



HAL
open science

Modélisation de la végétation urbaine comme régulateur thermique

Emilie Redon

► **To cite this version:**

Emilie Redon. Modélisation de la végétation urbaine comme régulateur thermique. Climatologie. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2017. Français. NNT : 2017TOU30240 . tel-01922348

HAL Id: tel-01922348

<https://theses.hal.science/tel-01922348>

Submitted on 14 Nov 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par : *l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)*

Présentée et soutenue le *20/06/2017* par :

EMILIE REDON

**Modélisation de la végétation urbaine comme régulateur
thermique**

JURY

JEAN-PHILIPPE GASTELLU- ETCHEGORRY	Professeur d'Université	Président du Jury
VALÉRY MASSON	Ingénieur en chef des Ponts, des Eaux et des Forêts	Directeur de thèse
AUDE LEMONSU	Chargée de Recherche	Directrice de thèse
ISABELLE CALMET	Maître de Conférences	Rapporteur
GEORGES NAJJAR	Maître de Conférences	Rapporteur
MARJORIE MUSY	Directrice de recherche	Examineur
SYLVAIN DUPONT	Directeur de recherche	Examineur
SCOTT KRAYENHOFF	Postdoctoral Associate	Examineur

École doctorale et spécialité :

SDU2E : Océan, Atmosphère et Surfaces Continentales

Unité de Recherche :

Centre National de Recherches Météorologiques (UMR 3589)

Directeur(s) de Thèse :

Aude LEMONSU et Valéry MASSON

Rapporteurs :

Isabelle CALMET et Georges NAJJAR

Remerciements

“Si nous prenons la nature pour guide, nous ne nous égarerons jamais.”

Cicéron

Quelle aventure !

C'est avec grand plaisir que j'ouvre enfin la section des remerciements de ce manuscrit. J'ai vécu une expérience incroyablement riche durant ces trois dernières années ! Et je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué, chacune à leur manière, au caractère extraordinaire de cette période de ma vie.

En tout premier lieu, je remercie vivement Aude Lemonsu et Valéry Masson qui ont dirigé mon travail de thèse. Aude, tu m'as accordé ta confiance dès le début, et jusqu'au bout, je t'en remercie. J'ai bénéficié de ton exceptionnelle pédagogie et patience. Tes croquis-minute résument parfaitement quelques heures de cours et cela m'a bluffé ! Merci pour ta disponibilité et ton accompagnement sans failles durant ces trois années aux multiples rebondissements. J'ai beaucoup appris de la rigueur que tu appliques dans tout ce que tu entreprends. Les séances de sport et les piques-niques étaient aussi des moments agréables. Un immense merci Valéry, pour ton optimisme, ton entrain contagieux à résoudre les problèmes les plus ardues, qu'ils soient logiques ou techniques. Tu as été le garant de la cohérence entre les implémentations en cours, les hypothèses historiques et la destinée de TEB tout au long de cette thèse. Malgré ton emploi du temps chargé tu étais présent pour les grands virages de cette thèse. Vos capacités d'analyse et d'abstraction hors normes à tous les deux n'ont pas effacé l'enthousiasme que vous savez communiquer à faire de la science. J'ai scientifiquement et humainement beaucoup appris à vos côtés.

Je remercie sincèrement Marc Pontaud, directeur scientifique du CNRM à mon arrivée pour m'avoir accueillie dans son laboratoire ainsi que Claire Doubremelle qui lui a succédé à ce poste et qui a participé activement au bon déroulement de ma soutenance de thèse.

Je tiens à remercier l'ensemble des membres du jury, Jean-Phillippe Gastellu-Etchegorry, Isabelle Calmet, Marjorie Musy, Georges Najjar, Scott Krayenhoff et Sylvain Dupont, pour avoir accepté de prendre de leur temps pour lire mon manuscrit, assister à ma soutenance et me faire part de leurs remarques. Grâce à la multiplicité de vos expertises (expérimentation, modélisation, schéma de transfert thermo-radiatif, lois aérodynamiques) tous les aspects de ce travail ont pu être abordés. Merci d'avoir nourri une discussion fertile qui orientera la suite des recherches. Je remercie tout particulièrement les rapporteurs Isabelle et Georges pour leur examen minutieux du manuscrit. Merci à Scott, venu de très loin malgré les embûches, pour avoir apporté ton éclairage sur nos résultats et suggéré d'intéressantes perspectives alors que tes travaux sont similaires aux nôtres.

Merci aux membres de mon comité de thèse Aaron Boone, Marjorie Musy et Katia Chancibault, qui m'ont aidé à prendre du recul sur les développements en cours, notamment sur le niveau de détail souhaitable dans la description des arbres de rue en première année. Nos réunions ont débouché sur une solide collaboration avec le laboratoire CRENAU grâce à la mise à disposition du modèle architectural d'ensoleillement SOLENE par Marjorie afin de réaliser un exercice de validation d'envergure. Benjamin Morille s'est rendu disponible pour m'expliquer les rudiments de la simulation SOLENE *via* une interface Python, merci. Merci à Laurent Malys qui vient également au secours de nombreux utilisateurs de SOLENE.

Je suis reconnaissante de l'introduction à la recherche que j'ai vécu avec Valérie Le Dantec au C.E.S.BIO. durant deux stages qui ont précédé cette aventure. Ces expériences n'ont fait que confirmer mon envie de m'engager dans une thèse il y a plus de trois ans.

Après une semaine de stage SURFEX, j'enchaînais déjà avec une seconde semaine de thèse à Paris pour une campagne de terrain appartenant au projet EUREQUA. Autant dire qu'à ce moment-là je peinais encore à distinguer les personnes de mon équipe ou plus largement de mon nouveau laboratoire. J'ai fait la connaissance de Julien, doctorant TURBAU très dynamique, qui a mené cette campagne d'une main de maître ainsi que Quentin, encore stagiaire, venu nous soutenir. Les différentes campagnes de terrain se sont déroulées dans la bonne humeur et le souci de la rigueur. J'ai aussi eu la chance de pouvoir assister à quelques réunions de travail concernant le projet VegDUD et y rencontrer de nombreux chercheurs. J'en retire de nombreux enseignements sur la conduite d'un projet de recherche ambitieux en bonne intelligence. Je salue toutes les personnes croisées à ces occasions.

Hola Noémie! C'est une belle rencontre qui m'attendait en début de thèse. J'ai passé de super moments avec toi. Ton naturel enjoué et ta simplicité ont été de grandes leçons de sagesse pour moi. En fait, l'agro-écologie c'est un peu la même chose que les arbres en ville, des arbres là où ne les attend pas! Je te souhaite une brillante carrière à l'INRA.

Évidemment, merci Cécile d'avoir posé les premiers jalons de la modélisation de systèmes de végétalisation innovants. Là où les toits de nos villes sont aussi plats que dans la version de TEB que je quitte il faudra maintenir l'effort de végétalisation. Merci d'avoir partagé ton expérience avec moi et facilité la transition entre nos travaux.

Un grand merci à tous ceux qui m'ont insufflé de la joie de vivre, de la force, de l'espoir, de l'envie, de l'amour, du bonheur à la pelle!

A la *team* TURBAU d'abord! Merci à Julien, Maxime, Quentin, Pierre-Antoine et Marine, j'ai passé d'excellents moments avec vous. Mon quotidien en est transformé! Julien, je me suis sentie rapidement intégrée grâce à ta présence au début de ma thèse. Comment résister au rituel des chouquettes à la pause? Comment râler devant Maxime si je dois marcher plus de 15 min pour rejoindre l'arrêt de bus (même avec une petite côte...)? Com-

ment ne pas penser à tous les tourbillons de milles échelles différentes qui nous entourent après les explications ultra-pointues mais très adroitement vulgarisées de Quentin sur la turbulence ? Comment ne pas avoir honte d'écouter de la musique ultra *mainstream* devant P-A ? Comment ne pas culpabiliser du CO2 que nous rejetons en expirant en présence de Marine ? Heureusement que les plantes sont là ;)

Aux belles Hélène et Carole. Vous avez été de fidèles amies durant ces années pleines de surprises. On est passées du rire aux larmes tant de fois, euh non l'inverse ! Merci pour tous ces moments de *brainstorming*, de rires, de virées Ramée-pique-nique, de visites à domicile et projets DIY qui m'ont aidé à m'évader de mes lignes de FORTRAN.

Thanks Sibó for your limitless kindness. I really have appreciated our talks and I have learned so MUCH thanks to you ! I hope to hear about you regularly. Keep in touch !

Merci Marie D. pour toutes les chouettes discussions et tes encouragements, même à distance ! Je te souhaite plein de bonnes choses !

Quelle surprise de croiser à nouveau le visage familier de Delphine, cette fois au CNRM ! J'ai été super contente de te revoir et j'espère que d'autres occasions se présenteront.

Je n'oublie pas l'agréable compagnie de mes co-bureaux successifs, Vincent et Renaud. La cohabitation s'est faite sans soucis ! Merci Renaud pour ton soutien et tes conseils avisés.

Merci Robert pour m'aider à y voir plus clair sur mon avenir professionnel.

Je garderai un très bon souvenir des moments partagés avec toutes les personnes du fameux couloir au 2ème étage, bâtiment Navier.

Je tiens à remercier tous les doctorants avec qui les pauses déjeuner étaient loin d'être monotones ! Adrien, Alexane, Benoit, Filipa, Gaël, Hélène F., Hélène P., Léo, Lisa, Marie M., Maxime M., Marine C., Mary, Nicolas, P-E-B, Pierre, Pierrick, Quentin, Simon, Sofia, Tiphaine, Xavier, Yann...

J'ai noué des amitiés sincères avec Noëlie et Natalia, rencontrées respectivement à Paris et à Nantes. On a pu partager à la fois nos avancements scientifiques et nos joies personnelles. Merci.

Merci à mes amis, éparpillés autour du monde, qui me pardonnent régulièrement de mes périodes de rush... Entre autres, Sonia, Emilie, Aurore, Louisiane, Blandine, Alina, Alice, Rémi, Rémy, Roxanne, Ingrid, Chloé, Laura, Pauline. Mention spéciale à Olivier, qui a cru à ma candidature pour cette thèse dès la première heure.

Enfin mais non des moindres, merci infiniment à ma famille et tous mes proches. Votre confiance et votre soutien ont été inestimables. Il y a une part de vous tous dans ce travail.

Je suis fier de toutes les épreuves personnelles traversées ensemble en si peu de temps. Un vrai cercle de *warriors*...

Certaines personnes peuvent infléchir à jamais le cours de votre existence. J'ai eu cette chance avec Martine Morel-Vidallet et sa fille Fabienne Vidallet.

Merci Maman, ton amour pour tous les êtres vivants, à commencer par les plantes, n'a pas été étranger à mes choix. Je partage ton souhait de voir s'épanouir partout des forêts comestibles.

Merci Artiom, ta bienveillance et ta patience en toutes circonstances sont inestimables. Le destin nous a offert durant cette thèse un cadeau du ciel qui porte magnifiquement son nom, Bogdan. Votre présence à mes côtés me confère l'énergie nécessaire pour surmonter toutes les épreuves et imaginer un monde meilleur pour demain.

À Bogdan

Table des matières

Introduction	1
1 État de l’art	5
1.1 Les villes sous influence d’un climat global et local	6
1.1.1 Le changement climatique à échelle globale	6
1.1.2 Un micro-climat à l’échelle de la ville	10
1.1.3 Conséquences sanitaires et résilience	13
1.2 Intérêts multiples de la végétalisation	16
1.2.1 Bénéfices socio-culturels et économiques	16
1.2.2 Bénéfices environnementaux	18
1.2.3 La végétation comme régulateur thermique en milieu urbain	20
1.2.3.1 Effet rafraîchissant de la végétation	20
1.2.3.2 Amélioration du confort thermique par la végétation	23
2 Modélisation de la végétation urbaine	25
2.1 Outils existants	26
2.1.1 Modèles à fine échelle	26
2.1.2 Modèles méso-échelle	28
2.2 TEB, un modèle de ville multi-couches intégrant la végétation urbaine	30
2.2.1 Version historique du modèle TEB	30
2.2.1.1 Concept général du modèle	31
2.2.1.2 Modélisation des processus physiques	32
2.2.2 Amélioration de TEB pour l’énergétique et le confort	34

2.2.2.1	Modèle d'énergétique du bâtiment	34
2.2.2.2	Indices de confort thermique	35
2.2.3	Modélisation de la végétation urbaine	37
2.2.3.1	Limites de la version historique	37
2.2.3.2	Végétalisation du canyon dans TEB	37
2.2.3.3	Résultats de modélisation	39
2.2.3.4	Besoins d'amélioration de la modélisation de la végétation	44
I	Bilan radiatif de la végétation urbaine	45
3	Vers un nouveau schéma de transfert thermo-radiatif incluant les arbres	47
3.1	Principes généraux de la paramétrisation des échanges en énergie solaire dans TEB	48
3.2	Inclusion d'une strate arborée dans le schéma de transfert radiatif	49
3.2.1	Rayonnement solaire direct reçu par chaque élément	52
3.2.2	Rayonnement solaire diffus reçu par chaque élément	53
3.2.3	Absorption du rayonnement solaire par chaque élément avant réflexion	54
3.2.4	Rayonnement solaire total absorbé par chaque élément	54
3.3	Prise en compte des arbres dans les interactions en Infra-Rouge	56
3.3.1	Température de surface du feuillage de la végétation haute	56
3.3.2	Rayonnement Infra-Rouge absorbé par chaque élément	56
4	Évaluation des propriétés d'interception des arbres avec le modèle à haute résolution spatiale SOLENE	61
4.1	Exercice de comparaison avec le modèle SOLENE	62
4.1.1	Présentation générale du modèle SOLENE	62

4.1.2	Configuration des expériences numériques	63
4.1.2.1	Modélisation du canyon dans SOLENE	63
4.1.2.2	Modélisation du canyon dans TEB	66
4.1.2.3	Méthode de comparaison	67
4.2	Résultats	68
4.2.1	Analyse générale et effets saisonniers	68
4.2.2	Cas des canyons urbains sans végétation	69
4.2.3	Cas des canyons urbains avec végétation	76
4.2.4	Avantages apportés par les développements TEB	81
4.2.4.1	Analyse du comportement du rayonnement solaire absorbé par surface de canyon	81
4.2.4.2	Analyse de l'albédo intégré du canyon	83

II Bilan énergétique et aérodynamique de la végétation urbaine **85**

5	Influence de l'environnement péri-urbain sur le bilan d'énergie d'une pelouse	87
5.1	Dispositif expérimental	88
5.2	Modélisation numérique avec ISBA-DIF	91
5.2.1	Forçages atmosphériques	91
5.2.2	Caractéristiques du sol	92
5.2.3	Propriétés de la végétation	93
5.2.4	Paramétrisation du modèle	96
5.2.5	Initialisation des variables pronostiques	96
5.2.6	Résultats obtenus avec la configuration par défaut	96

5.3	Tests de sensibilité sur la configuration du modèle	101
5.3.1	Effet de la texture du sol	101
5.3.2	Effet du profil racinaire	105
5.3.3	Effet de la longueur de rugosité aérodynamique	107
5.3.4	Effet de l'indice foliaire	110
5.3.5	Effet de l'option TEB-SBL	112
5.3.6	Conclusion intermédiaire	113
5.4	Configuration optimisée	113
5.4.1	Effet sur la température et le contenu en eau du sol	113
5.4.2	Impact sur le rayonnement net	115
5.5	Conclusion	117
6	Bilan d'énergie et aérodynamique	119
6.1	Bilan d'énergie de surface des éléments du canyon	120
6.1.1	Calcul des flux turbulents pour les surfaces artificielles	120
6.1.2	Calcul des flux turbulents pour les couverts naturels	122
6.1.3	Modification du bilan d'énergie liée à la canopée arborée	123
6.1.4	Désagrégation des flux turbulents associés à la végétation urbaine	124
6.2	Modèle de couche limite de surface au sein du canyon	125
6.2.1	Principe du modèle TEB-SBL	125
6.2.2	Distribution des flux de chaleur et d'humidité des couverts naturels	126
6.2.3	Effets aérodynamiques de la canopée arborée	128
7	Évaluation du microclimat d'un canyon végétalisé réel sous climat chaud et aride	129
7.1	Données expérimentales	130

7.2	Expérience numérique	135
7.3	Évaluation des variables microclimatiques	138
7.4	Évaluation de la transpiration des arbres	140
7.5	Conditions de confort thermique dans le canyon	142
Conclusions et perspectives		145
7.6	Conclusions	145
7.7	Perspectives	148
III Annexes liées aux développements de TEB dans le cadre du travail de thèse		151
A Facteurs de vue		153
B Transmissivité moyenne au rayonnement pour la canopée arborée dans le canyon		155
C Absorption totale du rayonnement solaire par la résolution de réflexions infinies		157
IV Annexes liées aux développements de TEB historiques ou présents en dehors du travail de thèse		163
D Équations d'évolution de la température des surfaces artificielles		165
E Diagnostic du confort thermique dans TEB		167
E.1	Principe général de l'UTCI	167
E.2	Implémentation de l'UTCI dans TEB	168
E.3	Prise en compte de la canopée arborée	170

F Publication scientifique dans revue à comité de lecture de rang A parue durant la thèse	171
Bibliographie	211

Table des figures

1.1	Évaluation des tendances de réchauffement sur la période 1951-2010 pour l'ensemble des gaz à effet de serre, les autres forçages anthropiques (incluant l'effet de refroidissement des aérosols et les changements d'occupation du sol), les forçages anthropiques combinés, le forçage naturel et la variabilité interne naturelle du climat (apparaissant spontanément même en absence de forçage). La figure illustre l'intensité et les intervalles de confiance associés pour chacun des forçages. Le changement de température de surface observé est en noir, avec l'incertitude liée à la mesure. Source : EDENHOFER et al. (2014)	7
1.2	Séries temporelles des valeurs globales (moyennées sur les continents seulement) des indices suivants : occurrence des événements de précipitations > 10mm, 5 jours d'affilés de précipitations, intensité des événements de précipitations (à gauche) et occurrence des jours secs, des nuits chaudes, des canicules (à droite). Trois scénarios d'émissions issus du rapport du GIEC ont été testés pour le XXI ^{ème} siècle. Les résultats ont été standardisés pour chacun des modèles et lissés sur 10 ans. La variation annuelle est montrée en arrière-plan. Source : TEBALDI et al. (2006)	8
1.3	Principales voies par lesquelles le changement climatique affecte la santé des populations. L'atténuation se réfère à la vraie prévention primaire (réduction des gaz à effet de serre). L'adaptation comprend les interventions ayant pour but de minorer les conséquences délétères sur la santé. Source : MCMICHAEL, WOODRUFF et HALES (2006)	9
1.4	Profil théorique de la température de l'air près de la surface, le long d'une coupe transversale d'une zone urbanisée (depuis les zones rurales jusqu'au centre-ville). Source : dans Grégoire PIGEON, Aude LEMONSU et al. (2008), adapté de T. OKE (1987).	11
1.5	Évolution journalière de la température de l'air mesurée dans le centre-ville de Toulouse et dans une zone péri-urbaine lors de la campagne de terrain CAPITOU. Source : Grégoire PIGEON, Aude LEMONSU et al. (2008) . . .	12
1.6	Projection de la population urbaine (à gauche) et de l'étalement des zones urbaines selon un scénario moyen (à droite) pour différentes régions du globe à l'horizon 2050. Source : ANGEL et al. (2011)	14

1.7	Principaux services écosystémiques fournis par les écosystèmes urbains à l'environnement intérieur. Les lignes continues et en pointillés correspondent aux effets directs et indirects, respectivement. Source : Y. WANG et al. (2014)	17
1.8	Bénéfices socio-économiques des infrastructures vertes en ville. Source : Green Infrastructure Audit - Best Practice Guide, https://www.london.gov.uk/sites/default/files/10.pdf	18
1.9	Diagramme des services écosystémiques. Source : metrovancouver.org	19
1.10	Gauche : comparaison de la température de l'air mesurée dans une cour semi-fermée aménagée selon trois configurations différentes : herbe, herbe et toile tendue au sommet des bâtiments, herbe et arbres. Droite : différence de température entre ces configuration et le cas de référence (sol nu). Source : SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL (2009)	21
1.11	Comparaison des niveaux de sensation thermique (4=confortable, 5=chaud, 6=très chaud, 7=extrêmement chaud) évaluées dans une cour semi-fermée aménagée selon différents aménagements : sol nu, herbe, sol nu et arbres, herbe et arbres. Source : SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL (2011)	24
2.1	Vue d'une scène urbaine composée de deux bâtiments à toit plat identiques se faisant face, d'une route et d'une rangée d'arbres centrée dans la rue, dont le houppier couvre 90 % de la largeur de la rue (représenté par un parallélépipède). Cette maquette digitale est visualisée grâce à l'outil ParaView. Elle a été produite dans le cadre de l'exercice de comparaison des simulations du bilan en énergie solaire absorbée entre SOLENE et TEB présenté dans le Chapitre 4 de ce manuscrit.	27
2.2	Interactions indirectes (à travers le modèle atmosphérique) entre les surfaces imperméables et les couverts naturels avec l'approche en mosaïque ou tuiles (a) comparé à des interactions directes bâtiments / végétation avec une approche intégrée de la modélisation de la végétation urbaine (b). UCM : modèle de climat urbain. SVAT : schéma de transfert sol - végétation - atmosphère. Source : KRAYENHOFF, CHRISTEN et al. (2014)	29
2.3	Représentation des termes des bilans radiatif, thermique et énergétique au sein du schéma générique de rue canyon dans TEB et interactions avec un modèle atmosphérique dans le cas d'un couplage. Source : Météo France	32

2.4	Schéma du couplage entre la surface (TEB) et l'atmosphère sans (à gauche) ou avec (à droite) un modèle multi-couche (TEB-SBL). Dans le dernier cas, une force de traînée est appliquée sur le vent. Le profil de température dans le modèle multi-couches est influencé par les températures des surfaces au sol (route et jardins), des murs et du toit. Le profil d'humidité est influencé par les surfaces au sol (route et jardins) et le toit. Source : MASSON et al. (2013)	33
2.5	Illustration du schéma conceptuel de TEB et quelques unes de ces options. Source : www.urban-modelling.com	34
2.6	Les trois environnements simulés dans TEB lors du calcul de l'UTCI. Source : PIGEON (2011)	36
2.7	Échelle de niveaux de stress thermique basée sur l'UTCI.	36
2.8	Schéma illustrant les différences conceptuelles et géométriques entre l'approche intégrée TEB-Veg à gauche et l'approche en mosaïque TEB-ISBA à droite. Source : D'après A. LEMONSU, V. MASSON et al., 2012	38
2.9	Architecture de toiture végétalisée pour TEB-GREENROOF et processus physique associés.	39
2.10	Comparaison des simulations TEB-Veg et TEB-ISBA (courbes noires) avec les observations collectées à l'intérieur de la cour instrumentée, aménagée avec de la pelouse (courbes grises). Les forçages météorologiques (température et humidité de l'air, vitesse du vent) ont été enregistrés à 10 m au-dessus du sol. Les mesures de température de surface des murs ont été réalisées par façade, sur le mur exposé à l'est et celui à l'ouest. Source : A. LEMONSU, V. MASSON et al. (2012)	40
2.11	Variations de température minimale nocturne dans les rues à 2 m du sol obtenues par la végétalisation de 75 % des surfaces disponibles au sol, avec de la végétation basse ou de la végétation mixte arborée. Source : DE MUNCK, C. AND LEMONSU, A. (2014)	42
2.12	Consommation d'eau et d'énergie pendant les 6 jours de canicule selon les scénarios de végétalisation. Source : DE MUNCK, C. AND LEMONSU, A. (2014)	43
3.1	Représentation schématique d'une rue canyon dans TEB, avec ou sans arbres.	51

4.1	Représentation schématique des différents rapports d’aspect des canyons testés dans TEB. Les blocs verts représentent les zones potentiellement occupées par de la végétation arborée, selon les configurations détaillées dans la Figure 4.2.	64
4.2	Représentation schématique des différents agencements de végétation au sein des canyons testés.	65
4.3	Comparaison des simulations TEB et SOLENE pour le cycle journalier de rayonnement solaire direct (haut) et diffus (milieu) en $W m^{-2}$ reçus par les facettes urbaines avant les réflexions multiples, et de rayonnement solaire total absorbé par celles-ci après inter-réflexions (bas) en $W m^{-2}$ pour des canyons dépourvus de végétation. Les résultats sont présentés ici seulement pour le rapport d’aspect de 1 et pour les quatre orientations de rue lors d’un jour d’été.	70
4.4	Diagrammes de dispersion comparant les simulations TEB et SOLENE pour des flux horaires de rayonnement solaire direct (haut) et diffus (milieu) en $W m^{-2}$ reçus par les facettes urbaines avant les réflexions multiples, et le flux de rayonnement solaire total absorbé par celles-ci après inter-réflexions (bas) en $W m^{-2}$ pour des canyons sans végétation. Les diagrammes rassemblent les quatre saisons, les trois rapports d’aspect et les quatre orientations de rue.	72
4.5	Comparaison des simulations TEB et SOLENE pour le cycle journalier de rayonnement solaire direct (haut), diffus (milieu) en $W m^{-2}$ reçus par les facettes urbaines avant les réflexions multiples, et de rayonnement solaire total absorbé par celles-ci après inter-réflexions (bas) en $W m^{-2}$ pour des canyons pourvus d’arbres. Les résultats sont présentés ici seulement pour le rapport d’aspect de 1 et pour les quatre orientations de rue lors d’un jour d’été.	79
4.6	Diagrammes de dispersion comparant les simulations TEB et SOLENE pour des flux horaires de rayonnement solaire direct (haut) et diffus (milieu) en $W m^{-2}$ reçus par les facettes urbaines avant les réflexions multiples, et le flux de rayonnement solaire total absorbé par celles-ci avant inter-réflexions (bas) en $W m^{-2}$ pour des canyons avec arbres. Les diagrammes rassemblent les quatre saisons, les trois rapports d’aspect et les quatre orientations de rue.	80

4.7	Comparaison des flux de rayonnement solaire total absorbés ($W m^{-2}$) par la route, les murs et les arbres simulés par TEB dans sa version de référence et avec la nouvelle version incluant une canopée arborée. Le cas d'étude est ici la configuration A pour un canyon orienté Nord-Sud avec un rapport d'aspect de 1 durant un jour estival. Les flux sont exprimés soit en $W m^{-2}$ de la surface considérée soit en $W m^{-2}$ de canyon.	82
4.8	Comparaison des albédos intégrés à l'échelle du canyon calculés au midi solaire à partir des simulations de référence TEB et de la nouvelle version incluant une canopée arborée. Les résultats sont présentés par rapport d'aspect pour tous les agencements de végétation combinés avec des canyons orientés Nord-Sud durant une journée d'été. Les astérisques représentent les albédos intégrés pour les canyons sans végétation.	84
5.1	Photo du quartier Grand Clos à Nantes. Source : http://www.sandrinemarc.com/le-grand-clos	89
5.2	Photo du dispositif instrumental dans un jardin privé du quartier «Grand Clos», Nantes. Source : Archives de la campagne FluxSAP 2012	90
5.3	Série temporelle des conditions de forçage météorologique pour les simulations ISBA-DIF : de haut en bas, les rayonnements solaire (direct et diffus) et IR incidents, la pression atmosphérique à 2 m, la température de l'air à 2 m, l'humidité spécifique à 2 m, et la vitesse du vent à 2 m. Les taux de précipitation sont indiqués en bleu sur l'axe supérieur.	92
5.4	Mesures de rayonnement remontant et incident (haut) et évaluation de l'albédo de la pelouse sur la base du rapport entre le rayonnement solaire montant et le rayonnement solaire incident (bas).	94
5.5	Profil vertical de la fraction racinaire pour les expériences DEF et RO1. . .	95
5.6	Comparaison entre les sorties modèle et les observations pour la configuration par défaut de ISBA-DIF.	99
5.7	Effet de la définition de la texture du sol sur les performances du modèle. Voir Tableau 5.4 pour la description des tests de sensibilité (DEF, TX1 et TX2).	103
5.8	Effet de la définition du profil racinaire sur les performances du modèle. Voir Tableau 5.4 pour la description des tests de sensibilité (DEF et RO1). . . .	106

5.9	Effet de la définition de la longueur de rugosité aérodynamique sur les performances du modèle. Voir Tableau 5.4 pour la description des tests de sensibilité (DEF, Z01 et Z02).	109
5.10	Effet de la définition de l'indice de surface foliaire (LAI) sur les performances du modèle. Voir Tableau 5.4 pour la description des tests de sensibilité (DEF, LAI1 et LAI2).	111
5.11	Effet de l'activation de l'option TEB-SBL sur les performances du modèle. Voir Tableau 5.4 pour la description des tests de sensibilité (DEF et SBL).	112
5.12	Effet du profil vertical de texture du sol combiné avec une longueur de rugosité aérodynamique de 0.40 et une initialisation du contenu en eau plus réaliste sur les performances du modèle. Voir Tableau 5.4 pour la description des tests de sensibilité (DEF et TX2-Z02).	114
5.13	Comparaison du contenu en eau du sol à 10 cm de profondeur simulé selon les tests de sensibilité de texture du sol et de longueur de rugosité aérodynamique séparément et combinés.	115
5.14	Comparaison entre le rayonnement net mesuré au-dessus de la pelouse et le rayonnement net simulé par ISBA-DIF pour les expériences DEF et TX2-Z02.	116
6.1	Représentation schématique de la résolution de la couche limite de surface lorsque l'option SBL est activée. (a) illustre l'exemple de l'impact des surfaces urbaines sur le profil de température dans la canopée urbaine. Un schéma similaire est utilisé pour le gradient d'humidité spécifique. En absence d'arbres (b), les flux turbulents associés à la végétation urbaine affectent le niveau le plus bas du schéma SBL. La nouvelle paramétrisation incluant les arbres permet d'allouer à hauteur réaliste les contributions en flux turbulents de la végétation haute (c).	121
7.1	Vue aérienne du site expérimental. Source : communication personnelle (E. Erell)	131
7.2	Photos des cours instrumentées comprenant un sol pavé et un filet (à droite) et de la pelouse et des arbres (à gauche). Source : SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL (2009)	132

7.3	Plan montrant la localisation des points de mesure dans les deux cours instrumentées, avec les arbres dans la cour ouest (à gauche) et avec le filet d'ombrage dans la cour est (à droite). Selon les scénarios, le sol est couvert partiellement de pelouse ou de sol nu. Leur emplacement est indiqué par la zone grisée sur le schéma de gauche pour la pelouse et sur le schéma de droite pour le sol nu, le reste de la surface au sol étant pavé. Source : SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL (2009)	132
7.4	Photographies dans le visible (en haut) et dans l'IR (en bas) de la cour semi-fermée du site expérimental Sde-Boqer aménagée avec de l'herbe et des arbres à 12:20 LST le 17 juillet 2007. Source : SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL (2011)	134
7.5	Conditions météorologiques observées à la station de référence durant les périodes expérimentales.	135
7.6	Comparaison des résultats obtenus entre TEB Ref (courbes rouges) et la nouvelle version comprenant l'implémentation des arbres ou TEB Urbtree (courbes vertes) avec les observations issues du site expérimental à Sde Boqer dans la cour agencée selon le mode Arbres-Sol nu. Les variables météorologiques (température et humidité spécifique de l'air, vitesse du vent) correspondent aux forçages à 10 m au-dessus du sol. Les températures de surface du sol sont séparées entre la face exposée à l'est et celle exposée à l'ouest. La température du feuillage des arbres mesurée est comparée à la température de la végétation placée au sol dans l'ancienne version et à la température de la canopée arborée dans la version implémentée. La température de l'air simulée au milieu du canyon est donnée pour indication. . .	138
7.7	Cycle diurne du flux de chaleur latente en $W m^{-2}$ observé (courbe noire), simulé par la version TEB-Veg (courbe rouge) et la version implémentée (courbe verte).	141
7.8	Comparaison des UTCI calculés pour un piéton exposé au soleil (à gauche) ou un piéton à l'ombre (à droite) et de la température de l'air à 2 m dans le canyon.	142
E.1	Principe du calcul de l'UTCI. Source : Bröde et al. (2013)	168

Liste des tableaux

2.1	Principaux paramètres descriptifs du canyon urbain dans le modèle TEB. Les paramètres suivis par un astérisque sont les données d'entrée prescrites par l'utilisateur, les autres sont calculés par le modèle, découlant des paramètres d'entrée.	31
2.2	Paramètres descriptifs complémentaires, ajoutés dans TEB pour la prise en compte de la végétation dans le canyon.	38
4.1	Liste des paramètres d'entrée pour l'ensemble des simulations exécutées avec TEB.	65
4.2	Résultats statistiques pour le flux de rayonnement solaire absorbé par surface selon les saisons.	69
4.3	Résultats statistiques pour le rayonnement solaire direct reçu par les surfaces avant les réflexions multiples pour un jour estival. NVEG désigne le cas référence de TEB sans végétation.	73
4.4	Résultats statistiques pour le rayonnement solaire diffus reçu par les surfaces avant les réflexions multiples pour un jour estival. NVEG désigne le cas référence de TEB sans végétation.	74
4.5	Résultats statistiques pour le rayonnement solaire total absorbé par les surfaces après les réflexions multiples pour un jour estival. NVEG désigne le cas référence de TEB sans végétation.	75
5.1	Paramètres de ISBA-DIF pour la configuration par défaut.	93
5.2	Scores statistiques pour la température du sol (RMSE et Biais en °C) calculés pour toutes les expériences de sensibilité entre les résultats ISBA-DIF et les observations <i>in situ</i>	100
5.3	Scores statistiques pour les contenus en eau du sol (RMSE en $m^3 m^{-3}$, pBiais en %) calculés pour toutes les expériences de sensibilité entre les résultats ISBA-DIF et les observations <i>in situ</i>	100
5.4	Description des expériences de sensibilité.	102

5.5	Caractéristiques hydrologiques de ISBA selon la texture du sol pour les expériences DEF, TX1, et TX2. Pour les autres expériences, les caractéristiques du sol sont similaires au cas par défaut (DEF).	102
5.6	Scores statistiques (RMSE et Biais en $W m^{-2}$) pour le rayonnement net calculé pour toutes les expériences de sensibilité.	116
6.1	Règles de désagrégation appliquées aux flux turbulents.	125
7.1	Paramètres d'entrée de TEB relatifs aux caractéristiques radiatives et thermiques des surfaces imperméables. Source : A. LEMONSU, V. MASSON et al., 2012 ; SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL, 2009, 2011.	136
7.2	Paramètres d'entrée de TEB relatifs à la typo-morphologie du site et aux propriétés de la végétation, selon les deux versions du modèle TEB-Veg et TEB-Urbtree.	137
7.3	Résultats statistiques comparant les performances en termes de RMSE et de biais des deux versions de TEB testées : la version référence de TEB-Veg et la nouvelle version avec implémentation d'une canopée arborée explicite.	139
E.1	Variables microclimatiques disponibles dans TEB pour le calcul de l'UTCI.	169

Introduction

Les effets du changement climatique au cours des dernières décennies sur la température de surface globale ont été quantifiés par le GIEC (EDENHOFER et al., 2014). L'amplitude de l'augmentation observée ne peut s'expliquer seule par la variabilité du système climatique ou du forçage naturel. Il est jugé extrêmement probable que les émissions anthropiques de gaz à effet de serre aient altéré la composition de l'atmosphère au point de provoquer des bouleversements climatiques à l'échelle globale. Or, le métabolisme des villes génère plus de 75 % des émissions anthropiques carbonées, du fait qu'elles soient des lieux de consommation intense d'énergie fossile et d'électricité, de matériaux et de production de substances synthétiques (BROWN, 2001 ; SVIREJEVA-HOPKINS, SCHELLNHUBER et POMAZ, 2004).

D'après des simulations numériques de climat futur, on anticipe une augmentation drastique des occurrences d'événements météorologiques extrêmes tels que les épisodes intenses de précipitations et de fortes chaleurs, causés par le dérèglement climatique (TEBALDI et al., 2006). La canicule de 2003 est un exemple des conséquences dévastatrices des vagues de chaleur. Plus de 70 000 décès excédentaires ont été enregistrés sur 12 pays européens dont 15 000 en France (ROBINE et al., 2007). Les vagues de chaleur ont été identifiées comme la principale cause de mortalité relative aux aléas climatiques en Europe (SCHAUSER et al., 2010).

À ce réchauffement global s'ajoute une signature thermique des villes, caractérisée par une anomalie positive de température entre les zones urbanisées et leur périphérie (Tim R OKE, 1982 ; T. OKE, 1987). En effet, le tissu urbain est une matrice composée de bâtiments et de routes à matériaux imperméables, souvent sombres, qui captent l'énergie solaire et IR provenant du ciel durant la journée et la stocke. Les parois artificielles limitent le refroidissement de l'air la nuit en relâchant de la chaleur et émettant du rayonnement IR. La forme urbaine tri-dimensionnelle agit également comme un piège pour l'énergie reçue et échangée dans la rue. Ce réchauffement de l'air en milieu urbain, caractéristique du micro-climat des villes, est désigné comme le phénomène d'îlot de chaleur urbain.

Les citoyens sont donc plus vulnérables au changement climatique, dans le sens où il peut être exacerbé par l'îlot de chaleur urbain (LEMONSU et al., 2015 ; Aude LEMONSU, KOUNKOU-ARNAUD et al., 2013). Accroître la résilience des villes, notamment du point de vue sanitaire, est donc un enjeu décisif pour la santé des populations à l'avenir. L'aménagement urbain doit proposer des réponses à la fois d'atténuation et d'adaptation à ces deux perturbations thermiques. La ventilation à l'intérieur des rues est un des facteurs modulant l'excès de température en ville. Elle est fonction de la vitesse du vent et de sa direction dominante par rapport aux bâtiments. Les matériaux hautement réfléchissants permettent de diminuer la température de surface des éléments urbains. Néanmoins, ils engendrent des

éblouissements inconfortables et dangereux et détériorent le confort thermique.

La végétalisation des villes, elle, est présentée comme une stratégie d'adaptation au changement climatique «sans regret» (DE MUNCK, C. AND LEMONSU, A., 2014; MILLS, WILSON et JOHANSSON, 1991) aux bénéfices multiples pour l'environnement et la société (M. MUSY, 2014). Lorsque la forme urbaine et l'orientation des rues ne peut être changée, c'est la stratégie de refroidissement la plus efficace. De plus, elle apporte de nombreux bénéfices sociaux-économiques, en créant de la valeur patrimoniale par exemple, et des espaces de cohésion sociale, d'activités sportives et de loisir. L'ombrage offert par les arbres s'est révélé efficace pour réduire la consommation d'énergie destinée à la climatisation en été. Le choix d'essences à feuilles caduques (qui tombent en automne) évite une demande en chauffage supplémentaire en hiver. La végétation procure également une régulation du climat (production d'O₂ et stockage de CO₂), de la qualité de l'air (absorption et rétention des polluants), de l'eau (phytoremédiation) et une diminution de l'amplitude thermique observée sur un cycle journalier, de sorte à prévenir une longue exposition à un stress thermique très élevé en milieu de journée. L'évapotranspiration est un phénomène unique de dissipation de la chaleur, qui consomme 99 % de l'énergie solaire absorbée par le végétal et humidifie l'air. Rétablir une fraction suffisante de couverts naturels en ville est une réponse appropriée pour lutter efficacement contre les effets délétères de l'îlot de chaleur urbain. La nature en ville permet de soutenir non seulement l'effort d'adaptation au changement climatique en améliorant les conditions de confort thermique pour les citoyens, l'atténuation des rejets anthropiques de chaleur et de gaz à effet de serre par économies d'énergie, et l'attractivité des pôles urbanisés pour des raisons sociologiques diverses, entre autres en connexion avec l'image de «viabilité» du cadre de vie.

La fraction de végétation présente dans les villes contemporaines n'est pas négligeable. Elle prend des formes diverses telles que les arbres d'alignement, les parcs publics, les jardins privés mais aussi les enveloppes végétales couvrant les bâtiments (ANQUETIL, 2010). Elle influence directement le climat urbain par ses propriétés radiatives, thermiques, hydriques et aérauliques ; ceci de l'échelle de la rue à la ville entière. Peu de modèles de climat urbain prennent aujourd'hui en compte la végétation (C. GRIMMOND, BLACKETT et al., 2010), et en particulier les arbres, en milieu urbain alors qu'ils modifient les bilans radiatifs et énergétiques en interceptant et absorbant une partie du rayonnement solaire incident, créent de l'ombre, dissipent de l'énergie et augmentent l'humidité de l'air par évapotranspiration et modifient également les écoulements des masses d'air dans le canyon.

Ces dernières années, le modèle de canopée urbaine TEB (V. MASSON, 2000), développé à Météo France initialement pour représenter les effets urbains dans les modèles météorologiques de méso-échelle, a été amélioré de façon à représenter explicitement la végétation en milieu urbain (A. LEMONSU, V. MASSON et al., 2012; Cécile de MUNCK, 2013). Le modèle TEB intègre aujourd'hui des paramétrisations dédiées à la végétation basse dans les canyons urbains et aux toitures végétalisées, et peut représenter les interactions de petite

échelle entre les surfaces minéralisées, la végétation et l’atmosphère. Ces développements ont notamment rendu possible l’évaluation de stratégies d’adaptation des villes basées sur la végétalisation (DANIEL, LEMONSU et VIGUIÉ, 2016 ; KOUNKOU-ARNAUD et al., 2014 ; C. de MUNCK et al., 2017), mais ont montré certaines limites puisque la végétation de pleine terre est uniquement traitée au sol.

Dans le cadre de ma thèse, une paramétrisation spécifique a été mise au point pour modéliser les aspects radiatifs, thermiques, énergétiques et aérauliques liés à la présence d’arbres de rue en interaction avec l’espace urbain et les bâtiments. Une canopée arborée explicite a été intégrée au-dessus de la chaussée et des jardins dans l’approche «canyon urbain» appliquée dans TEB pour modéliser l’environnement urbain et l’ensemble des processus physiques associés. Le modèle d’Interaction Sol–Biosphère–Atmosphère (ISBA, NOILHAN et PLANTON, 1989) a été utilisé pour représenter toutes les couvertures végétales (strates haute et basse de la végétation) et modéliser les processus physiologiques et énergétiques au sein de modèle TEB en interaction avec les surfaces bâties environnantes.

Suite à la présente introduction, un premier chapitre d’**état de l’art** dépeint le contexte climatique dans lequel s’inscrit la volonté de conserver une place prépondérante à la végétation en ville malgré les fortes contraintes d’urbanisation et de densification. La végétalisation constitue une stratégie «sans regret» efficace pour lutter contre le réchauffement climatique car elle offre des bénéfices sociaux-économiques et environnementaux qui dépassent la régulation du micro-climat en ville. S’en suit une brève revue des outils de modélisation de la végétation urbaine existants pour différentes échelles dans le **Chapitre 2**.

Les résultats de la thèse sont exposés par la suite dans deux grandes parties. La première grande partie présente les travaux relatifs au bilan radiatif de la végétation urbaine. Elle s’organise en deux chapitres qui décrivent successivement les étapes de développements et d’évaluation liées à l’intégration d’une canopée arborée explicite dans le canyon urbain. Le **Chapitre 3** expose les modalités de l’intégration d’une canopée arborée dans les calculs radiatifs afin de prendre en compte les effets d’ombrage et d’atténuation du rayonnement solaire et IR liés à la présence de cette canopée, et les interactions IR entre l’ensemble des éléments urbains du canyon (routes, murs, sols naturels, arbres). Une évaluation des évolutions du bilan radiatif a été réalisée dans le **Chapitre 4** grâce à une comparaison avec le modèle architectural d’enseillement à haute résolution SOLENE, sur la base d’un grand jeu de simulations de canyons urbains idéalisés et pour différentes configurations d’arbres de rue.

La deuxième grande partie du manuscrit aborde les développements concernant les effets des arbres sur le bilan d’énergie des surfaces du canyon et l’écoulements des masses d’air dans le canyon. Elle est introduite dans le **Chapitre 5** par une étude de l’influence de l’environnement péri-urbain sur le bilan d’énergie d’une pelouse. Il s’agit là de tester la

capacité du modèle de végétation ISBA à simuler les échanges thermiques et hydrologiques dans le sol et les échanges d'énergie en surface dans un environnement urbanisé. Grâce à des données expérimentales recueillies dans un jardin privatif à Nantes, une étude de sensibilité du modèle a été menée, sur la définition des paramètres d'entrée. Le **Chapitre 6** présente l'impact des arbres sur le bilan d'énergie des surfaces du canyon. Les flux d'énergie calculés par le modèle ISBA selon l'approche «big leaf» ont ensuite été redistribués sur la verticale de façon à altérer le microclimat à hauteur réaliste dans le canyon, selon la position du houppier (et non juste au sol comme c'était le cas dans la version initiale). De la même façon, un effet de traînée lié à la présence de la canopée arborée a été intégré dans les équations de quantité de mouvement et d'énergie cinétique turbulente résolues par la paramétrisation de couche limite de surface de TEB pour le volume d'air au sein du canyon. Dans le **Chapitre 7**, une confrontation à un cas réel de cette nouvelle version du modèle a finalement été conduite sur un site expérimental, à savoir une cour semi-fermée aménagée avec des arbres et où ont été collectées différentes variables microclimatiques : température et humidité de l'air et vitesse du vent. Les températures de surface des murs et du feuillage des arbres mesurées ont également été comparées aux simulations, ainsi que le flux d'évapotranspiration. L'étude a pu enfin donner lieu à une évaluation des conditions de confort thermique sous la canopée arborée dans cette configuration d'aménagement.

