arrosage des systèmes SOPRANATURE, Version03032011.* URL http://www.soprema.fr/actualites/nouveaux-produits/1383/1330753/Aquatex-nouvelle-solution-d-irrigation-raisonnee.

Souch, C. et C. Souch. 1993, «The effect of trees on summertime below canopy urban climates : a case study bloomington, indiana», *J. Arboricult.*, vol. 19, p. 303–312.

Spronken-Smith, R. et T. Oke. 1998, «The thermal regime of urban parks in two cities with different summer climates», *International Journal of Remote Sensing*, vol. 19, n° 11, p. 2085–2104. Cited By (since 1996)96.

Stein, J., E. Richard, J. Lafore, J. Pinty, N. Asencio et S. Cosma. 2000, «High-resolution non-hydrostatic simulations of flash-flood episodes with grid-nesting and ice-phase parameterization», *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 72, n° 2-4, p. 203–221.

Sternberg, T., H. Viles et A. Cathersides. 2011, «Evaluating the role of ivy (< i> hedera helix</i>) in moderating wall surface microclimates and contributing to the bioprotection of historic buildings», *Building and Environment*, vol. 46, n° 2, p. 293–297.

Synnefa, A., M. Stathopoulou, A. Sakka, K. Katsiabani, M. Santamouris, N. Adaktylou, C. Cartalis et N. Chrysoulakis. 2010, «Integrating sustainability aspects in urban planning : the case of athens.», 3rd International Conference on Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment (PALENC 2010), 5th European Conference on Energy Performance and Indoor Climate in Buildings (EPIC 2010), and 1st Cool Roofs Conference. Rhodes Island, Greece, 29 September–1 October 2010.

Taha, H., H. Akbari et A. Rosenfeld. 1991, «Heat island and oasis effects of vegetative canopies : Micro-meteorological field-measurements», *Theoretical and Applied Climatology*, vol. 44, n° 2, p. 123–138. Cited By (since 1996)38.

Takebayashi, H. et M. Moriyama. 2007, «Surface heat budget on green roof and high reflection roof for mitigation of urban heat island», *Building and Environment*, vol. 42, n° 8, p. 2971–2979.

Thayer, J., L. Robert et B. T. Maeda. 1985, «Measuring street tree impact on solar performance : a five-climate computer modeling study», *Journal of arboriculture*, vol. 11.

The Commission for Thermal Physiology of the International Union of Physiological Sciences. 2003, «Glossary of terms for thermal physiology», *Journal of Thermal Biology*, vol. 28, p. 75–106.

Trémeac, B., P. Bousquet, C. de Munck, G. Pigeon, V. Masson, C. Marchadier, M. Merchat, P. Poeuf et F. Meunier. 2012, «Influence of air conditioning management on heat island in paris air street temperatures», *Applied Energy*, vol. 95, p. 102–110.

Viguié, V., A. Beaulant, B. Bueno, S. Hallegatte, A. Lemonsu, C. Marchadier, V. Masson, G. Pigeon et J. Salagnac. 2013, *Cities vulnerability to future heat waves and adaptation strategies. Project methodology and results.*

Wark, C. et W. W. Wark. 2003, «Green roof specifications and standards. establishing an emerging technology», *The construction Specifier*, vol. 56, nº 8, p. 1–12. URL http://www.proenviroconstruction.com/pdf/GreenRoof.pdf.

Wong, N., Y. Chen, C. Ong et A. Sia. 2003, «Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment», *Building and Environment*, vol. 38, nº 2, p. 261–270. Cited By (since 1996)116.

Wong, N. H., A. Y. Kwang Tan, Y. Chen, K. Sekar, P. Y. Tan, D. Chan, K. Chiang et N. C. Wong. 2010, «Thermal evaluation of vertical greenery systems for building walls», *Building and environment*, vol. 45, nº 3, p. 663–672.

Yilmaz, H., S. Toy, M. Irmak, S. Yilmaz et Y. Bulut. 2008, «Determination of temperature differences between asphalt concrete, soil and grass surfaces of the city of erzurum, turkey», *Atmosfera*, vol. 21, nº 2, p. 135–146. Cited By (since 1996)7.

Yu, C. et C. Zheng. 2010, «HYDRUS : Software for flow and transport modeling in variably saturated Media», *Ground Water*, vol. 48, nº 6, p. 787–791.