Ce manuscrit s'achève par une conclusion générale sur les principaux résultats obtenus durant ce travail de thèse. Quelques voies restant à explorer seront évoquées en perspectives.

État de l'art

Sommaire

1.1	Les villes sous influence d'un climat global et local	6
1.1.1	Le changement climatique à échelle globale	6
1.1.2	Un micro-climat à l'échelle de la ville	10
1.1.3	Conséquences sanitaires et résilience	13
1.2	Intérêts multiples de la végétalisation	16
1.2.1	Bénéfices socio-culturels et économiques	16
1.2.2	Bénéfices environnementaux	18
1.2.3	La végétation comme régulateur thermique en milieu urbain	20

1.1 Les villes sous influence d'un climat global et local

1.1.1 Le changement climatique à échelle globale

Les activités humaines modifient aujourd'hui de manière significative le système « Terre » par le biais de changements importants dans l'occupation des sols, principalement par l'agriculture et l'urbanisation (FOLEY et al., 2005 ; KALNAY et CAI, 2003). Dans le même temps, elles sont également responsables de l'altération de la composition chimique de l'atmosphère, de l'eau et du sol par des actions polluantes et influencent les cycles biogéochimiques globaux (M. J. MOLINA et L. T. MOLINA, 2004 ; PATAKI et al., 2006 ; VITOUSEK et al., 1997). L'empreinte de l'Homme sur l'environnement est telle que des scientifiques proposent de nommer à l'aide du néologisme « Anthropocène » une nouvelle ère géologique qui débiterait à l'époque post-industrielle et se poursuivrait de nos jours (STEFFEN et al., 2011).

D'après le dernier rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (EDENHOFER et al., 2014), le réchauffement de notre système climatique est univoque et a des conséquences mesurables à échelle globale sur les sociétés humaines et les systèmes naturels. Il démontre que, parmi les causes potentielles expliquant le changement de température de surface observé durant la période 1951–2010, l'amplitude de la combinaison des forçages anthropiques supplante celle du forçage naturel ; elle expliquerait donc une part substantielle du réchauffement observé (Figure 1.1).

Les émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique sont considérées comme la cause dominante du réchauffement accéléré récent. Or, elles sont directement indexées sur les croissances démographique et économique mondiales. Le métabolisme des villes génère plus de 75 % des émissions anthropiques carbonées, du fait qu'elles soient des lieux de consommation intense d'énergie fossile et d'électricité, de matériaux, et des lieux de production de substances synthétiques, toxiques (BROWN, 2001 ; SVIREJEVA-HOPKINS, SCHELLNHUBER et POMAZ, 2004). Toutes les projections climatiques envisagées sont associées à une prolongation de l'augmentation de la température moyenne de surface au cours du XXI^{ème} siècle. Conjointement, l'accroissement de la fréquence, l'intensité et la durée des événements extrêmes de forte chaleur ou de précipitations est attendu (MEEHL et TEBALDI, 2004 ; TEBALDI et al., 2006, Figure 1.2).

Le changement climatique s'impose à la population mondiale, en ville et à la campagne. Il est à l'origine de diverses menaces directes ou indirectes pour la santé humaine, illustrées Figure 1.3, parmi lesquelles on peut citer : stress thermique chronique et/ou extrême, inondations, élévation du niveau de la mer, prolifération microbienne dans l'eau et les aliments, prolifération et changements de la répartition géographique de vecteurs de pathogène (*e.g.* moustiques), déclin de la productivité agricole et des ressources halieutiques (MCMICHAEL,

WOODRUFF et HALES, 2006).

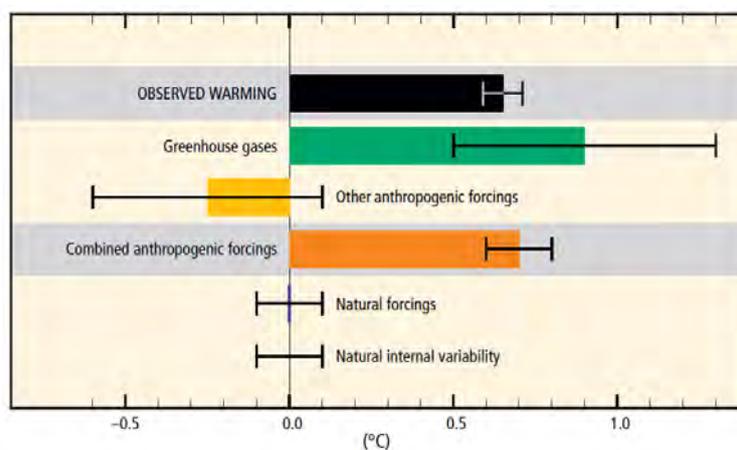


FIGURE 1.1 – Évaluation des tendances de réchauffement sur la période 1951-2010 pour l'ensemble des gaz à effet de serre, les autres forçages anthropiques (incluant l'effet de refroidissement des aérosols et les changements d'occupation du sol), les forçages anthropiques combinés, le forçage naturel et la variabilité interne naturelle du climat (apparaissant spontanément même en absence de forçage). La figure illustre l'intensité et les intervalles de confiance associés pour chacun des forçages. Le changement de température de surface observé est en noir, avec l'incertitude liée à la mesure. Source : EDENHOFER et al. (2014)

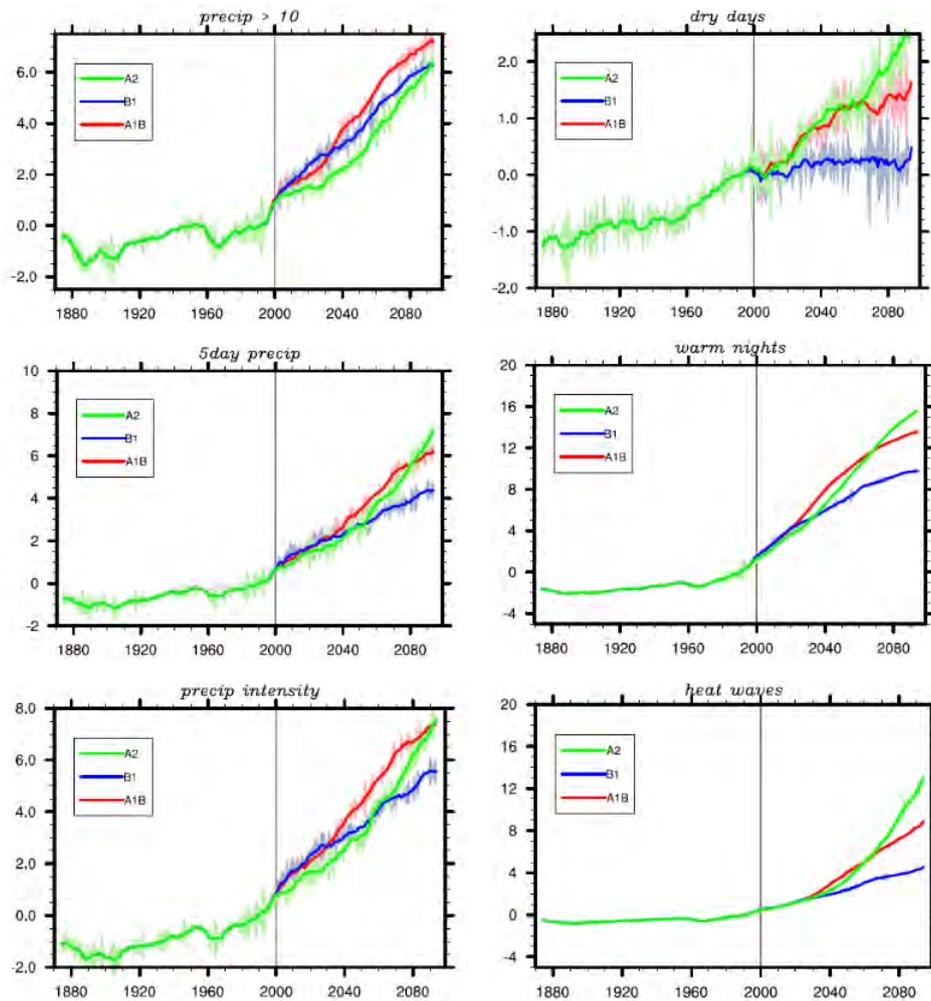


FIGURE 1.2 – Séries temporelles des valeurs globales (moyennées sur les continents seulement) des indices suivants : occurrence des événements de précipitations > 10mm, 5 jours d'affilés de précipitations, intensité des événements de précipitations (à gauche) et occurrence des jours secs, des nuits chaudes, des canicules (à droite). Trois scénarios d'émissions issus du rapport du GIEC ont été testés pour le XXI^{ème} siècle. Les résultats ont été standardisés pour chacun des modèles et lissés sur 10 ans. La variation annuelle est montrée en arrière-plan. Source : TEBALDI et al. (2006)

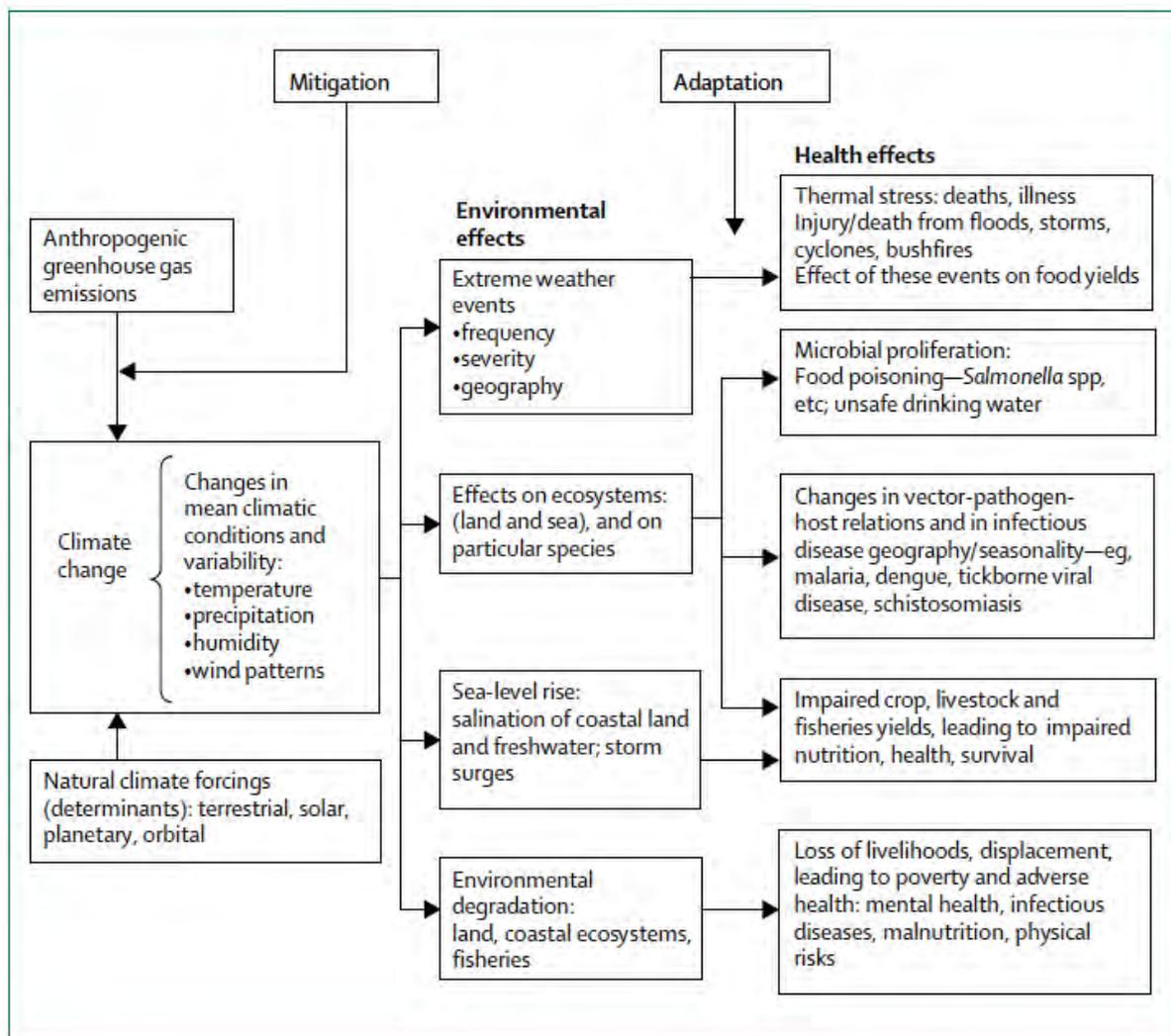


FIGURE 1.3 – Principales voies par lesquelles le changement climatique affecte la santé des populations. L'atténuation se réfère à la vraie prévention primaire (réduction des gaz à effet de serre). L'adaptation comprend les interventions ayant pour but de minorer les conséquences délétères sur la santé. Source : MCMICHAEL, WOODRUFF et HALES (2006)

1.1.2 Un micro-climat à l'échelle de la ville

Les travaux sur le climat urbain ont démontré depuis deux siècles que l'urbanisation produit un micro-climat spécifique caractérisé par des variations importantes des champs spatialisés de température de l'air, d'humidité et de vitesse de vent (HEBBERT et JANKOVIC, 2013). La conception des villes est considérée comme le plus vieux type de changement climatique d'origine anthropique (EGLI, 1951).

En 1833, Luke Howard observe que la température mesurée la nuit au cœur de Londres est sensiblement plus chaude que celle enregistrée dans la campagne environnante (H. E. LANDSBERG, 1981). Depuis, les travaux de Oke notamment, ont mis en évidence les changements radicaux induits par le processus d'urbanisation dans la nature et les propriétés atmosphériques à l'échelle régionale. Ils impliquent la transformation des caractéristiques radiatives, thermiques, d'humidité et aérodynamiques de la surface (T. OKE, 1987). En effet, la morphologie de la rue et les propriétés radiatives et thermiques des matériaux qui la composent lui confèrent un bilan d'énergie différent de celui des couverts naturels (Tim R OKE, 1982). Les aires urbanisées se caractérisent souvent par un albédo plus faible (0.15) que celui de la végétation (0.20 – 0.25). C'est un artefact de la forme tridimensionnelle des rues qui capte et piège l'énergie solaire. Les matériaux artificiels ont de grandes capacités thermiques et représentent une importante masse capable d'accumuler l'énergie solaire disponible le jour et de la ré-émettre la nuit sous forme de rayonnement IR et de flux de chaleur. Ces processus sont renforcés par la géométrie des éléments urbains qui piège l'énergie reçue, réfléchi ou émise dans la rue. Contrairement à une surface plane, le facteur de vue du ciel est nettement réduit lorsque les rues sont étroites. La canopée urbaine (soit la couche située entre la surface et la hauteur des bâtiments les plus hauts) modifie également les écoulements et crée des conditions favorables à la turbulence par la présence d'éléments rugueux de grande dimension. Le vent local, selon l'orientation de la rue par rapport à la direction dominante du flux, peut être soit ralenti, soit canalisé, accéléré et participer ainsi activement au relâchement de chaleur par les parois plus chaudes que l'air environnant ou la diffusion de particules et polluants. Le flux d'évapotranspiration issu des villes denses est plus faible qu'au-dessus d'une zone rurale car il y persiste une faible fraction de végétation. Les sols, imperméables, constituent des réservoirs d'eau limités et éphémères. Cela implique un rapport de Bowen modifié ($\beta = Q_H/Q_E$) en faveur du flux de chaleur sensible et du stockage par rapport aux couverts naturels (voir Eq. 1.1). Enfin, les villes sont assimilées à des centres où se concentrent les activités humaines (BROWN, 2001 ; GRIMM et al., 2008) qui génèrent une production endogène de chaleur (trafic routier, rejets industriels, chauffage). L'anomalie positive de température entre la ville et sa périphérie qui résulte de l'ensemble de ces phénomènes est appelée « Ilôt de Chaleur Urbain » en référence au dôme chaud se formant au-dessus des villes en conditions stables. Il est largement étudié dans la littérature du climat urbain (STEWART, 2011).

Selon un transect allant de la campagne au centre d'une agglomération, le profil de température de l'air près de la surface, mis en évidence par T. OKE (1987) et illustré par la Figure 1.4, traduit une structuration en trois couronnes concentriques centrées sur le centre-ville dense. La zone de transition entre les zones rurales et les quartiers résidentiels ou péri-urbains est caractérisée par un gradient thermique positif intense appelé «falaise». Ensuite une zone «plateau» correspond au réchauffement progressif ayant lieu suivant la densification de l'aire urbaine. Un pic est atteint au centre-ville, point de référence pour calculer la différence entre les températures les plus basses et les températures les plus chaudes, soit l'intensité maximale de l'îlot de chaleur urbain.

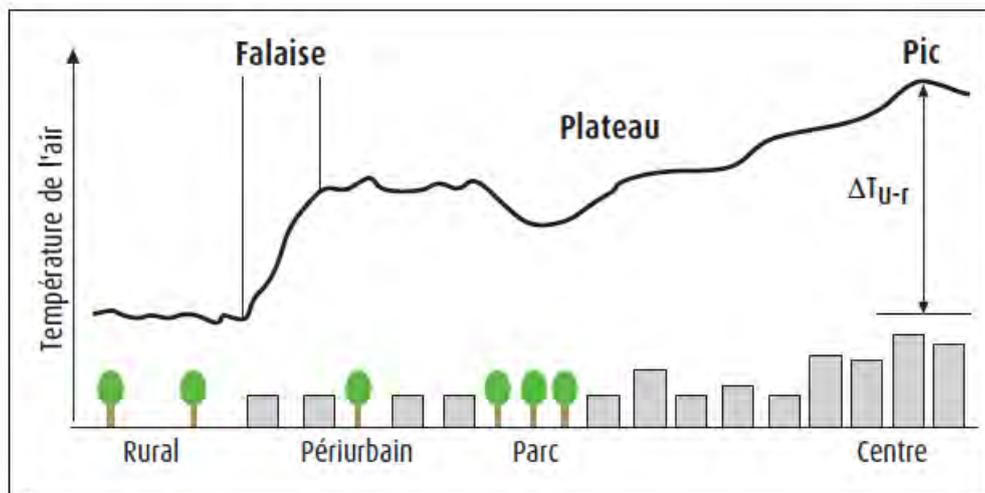


FIGURE 1.4 – Profil théorique de la température de l'air près de la surface, le long d'une coupe transversale d'une zone urbanisée (depuis les zones rurales jusqu'au centre-ville). Source : dans Grégoire PIGEON, Aude LEMONSU et al. (2008), adapté de T. OKE (1987).

Pendant la campagne de mesure CAPITOUL réalisée à Toulouse (France) en 2005 (V. MASSON, GOMES et al., 2008), on relève des différences variant autour de 4 °C en température potentielle la nuit, entre un quartier urbain dense et une zone péri-urbaine (Figure 1.5). Malgré de faibles différences le jour, l'écart s'amplifie après le coucher de soleil jusqu'à l'aube. En effet, les couverts naturels stockent moins de chaleur le jour et refroidissent plus vite que les surfaces urbaines la nuit. D'autres facteurs météorologiques importants modulent l'intensité de l'îlot de chaleur urbain : la vitesse du vent, la couverture nuageuse, la nébulosité, les précipitations (Grégoire PIGEON, Aude LEMONSU et al., 2008).

En résumé, la rareté de la végétation induit une moindre dissipation de l'énergie reçue par la canopée urbaine par évapotranspiration, contrairement à une canopée végétale. L'excès d'énergie est donc, soit dissipé sous forme de chaleur sensible vers l'atmosphère, soit stocké le jour par les éléments urbains dont la capacité thermique est élevée avant

d'être progressivement ré-émis la nuit limitant ainsi le refroidissement de l'air. De plus, la pollution atmosphérique concentrée dans le dôme de chaleur renvoie vers la surface une partie du rayonnement IR qui est ainsi piégé. Ces processus caractéristiques de l'îlot de chaleur urbain expliquent les différences de température de l'air observées entre le cœur d'une ville et sa périphérie.

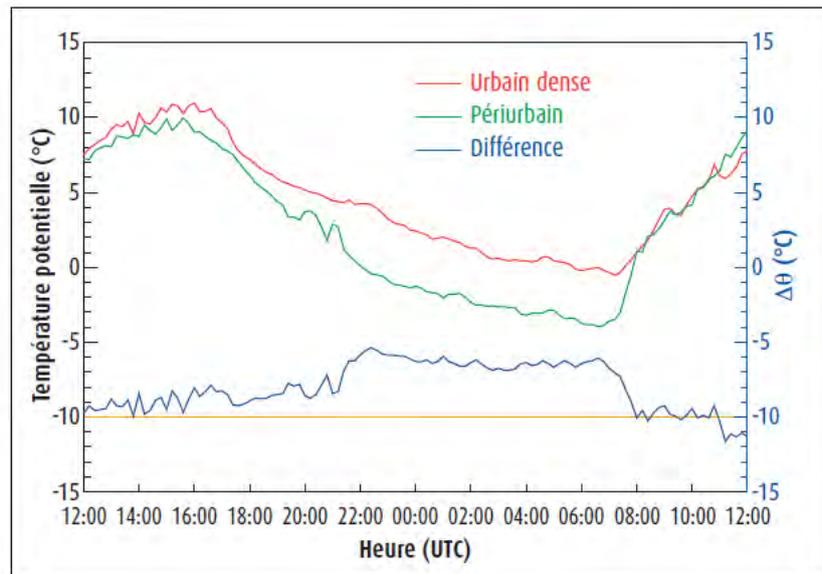


FIGURE 1.5 – Évolution journalière de la température de l'air mesurée dans le centre-ville de Toulouse et dans une zone péri-urbaine lors de la campagne de terrain CAPITOU. Source : Grégoire PIGEON, Aude LEMONSU et al. (2008)

Le bilan d'énergie d'un volume de canopée urbaine s'écrit (T. OKE, 1987) :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + (\Delta Q_A) \quad (1.1)$$

Les termes de gauche représentent l'énergie nette disponible pour réchauffer l'air et les termes de droite expriment la manière dont cette énergie est dissipée. Chacune des contributions au bilan d'énergie est exprimée comme une densité de flux, en $W m^{-2}$. Le terme source principal est le rayonnement net (Q^*) à savoir la différence entre les rayonnements incidents ($S^\downarrow, L^\downarrow$) et remontants (S^\uparrow, L^\uparrow) en courtes et grandes longueurs d'ondes, respectivement :

$$Q^* = S^\downarrow - S^\uparrow + L^\downarrow - L^\uparrow \quad (1.2)$$

Au rayonnement net s'ajoute le terme Q_F tout à fait spécifique au milieu urbanisé, qui représente l'énergie d'origine anthropique. Il participe ainsi au réchauffement de l'air en

ville, en particulier en hiver avec les rejets de chaleur importants liés au chauffage (PIGEON, LEGAIND et al., 2007). Les termes puits du bilan sont les flux turbulents de chaleur sensible (Q_H) et latente (Q_E), ΔQ_S le flux de stockage de chaleur, qui tient compte ici de l'ensemble des éléments urbains (parois des bâtiments, surfaces au sol). ΔQ_A désigne l'advection nette aux bords du volume considéré, liée au transferts horizontaux de flux de chaleur sensible et latente. D'ordinaire faible, elle est souvent négligée, excepté pour des environnements très hétérogènes ou à proximité de fortes discontinuités. C'est le cas notamment des lignes côtières, comme PIGEON, LEMONSU et al. (2007) l'ont mis en évidence sur Marseille où le terme d'advection horizontale devient prépondérant dans le bilan d'énergie du centre-ville, en conditions de brise de mer sous l'effet d'une entrée d'air maritime plus froid et plus humide.

1.1.3 Conséquences sanitaires et résilience

L'artificialisation des sols est une action irréversible de l'Homme, responsable de la diminution de la disponibilité en terres fertiles pour l'agriculture, l'altération du climat régional, la fragmentation des habitats et la perte en biodiversité. Les villes couvrent aujourd'hui moins de 3 % des terres émergées. Malgré tout, elles possèdent déjà des signatures thermique (îlot de chaleur urbain) et chimique (production de gaz à effet de serre) qui se distinguent nettement de la campagne environnante.

L'ONU estime que la population mondiale, d'environ 7,3 milliard d'individus actuellement, pourrait atteindre 9,7 milliards de personnes en 2050, dont les deux tiers se concentreront dans de vastes pôles urbanisés. Selon ANGEL et al. (2011), les zones urbanisées autour d'agglomérations comptant plus de 100 000 habitants en 2000 dans les pays en voie de développement seront multipliées par 2,5 d'ici 2030 et par 4 en 2050 en suivant une projection modérée de l'évolution de la démographie (Figure 1.6). SETO et al. (2011) ont mis au point un modèle global de l'évolution future de l'expansion urbaine en s'appuyant sur les scénarios du GIEC. Ils estiment que la couverture mondiale des aires urbanisées va croître 26 fois plus vite entre 2000 et 2030 que l'étalement observé entre 1970 et 2000, d'après leur scénario modéré jugé comme le plus probable.

Étant donné le couplage entre le rôle majeur des villes et les extrêmes météorologiques observés et attendus relatifs au changement climatique, le caractère prioritaire de l'adaptation des zones urbanisées apparaît évident (CARTER et al., 2015). Les villes sont des carrefours de haute densité de population et d'infrastructures vulnérables. À travers le changement climatique et l'îlot de chaleur urbain, les citoyens sont soumis à la combinaison de deux perturbations thermiques, l'une globale, l'autre locale. Ces perturbations constituent une menace pour la santé publique. En effet, le rôle prépondérant du confort thermique sur la santé des populations a déjà été largement documenté. Il a été observé que

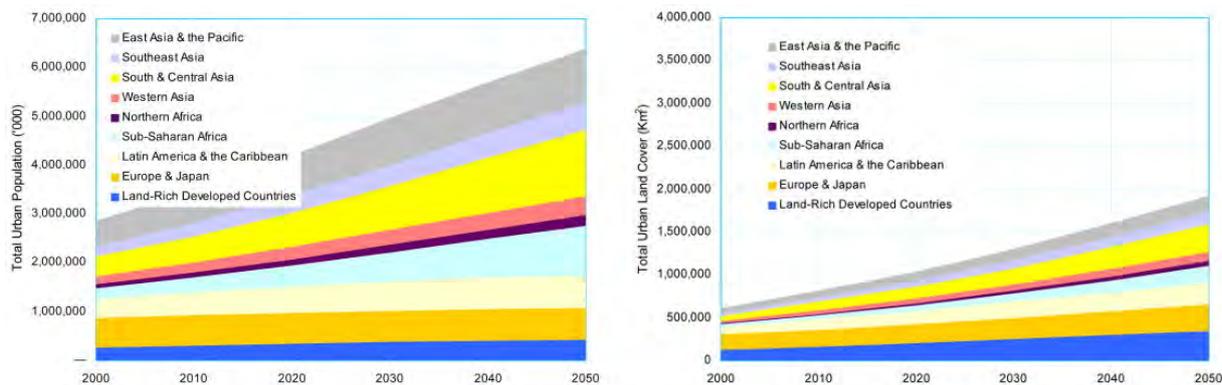


FIGURE 1.6 – Projection de la population urbaine (à gauche) et de l'étalement des zones urbaines selon un scénario moyen (à droite) pour différentes régions du globe à l'horizon 2050. Source : ANGEL et al. (2011)

le taux de mortalité d'une population augmente lorsque les conditions climatiques qu'elle subit s'éloignent de l'optimum de sa zone de confort. En résulte des courbes température journalière / nombre de décès caractéristiques, en forme de U.

Les projections de KOPPE et al. (2004) indiquent que le bénéfice en terme de réduction de la mortalité liée au froid attribuable au réchauffement attendu en Allemagne dans les années 2080 sera plus faible que l'augmentation des décès causés par la chaleur. On anticipe donc une transformation de la forme des futures courbes : les températures les plus froides représenteront un moindre risque et les températures les plus chaudes un risque accru de mortalité. Toutefois, ces résultats ne sont pas applicables à d'autres régions plus au nord (HAJAT et al., 2014). À Shanghai (Chine), l'exacerbation par l'îlot de chaleur urbain du stress thermique provoqué par les vagues de chaleur chez les citoyens a été démontrée (TAN et al., 2010). D'autres études montrent une augmentation importante du risque de mort prématurée sous climat futur (GREENE et al., 2011 ; HAJAT et al., 2014 ; C. HUANG et al., 2011).

D'après SCHAUSER et al. (2010) et BEHRENS, GEORGIEV et CARRARO (2010), les vagues de chaleur ont été la principale cause de mortalité relative aux événements climatiques extrêmes en Europe par le passé, loin devant les épisodes d'inondations ou de sécheresse. Lors de la canicule de 2003, plus de 70 000 décès excédentaires ont été enregistrés sur 12 pays européens, dont 15 000 en France (ROBINE et al., 2007). TAN et al. (2010) et LAAYDI et al. (2012) ont mis en lumière le fait que l'excès de mortalité observé à Paris durant cet épisode de canicule était principalement expliqué par les maxima et les minima de températures journalières. L'effet délétère sur le métabolisme des nuits dites «tropicales», pour lesquelles la température ne descend pas en-dessous de 20 °C, est avéré. L'absence d'un plan «canicule» qui aurait permis de mener des actions de prévention auprès

des personnes les plus fragiles (personnes âgées, malades, handicapées ou jeunes enfants) et une couverture suffisante du territoire par des systèmes de climatisation, notamment à des endroits stratégiques comme les maisons de retraite ont été *a posteriori* pointés du doigt (DHAINAUT et al., 2003). Ces mesures d'urgence ont démontré leur efficacité à réduire la mortalité liée aux vagues de chaleur dans 28 villes aux États-Unis (R. E. DAVIS et al., 2003). Elles constituent une des réponses possibles à l'adaptation au changement climatique. Néanmoins, la climatisation demeure une mesure individuelle d'acclimatation qui nécessite de s'équiper et accroît la demande énergétique. Les rejets de chaleur qu'elle occasionne entraîne une rétro-action sur la température de l'air et dégrade le confort thermique à l'extérieur (HSIEH, ARAMAKI et HANAKI, 2007).

Améliorer notre résilience face aux changements à venir est devenue l'une des préoccupations majeures ces dernières années (LEICHENKO, 2011). Le GIEC définit la résilience comme "la capacité des systèmes sociaux, économiques et environnementaux à faire face à un événement, une tendance ou une perturbation dangereuse, en répondant ou en se réorganisant de manière à maintenir la capacité d'adaptation, d'apprentissage, et de transformation".

D'autres stratégies d'adaptation au changement climatique et d'atténuation de l'effet de l'Îlot de Chaleur Urbain par l'aménagement, dites passives, offrent des solutions intéressantes :

1. La modification physique des surfaces artificielles *via* leur albédo ou leurs propriétés thermiques. Le recours à des matériaux hautement réfléchissants a montré ses limites sur les murs et au sol car ils génèrent d'importants inconforts visuels par éblouissement (AKBARI et al., 2005). De plus, l'abaissement des températures de surface observé ne permet pas d'améliorer le confort des piétons à cause des importants flux de rayonnement réfléchis qui lui sont renvoyés (EVYATAR ERELL et al., 2013). Ces matériaux restent toutefois intéressants à utiliser sur les toits pour diminuer l'échauffement de la surface externe en été et améliorer ainsi le confort thermique intérieur.
2. La végétalisation de l'espace urbain. Lorsque la morphologie urbaine ne peut être changée (implantation et orientation des bâtiments), la végétalisation compte parmi les stratégies d'adaptation les plus efficaces pour améliorer les conditions micro-climatiques extérieures à échelle locale tout en minorant les besoins en climatisation (GAGO et al., 2013; SALATA et al., 2015). En effet, les canopées arborées interceptent une partie du rayonnement solaire. Les températures de surface des aires bénéficiant de l'ombrage sont ainsi nettement réduites. Elles agissent également comme filtre aux apports solaires à travers les fenêtres des bâtiments. La dissipation d'énergie par évapotranspiration, modeste en milieu urbain, est rétablie. Le feuillage des arbres freine le vent et peut servir de barrière physique.

1.2 Intérêts multiples de la végétalisation

Outre son pouvoir de régulation thermique, la végétation apporte de nombreux autres bienfaits environnementaux mais aussi socio-culturels et économiques. C'est pourquoi la végétalisation est qualifiée de stratégie d'aménagement «sans regret» (MILLS, WILSON et JOHANSSON, 1991). À titre d'exemple, Y. WANG et al. (2014) montre la variété des services écosystémiques fournis par les infrastructures vertes sur l'environnement intérieur (Figure 1.7), qui cumulent des fonctions agissant sur le climat, la consommation d'énergie, la qualité de l'air, l'environnement sonore, ou encore l'esthétique.

1.2.1 Bénéfices socio-culturels et économiques

Les espaces végétalisés, qu'ils soient publics ou privés, créent une ambiance dont la perception par les habitants et usagers est souvent positive (BERRENS et CALVET-MIR, 2016) et sont source de bénéfices socio-culturel et économiques variés (Figure 1.8).

Toutes les formes de végétalisation en ville sont en général appréciées pour leur esthétique (KLEMM et al., 2015). Les plantes ont un effet bénéfique sur le stress, la santé mentale et le bien-être (BERTRAM et REHDANZ, 2015; KREKEL, KOLBE et WÜSTEMANN, 2016; MALLER et al., 2006). Elles aident à recouvrer plus vite la santé en cas de convalescence (BURLS, 2007; SHACKELL et WALTER, 2012). Les parcs et les coulées vertes encouragent aussi à l'exercice physique (AKPINAR, 2016). Ils sont des lieux de rencontre, de partage et d'activités de loisir renforçant la cohésion sociale (SULAIMAN, HASAN et JAMALUDDIN, 2016; VAN DILLEN et al., 2012). Les arbres en ville créent des filtres acoustiques qui diminuent les nuisances sonores et génèrent au contraire des sons agréables (ROBINETTE, 1972). Les canopées arborées denses constituent un abri au vent (J. LANDSBERG et POWELL, 1973). Les arbres de rue sont des protections physiques aux éventuelles blessures causées par les véhicules motorisés (TARRAN, 2009). Les écrins de verdure ont également un rôle pédagogique dans la transmission de connaissances sur la biodiversité et la sensibilisation à propos de sa sauvegarde. On observe une moindre criminalité dans les quartiers où la végétation est abondante (KUO et SULLIVAN, 2001).

La végétalisation peut même être utilisée pour favoriser l'attraction d'un lieu à des fins touristiques ou commerciales. La végétation est un élément d'architecture du paysage fortement valorisée qui véhicule caractère et identité. Les terrains arborés, en tous autres points comparables, ont une valeur immobilière supérieure aux terrains dépourvus d'arbres (ANDERSON et CORDELL, 1988). La diminution de la demande énergétique des bâtiments pour la climatisation ou le chauffage grâce à la présence de systèmes végétalisés sur leur enveloppe (toits et façades végétalisés) ou dans la rue (pelouse et arbres) représente une économie financière (ABDEL-AZIZ, SHBOUL et AL-KURDI, 2015; DONOVAN et BUTRY,

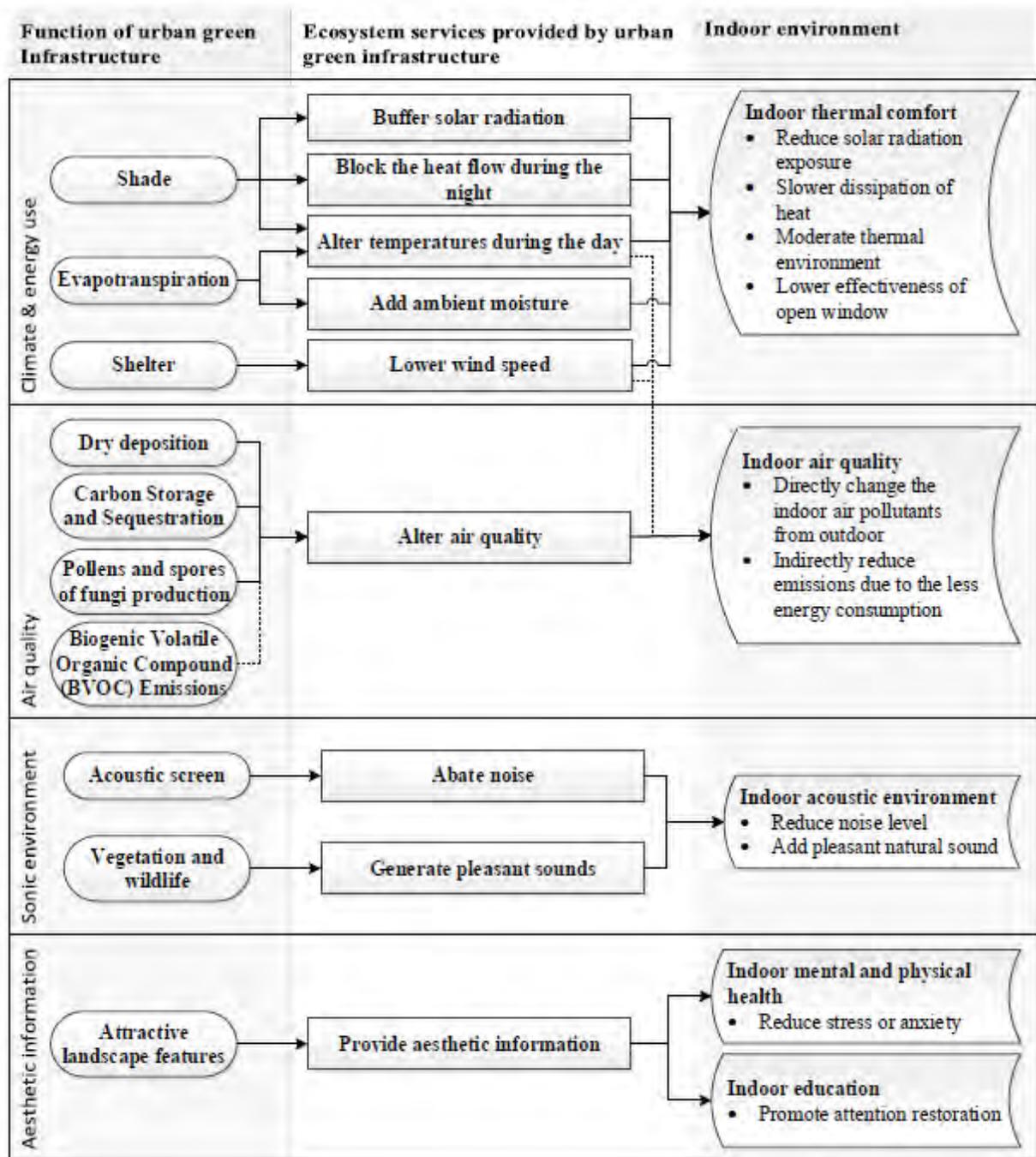


FIGURE 1.7 – Principaux services écosystémiques fournis par les écosystèmes urbains à l'environnement intérieur. Les lignes continues et en pointillés correspondent aux effets directs et indirects, respectivement. Source : Y. WANG et al. (2014)

2009 ; HEISLER, 1986 ; Y. HUANG et al., 1987).

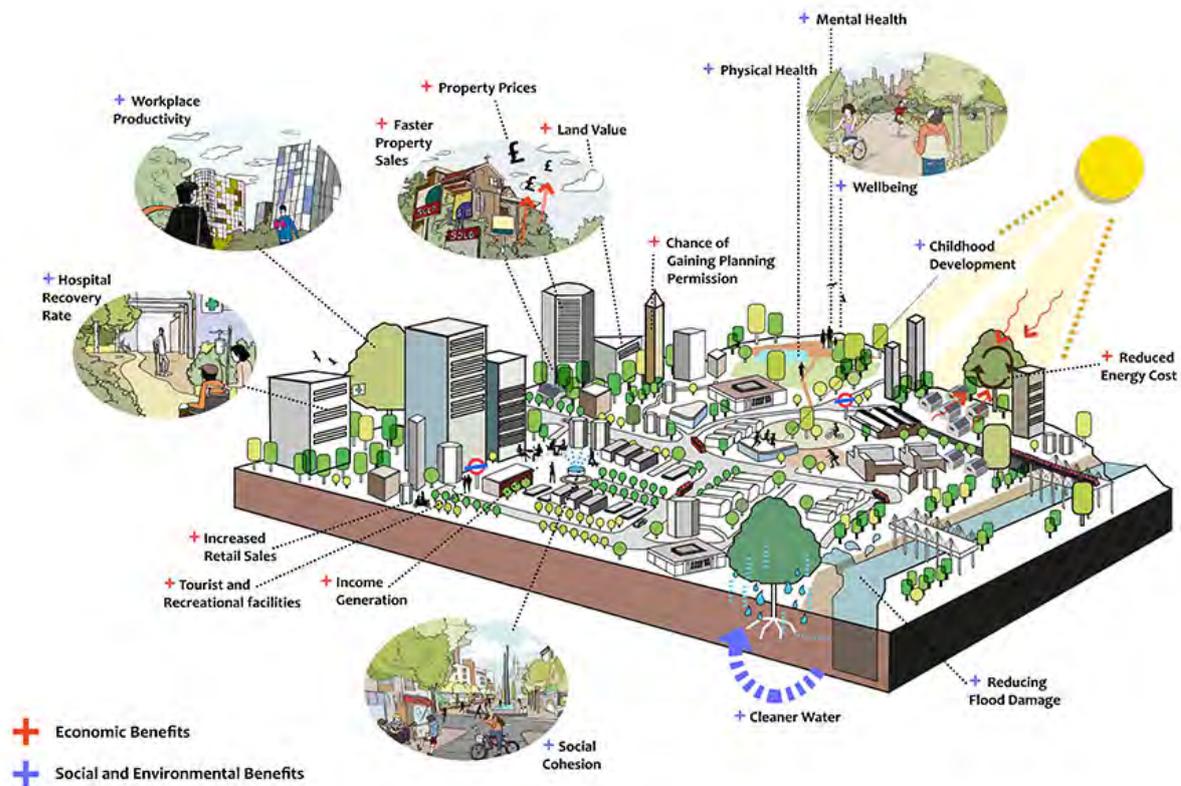


FIGURE 1.8 – Bénéfices socio-économiques des infrastructures vertes en ville. Source : Green Infrastructure Audit - Best Practice Guide, https://www.london.gov.uk/sites/default/files/bestpracticeguide_a4-10.pdf

1.2.2 Bénéfices environnementaux

La végétation en milieu urbain apporte également de nombreux bénéfices environnementaux pour la population que l'on regroupe sous le terme de services écologiques ou services écosystémiques (Figure 1.9).

La végétation produit le dioxygène (O_2) nécessaire à la respiration des organismes hétérotrophes. En échange, elle stocke du carbone provenant du dioxyde de carbone (CO_2) par photosynthèse. Sachant que le CO_2 est un des gaz à effet de serre qui contribue le plus au changement climatique, les organismes autotrophes qui le consomment interviennent dans la régulation du climat (NOWAK et CRANE, 2002). Les plantes filtrent certains polluants et particules et améliorent ainsi la qualité de l'air, à la fois par absorption et adsorption

(MORAKINYO, LAM et HAO, 2016 ; NOWAK, CRANE et STEVENS, 2006 ; XUE et X. LI, 2017). Il revient néanmoins aux aménageurs de tenir compte de l'émission de composés organiques volatiles biogéniques (COVBs) et de la production de pollens, toutes deux à la fois relatives à l'espèce et aux conditions météorologiques, lors du choix des essences à planter. En effet, l'altération de la composition de l'air en zone urbanisée par la végétation peut causer des problèmes sanitaires, notamment en provoquant des réactions allergiques ou en exacerbant la gravité de crises d'asthme. CALFAPIETRA et al. (2013) ont démontré l'effet tantôt protecteur tantôt promoteur des COVBs dans la formation d'ozone (O₃), un gaz irritant pour les muqueuses nasales et digestives, selon la concentration en oxydes nitreux (famille de gaz hautement réactifs, précurseurs de l'ozone) dans l'air.

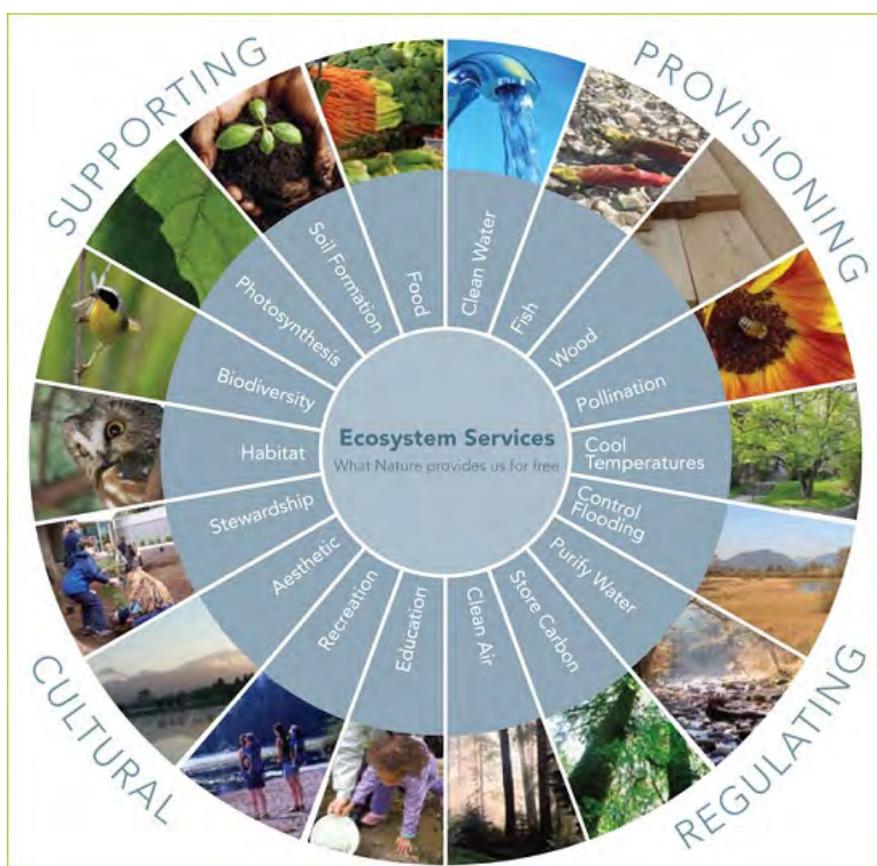


FIGURE 1.9 – Diagramme des services écosystémiques. Source : metrovancouver.org

Les économies d'énergie réalisées par les différents systèmes de végétalisation (toits et façades végétalisés, arbres), de par leur capacité d'ombrage et d'isolation, évitent potentiellement un relâchement de gaz à effet de serre et des actions polluantes pour la production énergétique. De ce fait, ces stratégies deviennent des stratégies, bien que mineures, d'atténuation du changement climatique.

Les sols naturels ou végétalisés ont de nombreuses fonctions hydrologiques. Leur perméabilité rend possible une infiltration profonde des eaux de pluie. Ils diminuent ainsi le ruissellement et les risques d'inondation (ARMSON, STRINGER et ENNOS, 2013 ; BERLAND et al., 2017). Le sol constitue un réservoir de stockage pérenne pour l'eau infiltrée. La réduction de la vitesse de ruissellement et la fixation du sol par une matrice racinaire limite l'érosion et les glissements de terrain. La qualité de l'eau peut être améliorée *via* deux processus : la filtration par la texture du sol et la phytoremédiation par certaines plantes capables de prélever les contaminants présents dans l'eau (SEKABIRA et al., 2011).

Les espaces verts constituent un refuge pour la biodiversité de la faune et la flore en ville en servant d'habitat, de protection ou en fournissant un approvisionnement en nourriture (SAVARD, CLERGEAU et MENNECHEZ, 2000). Ils participent au maintien de la continuité des corridors écologiques verts et bleus, menacée par la fragmentation des territoires naturels (A. M. DAVIS et GLICK, 1978). Les fermes urbaines sont d'ailleurs en plein essor aujourd'hui. Elles répondent au désir de nature, d'esthétisme et de ressource alimentaire du citoyen au sein même de son environnement.

Enfin, la régulation du micro-climat par la végétation est l'un des services écosystémiques les plus visibles et perçus positivement par la population car l'amélioration du confort thermique qu'elle procure est sensible.

1.2.3 La végétation comme régulateur thermique en milieu urbain

1.2.3.1 Effet rafraîchissant de la végétation

La littérature scientifique fournit des indices objectifs permettant d'appréhender le pouvoir de rafraîchissement de la végétation en conditions de stress thermique chaud. La plupart des études expérimentales traitant de cette problématique ont mesuré la différence de température de l'air exprimée en °C entre une zone dégagée au soleil et à l'ombre d'arbres. En général, l'amplitude de la différence observée en moyenne journalière est de l'ordre de 1 °C (CA SOUCH et SOUCH, 1993) ou 2 °C (TAHA, AKBARI et ROSENFELD, 1991). Toutefois, des variations journalières marquées sont enregistrées. Le maximum de potentiel de refroidissement des arbres se situe autour du midi solaire : les écarts de température sont alors de plusieurs degrés (6 °C dans l'expérimentation de TAHA, AKBARI et ROSENFELD (1991)) ou atteignent un fort pourcentage de diminution de la valeur de référence d'un point exposé (jusqu'à 20 % dans celle de BUENO-BARTHOLOMEI et LABAKI (2003)). À titre d'exemple, la Figure 1.10 présente une comparaison de la température de l'air mesurée dans une cour semi-fermée aménagée selon trois configurations différentes (de l'herbe au sol, de l'herbe au sol et une toile tendue au sommet des bâtiments, et enfin de l'herbe et des

arbres), et l'effet rafraîchissant de ces aménagement par rapport à du sol nu. En journée, les arbres permettent un rafraîchissement de 2 °C. SHASHUA-BAR et HOFFMAN (2000) ont montré que l'effet d'ombrage des arbres explique 80 % de la variation de la température de l'air observée. De plus, l'efficacité de la végétation à refroidir dépend du contexte dans lequel elle est présente. En effet, les arbres peuplant des rues à fort trafic routier rafraîchissent en moyenne l'air de 1 °C. En revanche, un parc de petite taille (0.15 ha) situé en ville procure un rafraîchissement de 4 °C par rapport à un environnement urbain entièrement minéral. La méta-analyse de BOWLER et al. (2010) montre un rafraîchissement de la température de l'air par les parcs urbains légèrement plus intense la nuit que le jour. Si l'on compare deux stations, l'une dans un parc et l'autre ailleurs dans la même ville, l'écart de température se situe entre 1 et plus de 3 °C. Plus les parcs sont grands, plus ils sont susceptibles d'être froids. À aires égales, la distance soumise au rafraîchissement du parc est deux fois plus grande en présence d'arbres qu'en présence de pelouse (MONTEIRO et al., 2016).

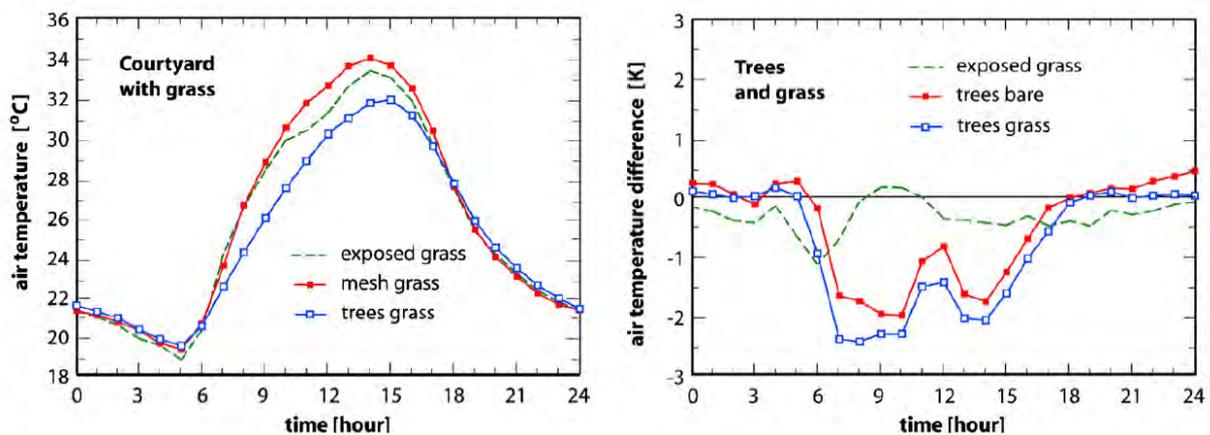


FIGURE 1.10 – Gauche : comparaison de la température de l'air mesurée dans une cour semi-fermée aménagée selon trois configurations différentes : herbe, herbe et toile tendue au sommet des bâtiments, herbe et arbres. Droite : différence de température entre ces configuration et le cas de référence (sol nu). Source : SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL (2009)

TAKÁCS et al. (2016) a testé l'influence de quatre essences d'arbres matures sur le microclimat sous canopée, comparée à celui d'un point non ombragé. En moyenne, un arbre isolé réduit de seulement 0.6 °C la température de l'air et augmente de 2 % l'humidité de l'air. La transmissivité moyenne mesurée entre 10:00 et 16:15 est de 8 %, soit un effet d'ombrage très significatif. La somme de toutes les modifications relatives aux flux de rayonnement solaire et IR sous la canopée montre une diminution de près de 50 % du bilan d'énergie de l'arbre comparé à un point situé dans un espace ouvert engazonné non ombragé

appartenant au même espace vert. Ces modifications sont dues à l'atténuation moyenne de plus de 93 % de rayonnement solaire incident et réfléchi par le sol par le feuillage, une diminution moyenne de près de 10 % de rayonnement IR émis par le sol vers l'arbre et une augmentation modérée d'environ 12 % du rayonnement IR global reçu et piégé dans la canopée. Ces résultats démontrent que la part d'énergie captée par la canopée arborée qui pourrait éventuellement accroître l'inconfort des piétons est largement compensée en journée par l'interception du rayonnement solaire.

En dépit de l'incidence limitée à quelques degrés de la couverture arborée sur la température de l'air, les arbres peuvent se révéler cruciaux pour l'amélioration significative du confort thermique. La sensation thermique est le résultat d'une synergie entre la température de l'air et d'autres paramètres climatiques : humidité de l'air, vitesse du vent et flux de rayonnement solaire et IR. Le processus d'évapotranspiration des arbres, de la pelouse et du sol nu accroît localement le flux de chaleur latente, qui à la fois consomme 99 % de l'énergie contre 1% utilisé pour la photosynthèse (Tim R OKE et al., 1989), rafraîchit et humidifie l'air. De plus, l'interception massive de rayonnement solaire et IR modère le rayonnement incident atteignant les piétons placés au-dessous ou les autres surfaces urbaines et modifie leur bilan radiatif. Même si la vitesse du vent peut s'affaiblir en présence d'arbres, elle dépend tout d'abord de l'orientation de la rue par rapport à la direction du vent dominant. Les travaux de ZÖLCH et al. (2016) et MONTEIRO et al. (2016) illustrent la non-linéarité existant entre l'augmentation de la couverture végétale et l'amélioration du confort thermique en été. Les stratégies d'aménagement appliquées à un quartier de Munich (Allemagne) ont montré une meilleure efficacité des arbres à réduire le stress thermique, suivi des façades végétalisées. Ils préconisent un placement stratégique de la végétation aux endroits les plus exposés au soleil et au plus proche des voies empruntées par les piétons ou des bâtiments à rafraîchir. Les façades végétalisées seront privilégiées dans les quartiers urbains denses. Dans cette typologie de rue, l'impact des arbres de rue sera plus faible à cause du fort ombrage des bâtiments à certains moments de la journée qui limitera le pouvoir d'évapotranspiration des arbres. De plus, il est recommandé de ne pas obstruer les rues étroites pour favoriser leur refroidissement durant la nuit. Ainsi une ventilation suffisante peut être maintenue, facilitant la dispersion des polluants produits par le trafic. Si la rue permet l'installation d'arbres, il est préférable d'opter pour des spécimens grands à faible densité foliaire (MORAKINYO, KONG et al., 2017). Les arbres doivent toujours être placés de façon optimale du côté le plus exposé des rues (en général le côté exposé à l'est), en ciblant les rues larges à faible rapport d'aspect (COUTTS, WHITE et al., 2016). MORAKINYO et LAM (2016) ont estimé que pour des indices foliaires équivalents, les houppiers dont le rapport hauteur/largeur était le plus grand offraient une amélioration du confort thermique supérieure. Les doubles rangées d'arbres sont plus efficaces que les simples lignées. Il faut néanmoins ne pas négliger la conservation d'une ventilation acceptable.

Pour maintenir une capacité optimale de transpiration de la végétation urbaine, la

mise en place d'un réseau d'irrigation est souvent nécessaire. Lors d'un stress par manque d'humidité dans le sol ou d'une température de l'air excessive, le flux de chaleur sensible produit par l'arbre est accru au détriment du flux de chaleur latente ; c'est pourquoi il ne faut pas négliger l'effet du stress thermique et hydrique qui contrôle et module la transpiration de la plante (YOSHIDA et al., 2009). La problématique de l'amélioration du confort thermique prodiguée par la végétation en milieu chaud et aride peut être envisagée comme le compromis entre l'économie en énergie réalisée et la consommation d'eau qu'elle exige. Ceci est pertinent dans la mesure où les régions qui subissent de sévères sécheresses ont des politiques de restriction qui limitent l'usage de l'eau pour l'irrigation (COUTTS, TAPPER et al., 2013). Cette contrainte hydrique sur la transpiration des plantes doit également être examinée sous d'autres climats pour anticiper le changement de régime des précipitations qui aura lieu avec le dérèglement climatique.

1.2.3.2 Amélioration du confort thermique par la végétation

L'étude de LOBACCARO et ACERO (2015) montre que l'indice de confort thermique appelé PET, soit *Physiological Equivalent Temperature*, est plus sensible aux variations de rapport d'aspect de la rue que de propriétés thermiques des matériaux. Ces résultats sont corroborés par CHATZIDIMITRIOU et YANNAS (2016) et complétés par l'analyse de l'effet d'autres stratégies sur le confort thermique. Une couverture arborée totale de l'espace disponible dans un square idéalisé est la mesure la plus efficace, donnant lieu à 15:00 à une baisse de 24 ° C du PET. L'implantation de points d'eau ou de pelouse abaisse le PET de 10 ° C. Des résultats similaires ont été trouvés par KETTERER et Andreas MATZARAKIS (2014). D'après MORAKINYO, KONG et al. (2017) la différence de PET maximum sous une canopée arborée est de 12 ° C dans une aire dégagée. Le potentiel d'amélioration du confort thermique diminue presque de moitié lorsque l'arbre est confiné à une rue. Une étude de MILOŠEVIĆ, BAJŠANSKI et SAVIĆ (2017) a montré d'importants bénéfices en terme d'amélioration du confort thermique en simulant à la fois (1) l'optimisation de la position des arbres déjà présents et (2) la plantation de nouveaux arbres dans un quartier de Novi Sad (Serbie). La différence d'UTCI (*Universal Thermal Comfort Index*) observée à positions variées de piétons imaginaires est comprise dans l'intervalle 0.3-0.8 ° C et 0.6-1.3 ° C pour les moyennes journalières avec des maxima de 3.3 ° C et 3.7 ° C pour les deux scénarios respectifs. Le premier scénario fournit une amélioration du confort thermique dans 77 % des positions testées. On parviendrait à 84 % de positions concernées dans le cas de plantation d'arbres supplémentaires.

On peut également citer les travaux expérimentaux de SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL (2011). Ils comparent des niveaux de sensation de stress pour différents aménagements paysagers au sein d'une cour demi-fermée. Ces niveaux de stress sont établis sur la base d'un indice de stress thermique exprimé en W et calculé à partir

d'un modèle d'échange d'énergie du piéton (D. PEARLMUTTER, BERLINER et SHAVIV, 2006, 2007). Les résultats (Figure 1.11) montrent une amélioration significative du confort thermique en milieu de journée grâce à la végétation arborée.

Configuration	Hour [LST]														
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Open space	4	4	5	6	6	6	6	7	7	7	6	5	4	4	4
Exposed Bare	4	4	4	6	6	6	7	7	7	7	5	4	4	4	4
Exposed Grass	4	4	4	5	5	5	5	5	6	5	4	4	4	4	4
Trees Bare	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	4	4	4	4	4
Trees Grass	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

FIGURE 1.11 – Comparaison des niveaux de sensation thermique (4=confortable, 5=chaud, 6=très chaud, 7=extrêmement chaud) évaluées dans une cour semi-fermée aménagée selon différents aménagements : sol nu, herbe, sol nu et arbres, herbe et arbres. Source : SHASHUABAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL (2011)

Parmi les indicateurs de la sensation de confort thermique la température radiante moyenne (T_{mrt}) est de plus en plus utilisée. Elle décrit la somme des rayonnements en courtes et longues longueurs d'ondes reçus depuis le ciel et les surfaces environnantes pondérés par les facteurs de vue correspondants. THORSSON et al. (2014) rapportent que la température radiante moyenne est un bon indicateur du risque de mortalité sous stress thermique. Grâce à l'effet d'ombrage des arbres, cette variable peut fortement varier dans un paysage urbain arboré. STREILING et MATZARAKIS (2003) ont observé aux abords de marronniers d'Inde (*Aesculus hippocastanum*) des différences maximales de 2.2°C , une humidité relative d'air légèrement supérieure (+ 5 à 7 %), une réduction du PET autour de 17°C et près du double concernant la T_{mrt} . De même, (H. LEE, MAYER et L. CHEN, 2016) ont comparé les effets d'atténuation d'arbres et de végétation au sol. Ils mentionnent une différence de PET similaire pour une différence de température de l'air de 2.7°C et une réduction au-delà de 39°C de la T_{mrt} , contre un abattement de seulement 7.5°C pour la pelouse pour cette même variable.

Modélisation de la végétation urbaine

Sommaire

2.1 Outils existants	26
2.1.1 Modèles à fine échelle	26
2.1.2 Modèles méso-échelle	28
2.2 TEB, un modèle de ville multi-couches intégrant la végétation urbaine	30
2.2.1 Version historique du modèle TEB	30
2.2.2 Amélioration de TEB pour l'énergétique et le confort	34
2.2.3 Modélisation de la végétation urbaine	37

La végétation urbaine constitue une fraction non négligeable des villes contemporaines. Elle peut prendre la forme d'arbres isolés, d'arbres d'alignement, d'associations de végétation basse et de massifs arbustifs et / ou arborés dans les parcs publics ou les jardins privés mais aussi de friches et de noues. Des enveloppes végétalisées innovantes nécessitant peu de maintenance se répandent également sur les toits plats et les façades. Les politiques d'aménagement urbain font aujourd'hui la promotion de la végétation en tant que stratégie d'atténuation des effets délétères du changement climatique sur le confort thermique des habitants, exacerbés par l'anomalie positive de température locale observée dans les villes vis-à-vis de la campagne environnante (ICU). Ainsi, on s'attend à une inversion de la tendance à la diminution des espaces verts en ville des décennies précédentes vers la conservation d'un équilibre nature / artificialisation pour maintenir la viabilité et l'attractivité des aires densément urbanisées. La préservation des services écosystémiques rendus par les espaces naturels est devenue une des préoccupations des acteurs de l'aménagement du territoire grâce aux études d'impact rendues obligatoires pour les grands projets.

La modélisation numérique du climat urbain fournit un outil puissant à destination à la fois des météorologues afin d'affiner leurs prédictions du temps et d'une communauté scientifique ou d'experts plus large (climatologues, urbanistes, hydrologues, spécialistes de la qualité de l'air) pour évaluer différentes stratégies d'aménagement urbain à court, moyen et long terme à l'aide d'arguments objectifs. Il est important d'intégrer la végétation urbaine dans les modèles s'intéressant au climat urbain pour reproduire correctement ses effets sur les processus radiatifs, énergétiques et aérodynamiques simulés.

2.1 Outils existants

2.1.1 Modèles à fine échelle

De nombreux modèles à fine échelle s'appuient sur une représentation réaliste des scènes urbaines, parfois modélisées par la construction de maquettes digitales rendant compte de l'agencement relatif des éléments urbains entre eux (Figure 2.1). Leur échelle caractéristique se situe entre 10^1 et 10^2 m, ce qui permet une définition fine de l'architecture du paysage urbain comprenant les bâtiments et les arbres. En général, les modèles de climat urbain à micro-échelle ont recours au maillage de la scène urbaine et sont capables de simuler un bilan en énergie et en eau propres à chacune des cellules. Ces petites échelles se prêtent à l'étude des écoulements des masses d'air dans la rue grâce aux modèles dits de mécanique des fluides numérique (ou *Computational Fluid Dynamics*, CFD), très coûteux en temps de calcul. Ceux-ci sont utiles à l'évaluation de la dispersion de polluants au travers de la matrice urbanisée faite de couloirs de passage (rues) et d'obstacles, poreux (arbres) ou non (murs). En revanche, d'autres processus à méso-échelle discutés ensuite sont mal

représentés.

Quelques exemples de modèles à fine échelle du micro-climat en ville sont décrits par la suite. ENVI-met résout explicitement chaque élément qui compose l’environnement urbain en distinguant les bâtiments, les surfaces au sol artificielles ou naturelles, la végétation et l’air. Les coefficients d’absorption du rayonnement par la végétation (basés sur une formulation exponentielle) sont calculés pour chacun des niveaux verticaux, en respectant le profil de *Leaf Area Density* (LAD, en $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$). ENVI-met est incapable de prédire le refroidissement des surfaces par mélange mécanique des sites très exposés au soleil et au vent (NICE, ISAAC et al., 2012). SOLWEIG simule les flux 3D de rayonnement solaire et IR à partir d’une description de la ville par coordonnées (x,y) et hauteur associée. Par le biais du calcul de la température moyenne radiante, la principale application du modèle est de produire des cartes de confort thermique (LINDBERG, HOLMER et THORSSON, 2008). Néanmoins le bilan en eau (et donc le flux d’évapotranspiration) est négligé. Le modèle SOLENE-microclimat (basé sur le modèle radiatif SOLENE) est capable de représenter les caractéristiques évaporative, d’ombrage et d’isolation des façades et des toits végétalisés, modélisés comme des surfaces (MALYS, 2012). Les arbres sont simulés comme des volumes poreux dans le modèle d’écoulement des masses d’air et comme des houppiers semi-transparentes dans le modèle radiatif; le bilan d’énergie (des flux évaporatif, convectif et de rayonnement) étant couplé à ces modèles (ROBITU et al., 2006). Cet équilibre permet l’évaluation des températures de l’air et des feuilles.

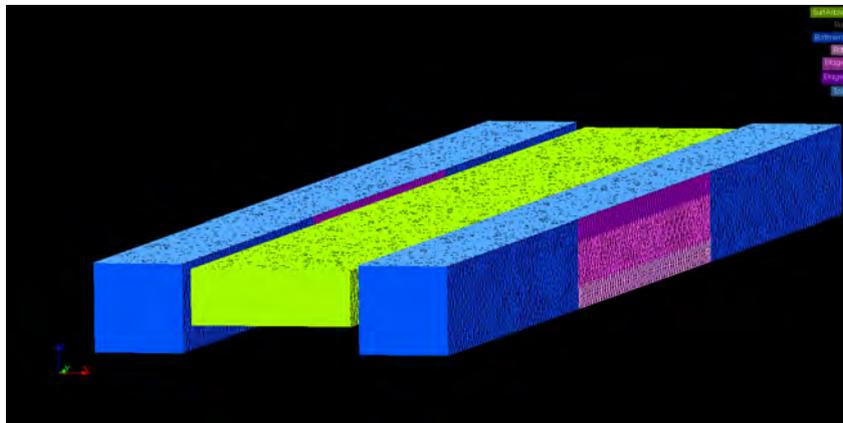


FIGURE 2.1 – Vue d’une scène urbaine composée de deux bâtiments à toit plat identiques se faisant face, d’une route et d’une rangée d’arbres centrée dans la rue, dont le houppier couvre 90 % de la largeur de la rue (représenté par un parallélépipède). Cette maquette digitale est visualisée grâce à l’outil ParaView. Elle a été produite dans le cadre de l’exercice de comparaison des simulations du bilan en énergie solaire absorbée entre SOLENE et TEB présenté dans le Chapitre 4 de ce manuscrit.

2.1.2 Modèles méso-échelle

La constatation de l'existence d'un micro-climat particulier au sein des villes a généré la création d'un nouveau pan en sciences, celui de la climatologie urbaine. D'après ARNFIELD (2003), l'étude du climat urbain durant les deux dernières décennies s'est concentrée sur deux aspects. Premièrement, elle s'est attachée à comprendre les processus climatiques spécifiques à la ville en relation avec la turbulence atmosphérique et les échanges en énergie et en eau qui lui sont propres. Pour cela, elle considère des longueurs caractéristiques de 10^1 à 10^4 m afin d'englober des motifs élémentaires, depuis les rues jusqu'aux quartiers. Cette échelle est cruciale pour saisir les particularités climatiques du paysage urbain. Le second aspect, s'appuyant sur le premier, s'intéresse à comprendre le phénomène d'îlot de chaleur urbain, une manifestation de la modification anthropique du climat. Sur la base de descriptions et de mesures, un corpus théorique relevant de la micro-météorologie de la canopée urbaine s'est enrichi, permettant le développement d'outils de modélisation prédictifs (Tim R OKE, 2006).

Jusqu'à récemment, très peu de modèles de climat urbain étaient capables de prendre en compte les sols naturels et la végétation. Ce fait constitue une limitation significative de la modélisation des échanges radiatifs et énergétiques dans les environnements urbains, d'après les résultats de l'exercice d'intercomparaison des modèles urbains réalisée par C. S. B. GRIMMOND et al. (2011). La plupart des modèles méso-échelle qui incluent déjà la végétation est basée sur l'approche par tuile qui consiste à traiter séparément les surfaces imperméables et naturelles avec des paramétrisations distinctes et sans interactions micro-échelle entre la végétation et les éléments bâtis (Figure 2.2). Cependant, un important effort a été conduit ces dernières années afin d'améliorer la représentation des processus physiques en relation avec la présence de végétation dans les modèles de climat urbain. Les zones de banlieue et quartiers résidentiels sont caractérisées par une végétation abondante (tous types confondus) alors que les arbres sont prédominants en ville. Cette particularité appartenant à la plupart des villes a motivé l'intérêt d'un perfectionnement des simulations du microclimat urbain sur ce type de domaine. KRAYENHOFF, CHRISTEN et al. (2014) présentent une revue exhaustive de la littérature sur les modèles existants et leurs caractéristiques.

Un grand nombre d'approches est aujourd'hui appliqué pour implémenter la végétation haute et son implication dans les calculs d'échanges radiatifs et énergétiques. Parmi les modèles à simple couche avec schéma de végétation intégré, S.-H. LEE et S.-U. PARK (2008) furent les premiers à traiter les effets des arbres dans les canyons urbains dans leur modèle végétalisé de canopée urbaine (VUCM). La couche de feuillage est explicitement représentée au milieu du canyon au-dessus du sol. Elle est caractérisée par une fraction de recouvrement, une épaisseur et un profil vertical de densité de surface foliaire (LAD en $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$). Les troncs sont présumés transparents, comme c'est souvent le cas dans les modèles de végétation.

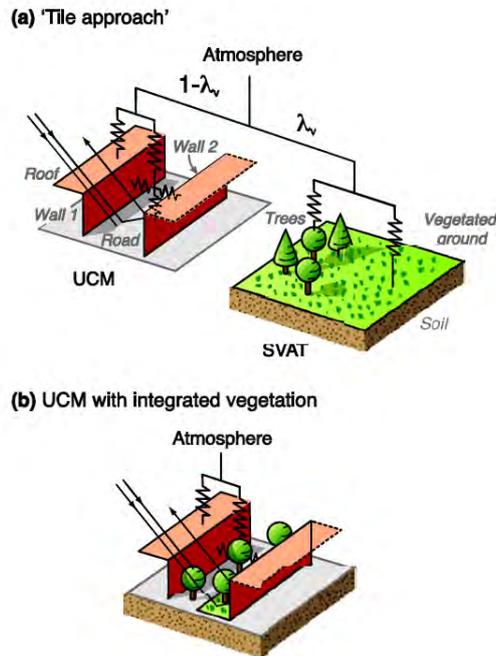


FIGURE 2.2 – Interactions indirectes (à travers le modèle atmosphérique) entre les surfaces imperméables et les couverts naturels avec l’approche en mosaïque ou tuiles (a) comparé à des interactions directes bâtiments / végétation avec une approche intégrée de la modélisation de la végétation urbaine (b). UCM : modèle de climat urbain. SVAT : schéma de transfert sol - végétation - atmosphère. Source : KRAYENHOFF, CHRISTEN et al. (2014)

Le bilan radiatif est calculé pour le rayonnement de courte longueur d’ondes (composantes directe et diffuse) en considérant les effets d’ombrage des arbres sur les bâtiments, ainsi que les réflexions multiples et le rayonnement IR avec une réflexion. L’hypothèse de réflectance lambertienne est appliquée en considérant chaque élément du canyon comme une surface uniforme (avec un albédo, une émissivité et une température uniformes). Pour chacun d’eux, les facteurs de vue en relation avec les éléments environnants sont calculés au centre de la surface. L’atténuation du rayonnement par les feuilles est incluse dans les équations lorsque le rayonnement de courte ou longue longueur d’ondes traverse le feuillage. Cette atténuation dépend des propriétés de transmission du feuillage - inspirées par les travaux de YAMADA (1982) pour les canopées forestières - qui suivent une loi exponentielle basée sur le profil de LAD et d’un facteur de modulation dépendant du type de végétation. Plus récemment, YOUNG et al. (2015) ont développé et testé une paramétrisation similaire pour les arbres de rue (TURban) dans le modèle urbain monocouche de l’université de Reading (SCRUM, HARMAN et S E BELCHER, 2006 ; PORSON et al., 2009). La canopée arborée est explicitement décrite comme un rectangle situé au milieu du canyon et supposé plus bas que la hauteur des bâtiments. Les facteurs de vue, pour les facettes entièrement

visibles ou partiellement occultées par la présence de feuillage, sont calculés d’une manière analytique, basée sur la construction des cordes croisées de Hottel (HOTTEL, 1954). Le modèle implémenté par RYU et al. (2015) considère deux arbres explicites et symétriques à couronne circulaire. L’algorithme de Monte Carlo développé par Z.-H. WANG (2014) est exécuté une fois au début de la simulation et subséquemment transformé en relations simples pour déterminer les facteurs de vue pour lesquels les arbres sont impliqués. Les échanges de rayonnement en courtes et grandes longueurs d’ondes, mais aussi les échanges de chaleur sensible et latente et les prélèvements d’eau par les racines, sont représentés.

BEP-Tree est le premier modèle multi-couches d’échanges d’énergie et d’écoulements urbains à l’échelle du quartier qui inclut les arbres et, à la fois, leurs propriétés radiatives (KRAYENHOFF, CHRISTEN et al., 2014) et leurs effets aérauliques (KRAYENHOFF, SANTIAGO et al., 2015). Les facteurs de vue sont également calculés en utilisant l’approche de tracé de rayons de Monte Carlo. La distribution en groupe des couronnes d’arbres est prise en compte à travers un unique facteur d’agrégation pour toute la végétation du canyon. La canopée arborée peut être présente à l’intérieur du canyon mais aussi au-dessus du canyon et au-dessus des toits.

Pour les Simulations de Grande Échelle (SGE, soit LES, *Large Eddy Simulation*) en environnement urbain, un modèle végétalisé de canopée urbaine a été intégré par TAVARES, Isabelle CALMET et DUPONT (2015) dans le modèle ARPS. Cette version ARPS-VUC distingue la canopée arborée des sols naturels et de la végétation au sol. Si les calculs radiatifs sont plutôt simples les processus aérodynamiques sont quant à eux décrits de manière exhaustive et précise. Le flux de rayonnement net décroît exponentiellement depuis le sommet de la canopée urbaine jusqu’au sol selon la densité de canopée, qui inclut à la fois les arbres et les bâtiments.

2.2 TEB, un modèle de ville multi-couches intégrant la végétation urbaine

2.2.1 Version historique du modèle TEB

Le modèle TEB (*Town Energy Budget*) a été développé à la fin des années 90 à Météo France (V. MASSON, 2000). L’ambition était à l’époque de simuler des îlots de chaleur urbains dans la modélisation météorologique à l’échelle kilométrique, ainsi que les impacts des surfaces urbanisées sur la structure verticale de la couche limite atmosphérique (Aude LEMONSU et Valéry MASSON, 2002).

2.2.1.1 Concept général du modèle

Le modèle TEB répond au besoin de représentation physique des zones urbanisées et de leurs spécificités en termes de processus radiatifs, énergétiques, aérodynamiques et hydrologiques au sein des modèles de surface. Le schéma physique du modèle est relativement complet en termes de processus bien que basé sur une représentation simplifiée du tissu urbain. Il repose sur une approche du type «rue canyon», infiniment longue et sans intersection (A. LEMONSU, C. S. B. GRIMMOND et V. MASSON, 2004 ; V. MASSON, 2000), qui consiste à décrire une zone urbaine (ou quartier) homogène par un canyon moyen composé d'une surface au sol bordée par deux bâtiments à toit plat de même hauteur (Figure 2.3). Ce canyon est décrit par un jeu de paramètres géométriques moyens (Tableau 2.1) : fraction de recouvrement des bâtiments (f_{bld}) (la fraction résiduelle est supposée être la route), hauteur moyenne des bâtiments (h) et densité surfacique de murs (r_w). On peut noter que ces paramètres sont utilisés dans TEB pour définir le rapport d'aspect du canyon, i.e. le rapport entre la hauteur des bâtiments et la largeur des rues h/W , selon une formulation empirique :

$$\frac{h}{W} = \frac{\frac{1}{2}r_w}{1 - f_{bld}} \quad (2.1)$$

TABLE 2.1 – Principaux paramètres descriptifs du canyon urbain dans le modèle TEB. Les paramètres suivis par un astérisque sont les données d'entrée prescrites par l'utilisateur, les autres sont calculés par le modèle, découlant des paramètres d'entrée.

Paramètre	Symbole	Unité
Fraction de recouvrement des bâtiments*	f_{bld}	–
Fraction de recouvrement des routes	f_{road}	–
Hauteur moyenne des bâtiments*	h	m
Densité surfacique de murs*	r_w	–
Rapport d'aspect du canyon	h/W	–
Albédo (toit, murs, route)*	$\alpha_R, \alpha_w, \alpha_r$	–
Émissivité (toit, murs, route)*	$\epsilon_R, \epsilon_w, \epsilon_r$	–
Capacité calorifique des couches de matériau (toit, murs, route)*	C_R, C_w, C_r	$\text{kJ K}^{-1} \text{m}^{-3}$
Conductivité thermique des couches de matériau (toit, murs, route)*	$\lambda_R, \lambda_w, \lambda_r$	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$

Le toit, les murs et la route sont caractérisés par leurs propriétés radiatives et thermiques selon les couches de matériaux de construction : albédo et émissivité sont prescrits pour le revêtement extérieur de chaque type de surfaces ; la conductivité et la capacité thermiques sont définis pour l'ensemble des couches de matériaux composant les bâtiments et les routes.

Le nombre de couches de matériaux constituant les éléments du canyon et leurs propriétés associées sont prescrites par l'utilisateur, de sorte que TEB peut simuler différents types de constructions, et intégrer notamment des couches d'isolation.

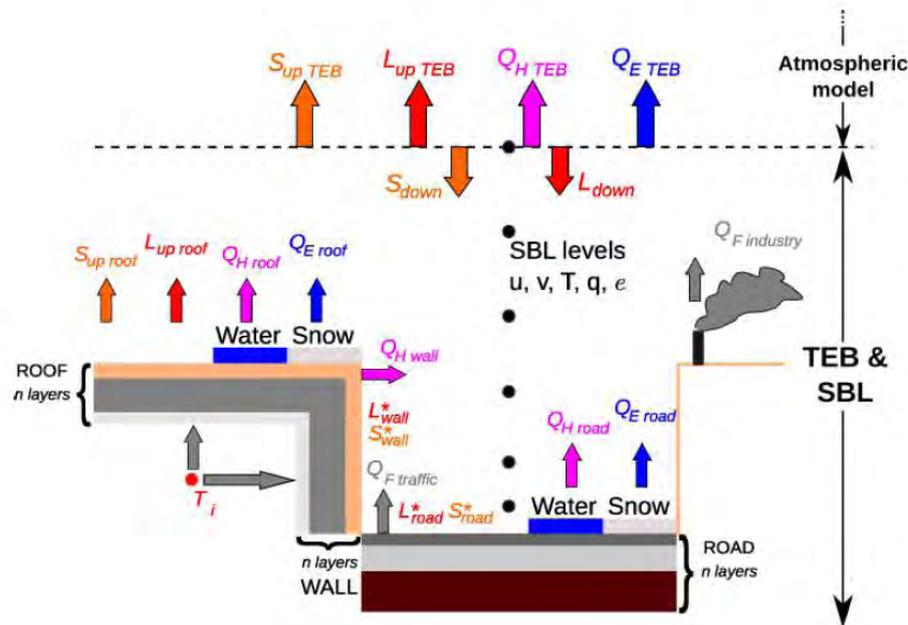


FIGURE 2.3 – Représentation des termes des bilans radiatif, thermique et énergétique au sein du schéma générique de rue canyon dans TEB et interactions avec un modèle atmosphérique dans le cas d'un couplage. Source : Météo France

2.2.1.2 Modélisation des processus physiques

Le bilan radiatif est calculé pour chaque surface composant le canyon. Les calculs radiatifs tiennent compte des effets d'ombrage dus à la géométrie du canyon ainsi que du piégeage radiatif des rayonnements solaire et infrarouge. Ces calculs sont résolus dans un plan qui traverse le canyon selon un axe perpendiculaire à la direction de la rue. Deux principales options sont disponibles : (1) l'hypothèse d'une orientation isotrope des rues est appliquée et dans ce cas, le bilan radiatif est calculé par intégration sur toutes les orientations et les murs sont gérés ensemble, comme une surface composite caractérisée par une température moyenne (V. MASSON, 2000); ou (2) une orientation de rue est prescrite, et les deux murs du canyon (mentionnés comme mur A et mur B) sont alors gérés séparément (A. LEMONSU, V. MASSON et al., 2012).

Une température moyenne est définie pour chaque surface (toit, route, murs) et un bilan

d'énergie est résolu : les flux de chaleur turbulents sont calculés en fonction du gradient de température et d'humidité entre la surface considérée et l'air ambiant (voir les détails dans le chapitre 3). La conduction et le stockage de chaleur dans le toit, les murs et la route sont quant à eux calculés grâce à la résolution d'une équation de conduction de chaleur.

Des sources de chaleur et d'humidité liées aux activités anthropiques (trafic routier dans le canyon et activités industrielles) peuvent être prescrites sous la forme de flux de chaleur sensibles et latents additionnels.

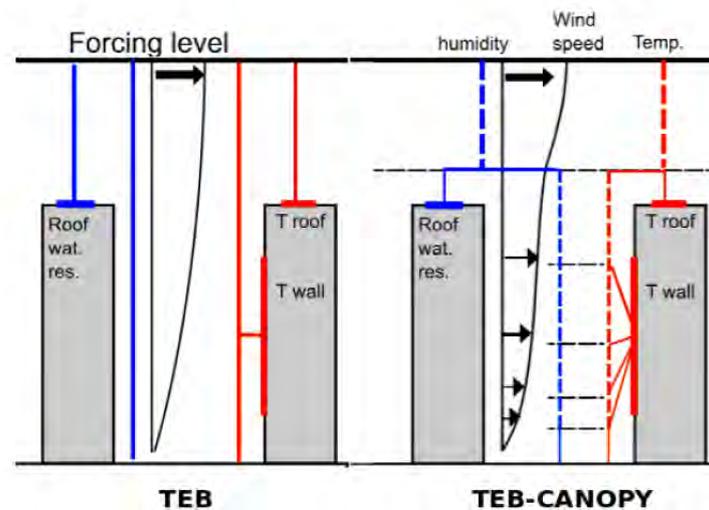


FIGURE 2.4 – Schéma du couplage entre la surface (TEB) et l'atmosphère sans (à gauche) ou avec (à droite) un modèle multi-couche (TEB-SBL). Dans le dernier cas, une force de traînée est appliquée sur le vent. Le profil de température dans le modèle multi-couches est influencé par les températures des surfaces au sol (route et jardins), des murs et du toit. Le profil d'humidité est influencé par les surfaces au sol (route et jardins) et le toit. Source : MASSON et al. (2013)

Le micro-climat dans le canyon (température, humidité, vent, turbulence) est initialement calculé en intégrant les interactions entre l'air du canyon et le bâti par une approche classique d'équation de quasi-équilibre pour les flux de chaleur, d'eau et de quantité de mouvement dans la rue. Un unique volume d'air aux conditions uniformes de température et d'humidité est décrit depuis le sol jusqu'au niveau de forçage. Afin d'améliorer la prédiction des champs météorologiques, une paramétrisation plus sophistiquée appelée TEB-SBL (pour *Surface Boundary Layer*) a été développée (Figure 2.4). Elle permet de résoudre la couche limite de surface entre la surface au sol du canyon et le sommet de la canopée urbaine (HAMDI et V. MASSON, 2008 ; Valéry MASSON et Yann SEITY, 2009) et de calculer le profil vertical des variables microclimatiques dans le canyon.

2.2.2 Amélioration de TEB pour l'énergétique et le confort

Le modèle TEB s'est enrichi de nouvelles paramétrisations concernant les systèmes de végétalisation (détaillés dans la section 2.2.3), l'énergétique du bâtiment et le confort thermique dans l'espace intérieur et dans les rues (Figure 2.5).

2.2.2.1 Modèle d'énergétique du bâtiment

Un modèle d'énergétique du bâtiment (*Building Energy Model*) a été intégré au schéma TEB par BUENO et al. (2012). Le modèle calcule le bilan d'énergie interne du bâtiment en ne considérant qu'une unique zone thermique pour laquelle l'inertie thermique des composants du bâtiment est assimilée à une seule masse.

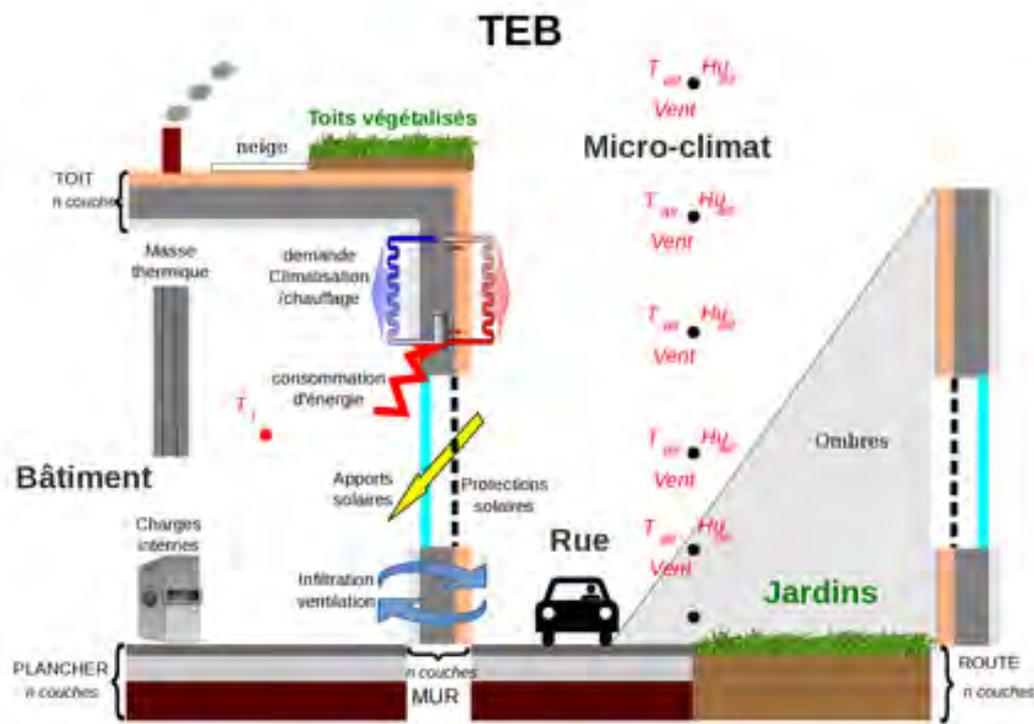


FIGURE 2.5 – Illustration du schéma conceptuel de TEB et quelques unes de ces options. Source : www.urban-modelling.com

Cette nouvelle paramétrisation des bâtiments comprend les processus suivants :

- Apport de chaleur par la transmission du rayonnement solaire à travers le vitrage, en appliquant un ratio de surface vitrée / surface de mur uniforme sur toutes les façades.

La pénétration du rayonnement peut par ailleurs être modulée par la simulation de protections solaires passives telles que des volets ou des stores ;

- Conduction de chaleur au travers de l’enveloppe du bâtiment ;
- Échanges de masses d’air par infiltration ou ventilation ;
- Réchauffement de l’air par l’effet de charges internes selon les équipements présents dans le bâtiment.

Le fonctionnement des systèmes de climatisation et de chauffage peut également être activé, de sorte que TEB est désormais capable d’estimer la demande énergétique des bâtiments liée à l’usage de la climatisation et du chauffage en fonction des températures de consigne prescrites par l’utilisateur, et de prendre en compte les rejets de chaleur ou de vapeur d’eau vers l’extérieur associés au fonctionnement de ces équipements.

Malgré une description simplifiée des bâtiments et des équipements (donnant néanmoins des résultats tout à fait acceptables selon PIGEON, ZIBOUCHE et al. (2014)), cette modélisation présente l’avantage de considérer les interactions entre le microclimat dans la rue et dans le bâtiment. Il est de cette façon possible d’évaluer les impacts d’aménagements extérieurs sur l’ensoleillement et la température dans le bâtiment et la consommation d’énergie, et inversement d’évaluer les effets de rétroaction de l’usage de la climatisation ou du chauffage sur la température de l’air dans la rue (Cécile de MUNCK, 2013).

2.2.2.2 Indices de confort thermique

Un diagnostic de confort thermique a également été implémenté dans TEB (PIGEON, 2011). Cet indice appelé *Universal Thermal Climate Index* (UTCI, www.utci.org) exprimé comme une température équivalente (en °C) combine diverses variables météorologiques (rayonnement, température de l’air, humidité, vitesse du vent) avec un modèle de thermo-régulation du corps humain (FIALA et al., 2012), simplifié ici sous la forme d’une équation de régression polynomiale élaborée et validée par BRÖDE et al. (2012). Cette équation a été implémentée dans TEB pour calculer l’UTCI selon trois situations (voir Figure 2.6) : (1) une personne dans la rue au soleil, le bilan thermique tenant compte de la température et l’humidité de l’air dans le canyon, du vent, ainsi que la somme des rayonnements solaire et IR reçus ; (2) une personne dans la rue à l’ombre des bâtiments, pour laquelle on ne tient pas compte du rayonnement solaire direct ; et enfin (3) une personne dans le bâtiment, en tenant compte des conditions microclimatiques à l’intérieur. Les valeurs d’UTCI sont associées à une échelle de niveaux de stress thermiques, s’étendant d’un stress froid extrême à un stress chaud extrême, comme l’illustre la Figure 2.7.

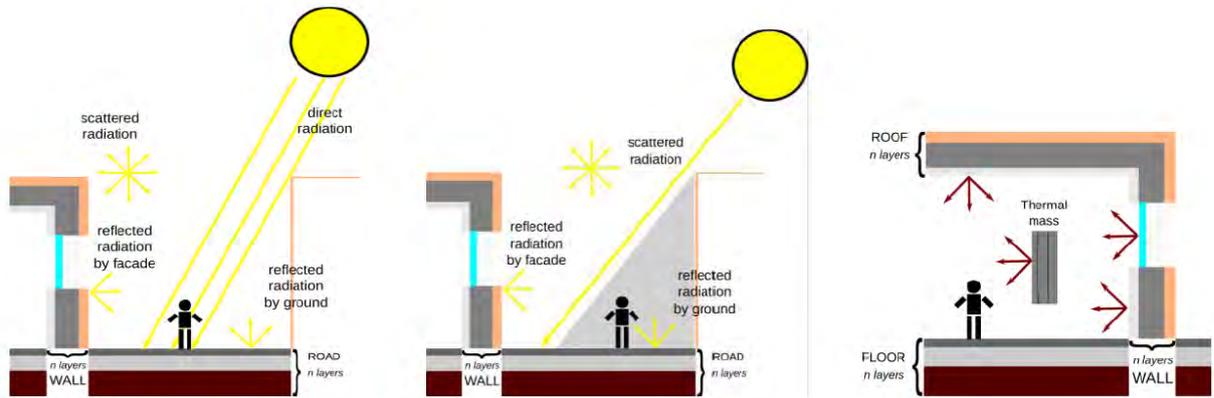


FIGURE 2.6 – Les trois environnements simulés dans TEB lors du calcul de l'UTCI. Source : PIGEON (2011)

Equivalent Temperature (°C)

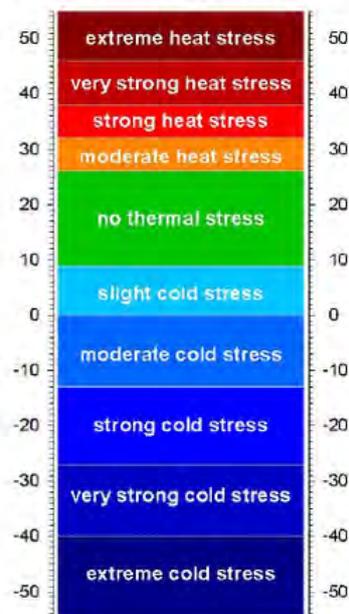


FIGURE 2.7 – Échelle de niveaux de stress thermique basée sur l'UTCI.

2.2.3 Modélisation de la végétation urbaine

2.2.3.1 Limites de la version historique

L'intercomparaison de modèles de climat urbain réalisée par C. GRIMMOND, BLACKETT et al. (2010) a mis en évidence les meilleures performances des modèles de ville intégrant la végétation urbaine pour la modélisation des échanges thermo-radiatifs et énergétiques dans les tissus urbains mixant les aires bâties et la végétation tels que les quartiers résidentiels.

Lors de cet exercice, la version originale du schéma urbain TEB (V. MASSON, 2000) ne permettait de traiter que les surfaces bâties. Dans cette configuration, TEB devait être associé au schéma Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère (ISBA, NOILHAN et PLANTON, 1989) dédié aux surfaces naturelles selon une approche «mosaïque» ou par «tuile», i.e. les deux modèles tournent sur une maille du domaine de simulation de façon indépendante (sans interactions entre modèles), pour calculer les variables microclimatiques et les flux d'énergie. Les résultats sont ensuite agrégés au moyen d'une pondération en fonction des surfaces respectives d'occupation dans la maille. Cette approche «mosaïque» présente l'inconvénient de traiter la fraction de couverts naturels à l'extérieur du canyon donc sans tenir compte des effets d'ombrage des bâtiments sur la végétation, et en contre-partie de modéliser un canyon urbain trop étroit dans TEB. Les interactions radiatives à micro-échelle entre végétation urbaine et bâti sont négligées, ainsi que l'impact de la végétation sur le microclimat dans le canyon (notamment au travers de l'évapotranspiration) et inversement l'effet du microclimat urbain sur les échanges énergétiques des couverts naturels.

2.2.3.2 Végétalisation du canyon dans TEB

Les limitations de l'approche «mosaïque» ont motivé le développement d'une nouvelle version du modèle par les travaux de A. LEMONSU, V. MASSON et al. (2012) pour intégrer explicitement la végétation urbaine dans le canyon entre les bâtiments, ainsi que leurs interactions (Figure 2.8). L'environnement urbain complexe est désormais caractérisé par quatre éléments distincts : le toit et les murs d'une part, et pour les surfaces au sol d'autre part, une combinaison de surfaces imperméables et naturelles désignées comme la route et le jardin, respectivement (Figure 2.8). La description des surfaces naturelles dans TEB est présentée dans le Tableau 2.2.

Concernant les couverts naturels, les échanges radiatifs et énergétiques avec l'atmosphère, aussi bien que les processus hydrologiques et thermiques dans le sol, sont paramétrés avec le modèle ISBA (NOILHAN et PLANTON, 1989). Ces couverts sont décrits dans le modèle ISBA comme une agrégation du sol nu, de la végétation basse (pelouse) et de la végétation haute (arbres), caractérisés par des propriétés descriptives et physiologiques

composites qui sont calculées à partir des propriétés des différents types de couverts naturels. Elles intègrent l'albédo et l'émissivité (selon la proportion de sol nu et de végétation), l'indice surfacique foliaire ou LAI (pour *Leaf Area Index*), la résistance stomatique, la longueur de rugosité, et la hauteur des arbres.

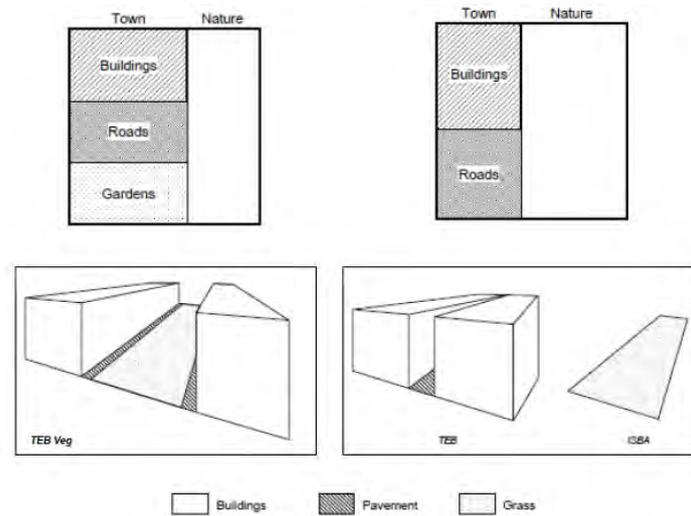


FIGURE 2.8 – Schéma illustrant les différences conceptuelles et géométriques entre l'approche intégrée TEB-Veg à gauche et l'approche en mosaïque TEB-ISBA à droite. Source : D'après A. LEMONSU, V. MASSON et al., 2012

TABLE 2.2 – Paramètres descriptifs complémentaires, ajoutés dans TEB pour la prise en compte de la végétation dans le canyon.

Paramètre	Symbole	Unité
Fraction de recouvrement des jardins	f_{garden}	–
Proportion de sol nu dans les jardins	δ_{nv}	–
Proportion de végétation basse dans les jardins	δ_{lv}	–
Proportion de végétation haute dans les jardins	δ_{hv}	–
Hauteur de la végétation haute	h_t	m
Indice foliaire de la végétation basse	LAI_{lv}	$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$
Indice foliaire de la végétation haute	LAI_{hv}	$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$

Cette nouvelle configuration de modélisation du canyon urbain permet d'intégrer explicitement les jardins dans le bilan radiatif du canyon. Les rayonnements solaire et infrarouge absorbés par les couverts naturels sont calculés en tenant compte des effets d'ombrage et des inter-réflexions dans le canyon, et les émissions IR des jardins interviennent dans les calculs des échanges radiatifs entre surfaces. Le bilan d'énergie des jardins, bien que résolu par ISBA, repose sur les conditions microclimatiques de vent, de température et d'humidité

au sein du canyon et non plus au-dessus de la canopée comme précédemment. Réciproquement, les paramètres microclimatiques dans le canyon sont calculés en tenant compte des contributions de la végétation.

Notons que sur la base de cette approche intégrant la physique du modèle ISBA dans le modèle urbain TEB, un module de toitures végétales extensives a également été développé par Cécile de MUNCK (2013) afin de simuler les interactions entre les bâtiments, la végétation sur les toits, et l'atmosphère au-dessus. La toiture végétale intègre un compartiment de végétation en interaction avec l'atmosphère, une couche de substrat et une couche de drainage. Cette structure est couplée au toit structural à travers la conduction de chaleur entre l'enveloppe externe du bâtiment et la couche en contact, c'est à dire la couche de drainage ou de rétention d'eau (Figure 2.9).

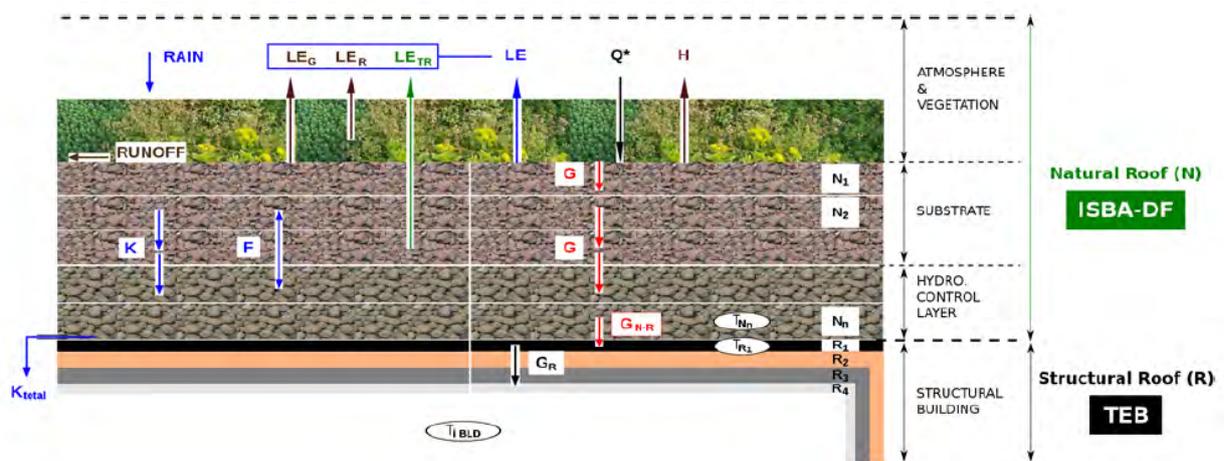


FIGURE 2.9 – Architecture de toiture végétalisée pour TEB-GREENROOF et processus physique associés.

2.2.3.3 Résultats de modélisation

Dans l'étude de A. LEMONSU, V. MASSON et al. (2012), la configuration initiale sans couplage TEB-ISBA et la nouvelle version TEB-Veg ont été confrontées à des données expérimentales issues d'une campagne de terrain conduite en Israël en 2007 (SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL, 2009). Des mesures *in situ* de paramètres microclimatiques et d'évapotranspiration ont été réalisées dans une cour bordée de bâtiments, très proche du concept de «canyon» appliqué dans TEB. La surface au sol est composée pour 80 % de gazon et 20 % de surface artificielle.

La Figure 2.10 présente les comparaisons entre les deux versions du modèle et les obser-

vations. Elle 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, dans le cas de l'agencement combinant pavement et pelouse. 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, avec pour conséquence une meilleure simulation de l'évapotranspiration (A. LEMONSU, V. MASSON et al., 2012). 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 l'humidité de l'air, on n'observe pas d'amélioration significative avec la version TEB-Veg. Les deux versions sous-estiment le transfert d'humidité entre la surface et l'atmosphère à l'intérieur du canyon.

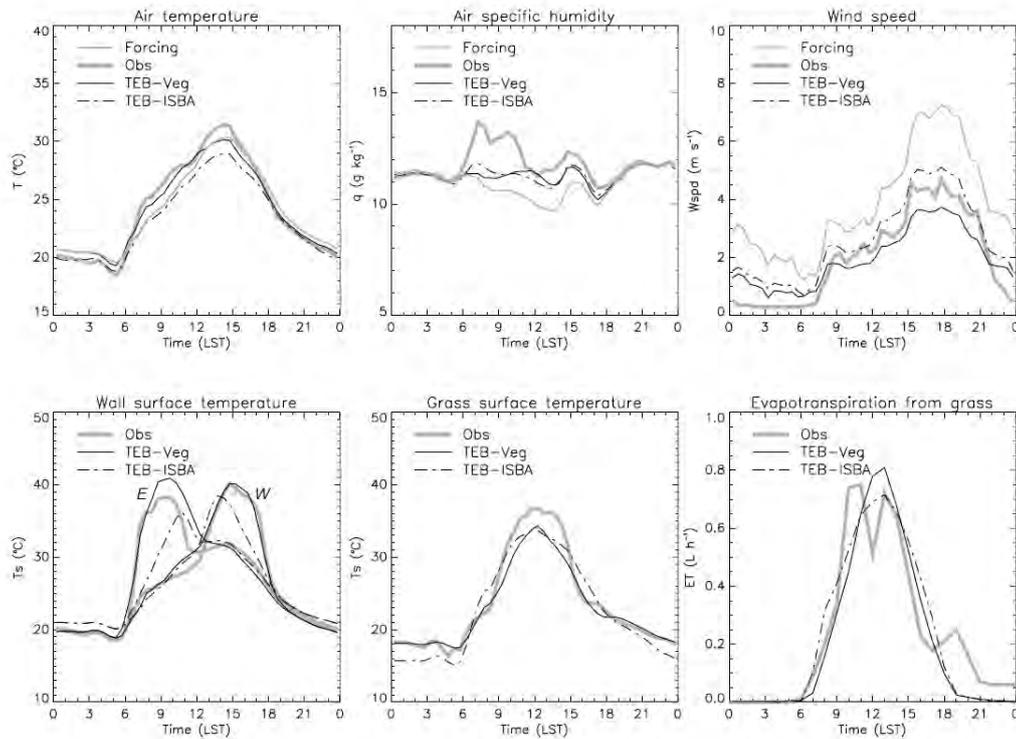


FIGURE 2.10 – Comparaison des simulations TEb-Veg et TEb-ISBA (courbes noires) avec les observations collectées à l'intérieur de la cour instrumentée, aménagée avec de la pelouse (courbes grises). Les forçages météorologiques (température et humidité de l'air, vitesse du vent) ont été enregistrés à 10 m au-dessus du sol. Les mesures de température de surface des murs ont été réalisées par façade, sur le mur exposé à l'est et celui à l'ouest. Source : A. LEMONSU, V. MASSON et al. (2012)

Différentes stratégies de végétalisation ont été évaluées dans le cadre du projet MUS-CADE en ayant recours à TEB (C. de MUNCK et al., 2017) : des stratégies de pleine terre avec divers degrés de recouvrement des surfaces urbaines non occupées par du bâti (25 %, 50 % et 75 %) soit avec de la végétation basse soit avec un mixte composé à 40 % d'arbres, des stratégies de systèmes végétalisés pour toitures (irrigués ou non) ainsi qu'une combinaison maximale. Cette étude a été réalisée en appliquant les conditions climatiques rencontrées lors de la canicule de 2003 à Paris et une température de consigne de 26 ° C pour le système de climatisation, conforme à la RT 2012 (norme française de performance énergétique des bâtiments).

Les cartes d'anomalie de température de l'air nocturne révèlent un impact limité du rafraîchissement induit par les toitures végétalisées. En revanche, leur pouvoir isolant réduirait la consommation énergétique liée à l'usage de la climatisation de 12 % sur l'ensemble de la période de canicule, à condition qu'elles soient irriguées. D'autre part, il a été démontré que l'augmentation du taux de végétalisation ainsi que l'introduction de végétation haute sont corrélés à un pouvoir de rafraîchissement plus élevé. À fractions de recouvrement égales, la stratégie de végétalisation mixte se révèle être nettement plus efficace que la végétalisation basse (Figure 2.11).

Une réduction sensible du temps subi en stress thermique très élevé durant la journée par la végétalisation de pleine terre est prédite, jusqu'à une heure en moins en présence d'arbres. Pourtant, cette version n'incluait pas encore les effets tels que l'interception du rayonnement par le feuillage, la superposition de fractions de végétation basse et haute, le refroidissement simultané de la température de l'air et de la température au sol et la libération d'humidité dans la rue au niveau de la canopée. On peut donc s'attendre à ce que ces résultats aient sous-estimé l'effet d'*oasis* de ce type de couverture végétale.

La figure 2.12 illustre l'impact des différentes stratégies testées sur la diminution de la consommation énergétique d'une part, et de la consommation en eau associée d'autre part. Sachant qu'un protocole standard d'irrigation a été appliqué il est difficile d'évaluer les besoins réels en eau de la végétation. À fractions de recouvrement et utilisation de la ressource en eau égales, les arbres dissipent l'énergie par évapotranspiration de manière plus efficace. Ainsi, l'introduction de végétation haute permet de réaliser des économies d'énergie supérieures à celles induites par la végétation basse. En effet, la canopée arborée est caractérisée par une densité foliaire plus importante, répartie sur un gradient vertical. Elle est alimentée en eau du sol par un système racinaire dont l'exploration en profondeur est équivalente à l'ampleur du houppier au-dessus du sol.

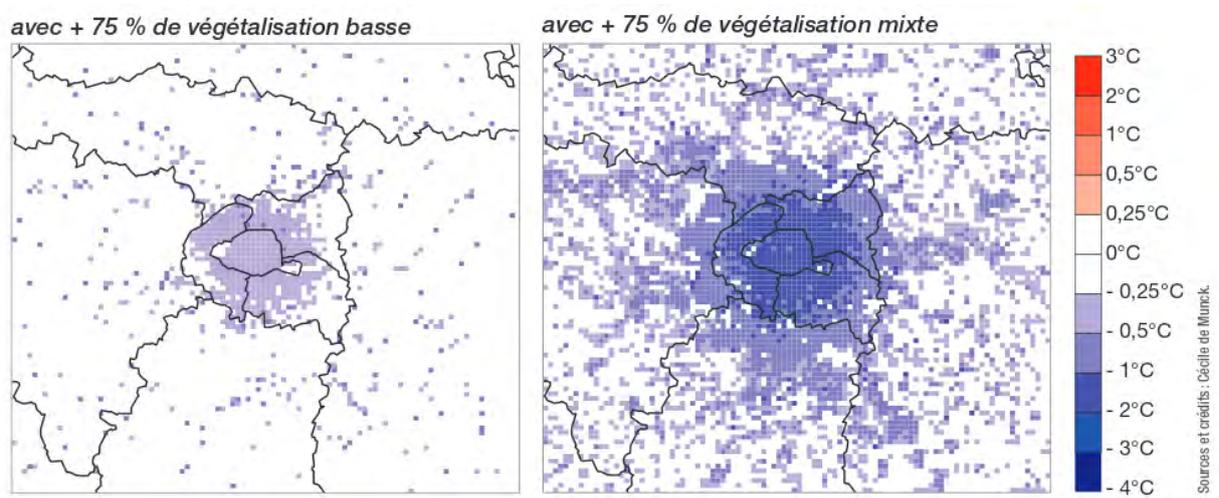


FIGURE 2.11 – Variations de température minimale nocturne dans les rues à 2 m du sol obtenues par la végétalisation de 75 % des surfaces disponibles au sol, avec de la végétation basse ou de la végétation mixte arborée. Source : DE MUNCK, C. AND LEMONSU, A. (2014)

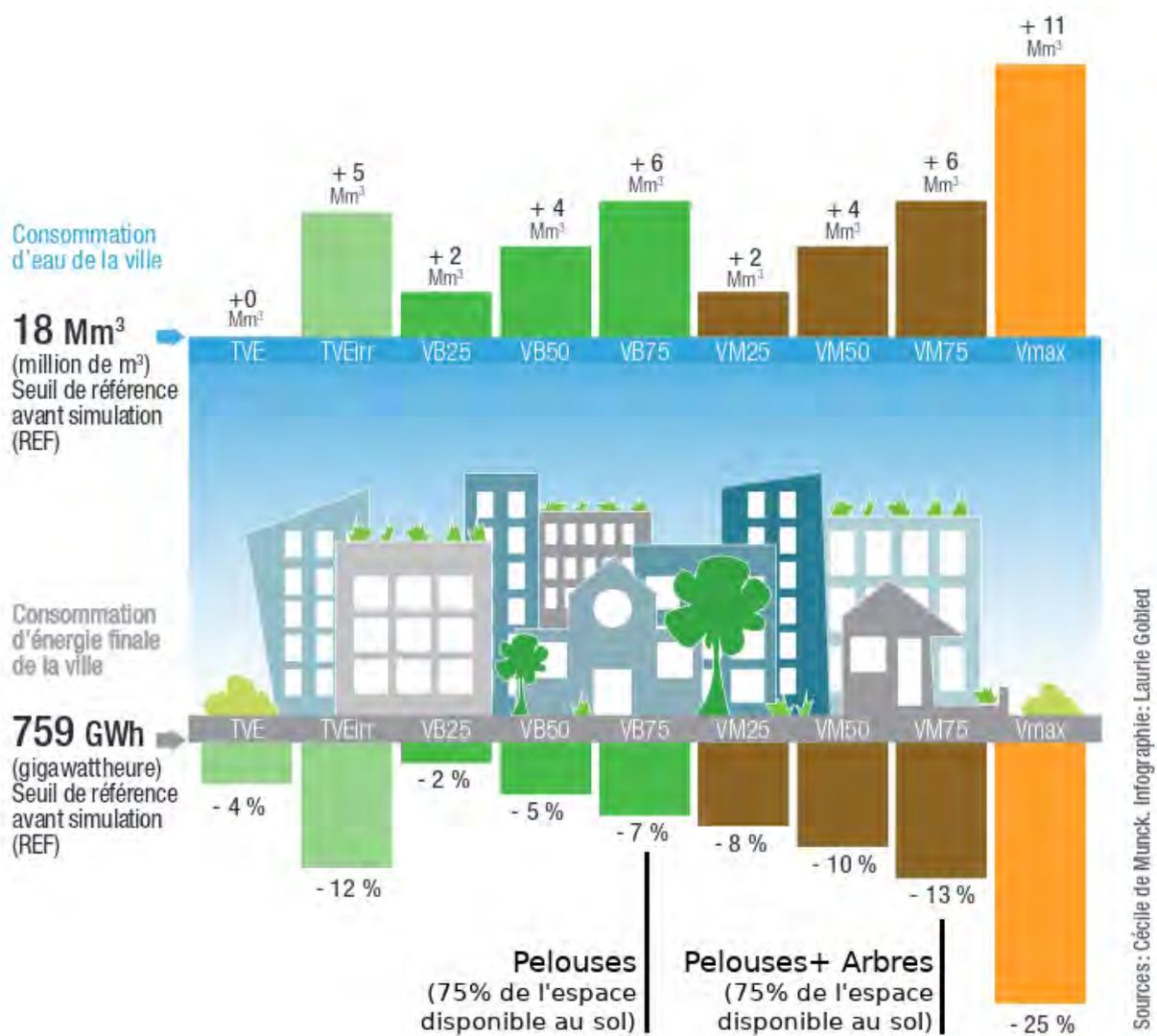


FIGURE 2.12 – Consommation d’eau et d’énergie pendant les 6 jours de canicule selon les scénarios de végétalisation. Source : DE MUNCK, C. AND LEMONSU, A. (2014)

2.2.3.4 Besoins d'amélioration de la modélisation de la végétation

Cette version de TEB intégrant explicitement les jardins à l'intérieur du canyon est basée sur deux simplifications majeures. Premièrement, il n'y a pas d'arrangement spatial explicite du jardin dans le canyon. Ils sont uniquement représentés comme une fraction de recouvrement de la surface au sol du canyon. Mais surtout, la strate végétale, même si elle peut comprendre des arbres à travers la définition des propriétés physiologiques, est toujours placée au sol sans extension verticale. Ainsi les effets d'ombrage sur le sol et les murs liés à la présence de la végétation haute ne sont pas pris en compte, ce qui peut fortement impacter les conditions de confort thermique dans la rue, ainsi que la pénétration du rayonnement solaire dans les bâtiments au travers des vitrages, et donc indirectement les conditions dans les bâtiments et la consommation d'énergie. De plus, il n'y a pas de distribution verticale des échanges d'énergie turbulente entre la végétation et l'atmosphère, l'effet étant confiné près de la surface au sol du canyon. Sans compter que l'absence de recouvrement de la végétation haute sur la végétation basse entraîne une sous-estimation de la couverture végétale totale, et par conséquent de l'évapotranspiration. Enfin, les effets aérodynamiques des arbres sur l'écoulement des masses d'air et la vitesse du vent sont également négligés.

Première partie

Bilan radiatif de la végétation urbaine

Vers un nouveau schéma de transfert thermo-radiatif incluant les arbres

Sommaire

3.1	Principes généraux de la paramétrisation des échanges en énergie solaire dans TEB	48
3.2	Inclusion d'une strate arborée dans le schéma de transfert radiatif	49
3.2.1	Rayonnement solaire direct reçu par chaque élément	52
3.2.2	Rayonnement solaire diffus reçu par chaque élément	53
3.2.3	Absorption du rayonnement solaire par chaque élément avant réflexion	54
3.2.4	Rayonnement solaire total absorbé par chaque élément	54
3.3	Prise en compte des arbres dans les interactions en Infra-Rouge	56
3.3.1	Température de surface du feuillage de la végétation haute	56
3.3.2	Rayonnement Infra-Rouge absorbé par chaque élément	56

Ces travaux, présentés dans le présent chapitre et l'évaluation du Chapitre 4, ont fait l'objet d'une publication parue en 2017 dans la revue *Geoscientific Model Development* : REDON et al., 2017, annexée au manuscrit.

3.1 Principes généraux de la paramétrisation des échanges en énergie solaire dans TEB

La présente étude décrit les améliorations du calcul du bilan radiatif dans TEB pour l'implémentation d'une végétation haute explicite. Conséquemment, cette section est focalisée sur la description des échanges radiatifs dans la version initiale de TEB. La paramétrisation des processus de flux de chaleur turbulent et de conduction de chaleur, ainsi que le calcul de paramètres microclimatiques à l'intérieur du canyon, ne sont pas présentés ici mais sont détaillés par HAMDI et V. MASSON (2008), A. LEMONSU, C. S. B. GRIMMOND et V. MASSON (2004), A. LEMONSU, V. MASSON et al. (2012), V. MASSON (2000) et Valéry MASSON et Yann SEITY (2009).

Les bilans radiatifs pour les courtes et grandes longueurs d'ondes sont résolus dans TEB pour chaque élément composant le canyon urbain (toits, murs, route, végétation au sol, et maintenant canopée arborée) avec le but de déterminer l'énergie absorbée par chaque élément, cette énergie étant utilisée ensuite pour calculer le bilan d'énergie à la surface.

Plus spécifiquement pour le bilan radiatif en courtes longueurs d'ondes, trois contributions sont considérées pour un élément donné :

1. Le rayonnement solaire direct reçu avant toutes réflexions dépend de l'angle zénithal puisque le rayonnement incident direct est unidirectionnel, de l'orientation de la rue, et du rapport d'aspect du canyon.
2. Le rayonnement solaire diffus reçu avant toutes réflexions dépend du facteur de vue du ciel de l'élément considéré puisque le rayonnement diffus est considéré comme isotrope.
3. Finalement, le rayonnement courtes longueurs d'ondes total absorbé après les réflexions multiples à l'intérieur du canyon est calculé. Après une première réflexion sur un des éléments du canyon, les contributions initiales de rayonnement direct et diffus sont supposées isotropes et traitées de la même manière. La part de rayonnement reçu par un élément dépend du facteur de vue de tous les autres éléments et de leur albédo qui détermine la part réfléchi.

Bien que cette section se concentre sur la résolution et l'évaluation du bilan radiatif de

courtes longueurs d’ondes, il est intéressant de remarquer que la validation de notre schéma radiatif de courtes longueurs d’ondes contribue à vérifier notre schéma de grandes longueurs d’ondes. En effet, les mêmes facteurs de vue utilisés pour les réflexions multiples seront appliqués au calcul des interactions de rayonnement de grandes longueurs d’ondes à l’intérieur du canyon (Section 3.3.2).

3.2 Inclusion d’une strate arborée dans le schéma de transfert radiatif

Afin de prendre en compte la canopée arborée dans TEB, il est requis d’ajouter une nouvelle strate végétalisée sur le plan vertical, qui puisse ombrager la route, les murs et la végétation basse. Cette modification mène à des calculs radiatifs plus complexes, mais elle a été réalisée avec la préoccupation de préserver un certain niveau de simplicité et de limiter le nombre de paramètres d’entrée de TEB. Ceci a été motivé par le type d’applications qui sont conduites avec le modèle TEB, et plus généralement avec la plateforme de modélisation des surfaces continentales SURFEX (MASSON et al., 2013) dont TEB fait partie. Le système est fréquemment appliqué sur des domaines de plusieurs centaines de mètres à quelques kilomètres de côté et peut être lancé sur de longues périodes de temps, jusqu’à plusieurs années dans le cas d’études climatiques (DANIEL, LEMONSU et VIGUIÉ, 2016 ; LEMONSU et al., 2015 ; Aude LEMONSU, KOUNKOU-ARNAUD et al., 2013 ; C. de MUNCK et al., 2017, e.g.). Cela implique que les temps de calculs soient acceptables, et que les données urbaines d’entrée soient disponibles ou aisées à définir.

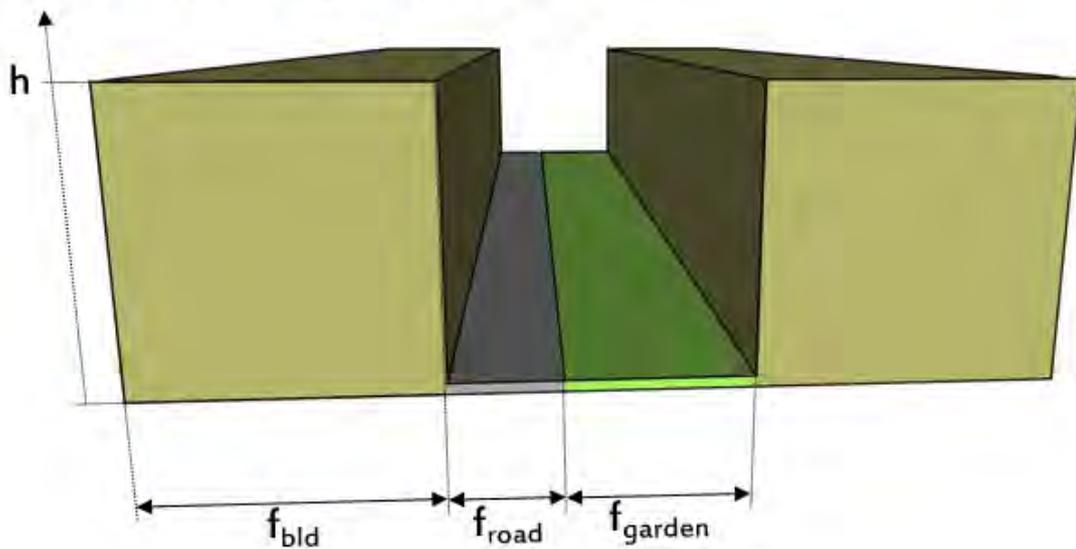
L’arrangement de la canopée arborée est ici décrite en utilisant trois paramètres seulement (Figure 3.1 et Tableau 2.2) : la fraction de recouvrement (δ_t), i.e. la proportion du canyon qui est couverte par la couche de feuillage sur le plan horizontal, la hauteur moyenne des arbres (h_t), et la hauteur moyenne des troncs (h_{tk}). Dans cette nouvelle version de TEB (qui sera intégrée dans la version officielle SURFEX v8.2), les arbres de rue sont supposés être moins hauts que les bâtiments environnants et systématiquement confinés à l’intérieur du canyon, de sorte qu’ils ne font pas d’ombre sur les toits. Cette hypothèse est cohérente avec les spécifications communes d’aménagement urbain pour la gestion des arbres de rue en Europe (BARCELONA CITY COUNCIL, 2011 ; CITY OF WESTMINSTER, 2009 ; MUNICIPALITY OF TOULOUSE, 2008). Ces documents assurent une juxtaposition satisfaisante des arbres avec les structures urbaines pour les citoyens. Des distances minimales entre les troncs ou les couronnes et les murs ou les balcons sont strictement imposées pour éviter certains problèmes, comme une obstruction excessive des couronnes en face de fenêtres, des ruptures des services souterrains par les racines ou une subsidence des bâtiments. Ces pratiques répandues sont aussi appliquées dans les jardins privés ou les zones péri-urbaines et tendent à éviter l’ombrage sur les toits même lorsque les arbres dépassent les bâtiments.

Les agencements où les arbres ombragent les toits sont statistiquement rares et leur impact sur le bilan de surface est limité. À ce stade, l'application de TEB à des quartiers de faible densité est restreint si les arbres peuvent significativement ombrager les toits. Ils sont probablement localisés à des hautes latitudes où les flux incidents sont plus faibles que dans les moyennes ou basses latitudes et ce biais potentiel se produirait seulement tôt le matin ou tard le soir, lorsque l'angle zénithal est grand mais que le flux de rayonnement solaire est loin d'être aussi énergétique qu'autour du midi solaire.

Pour l'instant, la forme du feuillage et la distribution verticale des feuilles ne sont pas définis comme paramètres d'entrée supplémentaires. Les couronnes des arbres sont considérées comme des parallélépipèdes rectangles avec un feuillage homogène qui est décrit par un indice foliaire ou *Leaf Area Index* (LAI_t) et un albédo (α_t). Il est cependant possible de faire varier le LAI durant l'année, afin de simuler le cycle saisonnier des arbres à feuilles caduques. La fraction de végétation haute est une combinaison de la somme des largeurs de couronnes dans le plan perpendiculaire à l'axe de la rue mais il tient également compte de la présence d'éventuelles trouées entre les couronnes le long de l'axe du canyon. Notons que les troncs ne sont pas pris en compte dans les calculs radiatifs. La couche arborée est considérée comme un élément partiellement transparent pour le rayonnement de courtes longueurs d'ondes. Une part du rayonnement incident reçu par les arbres est transmise à travers le feuillage. La part qui n'est pas transmise est par conséquent réfléchié ou absorbée, selon l'albédo.

Les équations relatives à l'implémentation d'une couche arborée dans le schéma de transfert radiatif du modèle TEB sont présentées ci-dessous. Les termes associés au bilan radiatif dans TEB seront décrits dans les trois sections suivantes. Premièrement, on détaillera la manière dont les flux de rayonnement solaire direct et diffus, respectivement, atteignent les surfaces du canyon. Puis, on montrera comment l'absorption totale est obtenue en résolvant séparément la première absorption de rayonnement solaire total sur chaque surface et la somme du rayonnement solaire absorbé après un nombre de réflexions infinies à l'intérieur du canyon.

a. Without explicit high vegetation



b. With explicit high vegetation

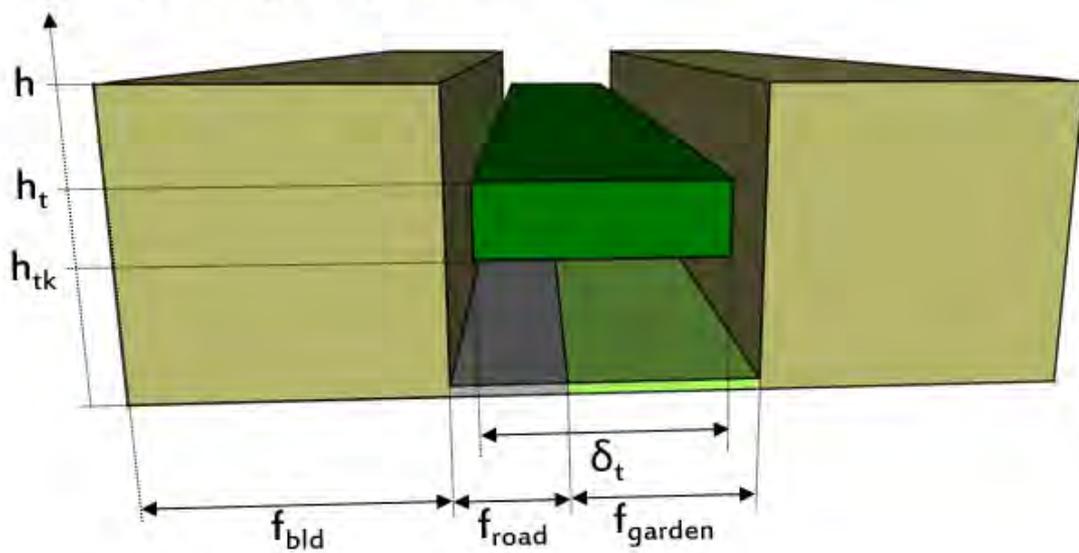


FIGURE 3.1 – Représentation schématique d'une rue canyon dans TEB, avec ou sans arbres.

3.2.1 Rayonnement solaire direct reçu par chaque élément

Le feuillage joue un rôle d'obstruction et d'atténuation du rayonnement solaire direct incident (S_t^\downarrow) pour les autres éléments du canyon urbain. Pour déterminer le rayonnement solaire direct reçu par chaque élément du canyon, on a donc besoin de résoudre en premier les équations liées à la végétation haute.

Le rayonnement solaire direct qui atteint potentiellement la cime des arbres (S_t^\downarrow) est calculé de manière géométrique en tenant compte des effets d'ombrage des bâtiments selon la hauteur des bâtiments (h), du rapport d'aspect du canyon (h/w), de l'orientation de la rue (θ_{can}), des angles zénithaux ou azimutaux (λ, θ_{sun}), et de la hauteur des arbres (h_t) :

$$S_t^\downarrow = S^\downarrow \max \left[0 ; 1 - \frac{h}{w} \left(\frac{h - h_t}{h} \right) \tan(\lambda) \sin |\theta_{sun} - \theta_{can}| \right] \quad (3.1)$$

Dans cette approche, le feuillage des arbres est supposé uniformément distribué sur la largeur du canyon à la hauteur des arbres (h_t). Comme expliqué précédemment, ce flux radiatif est partiellement transmis à travers le feuillage (S_t^{\gg}), alors que le rayonnement solaire restant est réfléchi (S_t^\uparrow) ou absorbé (S_t^*) :

$$S_t^\downarrow = S_t^{\gg} + S_t^\uparrow + S_t^* \quad (3.2)$$

La proportion de rayonnement solaire direct transmise à travers le feuillage est estimée par la loi de Beer Lambert (CAMPBELL et NORMAN, 1989) faisant intervenir l'indice de surface foliaire (LAI_t exprimé en m^2 de feuilles par m^2 de sol) de la canopée arborée et un coefficient d'extinction (k) :

$$S_t^{\gg} = S_t^\downarrow \exp(-k LAI_t) \quad (3.3)$$

Le coefficient d'extinction est fixé à 0.5, une valeur par défaut correspondant à une distribution homogène des feuilles en termes de densité et d'orientation (en d'autres termes, la distribution des angles d'inclinaison des feuilles est supposée sphérique). La part réfléchie du rayonnement dépend simplement de la part du rayonnement solaire incident non transmise à travers le feuillage et de l'albédo des arbres (α_t) :

$$S_t^\uparrow = \alpha_t S_t^\downarrow \left(1 - \exp(-k LAI_t) \right) \quad (3.4)$$

Enfin, la part du rayonnement solaire incident qui n'est ni transmise ni réfléchie est absorbée par les arbres. Elle est donc calculée comme le terme résiduel de Eq. 3.2 :

$$S_t^* = (1 - \alpha_t) S_t^\downarrow \left(1 - \exp(-k LAI_t) \right) \quad (3.5)$$

Le rayonnement solaire direct reçu par le sol (sans discriminer les fractions de route et jardin) est déduit en corrigeant le rayonnement solaire incident au-dessus du canyon de

l'interception du rayonnement par la végétation haute (i.e., la somme des rayonnements réfléchi et absorbé pondérée par la fraction de recouvrement de la végétation haute δ_t), et des effets d'ombrage des bâtiments (selon A. LEMONSU, V. MASSON et al., 2012). Les équations obtenues pour la route (S_r^\downarrow) et pour le jardin (S_g^\downarrow) sont identiques :

$$S_r^\downarrow = \left(S^\downarrow - \delta_t (S_t^\uparrow + S_t^*) \right) \max \left[0 ; 1 - \frac{h}{w} \tan(\lambda) \sin |\theta_{sun} - \theta_{can}| \right] \quad (3.6)$$

Le rayonnement solaire direct qui n'est intercepté ni par la végétation haute, ni par la route et les jardins, est affecté au mur ensoleillé ($S_{w_A}^\downarrow$ ou $S_{w_B}^\downarrow$ selon l'angle azimutal du soleil et l'orientation de la rue), alors que le mur opposé est à l'ombre. Par convention dans TEB, dans le cas d'un canyon orienté, on définit le mur A comme le mur le plus ensoleillé et le mur B comme le plus à l'ombre.

$$S_{w_A}^\downarrow = \left(S^\downarrow - S_r^\downarrow - \delta_t (S_t^\uparrow + S_t^*) \right) \frac{w}{h} \quad (3.7)$$

$$S_{w_B}^\downarrow = 0 \quad (3.8)$$

Pour rappel, les effets d'ombrage de la végétation haute sur les toits ne sont pas traités, les arbres étant supposés moins grands que les bâtiments dans cette nouvelle version de TEB (SURFEX v8.2).

3.2.2 Rayonnement solaire diffus reçu par chaque élément

Le rayonnement solaire incident diffus (S^\downarrow) est considéré comme isotrope. Chaque surface urbaine du canyon (route, mur, jardin) reçoit une part du rayonnement solaire diffus (S_\star^\downarrow) selon le facteur de vue du ciel de la surface $\Psi_{\star s}$ (voir Annexe A) et la transmissivité radiative moyenne entre le ciel et la surface donnée $\tau_{\star s}$ (voir Annexe B). Notons que le facteur de vue du ciel des murs est défini à la mi-hauteur des bâtiments ; pour les surfaces au sol (route et jardin), un unique facteur de vue du ciel $\Psi_{rs} = \Psi_{gs}$ est défini au centre du canyon (S.-H. LEE et S.-U. PARK, 2008 ; V. MASSON, 2000). Les équations suivantes sont obtenues pour la route (même expression pour le jardin) et pour le mur :

$$S_r^\downarrow = S^\downarrow \Psi_{rs} \tau_{rs} \quad (3.9)$$

$$S_w^\downarrow = S^\downarrow \Psi_{ws} \tau_{ws} \quad (3.10)$$

On admet que le flux résiduel du rayonnement solaire diffus qui n'est pas intercepté par la route, le jardin ou les murs atteint la canopée arborée :

$$S_t^\downarrow = \frac{S^\downarrow - \left(\delta_r S_r^\downarrow + \delta_g S_g^\downarrow + \frac{2h}{w} S_w^\downarrow \right)}{\delta_t} \quad (3.11)$$

Cette méthode présente deux avantages majeurs : (1) le flux de rayonnement solaire diffus reçu par la végétation haute est déjà corrigé de la part transmise atteignant les autres surfaces et (2) le bilan du rayonnement solaire diffus est toujours fermé.

Le flux pour chaque surface est ici exprimé conformément à la surface au sol totale du canyon, avec δ_r et δ_g les fractions de recouvrement de la route et des jardins dans le canyon (sachant que $\delta_r + \delta_g = 1$), respectivement.

3.2.3 Absorption du rayonnement solaire par chaque élément avant réflexion

La première absorption du rayonnement solaire total avant toute réflexion ($S^*(0)$) est seulement fonction du rayonnement solaire total reçu par l'élément considéré et de son albédo (α_*). La même expression est obtenue pour les murs et les surfaces au sol (\star désignant r , g , w_A ou w_B) :

$$S_{\star}^*(0) = (1 - \alpha_{\star}) (S_{\star}^{\downarrow} + S_{\star}^{\uparrow}) \quad (3.12)$$

Pour la canopée arborée, la part absorbée du rayonnement solaire direct est corrigée du flux transmis :

$$S_t^*(0) = (1 - \alpha_t) \left[(S_t^{\downarrow} - S_t^{\gg}) + S_t^{\uparrow} \right] \quad (3.13)$$

Par définition, S_t^{\downarrow} comprend le flux transmis S_t^{\gg} (voir Eq. 3.2) contrairement à S_t^{\uparrow} qui est calculé comme le flux restant (Eq. 3.11), corrigé de fait du flux transmis.

3.2.4 Rayonnement solaire total absorbé par chaque élément

Notre but est de calculer l'absorption totale du rayonnement solaire pour chaque élément $S_{\star}^*(\infty)$ en prenant en compte un nombre infini de réflexions entre tous les éléments composant le canyon urbain. À chaque réflexion, le rayonnement isotrope intercepté par un élément donné (1) après réflexion sur un des autres éléments (2) est conditionné par le facteur de vue de (2) depuis (1) noté Ψ_{12} (voir Annexe A), et la transmissivité radiative moyenne entre les deux éléments τ_{12} (voir Annexe B) ; l'absorption est alors déterminée suivant les propriétés réfléchives de (1).

L'utilisation d'un unique facteur de vue par surface dans les calculs de TEB est évidemment une limitation à la représentation précise des différentes contributions radiatives des surfaces du canyon à la végétation haute. En outre, nous avons peu de connaissances sur les effets de la diffusion ou de piégeage intervenant à l'intérieur des couronnes des arbres.

La canopée arborée étant décrite ici comme une surface, TEB néglige ces processus mais l'atténuation et la transmission appliquées au sommet de la canopée (voir Eq. 3.3, 3.4, 3.5, découlant de Eq. 3.1) peuvent être ajustés afin d'inclure implicitement ces phénomènes.

Dans le but d'assurer la fermeture du système, on définit le rayonnement solaire total absorbé par la végétation haute comme le rayonnement solaire restant, après avoir tenu compte de l'absorption et de la réflexion du rayonnement solaire incident total par tous les autres éléments du canyon. Cela requiert de calculer la part du rayonnement solaire qui quitte le canyon vers le ciel. Les termes R_∞ , G_∞ , A_∞ , B_∞ , et T_∞ font référence à la somme du rayonnement solaire total réfléchi par chaque surface, respectivement, après un nombre infini de réflexions (voir la résolution détaillée dans l'annexe C). Le rayonnement solaire total absorbé par chaque élément s'exprime comme suit :

$$S_s^*(\infty) = \Psi_{sr}\tau_{sr}(\delta_r R_\infty + \delta_g G_\infty) + \Psi_{sw}\tau_{sw}\frac{A_\infty + B_\infty}{2} + \Psi_{st}\delta_t T_\infty \quad (3.14)$$

$$S_r^*(\infty) = S_r^*(0) + (1 - \alpha_r) \left[\Psi_{rw}\tau_{rw}\frac{A_\infty + B_\infty}{2} + c_{rt}\Psi_{rt}\delta_t T_\infty \right] \quad (3.15)$$

$$S_g^*(\infty) = S_g^*(0) + (1 - \alpha_g) \left[\Psi_{rw}\tau_{rw}\frac{A_\infty + B_\infty}{2} + c_{rt}\Psi_{rt}\delta_t T_\infty \right] \quad (3.16)$$

$$S_{w_A}^*(\infty) = S_{w_A}^*(0) + (1 - \alpha_w) \left[\Psi_{wr}\tau_{wr}(\delta_r R_\infty + \delta_g G_\infty) + \Psi_{ww}\tau_{ww}B_\infty + c_{wt}\Psi_{wt}\delta_t T_\infty \right] \quad (3.17)$$

$$S_{w_B}^*(\infty) = S_{w_B}^*(0) + (1 - \alpha_w) \left[\Psi_{wr}\tau_{wr}(\delta_r R_\infty + \delta_g G_\infty) + \Psi_{ww}\tau_{ww}A_\infty + c_{wt}\Psi_{wt}\delta_t T_\infty \right] \quad (3.18)$$

$$S_t^*(\infty) = \frac{1}{\delta_t} \left[(S^\downarrow + S^\uparrow) - \left(S_s^*(\infty) + \delta_r S_r^*(\infty) + \delta_g S_g^*(\infty) + \frac{2h}{w} \frac{S_{w_A}^*(\infty) + S_{w_B}^*(\infty)}{2} \right) \right] \quad (3.19)$$

Les facteurs de vue reliés à la strate arborée sont exprimés dans l'annexe A. Les réflexions du rayonnement solaire depuis la végétation haute sont ici contraintes pour n'être orientées que vers le ciel et la partie supérieure des murs. Dans la nature, le rayonnement solaire est principalement redirigé vers le haut par la face réceptrice des feuilles éclairées à la cime de l'arbre durant la première réflexion. On néglige par notre approche la faible quantité de rayonnement solaire que la strate arborée est supposée réfléchir vers la partie basse du canyon durant les réflexions multiples en faveur d'une représentation réaliste de la première réflexion isotrope vers le haut, qui est de loin la réflexion la plus énergétique. Les calculs de réflexion solaire sont pleinement expliqués dans l'Annexe C. Comme mentionné précédemment, les facteurs de vue utilisés pour les réflexions multiples dans le schéma de transfert radiatif sont appliqués aux interactions de rayonnement IR à l'intérieur du canyon dans la section 3.3.2.

Ces développements liés à la prise en compte de la végétation haute dans les calculs radiatifs pour le rayonnement solaire ont été évalués par une comparaison à un modèle

architectural d'éclairage solaire (Chapitre 4).

3.3 Prise en compte des arbres dans les interactions en Infra-Rouge

3.3.1 Température de surface du feuillage de la végétation haute

Après avoir pris en compte les effets d'interception, de réflexion et d'absorption de la végétation haute au milieu du canyon dans le bilan radiatif (partie solaire), on souhaite adapter les bilans thermique et d'énergie des surfaces composant le canyon ainsi que les conditions microclimatiques (température et humidité de l'air, vitesse du vent) à l'intérieur du canyon.

Pour cela, on pose une hypothèse simplificatrice : la température de la végétation haute s'équilibre avec l'air environnant, et est supposée égale à la température de l'air dans le canyon. L'option SBL de TEB calcule un profil vertical de température de l'air dans le canyon (Section 2.2). On attribue donc à la canopée arborée la température de l'air interpolée sur la verticale au niveau correspondant à la mi-hauteur de la couronne des arbres.

3.3.2 Rayonnement Infra-Rouge absorbé par chaque élément

De même que pour le bilan en énergie solaire, un seul bilan IR moyen est résolu pour chacune des surfaces du canyon. Les échanges en IR entre les facettes du canyon sont calculés suivant une approximation linéaire de la loi de Stefan-Boltzmann. Les mêmes facteurs de vue que ceux utilisés pour les réflexions multiples du rayonnement solaire sont appliqués au calcul des interactions de rayonnement IR à l'intérieur du canyon (Annexe A).

Le bilan net en IR pour la surface (1) après échanges d'énergie entre les surfaces (1) et (2) est simulé tel que :

$$L_{12} = 4 \sigma \epsilon_1 \epsilon_2 \Psi_{12} \left(\frac{(T_1 + T_2)}{2} \right)^3 (T_2 - T_1) \quad (3.20)$$

où ϵ_* sont les émissivités de chacune des surfaces, σ est la constante de Stefan-Boltzmann, T_* les températures de chaque surface et Ψ_{12} le facteur de vue par lequel la surface réceptrice (1) voit la surface émettrice (2). Pour les échanges avec le ciel, une température

du ciel est définie à partir du rayonnement IR incident descendant, L^\downarrow , en supposant que l'émissivité du ciel est égale à 1, $T_s = (\frac{L^\downarrow}{\sigma})^{\frac{1}{4}}$.

Ce type d'approximation est répandu dans les modèles de simulation de l'énergétique du bâtiment. Elle reste pertinente lorsque les émissivités des matériaux sont élevées (typiquement, plus grandes que 0.9), ce qui est le cas de la plupart des surfaces, excepté les surfaces métalliques (documentation scientifique SURFEX v8.0). Pour des raisons de stabilité numérique, une formulation implicite est appliquée pour les bilans thermiques en IR, fonction des températures de surface au pas de temps précédent et pas de temps courant.

En tenant compte des contributions de toutes les surfaces environnantes, ainsi que des éventuels effets d'atténuation du rayonnement lorsque celui-ci traverse la canopée arborée, les bilans IR de la route, du jardin, du mur A et des arbres s'expriment ainsi :

$$\begin{aligned}
L_r^* &= 4\sigma\epsilon_r & (3.21) \\
& \left[\mathcal{F}_{rs} \left(\frac{T_s + T_r^-}{2} \right)^3 (T_s - T_r) \right. \\
& + \epsilon_w \mathcal{F}_{rw} \left(\frac{T_{wA}^- + T_r^-}{2} \right)^3 (T_{wA}^- - T_r) \\
& + \epsilon_w \mathcal{F}_{rw} \left(\frac{T_{wB}^- + T_r^-}{2} \right)^3 (T_{wB}^- - T_r) \\
& \left. + \epsilon_t \mathcal{F}_{rt} \left(\frac{T_t^- + T_r^-}{2} \right)^3 (T_t^- - T_r) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
L_g^* &= 4\sigma\epsilon_g & (3.22) \\
& \left[\mathcal{F}_{gs} \left(\frac{T_s + T_g^-}{2} \right)^3 (T_s - T_g) \right. \\
& + \epsilon_w \mathcal{F}_{gw} \left(\frac{T_{wA}^- + T_g^-}{2} \right)^3 (T_{wA}^- - T_g) \\
& + \epsilon_w \mathcal{F}_{gw} \left(\frac{T_{wB}^- + T_g^-}{2} \right)^3 (T_{wB}^- - T_g) \\
& \left. + \epsilon_t \mathcal{F}_{gt} \left(\frac{T_t^- + T_g^-}{2} \right)^3 (T_t^- - T_g) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
L_{w_A}^* &= 4\sigma\epsilon_w & (3.23) \\
& \left[\mathcal{F}_{ws} \left(\frac{T_s + T_{w_A}^-}{2} \right)^3 (T_s - T_{w_A}) \right. \\
& + \epsilon_r \mathcal{F}_{wr} \left(\frac{T_r + T_{w_A}^-}{2} \right)^3 (T_r - T_{w_A}) \\
& + \epsilon_g \mathcal{F}_{wg} \left(\frac{T_g + T_{w_A}^-}{2} \right)^3 (T_g - T_{w_A}) \\
& + \epsilon_w \mathcal{F}_{ww} \left(\frac{T_{w_B}^- + T_{w_A}^-}{2} \right)^3 (T_{w_B} - T_{w_A}) \\
& \left. + \epsilon_t \mathcal{F}_{wt} \left(\frac{T_t + T_{w_A}^-}{2} \right)^3 (T_t - T_{w_A}) \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
L_t^* &= 4\sigma\epsilon_t & (3.24) \\
& \left[\mathcal{F}_{ts} \left(\frac{T_s + T_t^-}{2} \right)^3 (T_s - T_t^-) \right. \\
& + \epsilon_r \mathcal{F}_{tr} \left(\frac{T_r^- + T_t^-}{2} \right)^3 (T_r^- - T_t^-) \\
& + \epsilon_g \mathcal{F}_{tg} \left(\frac{T_g^- + T_t^-}{2} \right)^3 (T_g^- - T_t^-) \\
& + \epsilon_w \mathcal{F}_{tw} \left(\frac{T_{w_A}^- + T_t^-}{2} \right)^3 (T_{w_A}^- - T_t^-) \\
& \left. + \epsilon_w \mathcal{F}_{tw} \left(\frac{T_{w_B}^- + T_t^-}{2} \right)^3 (T_{w_B}^- - T_t^-) \right]
\end{aligned}$$

Il suffit d'inverser les indices w_A et w_B dans la formulation de $L_{w_A}^*$ pour obtenir celle du mur opposé. Tout comme dans le bilan d'énergie solaire, $\delta_r + \delta_g = 1$, soit les fractions de route et de végétation au sol, respectivement.

Ces expressions ont été ici simplifiées en introduisant des facteurs géométriques intervenant dans le calcul des échanges IR entre deux surfaces et fonction des facteurs de vue

et des transmissivités :

$$\mathcal{F}_{rs} = \Psi_{rs} \tau_{rs} \quad (3.25)$$

$$\mathcal{F}_{rw} = 0.5\Psi_{rw} \tau_{rw} \quad (3.26)$$

$$\mathcal{F}_{rt} = \Psi_{rt} \delta_t \quad (3.27)$$

$$\mathcal{F}_{gs} = \Psi_{rs} \tau_{rs} \quad (3.28)$$

$$\mathcal{F}_{gw} = 0.5\Psi_{rw} \tau_{rw} \quad (3.29)$$

$$\mathcal{F}_{gt} = \Psi_{rt} \delta_t \quad (3.30)$$

$$\mathcal{F}_{ws} = \Psi_{ws} \tau_{ws} \quad (3.31)$$

$$\mathcal{F}_{wr} = \Psi_{wr} \tau_{wr} \delta_r \quad (3.32)$$

$$\mathcal{F}_{wg} = \Psi_{wr} \tau_{wr} \delta_g \quad (3.33)$$

$$\mathcal{F}_{ww} = \Psi_{ww} \tau_{ww} \quad (3.34)$$

$$\mathcal{F}_{wt} = 0.5\Psi_{wt} \delta_t \quad (3.35)$$

$$\mathcal{F}_{ts} = \Psi_{ts} \quad (3.36)$$

$$\mathcal{F}_{tr} = \frac{\delta_r}{\delta_t} [\Psi_{sr}(1 - \tau_{sr}) + \Psi_{wr}(1 - \tau_{wr})] \quad (3.37)$$

$$\mathcal{F}_{tg} = \frac{\delta_g}{\delta_t} [\Psi_{sr}(1 - \tau_{sr}) + \Psi_{wr}(1 - \tau_{wr})] \quad (3.38)$$

$$\mathcal{F}_{tw} = \frac{1}{2\delta_t} [\Psi_{sw}(1 - \tau_{sw}) + \Psi_{rw}(1 - \tau_{rw}) + \Psi_{ww}(1 - \tau_{ww})] \quad (3.39)$$

Évaluation des propriétés d'interception des arbres avec le modèle à haute résolution spatiale SOLENE

Sommaire

4.1	Exercice de comparaison avec le modèle SOLENE	62
4.1.1	Présentation générale du modèle SOLENE	62
4.1.2	Configuration des expériences numériques	63
4.2	Résultats	68
4.2.1	Analyse générale et effets saisonniers	68
4.2.2	Cas des canyons urbains sans végétation	69
4.2.3	Cas des canyons urbains avec végétation	76
4.2.4	Avantages apportés par les développements TEB	81

4.1 Exercice de comparaison avec le modèle SOLENE

Une évaluation objective et exhaustive des nouveaux calculs de rayonnement solaire dans TEB relatifs à l'inclusion des effets d'une strate arborée n'est pas un exercice facile. En effet, très peu de données expérimentales pour documenter les effets radiatifs des arbres en environnement urbain sont disponibles (M. PARK et al., 2012). L'objectif ici est de quantifier les performances de TEB à simuler les différentes contributions du bilan solaire radiatif pour l'ensemble des facettes urbaines et la végétation. À cette fin, j'ai plutôt opté pour une comparaison de modèle à modèle, sur la base du logiciel SOLENE, qui est un modèle architectural d'éclairement solaire de haute résolution spatiale et qui est utilisé dans ce travail comme référence. Diverses configurations de canyons urbains avec des arbres de rue (qui diffèrent en termes de densité végétale et de distribution spatiale) sont étudiées avec les deux modèles et comparées. Ainsi, les capacités et limites de l'approche géométrique simple de TEB peuvent être mises en relief et évaluées.

4.1.1 Présentation générale du modèle SOLENE

Le modèle SOLENE (GROLEAU et MESTAYER, 2013 ; MIGUET et GROLEAU, 2002 ; ROBITU et al., 2006) intègre un schéma de transfert radiatif basé sur la méthode des radiosités, appliquée à des scènes maillées par des facettes triangulaires, particulièrement adaptées aux géométries complexes (BOUYER, INARD et Marjorie MUSY, 2011 ; MALYS, Marjorie MUSY et INARD, 2014). Ce modèle fournit un bon outil pour étudier le rayonnement urbain en distinguant les rayonnements solaire (composantes directe et diffuse séparées, 0.3-2.5 μm) et infrarouges thermiques (2.5-18 μm).

Dans ce travail d'évaluation du bilan radiatif de TEB en présence d'arbres, on considère le schéma de transfert de rayonnement solaire seulement. Le rayonnement solaire direct incident est calculé en considérant le soleil comme un point source, en relation avec la hauteur du soleil (suivant la formulation de DE BRICHAMBAUT (1963)) et l'angle d'incidence des rayons à la surface (MIGUET, 2000). La part diffuse du rayonnement solaire incident est représentée comme une distribution non-uniforme provenant de la voûte céleste définie par un hémisphère de rayon infini, maillé en utilisant une triangulation géodésique. Les valeurs de luminance qui sont cartographiées sur l'hémisphère sont dérivées du modèle de Perez (PEREZ, SEALS et MICHALSKY, 1993). Ce modèle, basé sur cinq clartés et nébulosités, fournit une distribution statistique dépendant du type de temps représenté. Les réflexions multiples sont calculées en partant du principe que les surfaces sont lambertiennes et opaques pour les surfaces urbaines tandis que les surfaces végétales sont semi-transparentes (ROBITU et al., 2006).

Les simulations solaires sont exécutées en étapes successives. La première, reposant sur

des procédures géométriques, détermine la visibilité selon des masques solaires entre deux mailles ou une maille et un patch de ciel appartenant à la voûte céleste (y compris le soleil). Les facteurs de vue (incluant les facteurs de vue du ciel) sont produits pour chaque maille. Lors de la deuxième étape, les flux de rayonnement solaire reçus par chaque élément du maillage pour le pas de temps considéré sont calculés. Puis, les réflexions multiples sont estimées par la méthode des radiosités. Cette dernière étape fournit pour chaque maille le flux solaire net reçu, ainsi que les parts absorbées et réfléchies.

Avec l'évolution de SOLENE vers un modèle de microclimat appelé SOLENE-microclimat (ROBITU et al., 2006) et des besoins de simulations plus réalistes, les arbres ont été implémentés, notamment dans les calculs radiatifs. Les arbres sont géométriquement modélisés par leur enveloppe externe, et sont considérés comme semi-transparents. Par conséquent, un pourcentage de rayonnement solaire est transmis par la canopée arborée, selon un coefficient de transmission fixé à 0.5, et atteint de manière directionnelle les autres éléments de la scène urbaine. La part interceptée du flux de rayonnement solaire est soit réfléchi soit absorbée, selon l'albédo de l'arbre. Les propriétés radiatives de la végétation haute sont appliquées de manière homogène à toutes les mailles appartenant à la surface des blocs de végétation. Un bilan séparé est calculé pour chaque maille en utilisant des facteurs de vue spécifiques. Actuellement, il n'y a pas d'éléments explicites du feuillage ou de processus intra-canopée (comme la diffusion) représentés dans le modèle radiatif des arbres de SOLENE-microclimat.

4.1.2 Configuration des expériences numériques

4.1.2.1 Modélisation du canyon dans SOLENE

La géométrie du canyon urbain choisie pour construire les maquettes numériques de SOLENE sont aussi simples que possible pour refléter les hypothèses de TEB : une rue infiniment longue (150 m de longueur dans les maquettes) bordée par deux bâtiments identiques à toit plat. Comme illustré Figure 4.1, on définit trois différentes formes de canyons urbains correspondant à des rapports d'aspect (désignés par h/w) de 0.5, 1 et 2. Pour les deux premiers rapports d'aspects, la hauteur des bâtiments est égale à 8 m et la largeur de la rue à 16 m pour $h/w = 0.5$ et 8 m pour $h/w = 1$. Pour $h/w = 2$, la hauteur des bâtiments est égale à 16 m alors que la largeur de la rue est de 8 m.

Pour chacun de ces canyons urbains, 13 agencements de végétation différents sont prescrits (Figure 4.2), ainsi qu'un cas de contrôle sans végétation. Les blocs de végétation sont des parallélépipèdes rectangles représentant les couronnes des arbres en trois dimensions, sans le tronc. Ces volumes solides sont continus dans le sens de la longueur du canyon. Selon les configurations, les arbres peuvent être organisés en lignes simples ou doubles.

D'après un plan de coupe à travers le canyon, les couronnes des arbres peuvent remplir 30, 60, ou 90 % de la largeur du canyon. Pour les trois rapports d'aspects, la hauteur des arbres est prescrite à 5 m ou 7.5 m avec des troncs de 2.5 ou 5 m de haut. Ainsi l'épaisseur de la canopée peut varier entre 2.5 et 5 m. Des configurations additionnelles sont testées en redimensionnant la végétation en fonction de la hauteur des bâtiments dans le cas $h/w = 2$ (désignées par $h/w = 2$ à végétation redimensionnée ou *rescaled vegetation*) pour vérifier l'effet d'un agencement de végétation adapté au regard de la typologie de la rue. La hauteur des arbres est alors prescrite à 10 m ou 15 m avec des troncs de 5 ou 10 m de haut, selon l'épaisseur et la localisation de la couronne (Figure 4.1). En d'autres termes, la couche de végétation est deux fois plus épaisse et située plus haut que les cas $h/w = 0.5$ et $h/w = 1$ pour chaque configuration de végétation. Pour toutes les expériences, le LAI des arbres est prescrit à $1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, et l'albédo à 0.25 pour la route, 0.30 pour les murs et 0.25 pour les arbres. Toutes les configurations sont décrites dans Figure 3.1, 4.1, 4.2 et le Tableau 4.1.

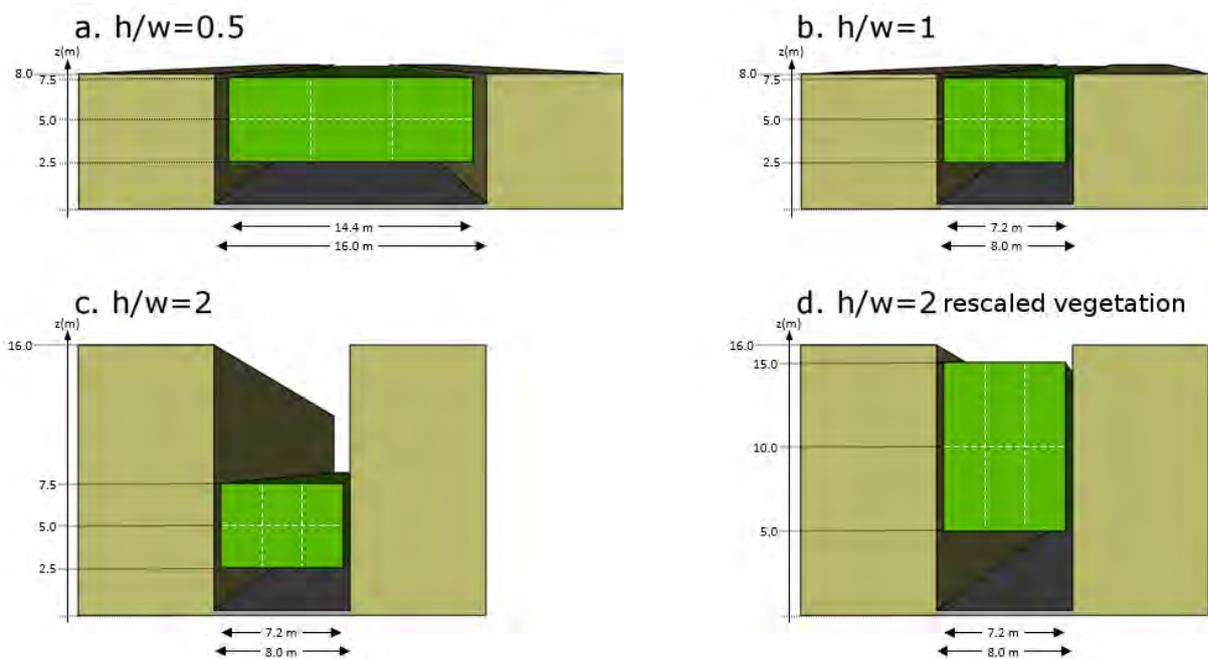


FIGURE 4.1 – Représentation schématique des différents rapports d'aspect des canyons testés dans TEB. Les blocs verts représentent les zones potentiellement occupées par de la végétation arborée, selon les configurations détaillées dans la Figure 4.2.

Afin de traiter l'ensemble des configurations, 55 maquettes digitales (52 canyons avec végétation et trois canyons sans végétation) ont été construites avec le logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAD) Salome V7_4_0. Toutes les maquettes ont été maillées par le logiciel GMSH qui est un générateur de maillages d'éléments finis. On a appliqué un maillage non uniforme avec une longueur caractéristique jusqu'à seulement 1 m afin de

raffiner la discrétisation spatiale des blocs de végétation, dont les plus petits pour certains agencements de végétation n'excèdent pas 2.4 m de largeur et 2.5 m de hauteur.

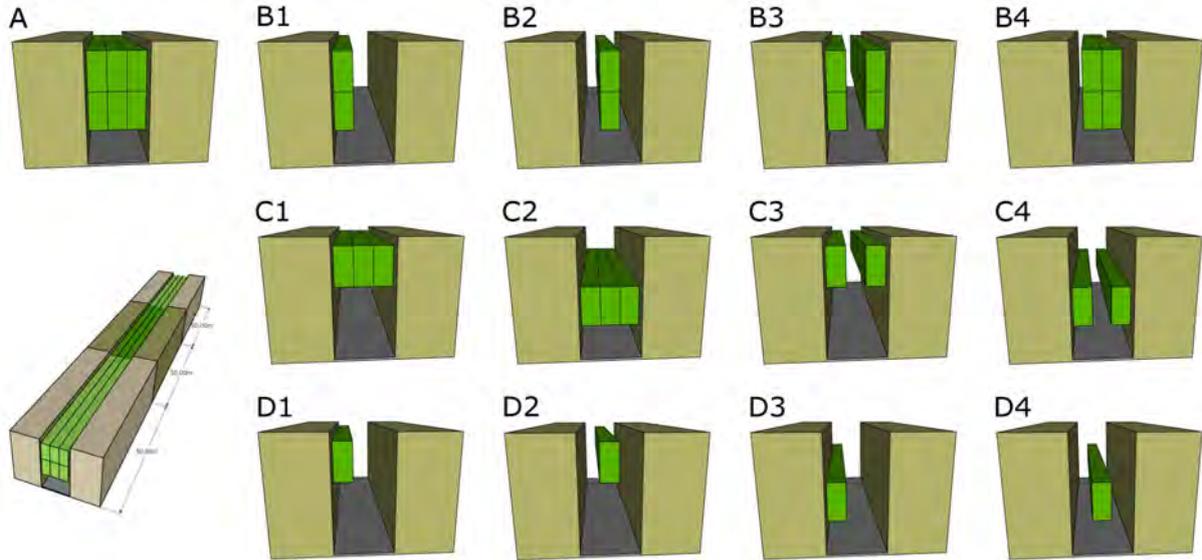


FIGURE 4.2 – Représentation schématique des différents agencements de végétation au sein des canyons testés.

TABLE 4.1 – Liste des paramètres d'entrée pour l'ensemble des simulations exécutées avec TEB.

Paramètres	Configurations												
	A	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4
$f_{\text{bld}} (-)$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$f_{\text{garden}} (-)$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\delta_t (-)$	0.9	0.3	0.3	0.6	0.6	0.9	0.9	0.6	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3
$h (m)$	8 pour $h/w = 0.5$, $h/w = 1$; 16 pour $h/w = 2$ à (végétation redimensionnée ou non)												
$r_w (-)$	0.5 pour $h/w = 0.5$; 1.0 pour $h/w = 1$; 2.0 pour tous les cas $h/w = 2$												
$h_t (m)$	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	5.0	7.5	5.0	7.5	7.5	5.0	5.0
$h_{\text{tk}} (m)$	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	5.0	2.5	5.0	2.5	5.0	5.0	2.5	2.5
$\text{LAI}_t (m^2 m^{-2})$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\tau_{\text{sr}} (-)$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
$\alpha_r (-)$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
$\alpha_w (-)$	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
$\alpha_t (-)$	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

Chaque canyon est projeté suivant les quatre orientations de rue 0° , 45° , 90° , et 135° (degrés depuis le Nord géographique, dans le sens contraire au sens trigonométrique, selon la nomenclature appliquée dans TEB). Une localisation spécifique (définie par la latitude et la longitude) doit être prescrite pour les calculs astronomiques. La ville de Nantes (France) est choisie de manière arbitraire (46° N, 1° E). Les échanges de rayonnement solaire sont alors calculés pour un seul cycle journalier, et sous des conditions d'illumination couvrant les quatre saisons en sélectionnant des dates proches des équinoxes et solstices pour l'année 2010, i.e. le 20 mars, le 21 juin, le 23 septembre, et le 23 décembre 2010. Notons aussi que le modèle de Perez (voir la section 4.1.1) a été paramétré afin de générer des ciels parfaitement clairs, dégagés de tout nuage.

4.1.2.2 Modélisation du canyon dans TEB

De la même manière, TEB est lancé pour des configurations équivalentes à celles de SOLENE, tout en respectant les différences d'hypothèses, d'approches et de résolution spatiale entre les deux modèles. Pour les simulations TEB, les paramètres géométriques décrivant la forme urbaine du canyon, ainsi que la hauteur des arbres et des troncs sont comparables à ceux des simulations SOLENE puisque ce sont directement des paramètres d'entrée du modèle TEB. Par ailleurs, les différents arrangements spatiaux des arbres simulés dans SOLENE sont simplement prescrits comme des fractions de recouvrement dans TEB. De ce fait, certaines configurations (e.g. B1 et B2 avec différentes positions horizontales ou B3 et B4 avec différents nombres de lignées d'arbres, illustré Figure 4.2) ne peuvent être distinguées par l'approche TEB, et sont associées à la même fraction de recouvrement cumulée de la canopée arborée dans TEB. Par conséquent, les interactions entre les lignées d'arbres ne sont pas prises en compte dans TEB, contrairement à SOLENE où les rayons sont atténués à chaque fois qu'ils traversent une maille appartenant à une enveloppe végétale. En outre, les deux modèles diffèrent par leur résolution spatiale : tandis que TEB calcule un facteur de vue unique pour chacun des couples de surfaces, SOLENE est capable de résoudre un bilan radiatif pour chacune des mailles de la scène urbaine, dont la longueur caractéristique est prescrite par l'utilisateur dans l'outil de maillage.

Tous les paramètres d'entrée du modèle TEB correspondant aux différentes configurations de canyon et d'agencement de végétation sont listés dans le Tableau 4.1. Dans SOLENE, le rayonnement incident est brutalement atténué de 50 % en traversant une maille appartenant à une enveloppe végétale. En termes de modélisation de processus, la formulation de la transmissivité du rayonnement à travers le feuillage dans TEB est ici simplifiée pour l'étape d'évaluation. Afin d'être cohérent avec l'approche SOLENE, l'atténuation exponentielle exprimant une interception maximum (incluant le LAI) dans Eq. 3.3, 3.4, 3.5 est remplacée par la valeur uniforme 0.5. De la même façon, la formulation proposée en Annexe B (Eq. B.1, B.2, B.3, B.4) pour moduler l'atténuation du rayonnement

selon un trajet probable des rayons et basée sur le profil de densité surfacique foliaire ou *Leaf Area Density* (LAD en $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$), est ici substituée par l'expression $1 - 0.5(LAD/LAI)$, de telle sorte que le maximum d'atténuation soit égal à 0.5 lorsque toute l'épaisseur de la canopée arborée est traversée. Notons aussi que TEB est forcé par les mêmes conditions de rayonnement solaire incident que ceux calculés pour les toits dans SOLENE. Mais par hypothèse, TEB utilise un forçage uniforme pour chaque composante (directe ou diffuse) du rayonnement solaire des simulations SOLENE, et ne prend pas en compte la distribution non-uniforme du rayonnement solaire diffus incident. De cette imprécision résultent des différences de l'ordre de 1 à 4% entre les flux des deux murs, selon leur orientation, pour les rapports d'aspect étudiés, durant l'été (analyse de sensibilité, conduite par B. Morille (CERMA), non montrée).

4.1.2.3 Méthode de comparaison

Au total, 880 simulations de rayonnement solaire sont exécutées avec à la fois les modèles TEB et SOLENE, i.e. 55 configurations, 4 orientations de rue et 4 saisons. Pour chacune d'elles, des sorties horaires sont stockées. Elles comprennent les rayonnements solaires direct et diffus reçus par les éléments séparément (route, murs et arbres) avant réflexions multiples, de même que le rayonnement solaire total absorbé par les éléments distincts après réflexions multiples. L'objectif principal de cet exercice comparatif est d'évaluer l'approche en fractions de recouvrement de TEB par rapport au modèle (SOLENE) résolvant le bilan radiatif urbain à fine échelle et avec des arbres explicitement représentés par des éléments géométriques. À cet effet, les écarts entre les simulations des flux de rayonnement solaire reçus par les surfaces du canyon ont été examinés. Rappelons que durant les réflexions multiples, le rayonnement est présumé isotrope à la fois dans TEB et SOLENE. Pour le cas de la végétation haute, les réflexions sont néanmoins contraintes vers le haut, sur un plan hémisphérique, afin de représenter de manière plus réaliste la première réflexion qui est aussi la plus énergétique (voir les détails dans la section 3.2.4 et l'Annexe C).

Afin de comparer les simulations de ces deux modèles, seulement la partie centrale des maquettes SOLENE est utilisée dans le but d'éviter les effets de bord (voir schéma Figure 4.2). Pour chacun des flux, les valeurs calculées par SOLENE sont sommées sur tous les points de grille qui composent chaque élément du canyon (séparément, la route, les deux murs et les arbres). Enfin, pour les deux modèles, les flux sont pondérés afin d'être exprimés selon la surface au sol du canyon, de sorte qu'ils puissent être comparés les uns les autres et au rayonnement incident.

Les scores statistiques calculés pour l'évaluation de TEB (en prenant ici SOLENE comme référence) sont la différence moyenne absolue, ou *Mean Absolute Difference* (MAD en W m^{-2}), le pourcentage de la différence moyenne absolue ou *Mean Absolute Percentage*

Difference (MAPD en %) et le biais moyen ou *Mean Bias* (Bias en $W m^{-2}$). Ils sont calculés à partir des flux horaires pour le MAD et le biais et à partir des flux journaliers moyens pour le MAPD, selon les équations suivantes :

$$MAD = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_o} \sum_{k=1}^{n_h} \sum_{l=1}^{n_t} |F_{SOL}(i, j, k, l) - F_{TEB}(i, j, k, l)|}{n_s \cdot n_o \cdot n_h \cdot n_t} \quad (4.1)$$

$$MAPD = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_o} \sum_{k=1}^{n_h} \left| \frac{F_{SOL}(i, j, k) - F_{TEB}(i, j, k)}{F_{SOL}(i, j, k)} \right|}{n_s \cdot n_o \cdot n_h} \quad (4.2)$$

$$Bias = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_o} \sum_{k=1}^{n_h} \sum_{l=1}^{n_t} (F_{SOL}(i, j, k, l) - F_{TEB}(i, j, k, l))}{n_s \cdot n_o \cdot n_h \cdot n_t} \quad (4.3)$$

Les indices i, j, k, l font référence à la saison, à l'orientation de la rue, au rapport d'aspect de la rue et à l'heure de la journée, respectivement, avec $n_s = 4$, $n_o = 4$, $n_h = 3$, $n_t = 24$.

4.2 Résultats

4.2.1 Analyse générale et effets saisonniers

Le Tableau 4.2 présente les résultats statistiques calculés pour le rayonnement solaire absorbé par les différents éléments du canyon pour les deux cas, avec ou sans végétation. Sachant que les réflexions multiples sont traitées différemment entre TEB et SOLENE, ces résultats sont utilisés pour montrer l'amplitude de la variabilité des différences liées à la présence de la végétation dans le canyon ou à la saison considérée. Les résultats sont présentés ici en regroupant les expériences exécutées avec différentes orientations de rue et différents agencements de végétation mais en distinguant les saisons. À la lumière des biais moyens, le modèle TEB tend à surestimer systématiquement l'absorption par les routes et les murs en comparaison avec SOLENE (jusqu'à +16 et +8.5 $W m^{-2}$ pour les routes et les murs, respectivement), et à sous-estimer l'absorption par les arbres (jusqu'à -16 $W m^{-2}$), quelque soit la configuration ou la saison. Étant donné que le climat tempéré est caractérisé par quatre saisons distinctes avec des ensoleillements ainsi que des conditions de températures et humidités de l'air contrastés, une analyse saisonnière a été entreprise. L'analyse des résultats pour chaque saison séparément indique que les différences relatives (MAPD) sont particulièrement élevées pour les simulations en hiver pour la route et les arbres, à cause d'un rayonnement solaire incident très faible à cette période. Néanmoins,

les biais et MAD associés sont acceptables (moins de 3.5 et $\pm 3 \text{ W m}^{-2}$, respectivement). L'été est la saison qui donne les meilleurs résultats en termes de MAPD lorsque le canyon est arboré (moins de 25 %) ou non (3 %). Cette saison est aussi la plus pertinente pour notre étude car l'enjeu principal est ici d'améliorer la simulation de l'effet potentiel du rafraîchissement des arbres de rue dans des environnements urbains, soumis à des forts effets d'îlot de chaleur urbain à cette période. L'évaluation se concentre sur les effets des arbres à feuilles caduques car ils sont typiques et largement présents dans les villes sous climat tempéré. Dépourvus de feuilles en hiver, ils ont un impact négligeable sur le confort thermique et la demande en énergie à cette saison. C'est pourquoi nous mettons par la suite l'accent sur la saison estivale, afin d'évaluer les performances de TEB à simuler les échanges solaires radiatifs dans des canyons idéalisés, qu'ils soient végétalisés ou non.

TABLE 4.2 – Résultats statistiques pour le flux de rayonnement solaire absorbé par surface selon les saisons.

	Hiver			Printemps			Été			Automne		
	MAD Wm^{-2}	MAPD %	Bias Wm^{-2}									
Canyon urbain sans arbres												
Route	2.13	43	+2.02	7.45	18	+4.47	6.03	3	+3.50	5.35	17	+4.21
Murs	0.81	4	+0.42	2.99	2	+0.91	3.38	3	+2.80	1.86	2	+1.06
Canyon urbain avec arbres (toutes configurations confondues)												
Route	2.67	108	+2.63	10.32	63	+9.22	16.31	24	+15.56	9.46	63	+9.07
Murs	1.75	13	+1.58	6.34	13	+4.77	9.39	14	+8.15	5.82	13	+4.86
Arbres	3.13	53	-1.20	12.15	31	-7.29	21.12	21	-15.96	12.03	31	-7.31

4.2.2 Cas des canyons urbains sans végétation

Les calculs radiatifs dans TEB sont dans un premier temps évalués pour les cas sans végétation. Plusieurs comparaisons avec les observations des flux radiatifs à l'échelle du quartier ont été effectuées dans des études antérieures (A. LEMONSU, BÉLAIR et al., 2010; A. LEMONSU, C. S. B. GRIMMOND et V. MASSON, 2004; V. MASSON, C. S. B. GRIMMOND et T. R. OKE, 2002; Grégoire PIGEON, MOSCICKI et al., 2008). Elles ont montré une bonne capacité du modèle à calculer le rayonnement solaire et IR remontant au sommet de la canopée urbaine, en cas réels. Toutefois, ces exercices d'évaluation n'ont pas permis d'analyser séparément les contributions radiatives des divers éléments qui composent l'environnement urbain. Une telle comparaison modèle à modèle dans un cadre contrôlé est idéal pour examiner et évaluer pleinement les paramétrisations du rayonnement dans TEB.

Le rayonnement solaire, à la fois direct et diffus, reçu par la route et les murs séparés avant toute réflexion, ainsi que le rayonnement solaire total absorbé par ces surfaces, sont étudiés. Un exemple de cycle journalier est présenté Figure 4.3 pour le cas $h/w = 1$ et les

quatre orientations de rue, pour la saison d'été. Les diagrammes de dispersion intègrent tous les flux horaires simulés pour les trois rapports d'aspect, les quatre orientations de rue, et les quatre saisons (Figure 4.4). Comme attendu, ils montrent une forte corrélation entre les flux calculés par SOLENE et TEB malgré des intensités et rapports de nature direct/diffus variés : $R^2 \geq 0.99$ excepté pour le rayonnement solaire diffus reçu par la route : $R^2 = 0.979$.

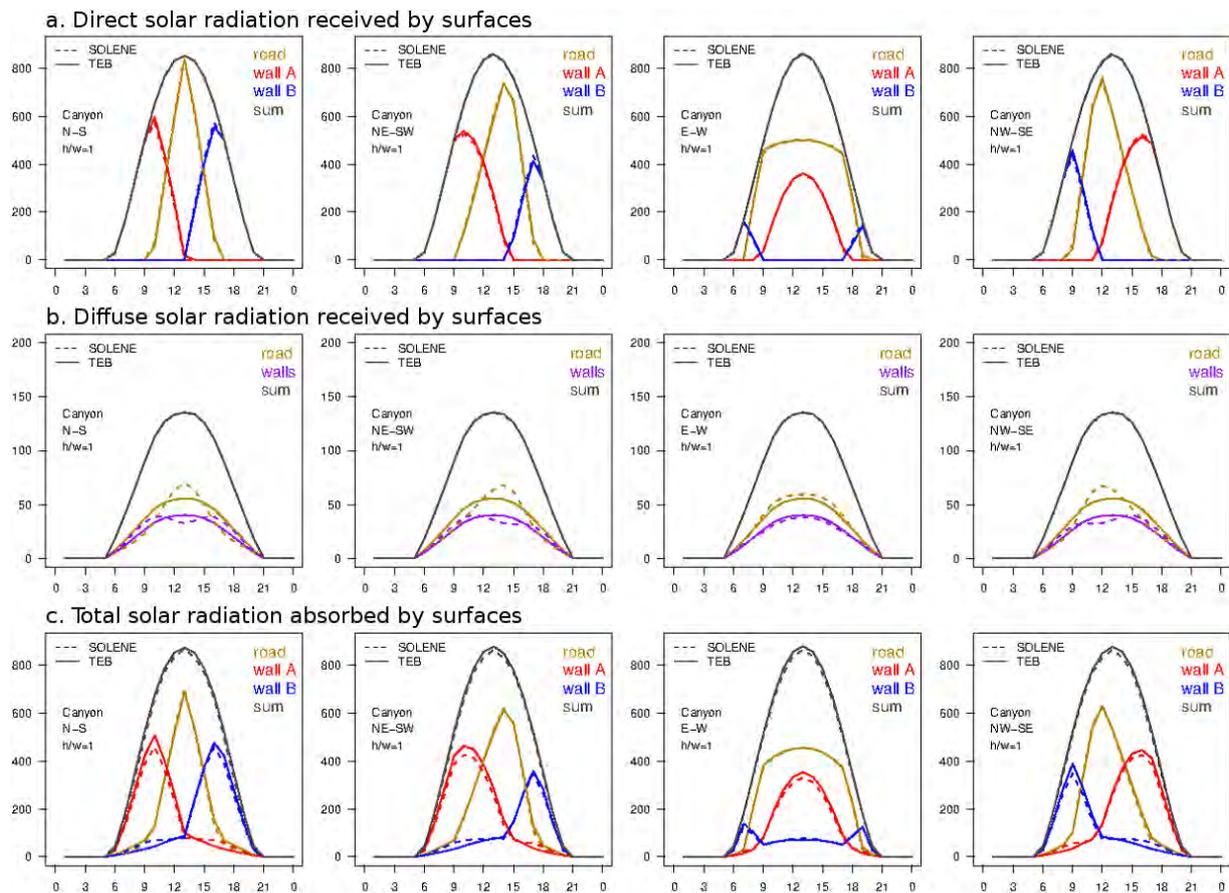


FIGURE 4.3 – Comparaison des simulations TEB et SOLENE pour le cycle journalier de rayonnement solaire direct (haut) et diffus (milieu) en W m^{-2} reçus par les facettes urbaines avant les réflexions multiples, et de rayonnement solaire total absorbé par celles-ci après inter-réflexions (bas) en W m^{-2} pour des canyons dépourvus de végétation. Les résultats sont présentés ici seulement pour le rapport d'aspect de 1 et pour les quatre orientations de rue lors d'un jour d'été.

La comparaison entre les simulations SOLENE et TEB pour le rayonnement solaire direct reçu par la route et les murs avant toute réflexion met en évidence les très bonnes performances de TEB. Le modèle est capable de reproduire les effets de la géométrie du canyon et de l'orientation de la rue sur la pénétration du rayonnement et l'ensoleillement

des surfaces selon le moment de la journée. Pour les rues orientées NE-SO et NO-SE (Figure 4.3a, colonnes 2 et 4), TEB simule correctement la dissymétrie des flux entre les deux murs, ainsi que le décalage temporel du pic de rayonnement reçu par la route, en comparaison avec les rues orientées N-S (Figure 4.3a, colonne 1). Pour les cas de rues E-O (Figure 4.3a, colonne 3), le rayonnement direct reçu par la route est marqué par un effet plateau entre 08:00 et 19:00. Les deux murs ont des comportements différents : le mur le plus exposé au soleil reçoit le maximum de rayonnement solaire direct au midi solaire, alors que le mur le plus ombragé reçoit du rayonnement solaire direct seulement tôt le matin ou tard dans l'après-midi. Ces résultats confirment les bonnes performances de TEB : les MAD sont de 4.39 et 2.49 W m^{-2} , et les biais sont de -0.28 et +0.40 W m^{-2} pour la route et les murs, respectivement (Tableau 4.3). Ils sont associés à de faibles MAPD de seulement 1 % pour à la fois la route et les murs.

Dans les calculs de rayonnement solaire diffus, TEB ne considère pas les deux murs séparément. Par conséquent, le rayonnement solaire diffus est comparé entre le mur composite de TEB, et la moyenne des flux de rayonnement solaire diffus reçus par des murs séparés dans les simulations SOLENE (Figure 4.3b). En considérant une surface moyenne, TEB sous-estime le rayonnement solaire diffus reçu par les murs le matin et l'après-midi, et le surestime au midi solaire. Au contraire, il surestime le rayonnement solaire diffus reçu par la route le matin et l'après-midi, et il le sous-estime au midi solaire. Les MAD et les biais restent faibles (moins de 3.5 et $\pm 1 \text{ W m}^{-2}$, respectivement) car les flux impliqués ne sont pas très grands (selon la saison, la composante diffuse représente 15-25 % du rayonnement solaire total incident), mais les MAPD sont légèrement plus élevées que pour le rayonnement solaire direct, atteignant 7 et 5 % pour la route et les murs, respectivement (Tableau 4.4). Cependant, ces disparités n'ont pas d'impact sur les performances de TEB ni à l'échelle journalière des flux des murs ni sur un cumul en instantané des flux du canyon. De plus, la dissymétrie des flux solaires diffus reçus par les murs n'est pas observée pour les cas orientés E-O.

Enfin, le rayonnement solaire total absorbé par la route et les murs est bien estimé par TEB malgré les hypothèses simplificatrices du modèle et l'usage d'un unique facteur de vue du ciel par surface : les MAD et biais sont de 6.03 et +3.50 W m^{-2} pour la route, respectivement, et de 3.38 et +2.80 W m^{-2} pour les murs (Tableau 4.5). Au vue de l'important rayonnement solaire incident, excédant 1 000 W m^{-2} au midi solaire, les MAPD de 3 % pour les deux surfaces demeurent modérées.

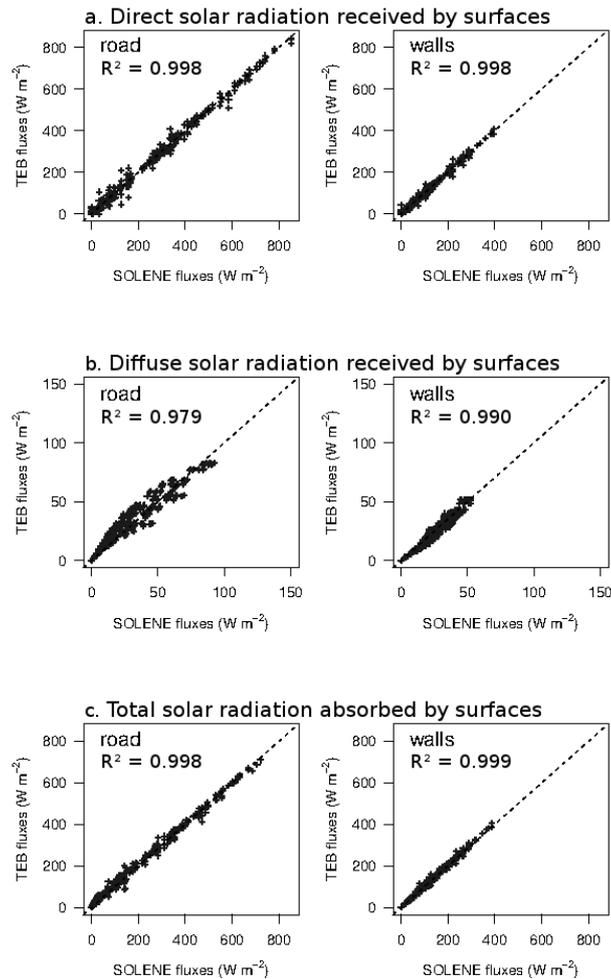


FIGURE 4.4 – Diagrammes de dispersion comparant les simulations TEB et SOLENE pour des flux horaires de rayonnement solaire direct (haut) et diffus (milieu) en W m⁻² reçus par les facettes urbaines avant les réflexions multiples, et le flux de rayonnement solaire total absorbé par celles-ci après inter-réflexions (bas) en W m⁻² pour des canyons sans végétation. Les diagrammes rassemblent les quatre saisons, les trois rapports d’aspect et les quatre orientations de rue.

TABLE 4.3 – Résultats statistiques pour le rayonnement solaire direct reçu par les surfaces avant les réflexions multiples pour un jour estival. NVEG désigne le cas référence de TEB sans végétation.

	Route			Murs			Arbres		
	MAD Wm ⁻²	MAPD %	Bias Wm ⁻²	MAD Wm ⁻²	MAPD %	Bias Wm ⁻²	MAD Wm ⁻²	MAPD %	Bias Wm ⁻²
NVEG	4.39	1	-0.28	2.49	1	+0.40	-	-	-
A	9.27	14	+8.73	3.52	5	-1.55	6.22	4	-5.43
B1	11.01	9	+9.11	10.84	6	+2.12	19.22	32	-13.17
B2	23.09	26	+22.51	8.26	8	+2.25	27.71	37	-26.76
B3	16.77	22	+16.47	11.25	20	+10.14	37.07	30	-36.78
B4	20.80	29	+20.42	7.09	8	-0.94	19.44	17	-18.35
C1	9.10	14	+8.55	3.51	5	-1.57	5.96	4	-5.18
C2	13.81	21	+13.47	5.89	9	-4.98	4.13	3	-3.17
C3	8.39	9	+7.79	9.77	16	+8.67	25.58	22	-25.24
C4	11.58	13	+11.15	4.77	4	+1.58	14.13	18	-13.91
D1	11.38	6	+6.40	10.03	5	+1.29	14.95	29	-8.86
D2	15.84	17	+15.29	8.29	8	+2.23	20.52	30	-19.56
D3	6.17	4	+3.90	7.82	4	-1.68	15.14	20	-0.21
D4	19.38	21	+18.62	5.05	5	-3.57	14.10	23	-11.11

TABLE 4.4 – Résultats statistiques pour le rayonnement solaire diffus reçu par les surfaces avant les réflexions multiples pour un jour estival. NVEG désigne le cas référence de TEB sans végétation.

	Route			Murs			Arbres		
	MAD Wm ⁻²	MAPD %	Bias Wm ⁻²	MAD Wm ⁻²	MAPD %	Bias Wm ⁻²	MAD Wm ⁻²	MAPD %	Bias Wm ⁻²
NVEG	3.35	7	+0.87	1.70	5	-0.43	-	-	-
A	1.91	15	+1.37	1.51	9	+1.07	3.51	20	-3.50
B1	2.99	14	+1.91	1.83	8	+1.09	4.10	43	-4.10
B2	4.03	29	+3.79	1.64	7	+0.79	5.38	49	-5.38
B3	3.10	24	+2.75	2.88	27	+2.72	8.22	44	-8.22
B4	3.37	30	+3.21	1.47	6	+0.74	4.71	32	-4.71
C1	1.89	14	+1.31	1.50	11	-0.55	1.73	13	-0.24
C2	1.90	14	+1.35	1.60	4	-0.19	1.94	12	-0.88
C3	2.43	13	+1.52	1.69	12	+1.38	4.36	28	-4.36
C4	2.37	13	+1.50	1.69	5	+0.52	2.61	22	-2.47
D1	2.82	10	+1.31	1.53	3	+0.36	2.05	26	-2.05
D2	3.27	20	+2.73	1.40	5	+0.25	3.25	35	-3.25
D3	2.80	9	+1.10	1.63	3	-0.11	1.20	17	-0.86
D4	3.54	22	+3.07	1.62	5	-0.65	1.84	27	-1.72

TABLE 4.5 – Résultats statistiques pour le rayonnement solaire total absorbé par les surfaces après les réflexions multiples pour un jour estival. NVEG désigne le cas référence de TEB sans végétation.

	Route			Murs			Arbres		
	MAD Wm ⁻²	MAPD %	Bias Wm ⁻²	MAD Wm ⁻²	MAPD %	Bias Wm ⁻²	MAD Wm ⁻²	MAPD %	Bias Wm ⁻²
NVEG	6.03	3	+3.50	3.38	3	+2.80	–	–	–
A	13.30	26	+12.98	9.30	17	+8.84	7.76	5	–2.16
B1	13.31	14	+11.91	11.64	15	+11.19	21.15	28	–16.95
B2	24.27	32	+23.79	10.36	12	+9.61	30.82	38	–29.47
B3	21.82	36	+21.64	21.05	45	+21.04	52.46	35	–50.33
B4	23.13	39	+22.82	9.44	13	+7.81	20.59	17	–17.28
C1	12.04	23	+11.81	5.26	8	+3.98	6.31	5	–0.61
C2	16.15	30	+15.83	3.99	5	–1.43	8.72	7	+4.08
C3	13.23	19	+13.01	16.10	29	+16.10	40.15	29	–37.89
C4	15.95	23	+15.67	9.28	13	+9.15	24.09	21	–19.77
D1	12.45	11	+9.29	8.10	8	+6.78	14.12	24	–8.65
D2	17.19	21	+16.70	8.05	8	+6.73	20.32	27	–18.57
D3	9.09	9	+7.24	5.25	4	+4.02	14.04	14	+0.11
D4	20.06	25	+19.52	4.21	4	+2.09	13.97	22	–9.95

4.2.3 Cas des canyons urbains avec végétation

Des évaluations similaires ont été conduites pour les canyons végétalisés. Les résultats statistiques sont calculés comme précédemment (voir Eq. 4.1, 4.2, 4.3) mais en tenant compte des 13 agencements de végétation. À titre d'exemple, une comparaison des flux horaires simulés par TEB et SOLENE est présentée Figure 4.5, pour l'agencement A et le rapport d'aspect $h/w = 1$, pour un cycle journalier estival. Cette configuration (décrite Figure 4.2) est l'une des plus simples, et elle est comparable entre les deux modèles : les arbres font 7.5 m de haut (une hauteur proche de celle des bâtiments), les couronnes d'arbres ont une épaisseur de 5 m, elles sont centrées sur le milieu du canyon et couvrent 90 % de la largeur du canyon sur le plan horizontal.

Les évolutions journalières du rayonnement solaire direct reçu par les différents éléments du canyon peuvent être comparés au cas sans végétation (Figure 4.3a). Les mêmes dynamiques temporelles sont obtenues, que ce soit pour les murs ou la route et les quatre orientations de rue, avec une atténuation liée à la présence des arbres. Ici, une part significative du rayonnement solaire direct incident est interceptée par le feuillage. Par ses propriétés de transparence partielle due aux trouées qui se traduisent par une transmissivité fixée à 0.5, le houppier permet à au moins la moitié du flux de rayonnement de passer à travers. Par conséquent, les surfaces urbaines (murs et route) reçoivent moins de rayonnement incident direct mais ne sont jamais totalement occultées par les arbres. Ces processus sont correctement simulés par TEB avec quelques limitations : le rayonnement solaire direct intercepté par la végétation haute au sommet de la couronne est calculé en traitant la couche arborée comme une surface horizontale (Eq. 3.1). Les flux atteignant les arbres dans TEB sont par conséquent globalement sous-estimés comparés à ceux dans SOLENE qui intègrent les contributions des surfaces verticales de l'enveloppe de la couronne (Figure 4.6 a., toutes saisons et configurations). Le rayonnement solaire qui n'est pas intercepté par la couche arborée dans les simulations TEB est assigné à la route et aux parties inférieures des murs. Cela conduit pour la configuration A à des MAD de 9.27, 3.52 et 6.22 $W m^{-2}$ pour la route, les murs et les arbres, respectivement, ainsi que des MAPD de 14, 5, et 4 % seulement (Table 4.3). Plus la couronne est épaisse, plus cet artefact associé à la représentation de la couche arborée dans TEB est grand (D1 vs B1 ou D2 vs B2), particulièrement lorsque les rangées d'arbres sont éloignées des murs (B1 vs B2, D1 vs D2 ou D3 vs D4), contrairement à des couches continues où les arbres occupent presque entièrement la largeur du canyon (A, C1, C2).

Comme exprimé dans Eq. 3.9 et 3.10, les flux de rayonnement solaire diffus reçus par la route et les murs (les murs sont gérés ensemble comme une surface moyenne), dépendent du facteur de vue du ciel de la surface donnée et du coefficient d'atténuation du rayonnement incident à travers le feuillage. En considérant toutes les saisons et configurations confondues, le rayonnement solaire diffus reçu par les surfaces au sol est surestimé. Inversement,

le rayonnement solaire diffus atteignant les couronnes des arbres, calculé comme la part résiduelle du flux de rayonnement solaire diffus incident qui n'a pas été reçu par la route et les murs (Eq. 3.11), est sous-estimé dans les simulations TEB par rapport à SOLENE (Figure 4.6 b, Tableau 4.4). Des résultats contrastés sont obtenus pour les surfaces verticales selon l'agencement de la végétation, en particulier entre les agencements double-lignes et les arbres centrés (B3 vs B4). Comme expliqué précédemment, ces défauts sont reliés à l'application dans TEB d'un facteur de vue du ciel unique pour chaque surface, qui est calculé à mi-hauteur des bâtiments pour les murs et au milieu de la rue pour la route et les arbres. La nature isotrope du rayonnement solaire diffus accentue la sous-estimation du flux reçu par la végétation haute dans TEB, particulièrement dans les cas de canopées arborées épaisses et avec deux rangées d'arbres (A vs B3, C1 vs C3) car le modèle ne tient pas compte du rayonnement reçu par les faces verticales de l'enveloppe végétale comme c'est le cas dans SOLENE. En examinant le canyon A extrêmement végétalisé, les MAPD sont de 15, 9 et 20 % pour la route, les murs et les arbres, respectivement, correspondant à des MAD de 1.91, 1.51 et 3.51 W m^{-2} (Tableau 4.4). Globalement, l'estimation des rayonnements solaires diffus reçus par la route et les murs sont acceptables au regard des MAPD qui sont $\leq 30\%$. Toutefois, les différences relatives associées à la couche arborée sont contrastées (de 12 % à 49 %), selon les caractéristiques de l'agencement de végétation.

Toujours pour la configuration A, la comparaison aux simulations références de SOLENE montre que le rayonnement solaire absorbé par les différents éléments du canyon est simulé par TEB avec une dynamique journalière correcte (Figure 4.5c). Néanmoins, leurs amplitudes peuvent grandement diverger, principalement pour la route et les arbres avec certaines MAPD dépassant 30 % et certains biais excédant $\pm 25 \text{ W m}^{-2}$ (Tableau 4.5). Les diagrammes de dispersion globaux (Figure 4.6 c., toutes saisons et configurations confondues) confirment les tendances précédemment constatées : le flux solaire total absorbé par les arbres est sous-estimé et la corrélation avec les flux SOLENE est assez faible ($R^2 = 0.954$).

Ces mauvaises performances de TEB en matière de résultats statistiques doivent être interprétés avec précaution. Ce travail vise à évaluer la capacité de TEB à simuler les flux radiatifs absorbés par chaque facette du canyon en dépit d'une approche géométrique simple faisant intervenir des fractions de recouvrement et un unique facteur de vue par interaction surface/surface. Par exemple, la fraction d'arbres est calculée comme une fraction cumulée de tous les houppiers sur le plan perpendiculaire à la rue dans TEB. Ainsi, les interactions entre lignées d'arbres ne sont pas considérées, contrairement à SOLENE. Les deux modèles diffèrent sur d'autres aspects, le modèle SOLENE étant lui-même basé sur certaines hypothèses qui font qu'il ne peut être considéré en tout point comme une référence, ou du moins comme la réalité. En particulier, le calcul de la transmissivité lors des réflexions multiples est différent entre les deux modèles (voir section 4.1.2.2). Le modèle TEB calcule des réflexions isotropes infinies en utilisant un facteur de vue unique pour chaque facette du canyon ainsi qu'un terme de transmissivité moyenne. La formulation

des termes de transmissivité moyenne du rayonnement est basée sur des hypothèses fortes au regard de l'atténuation potentielle des rayons : ils expriment le ratio entre le secteur du canyon balayé par le facteur de vue associé à l'interaction étudiée et l'épaisseur du houppier contenue dans ce secteur (voir Annexe B). De plus, les réflexions depuis la végétation haute sont contraintes vers le haut dans TEB (voir section 3.2.4 et Annexe C). Au contraire, le schéma radiatif de SOLENE calcule des réflexions multiples isotropes à l'intérieur du canyon pour chaque maille triangulaire, en utilisant la méthode des radiosités. Les enveloppes végétales sont strictement semi-transparentes car la pénétration de la lumière à travers le feuillage ne peut être modulée par la densité de surface foliaire (LAD). Quelque soit l'épaisseur du feuillage traversée, dès qu'un rayon atteint une cellule de l'enveloppe végétale dans SOLENE, ce rayonnement est atténué de moitié.

Des travaux complémentaires (non présentés ici) ont examiné la sensibilité des résultats de TEB et ses performances selon les caractéristiques des agencements de végétation. En termes de scores statistiques, ces analyses n'ont pas mis en évidence de tendances claires et systématiques lorsque l'on étudie l'impact de (1) la fraction horizontale de recouvrement des arbres (soit la fraction d'arbres) ; (2) la hauteur de la canopée arborée comparée à celle des bâtiments ; (3) la position des arbres - centrés ou sur un côté - dans le canyon. Cela peut être expliqué par l'interaction entre des effets contraires liés aux caractéristiques des agencements de végétation.

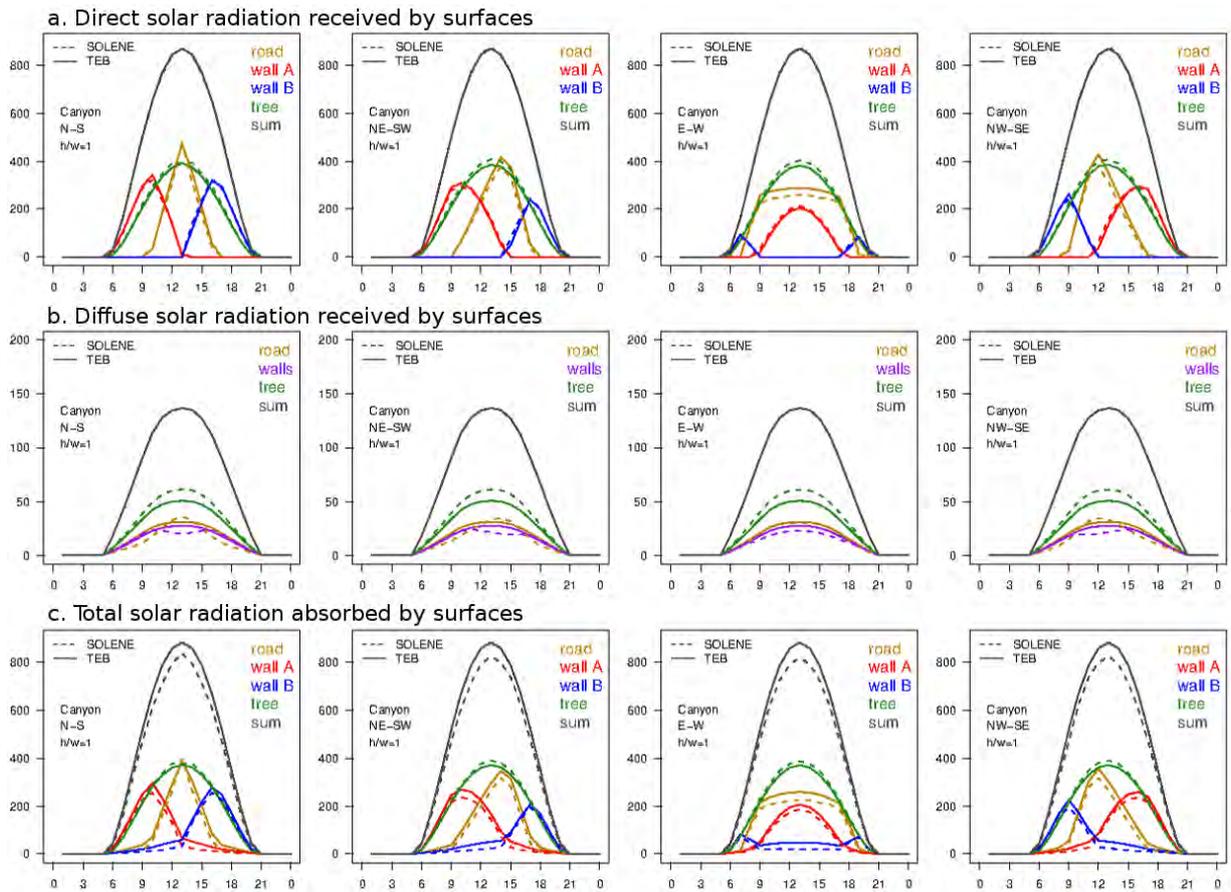


FIGURE 4.5 – Comparaison des simulations TEB et SOLENE pour le cycle journalier de rayonnement solaire direct (haut), diffus (milieu) en W m^{-2} reçus par les facettes urbaines avant les réflexions multiples, et de rayonnement solaire total absorbé par celles-ci après inter-réflexions (bas) en W m^{-2} pour des canyons pourvus d'arbres. Les résultats sont présentés ici seulement pour le rapport d'aspect de 1 et pour les quatre orientations de rue lors d'un jour d'été.

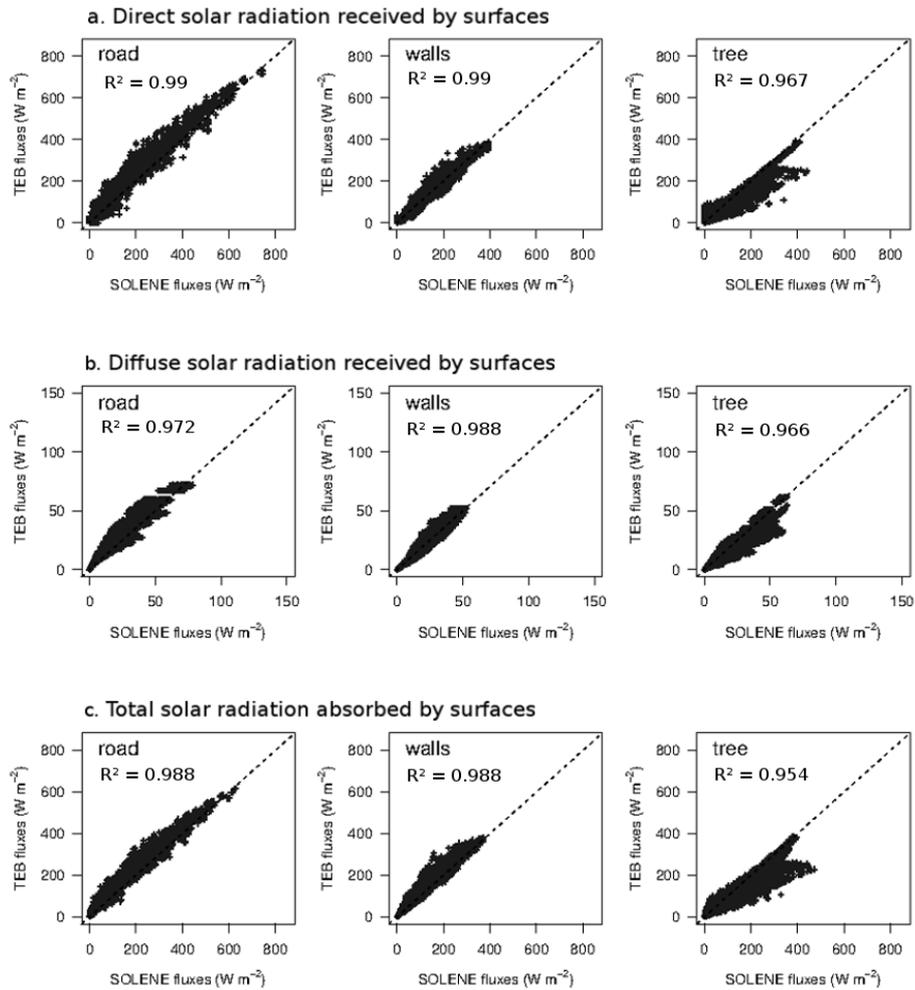


FIGURE 4.6 – Diagrammes de dispersion comparant les simulations TEB et SOLENE pour des flux horaires de rayonnement solaire direct (haut) et diffus (milieu) en $W m^{-2}$ reçus par les facettes urbaines avant les réflexions multiples, et le flux de rayonnement solaire total absorbé par celles-ci avant inter-réflexions (bas) en $W m^{-2}$ pour des canyons avec arbres. Les diagrammes rassemblent les quatre saisons, les trois rapports d’aspect et les quatre orientations de rue.

4.2.4 Avantages apportés par les développements TEB

On compare dans cette section, les simulations réalisées par la version initiale de TEB et la nouvelle version implémentée afin de comparer l'apport d'une description plus explicite de la végétation haute dans les calculs radiatifs. Contrairement au cas particulier de la comparaison avec SOLENE, on utilise la formulation exponentielle de la transmissivité au travers du couvert arboré, fonction du LAI ou du LAD selon les cas (Eq. 3.3 et Annexe B).

4.2.4.1 Analyse du comportement du rayonnement solaire absorbé par surface de canyon

Les flux de rayonnement solaire reçu et absorbé par les murs et la route peuvent être fortement affectés par la présence d'arbres. La comparaison entre la version initiale de TEB qui traite la végétation au niveau du sol et la nouvelle version qui inclut explicitement une strate additionnelle arborée, met en exergue des différences, illustrées par la Figure 4.7. On prend ici l'exemple d'un canyon orienté Nord-Sud avec un rapport d'aspect égal à 1, végétalisé selon la configuration A, pendant un jour d'été. En analysant les flux exprimés par mètres carrés de la surface considérée, les surfaces artificielles (route et murs) absorbent moins d'énergie lorsqu'elles sont ombragées par une canopée arborée explicite, tandis que les dynamiques journalières sont similaires.

Pour les arbres, la dynamique temporelle est très différentes entre les deux versions. Lorsqu'elle est traitée au sol (pour le cas de référence), la végétation est soumise à l'ombrage des bâtiments le matin et l'après-midi. En milieu de journée, dès que le fond du canyon est ensoleillé, le rayonnement absorbé par la végétation devient très important, i.e. 75 % du rayonnement reçu puisque son albédo est $\alpha_t = 0.25$ et qu'il n'y a pas dans ce cas d'effet de transmission de rayonnement au travers du feuillage. Après l'implémentation d'une canopée réelle à l'intérieur du canyon, les arbres absorbent du rayonnement dès le lever et jusqu'au coucher du soleil car ils sont hauts dans le canyon et donc moins soumis à l'ombrage des bâtiments. Cependant, autour du midi solaire, l'absorption par les arbres est substantiellement réduite par ses propriétés de transmissivité au regard de la version initiale où toutes les surfaces urbaines végétalisées sont opaques. Dans la nouvelle version, 50 % du rayonnement solaire reçu est transmis à travers le feuillage et 75 % du flux restant est absorbé par les arbres, i.e. seulement 37.5 % du rayonnement solaire total reçu par les arbres.

En comparant les flux avant et après leur pondération basée sur leur fraction dans le canyon, l'absorption de la route par mètre carré de canyon peut extrêmement varier suivant la fraction de jardin au sol dans la version initiale. En effet, dans les cas de référence, la végétation haute étant traitée comme une fraction de végétation au sol qui est

comprise dans la fraction de jardin (δ_g), la fraction de route est toujours définie comme le complémentaire $1 - \delta_g$. Par exemple ici, la fraction de route est de seulement 10 %. Pour cette expérience, les différences entre avant et après la pondération des flux absorbés par les arbres est minime car la fraction d'arbres est élevée (90 %). Il n'y a pas de différences pour les murs en fonction de l'unité des flux puisque le rapport d'aspect du canyon est de $h/w=1$.

Les nouveaux développements ont corrigé le biais systématique de sur-estimation de l'absorption par la route, la végétation basse et les murs en absence d'effet d'ombrage des arbres dans la version référence de TEB. Néanmoins, la strate arborée, devenue indépendante de la végétation basse et du sol nu, constitue également une nouvelle surface d'interception et d'absorption du rayonnement solaire. Cela peut engendrer un impact significatif sur la simulation des conditions de confort thermique des piétons aussi bien que de consommation d'énergie des bâtiments pour l'usage de la climatisation.

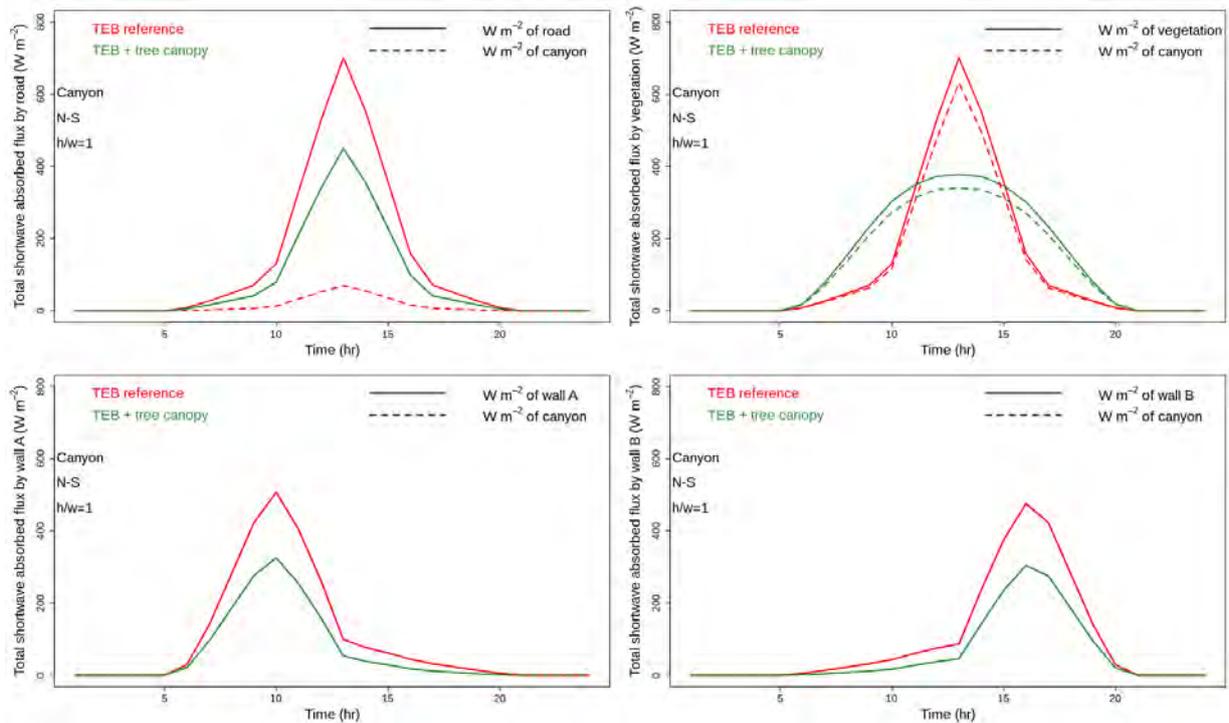


FIGURE 4.7 – Comparaison des flux de rayonnement solaire total absorbés ($W m^{-2}$) par la route, les murs et les arbres simulés par TEB dans sa version de référence et avec la nouvelle version incluant une canopée arborée. Le cas d'étude est ici la configuration A pour un canyon orienté Nord-Sud avec un rapport d'aspect de 1 durant un jour estival. Les flux sont exprimés soit en $W m^{-2}$ de la surface considérée soit en $W m^{-2}$ de canyon.

4.2.4.2 Analyse de l'albédo intégré du canyon

L'albédo intégré sur le canyon est un indicateur synthétique de l'amélioration de TEB à l'échelle du canyon entier, qui se révèle crucial lorsque la plateforme de modélisation des surfaces continentales SURFEX (intégrant TEB pour l'urbain) tourne en mode couplé avec un modèle atmosphérique comme le modèle de recherche MESO-NH (LAFORE et al., 1997) ou le modèle opérationnel nommé AROME (Y. SEITY et al., 2011). Les impacts sur le schéma radiatif du modèle atmosphérique peuvent en effet être significatifs.

L'albédo du canyon (α_{can}) est calculé comme le ratio entre le rayonnement solaire remontant, qui est déduit de la différence entre le rayonnement solaire incident total $S_{can}^\downarrow + S_{can}^\uparrow$ et le rayonnement solaire absorbé S_{can}^* , et le rayonnement solaire incident total :

$$\alpha_{can} = \frac{(S_{can}^\downarrow + S_{can}^\uparrow) - S_{can}^*}{(S_{can}^\downarrow + S_{can}^\uparrow)} \quad (4.4)$$

Pour chaque configuration, un albédo du canyon est calculé à partir des flux simulés au midi solaire. Les résultats en été sont présentés sous forme de boîtes à moustaches (Figure 4.8) qui regroupent tous les albédos calculés pour l'ensemble des agencements de végétation, mais qui distinguent les rapports d'aspect de canyon. Seuls les canyons orientés Nord-Sud sont représentés ici.

Le rapport d'aspect a un impact significatif sur l'albédo du canyon qui décroît lorsque le canyon est plus encaissé.

Les simulations sans végétation (notées NVEG) et avec la version TEB de référence donnent des résultats identiques pour α_{can} puisque la végétation est traitée au sol et que son albédo est le même que celui de la route ($\alpha_r = \alpha_g = 0.25$). Pour les canyons larges et arborés de rapport d'aspect de $h/w = 0.5$, α_{can} est systématiquement plus faible que pour les canyons non végétalisés d'après les nouvelles simulations car les arbres absorbent une partie du rayonnement incident. Pour les rapports d'aspect $h/w = 1$, l'impact des arbres varie plus selon les configurations et dépend de la balance entre leur plus grand facteur de vue et réflectivité par rapport aux surfaces artificielles et leur effet de piégeage du rayonnement solaire, en réduisant ou augmentant l'absorption totale d'énergie solaire, respectivement. Notons aussi que leur impact relatif est plus petit lorsque l'épaisseur de la couronne est petit, proportionnellement à la hauteur du bâtiment, *i.e.* les cas avec $h/w = 2$. Pour les cas où la taille et la position de la végétation ont été adaptées à des rues étroites et encaissées, on observe une plus grande variabilité de l'albédo des canyons comparé à la même forme urbaine avec des couronnes d'arbres moins épaisses, placées dans la partie inférieure du canyon.

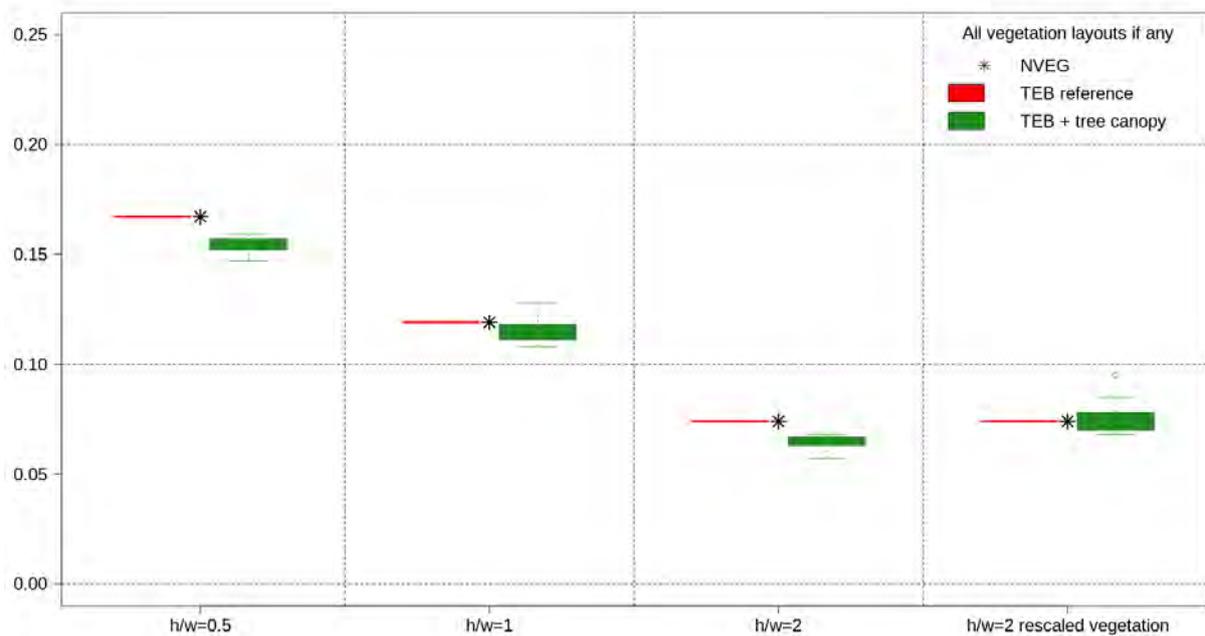


FIGURE 4.8 – Comparaison des albédos intégrés à l’échelle du canyon calculés au midi solaire à partir des simulations de référence TEB et de la nouvelle version incluant une canopée arborée. Les résultats sont présentés par rapport d’aspect pour tous les agencements de végétation combinés avec des canyons orientés Nord-Sud durant une journée d’été. Les astérisques représentent les albédos intégrés pour les canyons sans végétation.

Deuxième partie

Bilan énergétique et aérodynamique de la végétation urbaine

Influence de l'environnement péri-urbain sur le bilan d'énergie d'une pelouse

Sommaire

5.1	Dispositif expérimental	88
5.2	Modélisation numérique avec ISBA-DIF	91
5.2.1	Forçages atmosphériques	91
5.2.2	Caractéristiques du sol	92
5.2.3	Propriétés de la végétation	93
5.2.4	Paramétrisation du modèle	96
5.2.5	Initialisation des variables pronostiques	96
5.2.6	Résultats obtenus avec la configuration par défaut	96
5.3	Tests de sensibilité sur la configuration du modèle	101
5.3.1	Effet de la texture du sol	101
5.3.2	Effet du profil racinaire	105
5.3.3	Effet de la longueur de rugosité aérodynamique	107
5.3.4	Effet de l'indice foliaire	110
5.3.5	Effet de l'option TEB-SBL	112
5.3.6	Conclusion intermédiaire	113
5.4	Configuration optimisée	113
5.4.1	Effet sur la température et le contenu en eau du sol	113
5.4.2	Impact sur le rayonnement net	115
5.5	Conclusion	117

On souhaite modéliser les effets des arbres sur les bilans radiatif, thermique, hydrique et énergétique de chacun des éléments d'un canyon végétalisé. Pour cela, TEB dispose aujourd'hui d'une architecture lui permettant de faire appel à ISBA, un modèle de Transfert Sol-Végétation-Atmosphère très complet et de représenter les interactions à micro-échelle entre la végétation et les surfaces artificielles. Néanmoins, la définition des paramètres d'entrée au modèle de végétation doit être adaptée au contexte urbain que l'on veut simuler. Afin de s'assurer de la paramétrisation correcte du modèle de végétation lorsqu'il est utilisé au sein d'une maille partiellement bâtie nous avons conduit une étude de sensibilité à l'aide de ISBA en testant divers paramètres liés à la description du sol, de la végétation ou des contraintes aérodynamiques du milieu ainsi que de la discrétisation verticale du modèle (option SBL présente à la fois dans TEB et ISBA).

5.1 Dispositif expérimental

Durant la campagne expérimentale FluxSAP 2012 qui a eu lieu à Nantes (France) au printemps 2012 dans le cadre du projet VegDUD¹, une instrumentation spécifique a été mise en place dans le jardin privatif d'une maison individuelle. Le but de cette expérience était de documenter dans cet environnement local spécifique les échanges énergétiques à la surface et l'évolution des températures et contenus en eau du sol. Ce jardin a été choisi au cœur d'un quartier ouvrier appelé "Grand Clos" de la ville de Nantes. La typomorphologie du quartier est très homogène en termes d'agencement de rues, maisons et jardins, de hauteur de bâtiments, et les matériaux de construction sont similaires (Figure 5.1). Chaque unité structurale comprend une maison à un étage et un jardin privé à l'arrière. Les jardins sont principalement composés de pelouse et d'un arbre isolé.

La période expérimentale s'est étendue du 24 mai 2012 00:30 au 26 juin 2012 23:30. L'instrumentation installée dans le jardin (décrite en Figure 5.2) comprenait des capteurs de température de l'air, humidité de l'air, et pression atmosphérique à 2 m au-dessus du sol et des sondes enterrées dans le sol pour les mesures de températures et de contenus en eau du sol à différentes profondeurs (-1, -10, -35 et -65 cm). Les rayonnements solaire global et IR, descendants et montants, ont été également enregistrés à 0.80 m au-dessus de la pelouse. Enfin, un système de thermomètres IR pointait sur la pelouse, l'arbre et la maison pour mesurer la température de surface des feuilles et des murs.

Toujours sur la pelouse, un petit mât a été équipé d'un système de mesures de flux par la méthode de covariance des turbulences avec un anémomètre sonique et un hygromètre placés à 0.80 m au-dessus du sol, accompagné d'une girouette enregistrant la vitesse et la

1. Rôle du végétal dans le développement urbain durable ; une approche par les enjeux liés à la climatologie, l'hydrologie, la maîtrise de l'énergie et les ambiances, Projet ANR- 09-VILL-0007, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01188804/file/RapportScientifiqueDetailleVegDUD.pdf>

direction du vent à 2 m. Ces données ont été moyennées selon un pas de temps de 30 min et traitées par une chaîne de calcul standard. Durant une période d'observation intensive entre le 12 et le 14 juin 2012, des mesures d'évapotranspiration ont également été réalisées à l'aide d'une chambre de transpiration portable en plexiglas installée sur la pelouse, une fois par heure entre 06:00 et 22:00 et avec une intensification des mesures autour du midi solaire afin de détecter le maximum journalier.



FIGURE 5.1 – Photo du quartier Grand Clos à Nantes. Source : <http://www.sandrinemarc.com/le-grand-clos>

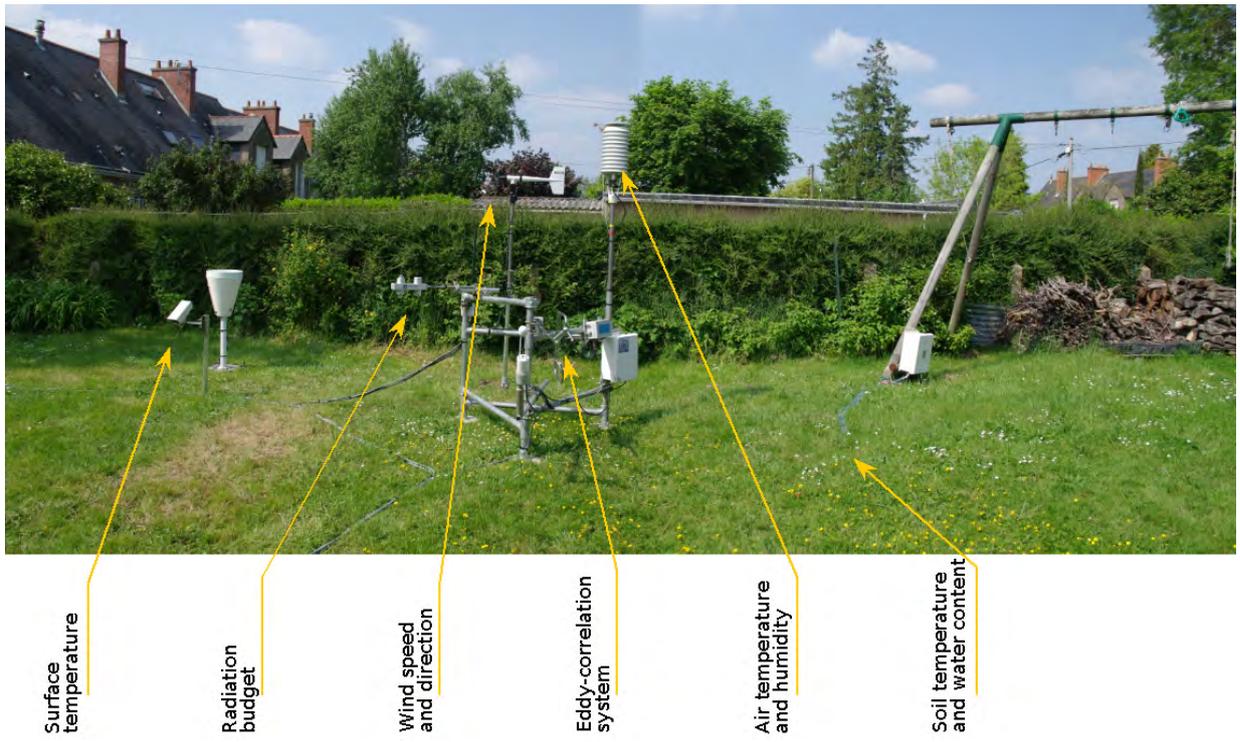


FIGURE 5.2 – Photo du dispositif instrumentel dans un jardin privé du quartier «Grand Clos», Nantes. Source : Archives de la campagne FluxSAP 2012

5.2 Modélisation numérique avec ISBA-DIF

Le modèle ISBA a tourné en mode autonome, i.e. qu'il a été forcé par des données atmosphériques locales décrites juste après, mesurées pour la plupart dans le jardin. Il a été appliqué sur un seul point de grille (47 ° 14' 38" N, 1 ° 31' 56" O) en prescrivant des données d'entrée homogènes puisque l'objectif ici est d'étudier les processus très locaux (à l'échelle de la pelouse) en supposant qu'il n'y a pas d'effets de large échelle. La simulation de référence a été réalisée sur la base de la configuration par défaut du modèle décrite plus en détails dans les sections suivantes.

5.2.1 Forçages atmosphériques

En mode autonome (non couplé avec un modèle atmosphérique), ISBA-DIF a été forcé de manière continue depuis le 24 mai jusqu'au 26 juin 2012 par des données météorologiques locales à un pas de temps de 30 minutes. Les forçages requis dans cette configuration sont les rayonnements IR et solaire (direct et diffus) incidents, les taux de précipitation, la pression atmosphérique, la température de l'air, l'humidité spécifique de l'air, et la vitesse du vent. La direction du vent n'est pas requise pour ce mode car il n'y a pas d'échanges horizontaux entre points de grille. Le dispositif instrumental permet de définir un niveau de forçage à 2 m au-dessus du sol pour la température et l'humidité de l'air, la pression et le vent. Les mesures radiatives sont quant à elles disponibles à 80 cm.

L'évolution temporelle des conditions radiative et atmosphérique durant la campagne expérimentale est présentée en Figure 5.3. On peut noter que concernant le rayonnement solaire incident, le modèle de surface a besoin des contributions séparées entre la partie directe et la partie diffuse. Ces données ne sont pas disponibles car seul le rayonnement incident global a été mesuré. En absence d'informations sur la visibilité ou la couverture nuageuse, une distribution simple et arbitraire a été faite :

$$S^\downarrow = 0.80 S_{global} \quad (5.1)$$

$$S^\uparrow = 0.20 S_{global} \quad (5.2)$$

On peut remarquer que les conditions météorologiques ont évolué durant la période expérimentale. Les dix premiers jours correspondent à une période ensoleillée avec des températures maximales journalières relativement élevées (autour de 25 ° C). Le temps est plus nuageux ensuite, et quelques événements de précipitation sont notés.

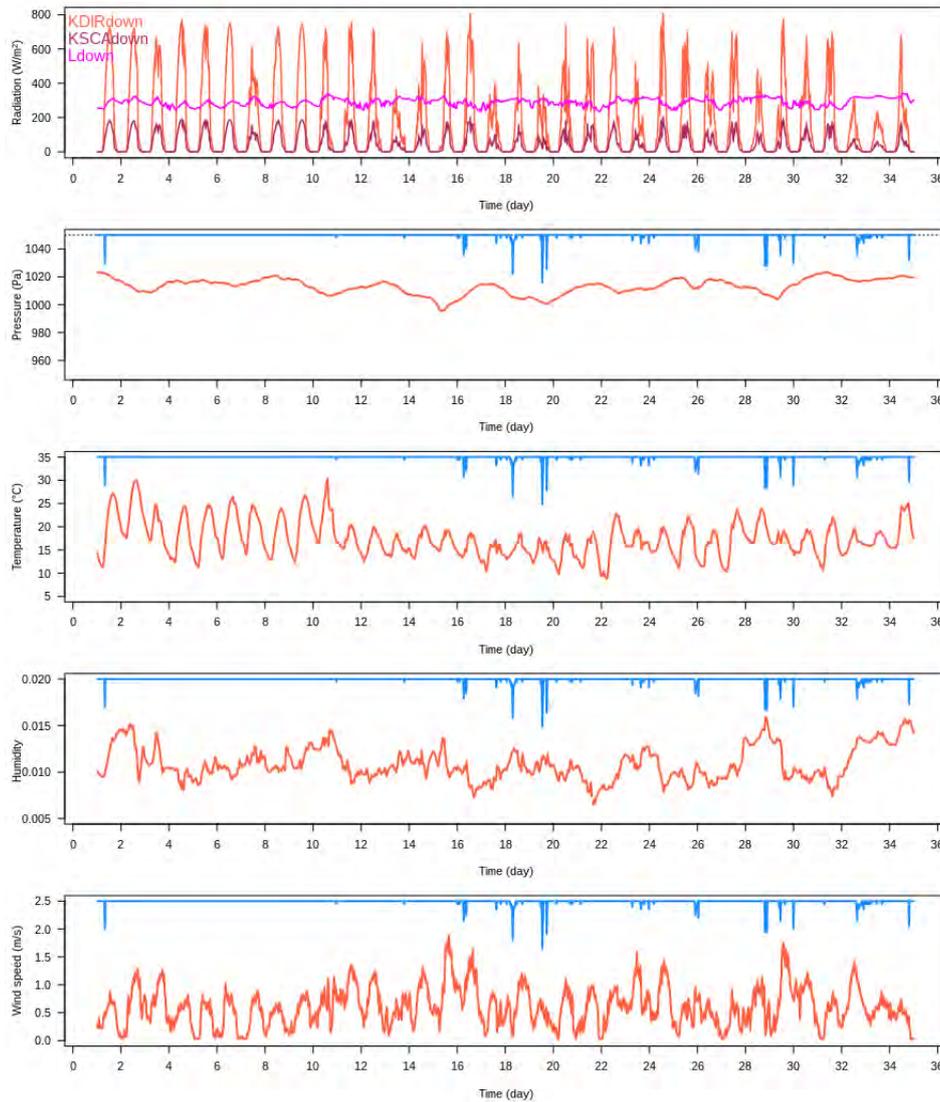


FIGURE 5.3 – Série temporelle des conditions de forçage météorologique pour les simulations ISBA-DIF : de haut en bas, les rayonnements solaire (direct et diffus) et IR incidents, la pression atmosphérique à 2 m, la température de l’air à 2 m, l’humidité spécifique à 2 m, et la vitesse du vent à 2 m. Les taux de précipitation sont indiqués en bleu sur l’axe supérieur.

5.2.2 Caractéristiques du sol

Dans la version diffusive d’ISBA, la colonne de sol est définie par une profondeur totale et décrite comme une succession de couches de sol dont le nombre et les épaisseurs peuvent être prescrits par l’utilisateur. Cette discrétisation verticale du sol est ensuite appliquée

pour les calculs numériques. Le sol est décrit par une texture (i.e. une composition en sable, argile, limon) uniforme sur toute la colonne. Sur la base de ces caractéristiques, des formulations empiriques de pédo-transfert sont appliquées pour calculer les propriétés thermiques du sol sec (capacité et conductance thermique) et les propriétés hydrologiques du sol (porosité, conductivité hydraulique à saturation, contenu en eau à la capacité au champ, coefficient pour la courbe de rétention d'eau).

Pour cette étude, la discrétisation verticale du sol a été fixée en cohérence avec les profondeurs auxquelles les mesures étaient disponibles de façon à faciliter la comparaison entre sorties de modèle et observations. La colonne de sol a une profondeur totale de 1.80 m, et est discrétisée selon 11 niveaux verticaux détaillés dans le Tableau 5.1. La texture du sol est supposée neutre, composée de 1/3 d'argile, 1/3 de sable et 1/3 de limon.

TABLE 5.1 – Paramètres de ISBA-DIF pour la configuration par défaut.

Paramètre	Unité	Valeur
Fraction de sable	%	33
Fraction d'argile	%	33
Nombre de couches de sol	-	11
Profondeur de chaque couche de sol	cm	1-3-5-8-12-20-30-40-50-80-180
Fraction cumulée de racines par horizon	%	10-20-30-50-80-100-100-100-100-100-100
Longueur de rugosité de la végétation	m	0.004
Fraction de végétation	%	100
Type de végétation	-	Herbe
Indice surfacique foliaire	$\text{m}^2 \text{ m}^{-2}$	2
Émissivité de la végétation	-	0.98
Albédo de la végétation	-	0.20

5.2.3 Propriétés de la végétation

La zone d'étude du jardin était couverte de pelouse, toujours verte et en bonne santé sur l'ensemble de la campagne de terrain (voir photo Figure 5.2). La végétation est donc définie dans ISBA-DIF comme de l'herbe, avec une fraction de végétation prescrite égale à 100%. En l'absence de mesures et en accord avec le type de végétation et la bibliographie (QIN et KARNIELI, 1999), l'indice surfacique foliaire (ou LAI) est fixé à $2 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ et l'émissivité à 0.98. Les mesures de rayonnement solaire au-dessus de la pelouse ont été exploitées pour estimer l'albédo de l'herbe (Figure 5.4) : basé sur le rapport entre le rayonnement montant et le rayonnement incident durant les heures de jour, l'albédo a été prescrit à 0.20. Notons que cette valeur est plutôt stable durant les premières semaines de la campagne de terrain.

Pourtant un déclin est observé le dix-huitième jour, qui pourrait être expliqué par la tonte de la pelouse ayant eu lieu ce jour-là.

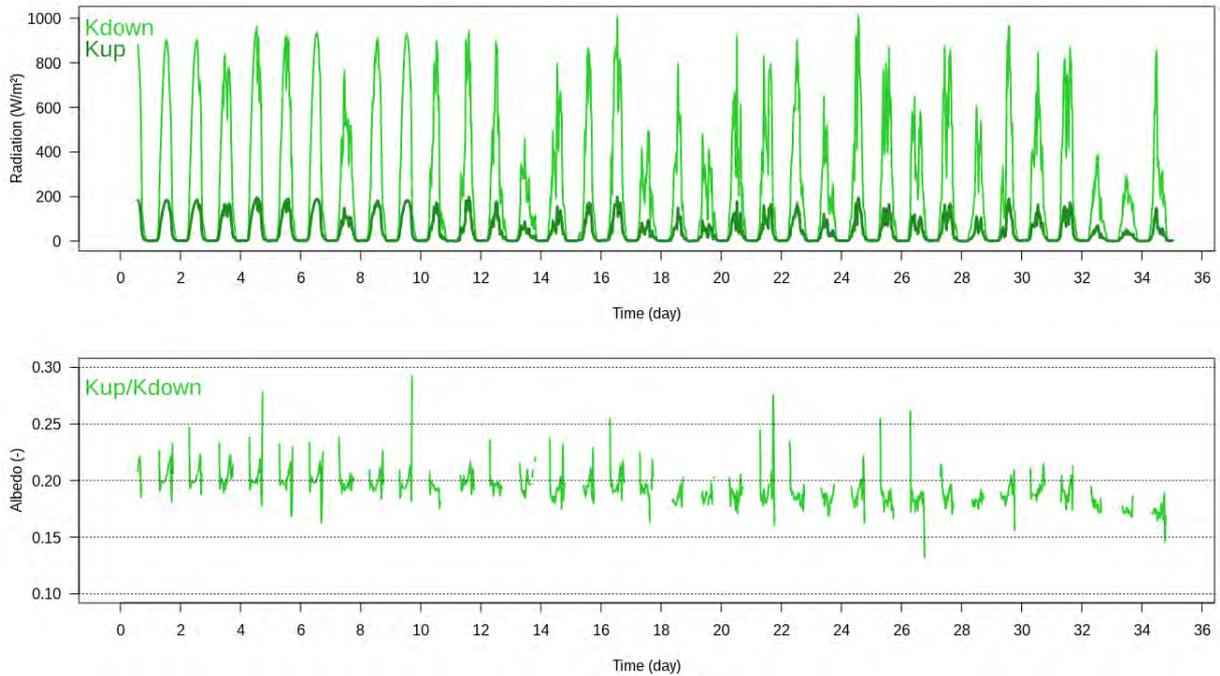


FIGURE 5.4 – Mesures de rayonnement remontant et incident (haut) et évaluation de l'albédo de la pelouse sur la base du rapport entre le rayonnement solaire montant et le rayonnement solaire incident (bas).

La longueur de rugosité aérodynamique de la végétation est simplement définie comme étant égale à un dixième de la hauteur des éléments rugueux, à savoir les brins d'herbe qui mesurent environ 4 cm de haut. Un paramètre additionnel est requis pour la végétation : la fraction d'exploration des racines par couche de sol qui indique la capacité des plantes à extraire l'eau du sol disponible. On l'exprime comme un profil vertical de densité racinaire, en pourcentage cumulé sur la colonne de sol (Tableau 5.1). Il a été fixé arbitrairement ici, bien qu'il respecte une profondeur racinaire réaliste n'excédant pas 20 cm pour une pelouse (voir Figure 5.5), de sorte que les racines sont confinées dans les six premières couches de sol.

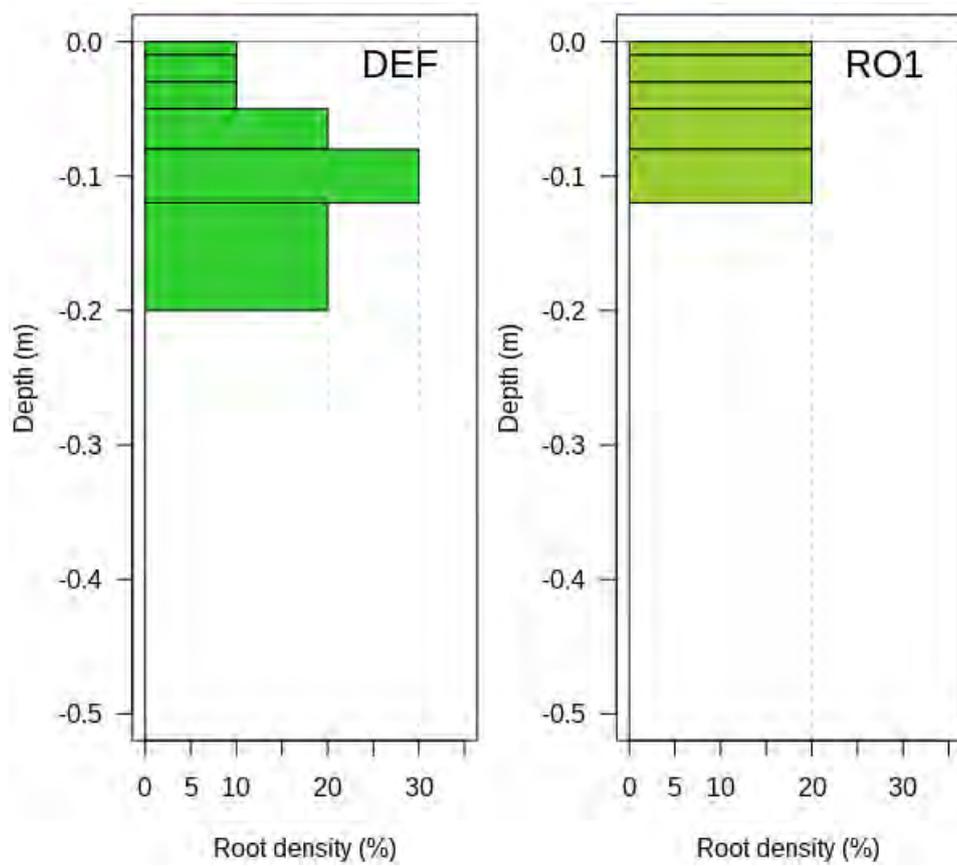


FIGURE 5.5 – Profil vertical de la fraction racinaire pour les expériences DEF et RO1.

5.2.4 Paramétrisation du modèle

Pour la configuration par défaut, le modèle ISBA est exécuté sans activer l’option TEB-SBL (HAMDI et V. MASSON, 2008 ; Valéry MASSON et Yann SEITY, 2009) qui résout un modèle simplifié de couche limite de surface entre le sommet de la canopée végétale et le niveau de forçage (fixé ici à 2 m au-dessus du sol). Dans la présente configuration, les flux d’énergie de surface sont calculés à partir des gradients de température et humidité de l’air entre la surface et le niveau de forçage.

5.2.5 Initialisation des variables pronostiques

Le modèle ISBA-DIF résout les équations d’évolution de la température du sol et du contenu en eau du sol selon la grille verticale définie par l’utilisateur. Ces variables pronostiques doivent être initialisées au début de la simulation. Elles sont ici initialisées en accord avec les données observées disponibles dans le jardin à 10, 35 et 65 cm de profondeur. Il est à noter que pour l’état hydrique du sol, les contenus en eau du sol sont initialisés dans ISBA à travers l’indice d’humidité du sol (ou *Soil Water Index*, *SWI*) défini comme :

$$SWI = \frac{(w - w_{wilt})}{(w_{fc} - w_{wilt})} \quad (5.3)$$

Cet indice exprime les conditions d’humidité du sol comme un pourcentage d’eau disponible en fonction des propriétés hydrologiques du sol considéré : le point de flétrissement (w_{wilt}) qui est la teneur en eau en-deçà de laquelle l’eau n’est plus accessible pour la plante, et le contenu en eau à la capacité au champ (w_{fc}) qui est la capacité maximale de rétention d’eau du sol qui s’établit lorsque tout l’excédent d’eau a été drainé.

L’initialisation des SWI est donc déterminée d’après la texture choisie et les propriétés hydrologiques qui en découlent. La texture du sol étant homogène sur toute la colonne de sol, les propriétés hydrologiques associées sont aussi uniformes. Néanmoins, les valeurs de SWI varient sur la verticale en fonction des contenus en eau prescrits. Les valeurs initiales de SWI pour les expériences de sensibilité sont listées dans le Tableau 5.5.

5.2.6 Résultats obtenus avec la configuration par défaut

Les performances des simulations ISBA sont évaluées selon les scores statistiques suivants :

1. La racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (*Root Mean Square Error*, RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_{OBS}(i) - x_{MOD}(i))^2}{n}} \quad (5.4)$$

2. Le biais moyen (Biais)

$$Biais = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{OBS}(i) - x_{MOD}(i))}{n} \quad (5.5)$$

3. Le pourcentage de biais (pBiais)

$$pBiais = 100. \frac{\sum_{i=1}^n (x_{OBS}(i) - x_{MOD}(i))}{\sum_{i=1}^n x_{OBS}(i)} \quad (5.6)$$

où x_{OBS} et x_{MOD} désignent les valeurs observées et simulées, respectivement, i le pas de temps considéré et n le nombre total de pas de temps. L'ensemble des RMSE et biais sont regroupés dans le Tableau 5.2 pour la température du sol et dans le Tableau 5.3 pour les scores d'humidité du sol.

La température de surface simulée correspond ici à la température de la pelouse, attribuée à la mi-hauteur de la première couche de sol, c'est-à-dire à 0.50 cm. Notons que cette variable sera comparée tout au long de l'analyse de sensibilité aux deux mesures disponibles suivantes : T_{surf} , soit la température du sol mesurée à 1 cm de profondeur et T_{lawn} , soit la température radiante de la pelouse.

La température journalière moyenne et l'amplitude journalière décroissent avec la profondeur de sol à la fois dans les sorties modèle et les observations. La RMSE est significativement améliorée entre le premier niveau (8.22 °C) et le niveau de mesure le plus bas (3.39 °C). Cette amélioration est majoritairement due à la forte diminution de l'amplitude journalière. Cependant, le modèle surestime systématiquement la moyenne journalière de la température de sol, comme le traduit le biais autour de +4 °C quel que soit le niveau de mesure.

Les deux premières semaines de l'expérimentation de terrain ont été caractérisées par une période sèche sans précipitations importantes. Un assèchement progressif du sol a été observé (avec une diminution continue du contenu en eau à 10 cm de profondeur depuis 0.29 à 0.18 m³ m⁻³). Les semaines suivantes, le contenu en eau a augmenté de nouveau et varié autour de valeurs supérieures à cause d'événements de précipitation plus fréquents. Le contenu en eau du sol enregistré dans les couches les plus profondes (35 et 65 cm de profondeur) indique une diminution légère mais continue de l'humidité du sol tout le long de la période expérimentale.

Le modèle simule correctement les variations temporelles de l'humidité du sol proche

de la surface. Néanmoins, il sous-estime l'assèchement du sol durant la seconde semaine. Le modèle est ici contraint par la définition du contenu en eau au point de flétrissement qui est prescrit à $0.213 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ par le biais des caractéristiques de texture, alors que les observations suggèrent que le contenu en eau au point de flétrissement est bien plus faible. À 35 cm de profondeur, l'humidité du sol modélisée diverge dans le temps et tend à surestimer l'humidité réelle. À 65 cm de profondeur, un écart est présent tout au long de la simulation avec une sous-estimation régulière de 4 à 7 % environ.

Les résultats exposés précédemment soulignent le besoin de conduire une analyse de sensibilité afin de raffiner les paramètres en jeu dans les simulations de cet environnement particulier de jardin privatif en milieu urbain résidentiel. Des solutions potentielles émergent pour améliorer les scores statistiques obtenus avec la simulation par défaut.

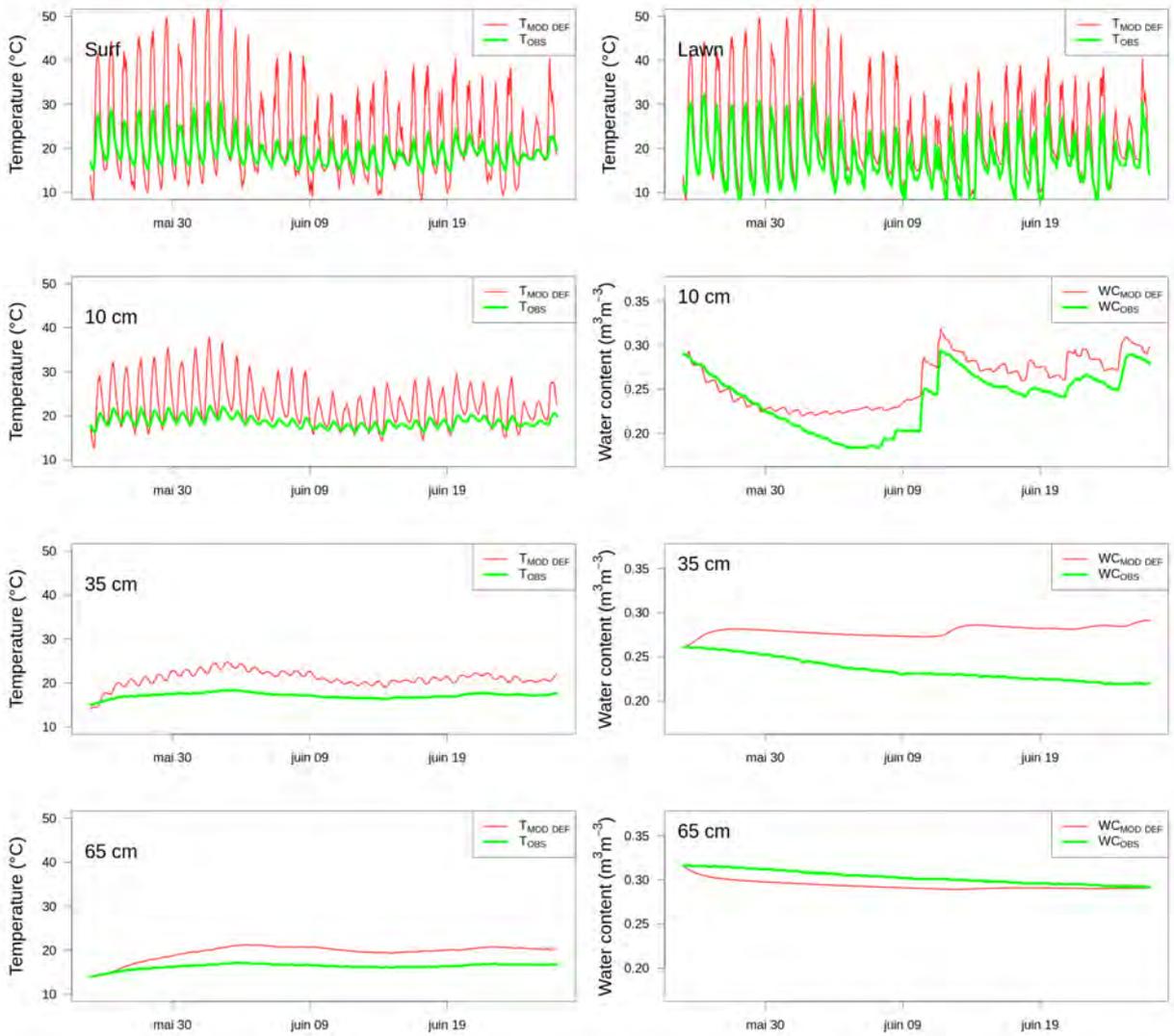


FIGURE 5.6 – Comparaison entre les sorties modèle et les observations pour la configuration par défaut de ISBA-DIF.

TABLE 5.2 – Scores statistiques pour la température du sol (RMSE et Biais en °C) calculés pour toutes les expériences de sensibilité entre les résultats ISBA-DIF et les observations *in situ*.

	T(Surf)		T(Pelouse)		T(-10cm)		T(-35cm)		T(-65cm)	
	RMSE	Biais	RMSE	Biais	RMSE	Biais	RMSE	Biais	RMSE	Biais
DEF	8.22	+4.10	7.55	+5.79	5.53	+4.07	4.09	+3.91	3.39	+3.21
TX1	6.52	+2.84	5.64	+4.53	4.35	+2.94	3.15	+3.04	2.71	+2.58
TX2	6.66	+3.19	5.96	+4.87	4.79	+3.33	3.57	+3.44	2.97	+2.84
RO1	8.49	+4.30	7.87	+5.98	5.74	+4.24	4.28	+4.06	3.53	+3.33
LAI1	8.71	+4.49	8.04	+6.18	5.88	+4.44	4.38	+4.21	3.62	+3.44
LAI2	8.00	+3.93	7.34	+5.62	5.38	+3.91	3.97	+3.78	3.29	+3.10
Z01	5.88	+1.98	4.86	+3.66	3.66	+2.11	2.47	+2.31	2.07	+1.96
Z02	3.49	-0.19	1.98	+1.50	2.08	+0.11	0.89	+0.68	0.73	+0.68
SBL	8.52	+4.35	7.87	+6.03	5.76	+4.30	4.28	+4.09	3.54	+3.35
TX2-Z02	3.05	-0.48	1.58	+1.21	2.10	-0.10	0.85	+0.59	0.66	+0.61

TABLE 5.3 – Scores statistiques pour les contenus en eau du sol (RMSE en $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, pBiais en %) calculés pour toutes les expériences de sensibilité entre les résultats ISBA-DIF et les observations *in situ*.

	w(-10cm)		w(-35cm)		w(-65cm)	
	RMSE	pBiais	RMSE	pBiais	RMSE	pBiais
DEF	0.0243	+8.12	0.0469	+8.68	0.0102	+3.07
TX1	0.0256	+7.66	0.0356	+4.19	0.0257	+8.36
TX2	0.0184	+3.45	0.0149	+4.40	0.0061	+1.30
R01	0.0307	+0.73	0.0503	+0.06	0.0093	+2.62
LAI1	0.0323	+1.73	0.0509	+0.10	0.0096	+2.65
LAI2	0.0210	+6.46	0.0452	+8.08	0.0105	+3.22
Z01	0.0273	+9.37	0.0481	+9.12	0.0100	+2.94
Z02	0.0361	+3.19	0.0528	+0.75	0.0095	+2.44
SBL	0.0239	+7.92	0.0467	+8.61	0.0102	+3.09
TX2-Z02	0.0177	+0.72	0.0146	+2.71	0.0086	+2.05

5.3 Tests de sensibilité sur la configuration du modèle

On s'attend à ce que la simulation de l'humidité du sol par le modèle soit sensible à la prescription des propriétés du sol. Les paramètres de texture du sol peuvent se révéler être des paramètres fortement influents. En raison des paramétrisations ISBA et particulièrement des fonctions de pédo-transfert, les fractions de sable et d'argile sont impliquées dans les calculs des propriétés hydrologiques, et ils modifient la capacité du sol à retenir ou à drainer l'eau. On s'attend à ce que la simulation de la température du sol, quant à elle, soit principalement impactée par les échanges énergétiques en surface et par conséquent par la caractérisation des propriétés de la végétation : longueur de rugosité aérodynamique de l'herbe, indice foliaire, émissivité et albédo.

Un jeu d'expériences de sensibilité a été constitué en faisant varier différents paramètres un par un dans le but d'évaluer l'effet de la texture du sol, du profil racinaire, du LAI, de la longueur de rugosité aérodynamique et des calculs liés à la paramétrisation des échanges de surface. Les simulations sont évaluées et comparées sur la base de l'évolution temporelle de la température et du contenu en eau du sol aux différentes profondeurs, et des scores statistiques associés (RMSE et pourcentage de biais).

5.3.1 Effet de la texture du sol

On a pu tirer profit de mesures *in situ* de texture du sol qui ont été réalisées par le laboratoire IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux) de Nantes dans la zone d'étude à trois profondeurs :

- 10 cm : 0-20cm => 60% sable, 23% argile, 17% limon - 35 cm : 20-50 cm => 50% sable, 14% argile, 36% limon - 65 cm : 50-180 cm => 30% sable, 30% argile, 40% limon

Ces données ont été utilisées de deux manières :

La première approche (expérience TX1, Tableau 5.4) est contrainte par le fait que la version actuelle de ISBA-DIF suppose une texture de sol homogène dans toute la colonne de sol. Pour répondre à cette contrainte, les pourcentages définis pour les trois profondeurs ont été moyennés afin de prescrire des propriétés moyennes (i.e. 45 % de sable et 22 % d'argile dans la colonne de sol).

Dans une seconde étape (expérience TX2, Tableau 5.4), un profil vertical de texture du sol a été spécifié (codé en dur dans ISBA-DIF) dans le but de tenir compte de l'hétérogénéité verticale documentée par les mesures *in situ*. On a séparé les couches de sol en trois zones (0-20 cm, 20-50 cm, 50-180 cm), et prescrit pour chacune d'elles les pourcentages observés : 60, 50, 30 % de sable, et 23, 14, 30 % d'argile, dans les trois zones, respectivement.

TABLE 5.4 – Description des expériences de sensibilité.

Expé	Description	
DEF	Configuration par défaut	-
TX1	Profil vertical moyen de texture du sol basé sur les observations <i>in situ</i>	45% sable, 22% argile, 33% limon
TX2	Profil vertical hétérogène de texture du sol basé sur les observations <i>in situ</i>	0-20 cm => 60% sable, 23% argile, 17% limon 20-50 cm => 50% sable, 14% argile, 36% limon 50-180 cm => 30% sable, 30% argile, 14% limon
R01	Profil vertical homogène de fraction racinaire (20 % dans les 5 premières couches)	Fractions racinaires = 20-40-60-80-100-100-100-100-100-100
LAI1	Diminution de l'indice foliaire	LAI = 1 m ² m ⁻²
LAI2	Augmentation de l'indice foliaire	LAI = 3 m ² m ⁻²
Z01	Augmentation de la longueur de rugosité aérodynamique	z ₀ =0.04 m
Z02	Augmentation de la longueur de rugosité aérodynamique	z ₀ =0.40 m
SBL	Activation de l'option TEB-SBL pour ISBA	
TX2-Z02	Combinaison de TX2 et Z02	0-20 cm => 60% sable, 23% argile, 17% limon 20-50 cm => 50% sable, 14% argile, 36% limon 50-180 cm => 30% sable, 30% argile, 40% limon z ₀ =0.40 m

TABLE 5.5 – Caractéristiques hydrologiques de ISBA selon la texture du sol pour les expériences DEF, TX1, et TX2. Pour les autres expériences, les caractéristiques du sol sont similaires au cas par défaut (DEF).

Propriétés	DEF	TX1	TX2		
	0-1.8 m	0-1.8 m	0-0.2 m	0.2-0.5 m	0.5-1.8 m
Fraction de sable (-)	0.33	0.45	0.60	0.50	0.30
Fraction d'argile (-)	0.33	0.22	0.23	0.14	0.30
Conductivité hydraulique à saturation (m ⁻¹)	2.37e-6	6.27e-6	8.69e-6	14.5e-6	2.69e-6
Potentiel matriciel à saturation (m)	-0.363	-0.284	-0.210	-0.27	-0.385
Coefficient b (-)	8.022	6.515	6.652	5.419	7.611
Contenu en eau au point de flétrissement (m ³ m ⁻³)	0.213	0.174	0.178	0.139	0.203
Contenu en eau à la capacité au champ (m ³ m ⁻³)	0.357	0.317	0.280	0.294	0.359
Porosité (m ³ m ⁻³)	0.459	0.446	0.429	0.440	0.462
Conductivité thermique (sol sec) (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.199	0.208	0.220	0.212	0.197
Conductivité thermique (solides) (W m ⁻¹ K ⁻¹)	3.212	3.746	4.539	3.994	3.091
SWI initial (-)	10 cm	0.535	0.811	1.099	-
	35 cm	0.333	0.608	-	0.787
	65 cm	0.715	0.993	-	-
					0.724

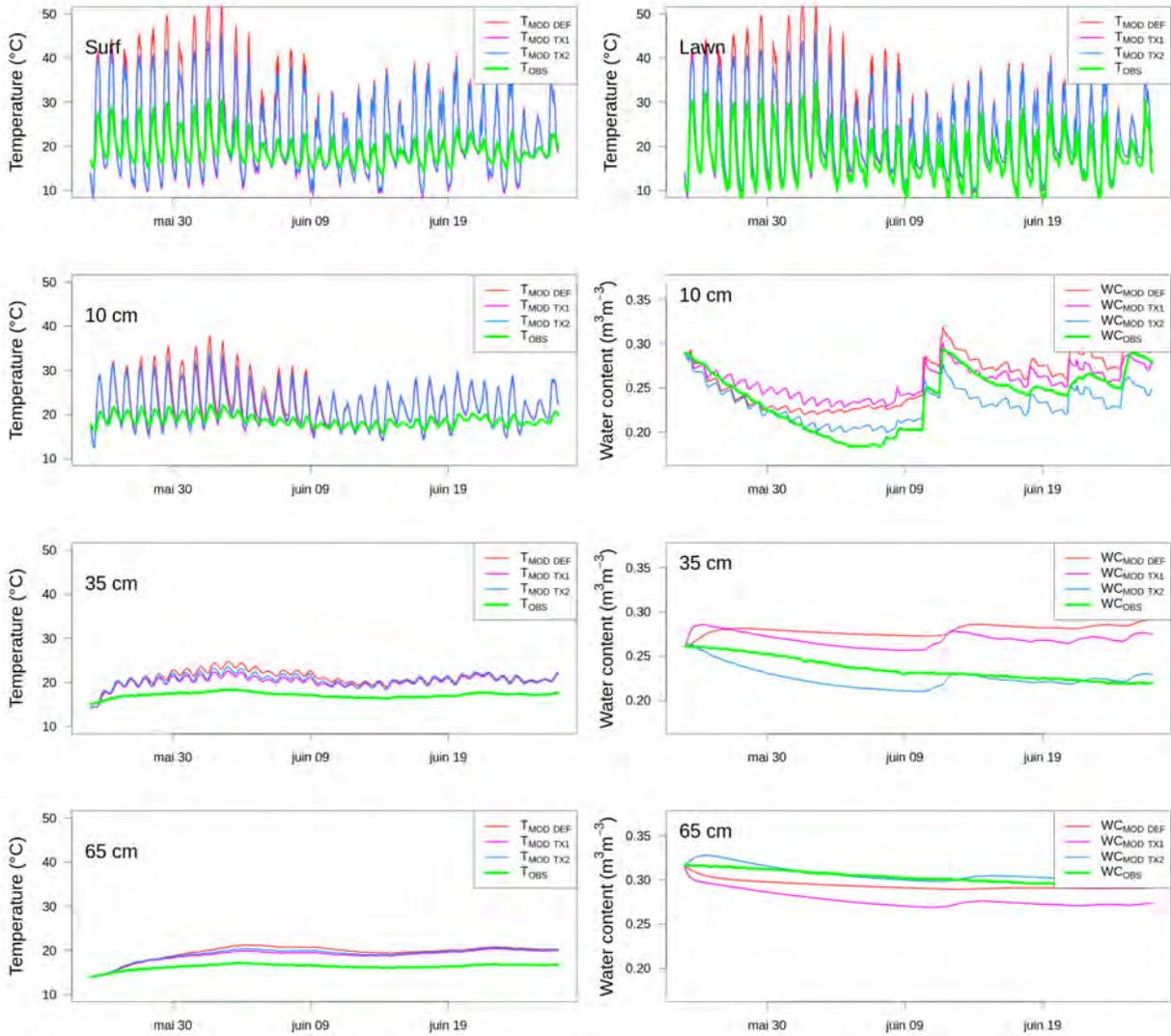


FIGURE 5.7 – Effet de la définition de la texture du sol sur les performances du modèle. Voir Tableau 5.4 pour la description des tests de sensibilité (DEF, TX1 et TX2).

Les caractéristiques de texture du sol, aussi bien que les propriétés thermiques et hydrologiques du sol déduites depuis les fractions de sable et d'argile, sont notées dans le Tableau 5.5 pour les trois expériences : DEF, TX1, et TX2.

La modification des fractions de sable et d'argile influence l'évolution du contenu en eau du sol aux trois profondeurs de sol étudiées, mais plus significativement à 10 et 35 cm de profondeur (Figure 5.7, Tableau 5.3). Pour ces profondeurs, les couches ISBA sont caractérisées par des sols plus sablonneux, c'est pourquoi le contenu en eau du sol au point de flétrissement est plus bas, ainsi que les coefficients de la courbe de rétention de l'eau. Les dynamiques pour l'humidité du sol sont par conséquent différentes – avec un assèchement du sol plus efficace – et en meilleur accord avec les observations.

Un léger effet de la texture du sol est observé sur la température du sol : TX1 et TX2 fournissent des résultats légèrement meilleurs que ceux obtenus par défaut, reliés à une diminution de l'amplitude journalière de la température du sol, et un léger refroidissement de la température du sol en profondeur (Figure 5.7, Tableau 5.2).

5.3.2 Effet du profil racinaire

L'herbe semée dans les jardins privés appartient généralement à du *Ray-grass* avec un système de racines fibreuses typiques. Dans cet environnement urbain avec un sous-sol particulièrement remanié et contraignant, l'extension en profondeur des racines peut être restreinte par un semis dense, un sol compacté, une coupe et un piétinement réguliers. Par conséquent, les racines peuvent être confinées dans les premiers centimètres de sol.

Dans la configuration par défaut, les racines s'étendent jusqu'à 20 cm de profondeur avec une fraction racinaire maximale autour de 8-12 cm de profondeur (Figure 5.5). Pour l'expérience RO1, la distribution de fraction racinaire testée présente une distribution homogène de 20 % appliquée aux cinq couches de sol les plus superficielles (0-12 cm de profondeur).

La distribution homogène et superficielle de la fraction racinaire ne modifie pas significativement les résultats en termes de température et d'humidité du sol, excepté pour le contenu en eau du sol à 10 cm de profondeur durant les deux premières semaines de la période expérimentale : dans ce cas, les résultats sont légèrement dégradés avec un assèchement du sol moins important dans l'expérience RO1 (Figure 5.8, Tableaux 5.2 et 5.3).

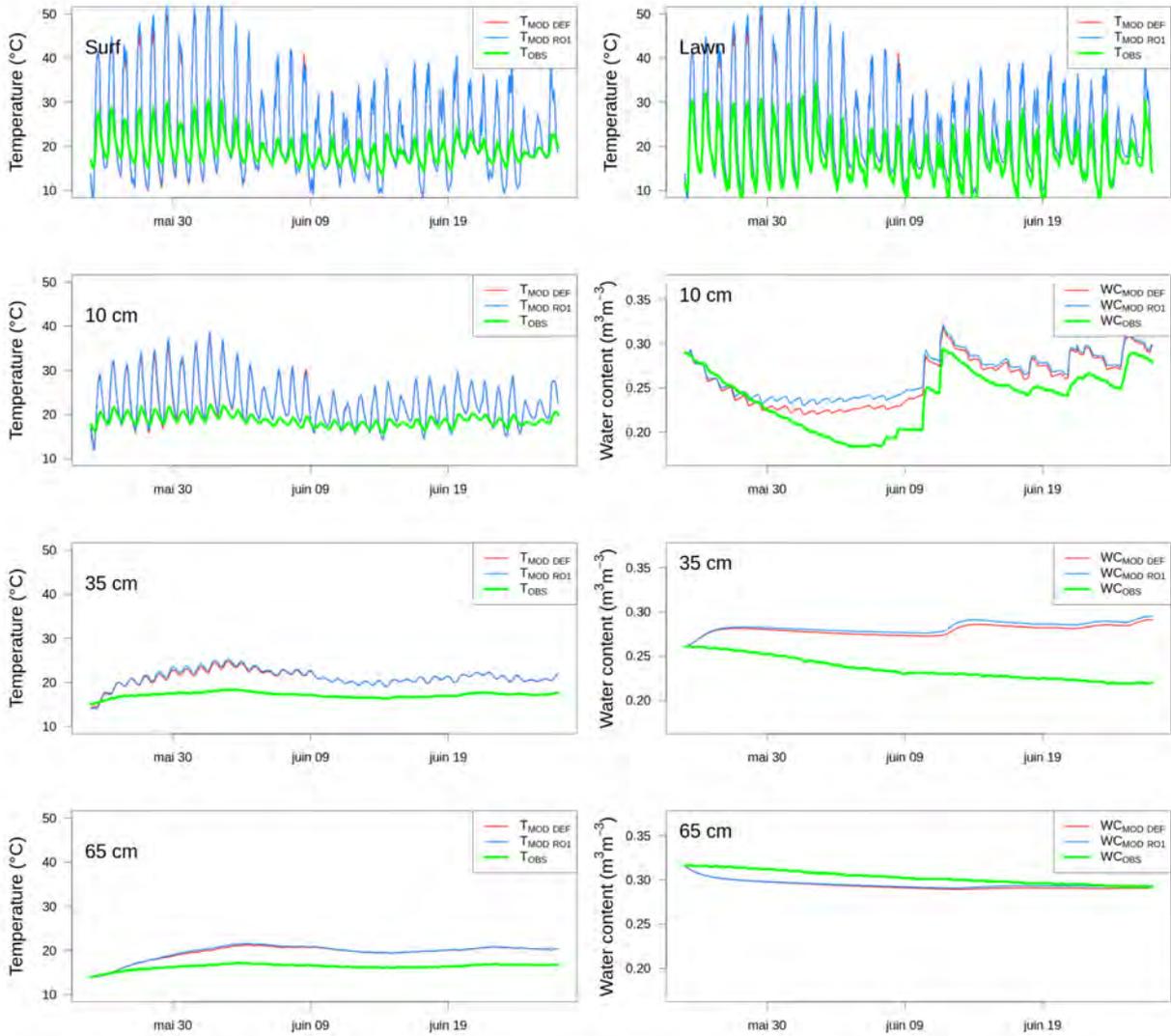


FIGURE 5.8 – Effet de la définition du profil racinaire sur les performances du modèle. Voir Tableau 5.4 pour la description des tests de sensibilité (DEF et RO1).

5.3.3 Effet de la longueur de rugosité aérodynamique

Les résultats précédents ont montré une surestimation systématique de la température du sol à chaque niveau de la colonne de sol (Figure 5.6). La température du sol du premier niveau simulé par ISBA est particulièrement élevée comparée aux mesures. Une hypothèse probable est que la longueur de rugosité aérodynamique – qui gouverne l'intensité des échanges turbulents – est ici prescrite à une valeur trop faible (0.004 m pour l'herbe). Le jardin étudié couvre seulement quelques centaines de mètres carrés et est délimité par la maison et une clôture. Il est évident que les échanges turbulents qui ont lieu au-dessus de l'herbe sont altérés par l'environnement complexe aux alentours (maisons, clôtures, arbres). Dans ce contexte, la longueur de rugosité aérodynamique peut être un paramètre clé pour représenter le bilan d'énergie du jardin en prenant en compte l'influence de la typo-morphologie locale.

La bibliographie nous fournit quelques chiffres sur lesquels nous nous sommes appuyés pour mener l'analyse de sensibilité de ISBA-DIF sur le paramètre de longueur de rugosité aérodynamique. Les travaux de MILFORD (1974) suggèrent que la longueur de rugosité aérodynamique correspondant à une large zone enherbée est autour de 0.007 m, soit du même ordre de grandeur que notre valeur par défaut ($z_0=0.004$ m), dépendant de la hauteur typique du gazon. Plus récemment, des études concernant les contextes péri-urbains ou quartiers résidentiels avec une hauteur de bâtiments et une densité bâtie faibles (C. GRIMMOND et Timothy R OKE, 1999) fournissent des longueurs de rugosité aérodynamiques décrivant la surface entre 0.3 et 0.8 m, respectivement.

L'étude réalisée par DOUVILLE, ROYER et MAHFOUF (1995) ayant recours au modèle ISBA et s'intéressant au bilan d'énergie d'un manteau neigeux en environnement naturel, notamment au Col de Porte dans les Alpes, a démontré la nécessité d'utiliser une longueur de rugosité aérodynamique de surface globale, incluant les effets des forêts mais aussi des éléments topographiques dans l'environnement immédiat, s'ajoutant à la très faible rugosité propre à la neige. Les températures de surface ainsi simulées sont en meilleure adéquation avec la réalité. Leurs résultats s'appuient sur une série longue de mesure de température de surface (du 17/12/88 au 08/05/89). Ces conclusions ont amené à des modifications dans la paramétrisation des longueurs de rugosité aérodynamiques propres aux surfaces urbaines dans TEB. Bien que l'approche ici choisie pour faire varier la longueur de rugosité aérodynamique d'une pelouse en contexte urbain complexe soit limitée, il conviendrait à l'avenir de veiller à utiliser une valeur de ce paramètre caractéristique de l'environnement proche pour les calculs de bilan d'énergie en milieu hétérogène. Il serait pertinent d'étudier plus en détails l'évolution conjointe des longueurs de rugosité thermique et dynamique et leur effet sur la température de surface voire de développer une méthode permettant de déduire une approximation de la longueur de rugosité aérodynamique réelle à partir de sites expérimentaux instrumentés, par exemple par méthode inverse de modélisation.

Outre la configuration par défaut ($z_0=0.004$ m), on a testé ici deux valeurs de longueur de rugosité aérodynamique de 0.04 m (expérience Z01) et 0.4 m (expérience Z02). Ce paramètre a une forte influence sur la température du sol (Figure 5.9). Plus la longueur de rugosité aérodynamique est élevée, meilleurs sont les scores statistiques (Tableau 5.2. Dans le cas $z_0=0.4$ m (100 fois plus grand que la valeur par défaut), l'amplitude journalière de la température du sol est fortement réduite, particulièrement près de la surface, avec des maxima et minima en meilleur accord avec les observations. Ce résultat semble confirmer la modification significative de l'écoulement du vent au-dessus de la pelouse d'un jardin entouré par des obstacles tels que des clôtures et des maisons en comparaison avec une vaste étendue d'herbe dans un environnement naturel.

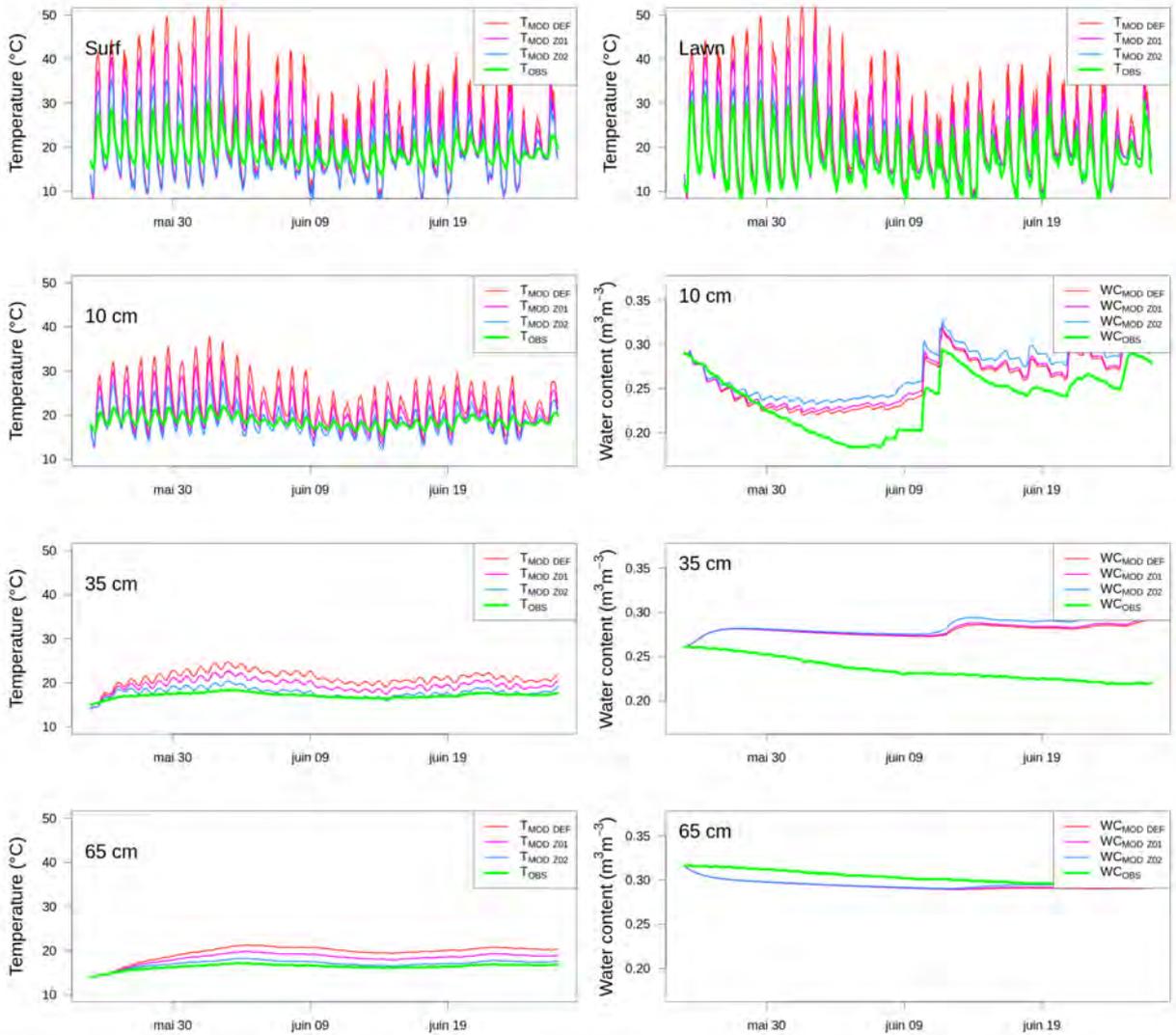


FIGURE 5.9 – Effet de la définition de la longueur de rugosité aérodynamique sur les performances du modèle. Voir Tableau 5.4 pour la description des tests de sensibilité (DEF, Z01 et Z02).

5.3.4 Effet de l'indice foliaire

En l'absence de données de terrain pour la caractérisation du LAI du jardin étudié, notre démarche ici est de tester la sensibilité du modèle ISBA-DIF aux valeurs de LAI autour de la valeur par défaut. La prescription du LAI influence le taux de transpiration des plantes car il caractérise la surface de feuilles par m^2 de sol. Il impacte également la capacité d'interception de l'eau précipitée.

Selon l'expérimentation de SIMON et LEMAIRE (1987), l'espèce *Lolium perenne*, qui est classiquement semée dans les jardins privés, est caractérisée par un développement rapide des feuilles et atteint un maximum de surface foliaire de 2 ou 3 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$, suivant l'apport d'azote. Dans notre cas, nous avons prescrit deux valeurs différentes de LAI, à savoir 1 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ (expérience LAI1) et 3 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ (expérience LAI2).

En général, le LAI fixé à 3 améliore légèrement le RMSE pour le contenu en eau du sol à 10 cm de profondeur (Figure 5.10, Tableau 5.3) mais il y a peu de différences entre un LAI de 2 ou 3 $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$. Ce résultat est cohérent avec l'hypothèse que l'herbe est bien installée et a atteint un stade de développement complet.

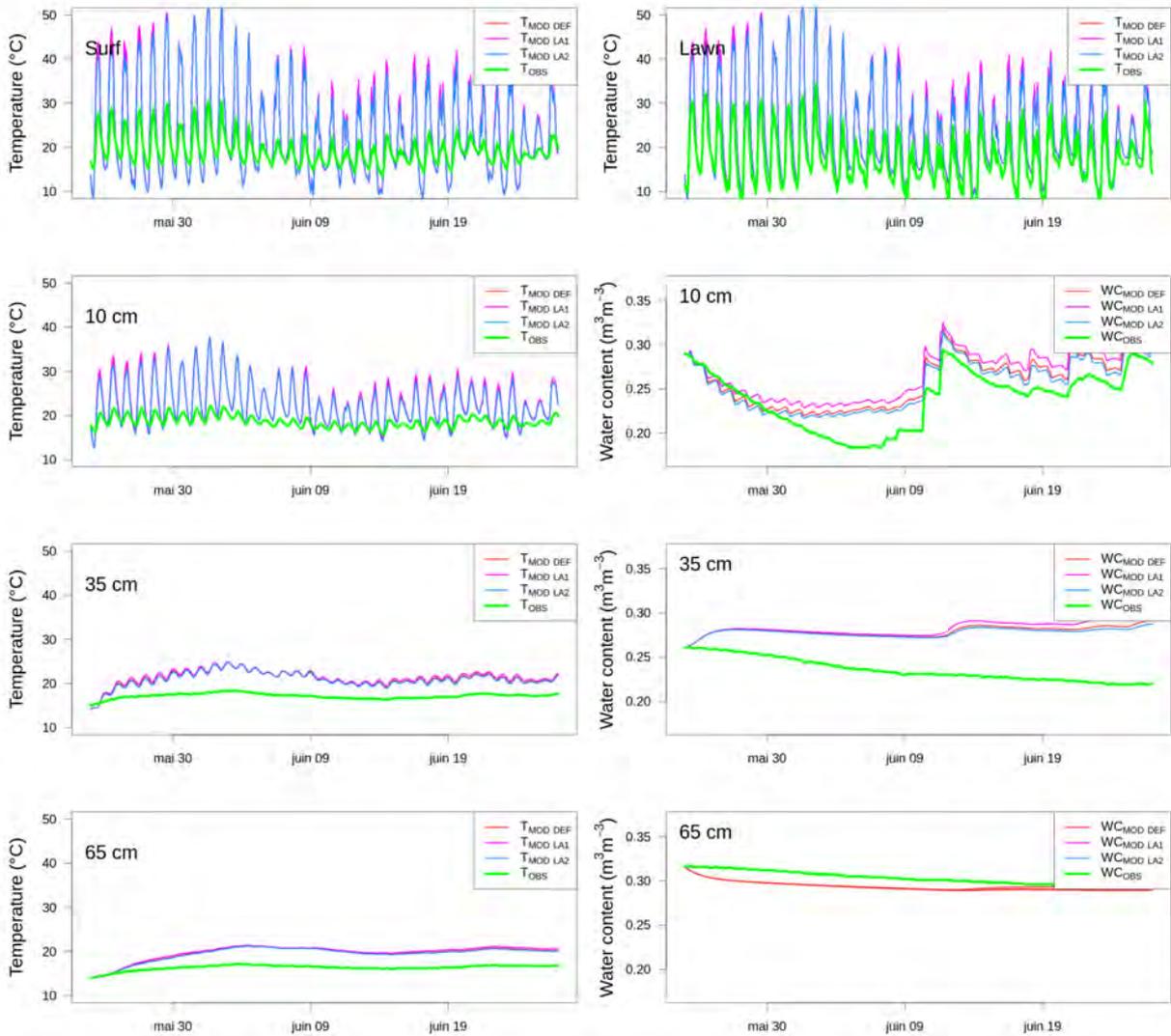


FIGURE 5.10 – Effet de la définition de l'indice de surface foliaire (LAI) sur les performances du modèle. Voir Tableau 5.4 pour la description des tests de sensibilité (DEF, LAI1 et LAI2).

5.3.5 Effet de l'option TEB-SBL

L'option TEB-SBL (activée dans l'expérience SBL) nous permet d'assigner les flux d'énergie à des niveaux spécifiques dans la colonne d'air. Dans le cas présent, les résultats obtenus avec les expériences DEF et SBL sont très comparables car les niveaux de forçage sont bas donc le modèle simplifié de couche limite implémenté dans l'option TEB-SBL n'a pas d'impact sur les résultats (Figure 5.11).

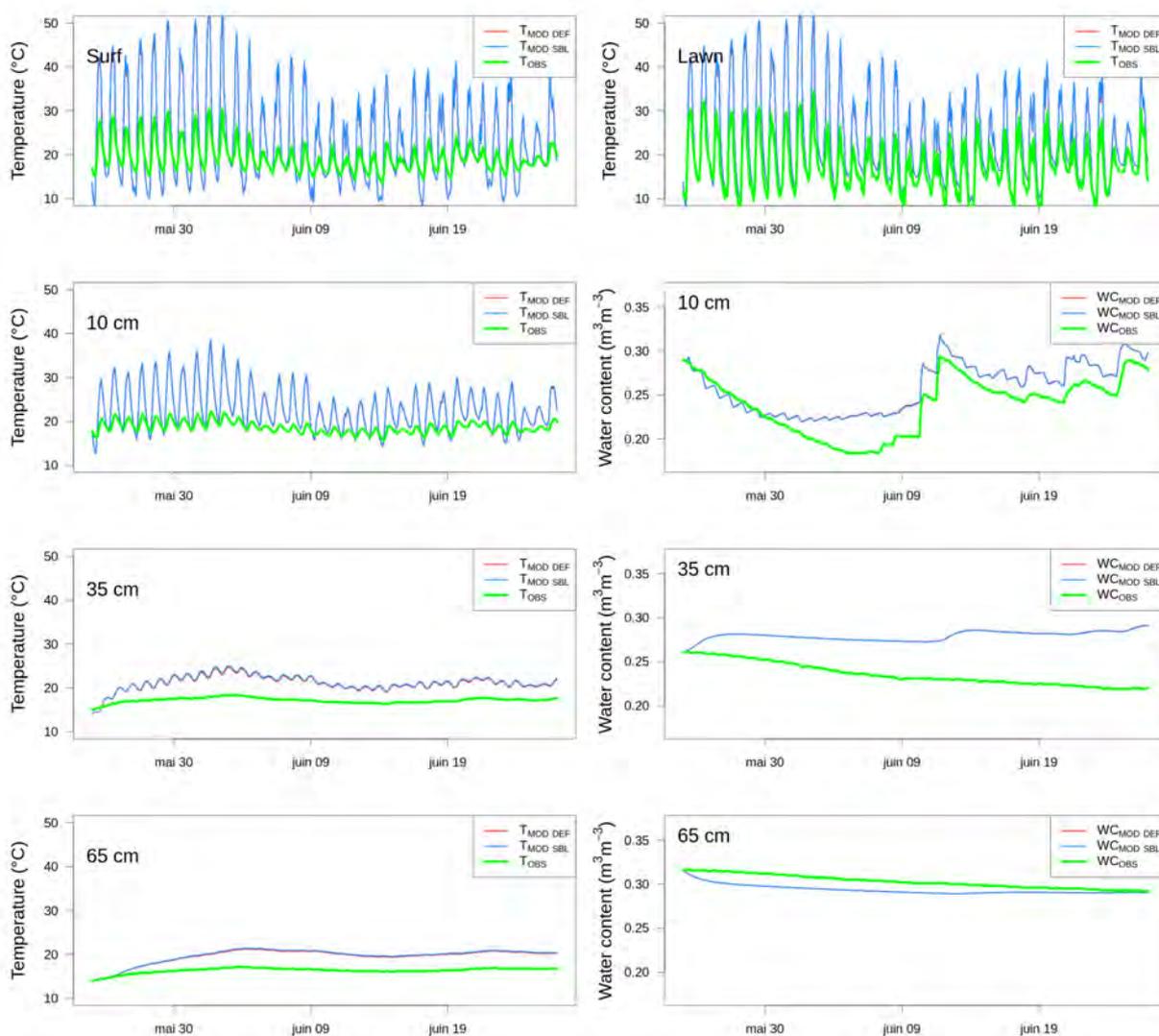


FIGURE 5.11 – Effet de l'activation de l'option TEB-SBL sur les performances du modèle. Voir Tableau 5.4 pour la description des tests de sensibilité (DEF et SBL).

5.3.6 Conclusion intermédiaire

L'analyse des résultats obtenus avec la configuration par défaut DEF a révélé certaines faiblesses dans les performances de simulation de la température et l'humidité du sol. Afin de comprendre l'origine de ces limitations et d'améliorer les résultats, nous avons testé différentes configurations de texture du sol, profil racinaire, longueur de rugosité aérodynamique et LAI. Les scores statistiques nous ont aidé à évaluer la qualité des simulations au regard de la définition de la texture du sol ou du profil racinaire pour la représentation de l'humidité du sol. D'autre part, l'étude a confirmé le rôle clé de la longueur de rugosité aérodynamique dans la prédiction de la température du sol. Il semble crucial de prendre en compte l'impact de l'environnement local sur l'écoulement du vent et la définition de la longueur de rugosité aérodynamique. L'indice de surface foliaire (LAI) a également une légère influence sur la qualité des résultats.

5.4 Configuration optimisée

5.4.1 Effet sur la température et le contenu en eau du sol

Suite à l'analyse précédente, une dernière simulation combinant les meilleures options pour la texture du sol (TX2) et la longueur de rugosité aérodynamique (Z02) a été réalisée, nommée expérience TX2-Z02.

La modélisation de la température est principalement influencée par la longueur de rugosité aérodynamique prescrite pour l'herbe. À partir d'une certaine profondeur, la dynamique du contenu en eau du sol est directement reliée aux propriétés hydrologiques (et par conséquent à la texture du sol). Néanmoins, les différences majeures entre les tests de sensibilité qui ont permis d'évaluer l'influence de la texture du sol et de la longueur de rugosité aérodynamique séparément ou de manière combinée (TX2, Z02, et TX2-Z02) sont observées pour le contenu en eau du sol à 10 cm de profondeur (Figure 5.12).

En augmentant z_0 , le contenu en eau du sol décroît moins que dans la configuration par défaut (Figure 5.13). En résulte un assèchement un peu moins marqué pour TX2-Z02 par rapport à celui observé pour TX2. Cela entraîne un moins bon accord avec les mesures d'humidité du sol pour la première partie de la campagne expérimentale (en l'absence de précipitations) mais une meilleure concordance durant la seconde partie.

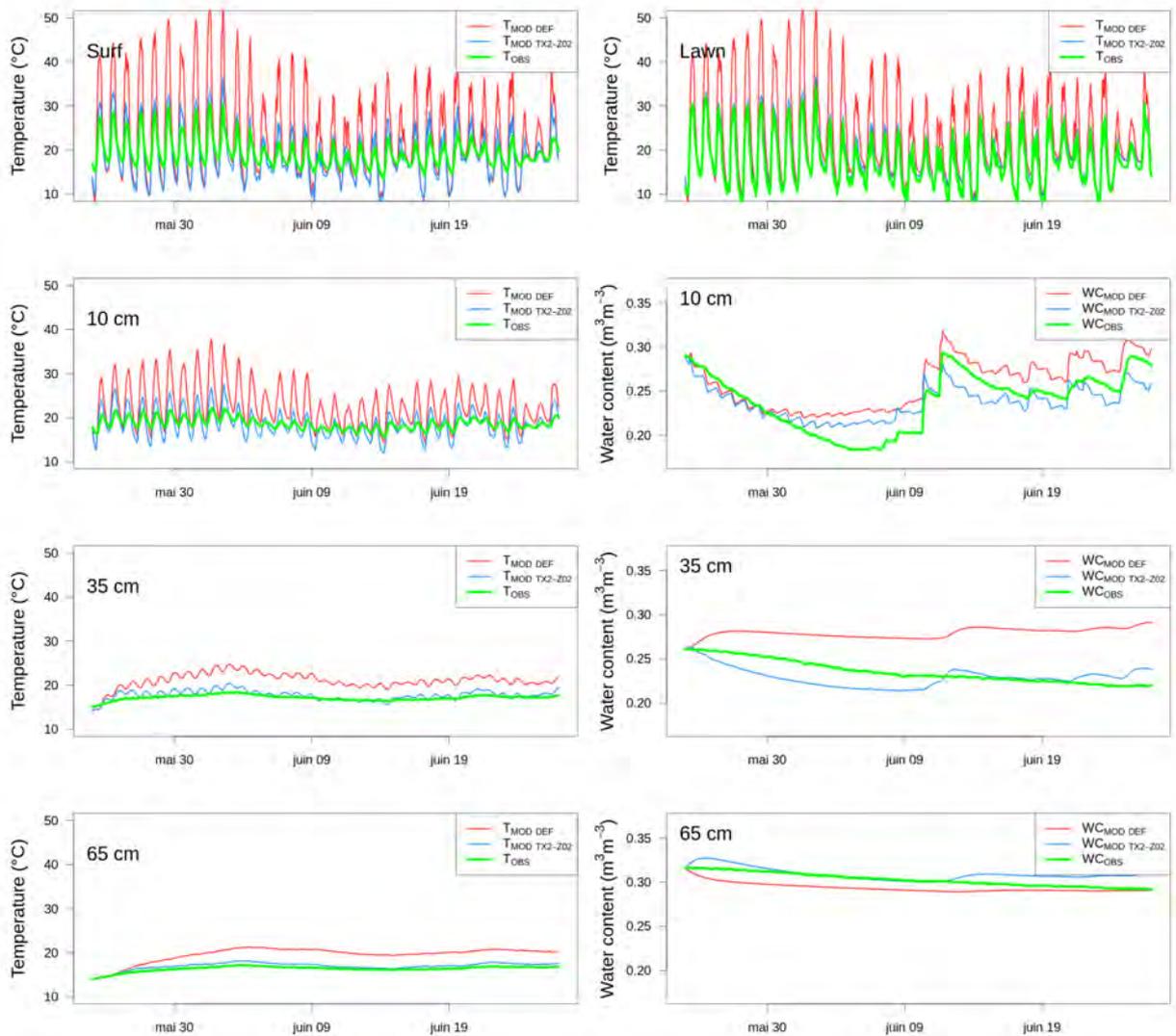


FIGURE 5.12 – Effet du profil vertical de texture du sol combiné avec une longueur de rugosité aérodynamique de 0.40 et une initialisation du contenu en eau plus réaliste sur les performances du modèle. Voir Tableau 5.4 pour la description des tests de sensibilité (DEF et TX2-Z02).

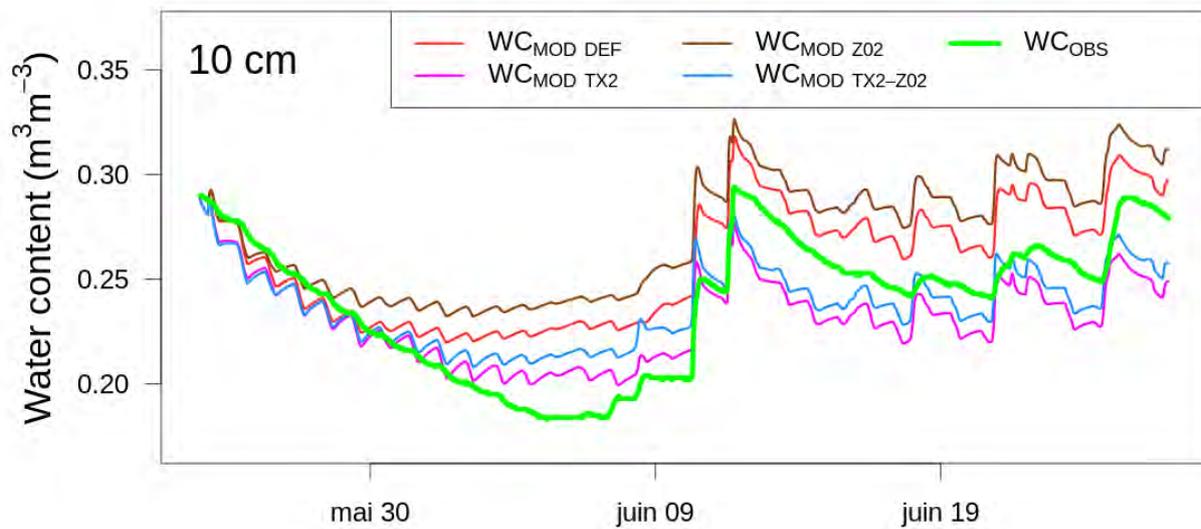


FIGURE 5.13 – Comparaison du contenu en eau du sol à 10 cm de profondeur simulé selon les tests de sensibilité de texture du sol et de longueur de rugosité aérodynamique séparément et combinés.

5.4.2 Impact sur le rayonnement net

L'amélioration de la simulation est aussi confirmée par la comparaison entre les rayonnements nets (Q^*) observés et modélisés (Figure 5.14 et Tableau 5.6). La combinaison TX2-Z02 recueille de très bons résultats statistiques, avec une nette diminution du RMSE et du biais (tous deux inférieurs à 17 W m^{-2}). Cette amélioration est largement due à la contribution de la longueur de rugosité aérodynamique, comme l'atteste les résultats de l'expérience Z02. De la diminution significative de la température du sol en raison d'une longueur de rugosité aérodynamique plus élevée (qui intensifie les échanges turbulents à la surface) résulte une réduction du rayonnement IR émis durant la journée, entre -10 % et -20 % selon la période.

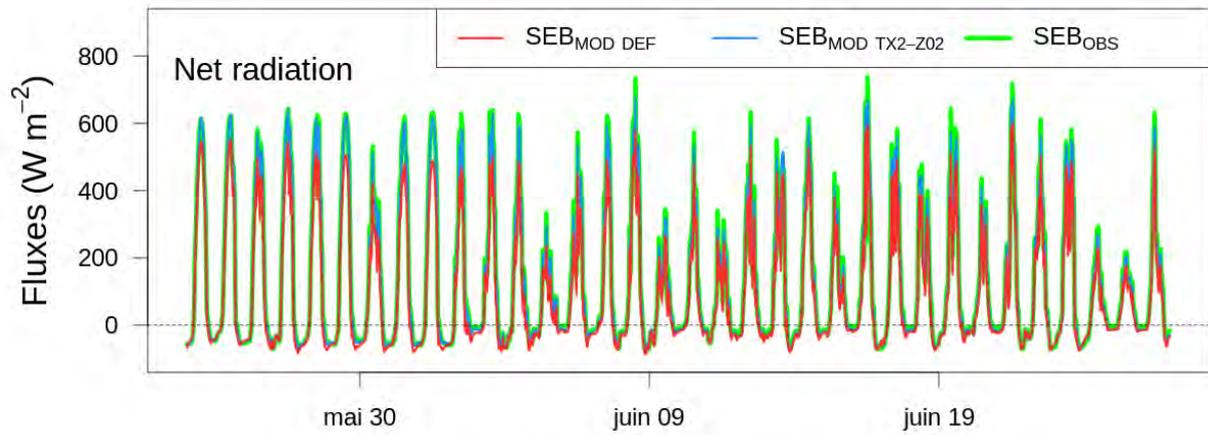


FIGURE 5.14 – Comparaison entre le rayonnement net mesuré au-dessus de la pelouse et le rayonnement net simulé par ISBA-DIF pour les expériences DEF et TX2-Z02.

TABLE 5.6 – Scores statistiques (RMSE et Biais en $W m^{-2}$) pour le rayonnement net calculé pour toutes les expériences de sensibilité.

	Q^*	
	RMSE	Biais
DEF	50.10	-35.81
TX1	38.38	-27.77
TX2	39.95	-29.75
R01	52.12	-37.10
LAI1	53.22	-38.26
LAI2	48.77	-34.75
Z01	33.77	-22.76
Z02	18.14	-9.74
SBL	52.20	-37.36
TX2-Z02	16.51	-7.96

5.5 Conclusion

La présente analyse de sensibilité du modèle de végétation ISBA a souligné le rôle significatif de la texture du sol sur la dynamique temporelle du contenu en eau dans les couches de sol. Or, les proportions en sable, argiles, et limons des horizons de sol en milieu urbain sont susceptibles d'être très hétérogènes, à la fois dans une dimension verticale et horizontale (SCHLEUSS, WU et BLUME, 1998). En effet, les sols urbains sont soumis à d'importants remaniements, voire à des interventions d'exports et imports. Aussi, les résultats ont mis en relief le rôle prépondérant de la définition de la longueur de rugosité aérodynamique sur la température de surface par le biais de la modification de l'intensité des échanges turbulents et de l'écoulement des masses d'air de basse couche sur le site étudié. La longueur de rugosité aérodynamique s'est révélée être un paramètre clé de la simulation du bilan d'énergie d'une pelouse en contexte urbain. Il doit tenir compte de l'envergure des plus grands obstacles présents dans l'environnement immédiat de la surface considérée.

Bilan d'énergie et aérodynamique

Sommaire

6.1	Bilan d'énergie de surface des éléments du canyon	120
6.1.1	Calcul des flux turbulents pour les surfaces artificielles	120
6.1.2	Calcul des flux turbulents pour les couverts naturels	122
6.1.3	Modification du bilan d'énergie liée à la canopée arborée	123
6.1.4	Désagrégation des flux turbulents associés à la végétation urbaine .	124
6.2	Modèle de couche limite de surface au sein du canyon	125
6.2.1	Principe du modèle TEB-SBL	125
6.2.2	Distribution des flux de chaleur et d'humidité des couverts naturels .	126
6.2.3	Effets aérodynamiques de la canopée arborée	128

6.1 Bilan d'énergie de surface des éléments du canyon

Comme on l'a évoqué précédemment, le modèle TEB résout un bilan radiatif pour chaque élément composant le canyon urbain, en tenant compte des effets d'ombrage et d'obstruction par les bâtiments, d'atténuation par la présence d'arbres (désormais représentés de façon explicite dans la nouvelle paramétrisation), et d'inter-réflexion entre éléments. La résolution de ce bilan radiatif nous permet de définir la quantité d'énergie absorbée sous forme de rayonnement de courtes et grandes longueurs d'onde par chacun des éléments, ou rayonnement net (Q_{RN^*}), qui s'exprime comme :

$$Q_{RN^*}^* = S_{^*}^* + L_{^*}^* \quad (6.1)$$

Cette source nette d'énergie est redistribuée sous la forme de flux turbulents de chaleur sensible (Q_H) et de chaleur latente (Q_E) et de flux de stockage de chaleur par conduction (ΔQ_S) :

$$Q_{RN^*}^* = Q_{H^*} + Q_{E^*} + \Delta Q_{S^*} \quad (6.2)$$

La version initiale du modèle (V. MASSON, 2000) ne tenait compte que des surfaces artificielles (toit, route, murs) dans la description du canyon urbain. Cette approche a été complexifiée par A. LEMONSU, V. MASSON et al. (2012) afin d'intégrer les couverts naturels (ou «jardin») au sein du canyon ; ces couverts étant représentés comme une fraction d'occupation de la surface au sol du canyon. Le canyon urbain est ainsi décrit sur la base de quatre éléments : le toit, les murs (avec la possibilité de dissocier le mur ensoleillé du mur à l'ombre) et la route, traités comme dans la version initiale du modèle, et les couverts naturels traités comme une surface composite de sols naturels et de végétation pour laquelle les échanges surface/atmosphère sont modélisés avec ISBA. On décrit par la suite le calcul des flux turbulents, tel qu'il est appliqué dans TEB pour les surfaces artificielles et dans ISBA pour les couverts naturels.

6.1.1 Calcul des flux turbulents pour les surfaces artificielles

Pour les surfaces artificielles (toit, route, murs), le modèle TEB résout un bilan d'énergie et une équation d'évolution de la température par type de surface (comme détaillé dans V. MASSON (2000)). Les flux de chaleur sensible et de chaleur latente entre les surfaces et

l'atmosphère s'expriment de la manière suivante :

$$Q_{H_\star} = \frac{C_{pd} \rho_a (T_\star - T_a)}{R_\star} \quad (6.3)$$

$$Q_{E_\star} = \frac{L_v \rho_a (q_{sat}(T_\star, p_s) - q_a)}{R_\star} \quad (6.4)$$

Ces formulations dépendent des gradients en température et en humidité entre la surface considérée et l'air ambiant. La surface est caractérisée par une température (T_\star) et une humidité à saturation (q_{sat}) dépendant des conditions de température et de pression. L'air ambiant est caractérisé par la capacité thermique de l'air sec (C_{pd}), la constante de vaporisation (L_v), ainsi que sa densité (ρ_a), sa température (T_a) et son humidité spécifique (q_a). Ces trois dernières variables sont définies au premier niveau atmosphérique au-dessus de la canopée urbaine pour le calcul des flux des toits, ou à l'intérieur du canyon pour le calcul des flux de la route et des murs (voir Figure 6.1a pour l'exemple des échanges de chaleur sensible). Enfin, les échanges turbulents sont contraints par la résistance aérodynamique de la surface (R_\star) qui varie en fonction de la rugosité de la surface, de la force du vent et des conditions de stabilité de l'atmosphère (A. LEMONSU, C. S. B. GRIMMOND et V. MASSON, 2004; V. MASSON, 2000).

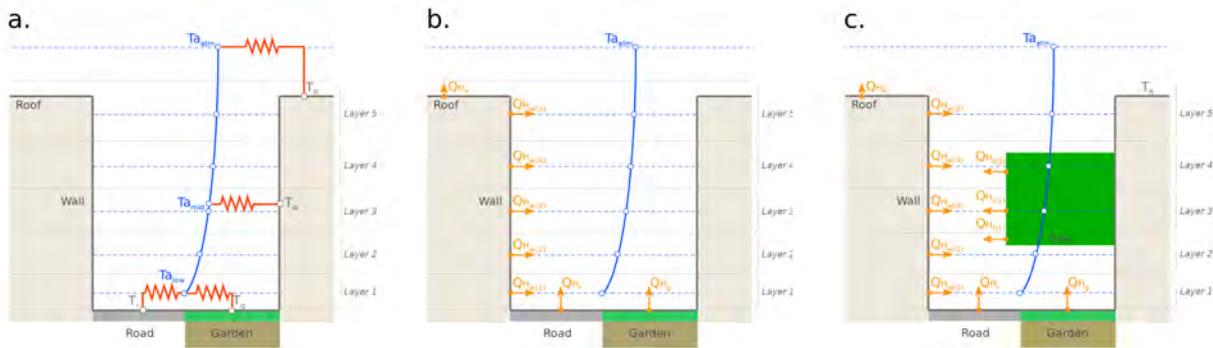


FIGURE 6.1 – Représentation schématique de la résolution de la couche limite de surface lorsque l'option SBL est activée. (a) illustre l'exemple de l'impact des surfaces urbaines sur le profil de température dans la canopée urbaine. Un schéma similaire est utilisé pour le gradient d'humidité spécifique. En absence d'arbres (b), les flux turbulents associés à la végétation urbaine affectent le niveau le plus bas du schéma SBL. La nouvelle paramétrisation incluant les arbres permet d'allouer à hauteur réaliste les contributions en flux turbulents de la végétation haute (c).

6.1.2 Calcul des flux turbulents pour les couverts naturels

Pour les couverts naturels, le modèle TEB intègre les paramétrisations d'ISBA pour modéliser les processus thermiques, hydrologiques et physiologiques des sols naturels et de la végétation, en tenant compte des contraintes radiatives et microclimatiques liées à l'environnement urbain (A. LEMONSU, V. MASSON et al., 2012). Cela signifie que les rayonnements solaire et IR incidents envoyés au modèle ISBA sont ceux recalculés à partir du bilan radiatif du canyon urbain incluant les effets d'ombrage liés à la présence des bâtiments et les échanges radiatifs entre surfaces. Le rayonnement net absorbé par la fraction de couvert naturel dans la maille de ville est alors calculé selon la formulation :

$$Q_{RN_g}^* = S_g^* + L_g^* = (1 - \alpha_g) S_g^\downarrow + \epsilon_g (L_g^\downarrow - \epsilon \sigma T_g^4) \quad (6.5)$$

Ce calcul fait intervenir les flux solaire (S_g^\downarrow) et IR (L_g^\downarrow) reçus par les couverts naturels au sol, déterminés à partir du schéma de transfert radiatif de TEB, ainsi que les propriétés composites des couverts naturels (combinant une fraction de sol nu et de végétation) : l'albédo agrégé (α_g), l'émissivité agrégée (ϵ_g) et la température de la première couche de sol (T_g).

De la même façon, les conditions de température, de vent, et d'humidité permettant le calcul des échanges turbulents sont celles calculées à l'intérieur du canyon et non les conditions au niveau atmosphérique au-dessus de la canopée. Le calcul de flux de chaleur sensible suit la formulation :

$$Q_{H_g} = C_{p_d} \rho_a C_H U_a (T_g - T_a) \quad (6.6)$$

Les échanges turbulents sont contraints par le coefficient de traînée (C_H), la force du vent U_a dans le canyon, et le gradient de température entre le couvert naturel (T_g) et l'air ambiant (T_a). Pour le calcul du flux de chaleur latente, le modèle ISBA tient compte de différents processus d'évaporation liés au fonctionnement des sols naturels et de la végétation, i.e. l'évapotranspiration de la végétation, l'évaporation par le sol (avec et sans gel) et la vaporisation du manteau neigeux, de sorte que le flux turbulent de chaleur latente pour les couverts naturels (ou la fraction de jardin du canyon urbain) s'exprime comme :

$$Q_{Eg} = Q_{Eg_v} + Q_{Eg_g} + Q_{Eg_{g_i}} + Q_{Eg_s} \quad (6.7)$$

avec les différents flux :

$$Q_{Eg_v} = f_v \rho L_v (1 - \delta_{v_{sn}}) H_v (q_{sat} - q_a) \quad (6.8)$$

$$Q_{Eg_g} = (1 - f_v) \rho L_v (1 - \delta_{g_{sn}}) (1 - f_{g_{froze}}) (H u_g q_{sat} - q_a) \quad (6.9)$$

$$Q_{Eg_{g_i}} = (1 - f_v) \rho L_s (1 - \delta_{g_{sn}}) f_{g_{froze}} (H u_{g_i} q_{sat} - q_a) \quad (6.10)$$

$$Q_{Eg_s} = \rho L_s (f_v \delta_{v_{sn}} + (1 - f_v) \delta_{g_{sn}}) (q_{sat} - q_a) \quad (6.11)$$

Les fractions respectives de végétation et de sol sont f_v et f_g , en distinguant pour chacune d'elles les fractions enneigées $\delta_{v_{sn}}$ et $\delta_{g_{sn}}$; δ_{sn} est la fraction cumulée couverte de neige et $f_{g_{froze}}$ la fraction de glace dans le sol; q_{sat} est l'humidité à saturation et q_a l'humidité spécifique de l'air à l'intérieur du canyon urbain dans le cas de la végétation urbaine; H_v est le coefficient de Halstead (i.e. l'humidité relative de la canopée végétale comme défini par NOILHAN et PLANTON (1989)), $H u_g$ l'humidité relative du sol nu, et $H u_{g_i}$ l'humidité relative du sol nu gelé. Enfin, L_v et L_s sont les chaleurs latentes de vaporisation et de sublimation.

6.1.3 Modification du bilan d'énergie liée à la canopée arborée

L'implémentation d'une canopée arborée dans TEB, comme une couche supplémentaire se superposant aux surfaces au sol, nécessite d'adapter le calcul des flux incidents fournis à ISBA pour le calcul du bilan d'énergie. En conservant l'approche «big leaf» pour les aspects énergétiques, ISBA traite désormais une végétation urbaine totale qui intègre les couverts naturels au sol (le jardin) et la végétation haute pour laquelle le rayonnement net s'exprime selon la même formulation que précédemment :

$$Q_{RN_{veg}}^* = S_{veg}^* + L_{veg}^* = (1 - \alpha_{veg}) S_{veg}^\downarrow + \epsilon_g (L_{veg}^\downarrow - \epsilon \sigma T_g^4) \quad (6.12)$$

Une seule température composite de surface de la végétation urbaine (T_g) est conservée pour le bilan d'énergie. D'après l'approche *force restore* dans ISBA, le calcul de l'évolution de cette température de surface dépend à la fois du bilan net des rayonnements solaire et IR absorbés par la végétation mais également de la capacité thermique agrégée (C_T) de la dissipation d'énergie par les flux de chaleur sensible (H) et latente (LE) et de la différence de température entre la couche de surface T_g et la seconde couche T_2 :

$$\frac{\partial T_g}{\partial t} = C_T (Q_{RN_{veg}}^* - Q_{H_{veg}} - Q_{E_{veg}}) - \frac{2\Pi}{\tau} (T_g - T_2) \quad (6.13)$$

où le bilan net est redéfini tel que :

$$Q_{RN_{veg}}^* = (1 - \alpha_{veg}) S_{veg}^\downarrow + \epsilon_g L_{veg}^\downarrow + \Delta L_t^* \quad (6.14)$$

soit ΔL_t^* l'énergie IR absorbée par la canopée arborée pendant le pas de temps considéré.

Les flux agrégés solaires (S_{veg}^\downarrow) et IR (L_{veg}^\downarrow) reçus par la végétation urbaine totale sont calculés en prenant en compte les flux reçus à la fois par le jardin et la végétation haute, ramenés à une seule fraction de végétation urbaine. La conservation d'énergie solaire et IR (en $W\ m^{-2}$ de végétation totale) dans le système canyon est assurée en pondérant les flux selon les relations suivantes :

$$\begin{aligned} S_{veg}^\downarrow &= \frac{\delta_g S_g^\downarrow + \delta_t S_t^\downarrow}{\delta_g + \delta_t} \\ L_{veg}^\downarrow &= \frac{\delta_g L_g^\downarrow + \delta_t L_t^\downarrow}{\delta_g + \delta_t} \end{aligned} \quad (6.15)$$

Pour rappel, δ_g est la fraction au sol du canyon occupée par les jardins (sols naturels et végétation basse) et δ_t est la fraction de recouvrement de la canopée arborée, ces deux fractions étant indépendantes et la somme des deux pouvant être supérieure à 1.

En présence d'arbres, on s'attend à diminuer le rayonnement solaire reçu par la route, le jardin, les murs et les apports vers l'intérieur des bâtiments à travers les fenêtres. La balance entre le gain de rayonnement solaire et IR capté par la végétation haute et ses propriétés de transmission (modulées par la densité de feuillage et la fraction de recouvrement des houppiers) déterminera si le flux global reçu par la végétation urbaine est augmenté ou minoré par rapport à une surface engazonnée au sol en absence d'arbres.

Inversement, les flux turbulents $Q_{H_{veg}}$ et $Q_{E_{veg}}$ calculés par ISBA selon l'approche «big leaf» (et selon les équations 6.6 et 6.7) doivent ensuite être désagrégés entre les couverts naturels au sol et la canopée arborée, dans l'optique de les redistribuer selon un profil vertical dans le canyon pour le calcul des variables microclimatiques avec l'approche TEB-SBL (Section 2.2).

6.1.4 Désagrégation des flux turbulents associés à la végétation urbaine

Afin d'affecter à hauteur et intensité réalistes le micro-climat dans le canyon les flux de chaleur sensible $Q_{H_{veg}}$ et latente $Q_{E_{veg}}$ sont découplés en deux contributions issues de la végétation basse et du sol nu d'une part et des arbres d'autre part, à l'aide de coefficients de désagrégation (Tableau 6.1).

En absence d'arbres, tout le flux énergétique est attribué à la végétation au sol et au sol nu.

TABLE 6.1 – Règles de désagrégation appliquées aux flux turbulents.

$\delta_t \neq \mathbf{0}$.	$\delta_t = \mathbf{0}$.
$Q_{H_g} = Q_{H_{veg}} * d_g$	$Q_{H_g} = Q_{H_{veg}}$
$Q_{H_t} = Q_{H_{veg}} * d_t$	$Q_{H_t} = 0$.
$Q_{E_g} = Q_{E_{veg}} * d_g$	$Q_{E_g} = Q_{E_{veg}}$
$Q_{E_t} = Q_{E_{veg}} * d_t$	$Q_{E_t} = 0$.

En présence d'arbres en revanche, on calcule la quantité d'énergie solaire et IR absorbée par chacune des surfaces à partir du produit des flux absorbés et des fractions de recouvrement. On en déduit les coefficients de désagrégation suivants :

$$d_g = \frac{S_g^* + L_g^*}{S_g^* + S_t^* + L_g^* + L_t^*} \frac{\delta_g}{\delta_g + \delta_t} \quad (6.16)$$

$$(6.17)$$

$$d_t = \frac{S_t^* + L_t^*}{S_g^* + S_t^* + L_g^* + L_t^*} \frac{\delta_t}{\delta_g + \delta_t} \quad (6.18)$$

6.2 Modèle de couche limite de surface au sein du canyon

6.2.1 Principe du modèle TEB-SBL

La paramétrisation TEB-SBL (SBL pour *Surface Boundary Layer*) a été développée dans le modèle TEB dans le but d'améliorer la prédiction des champs météorologiques à l'intérieur de la rue canyon (HAMDI et V. MASSON, 2008 ; A. LEMONSU, V. MASSON et al., 2012 ; Valéry MASSON et Yann SEITY, 2009). Inspirée de l'approche de YAMADA (1982) pour les canopées végétales, elle résout la couche limite de surface pour le volume d'air à l'intérieur et au-dessus du canyon, sur la base d'un système d'équations d'évolution de la température de l'air (T), de l'humidité spécifique (q), de la quantité de mouvement (U) et de l'énergie cinétique turbulente (E) qui suivent la même expression générale (avec V la variable considérée et F_V un terme de forçage général associé) :

$$\frac{\partial V}{\partial t} = F_V + \left. \frac{\partial V}{\partial t} \right|_{TEB} \quad (6.19)$$

Selon MARTILLI, CLAPPIER et ROTACH (2002), au terme de forçage général se super-

posent des contributions (de chaleur, d'humidité et de traînée selon la variable considérée) associées aux surfaces horizontales et verticales du canyon :

$$\left. \frac{\partial V}{\partial t} \right|_{TEB} = \left. \frac{\partial V}{\partial t} \right|_{TEB}^H + \left. \frac{\partial V}{\partial t} \right|_{TEB}^V \quad (6.20)$$

Pour les termes liés aux effets du canyon, les équations sont résolues selon une discrétisation verticale depuis le sol jusqu'à un niveau atmosphérique de référence au-dessus des bâtiments. La grille par défaut comprend six niveaux verticaux, le premier étant situé à 50 cm au-dessus du sol, le second à 2 m et les suivants adaptés en fonction de la hauteur des bâtiments. Sur la base de la version de TEB décrite dans A. LEMONSU, V. MASSON et al. (2012), on obtient le système d'équations suivant pour chaque couche k de la grille TEB-SBL :

$$\left. \frac{\partial U(k)}{\partial t} \right|_{TEB} = C_{dbld} U(k)^2 \frac{S_{V_w}(k)}{V_{air}(k)} - u_*^2 \frac{S_{H_R}(k)}{V_{air}(k)} \quad (6.21)$$

$$\left. \frac{\partial E(k)}{\partial t} \right|_{TEB} = C_{dbld} U(k)^3 \frac{S_{V_w}(k)}{V_{air}(k)} \quad (6.22)$$

$$\left. \frac{\partial T(k)}{\partial t} \right|_{TEB} = \frac{Q_{H_R}}{\rho C_p} \frac{S_{H_R}(k)}{V_{air}(k)} + \frac{Q_{H_r}}{\rho C_p} \frac{S_{H_r}(k)}{V_{air}(k)} + \frac{Q_{H_g}}{\rho C_p} \frac{S_{H_g}(k)}{V_{air}(k)} + \frac{Q_{H_w}}{\rho C_p} \frac{S_{V_w}(k)}{V_{air}(k)} \quad (6.23)$$

$$\left. \frac{\partial q(k)}{\partial t} \right|_{TEB} = \frac{Q_{E_R}}{\rho} \frac{S_{H_R}(k)}{V_{air}(k)} + \frac{Q_{E_r}}{\rho} \frac{S_{H_r}(k)}{V_{air}(k)} + \frac{Q_{E_g}}{\rho} \frac{S_{H_g}(k)}{V_{air}(k)} \quad (6.24)$$

où C_{dbld} le coefficient de traînée des bâtiments, u_* la vitesse de friction et V_{air} le volume d'air de la couche du schéma SBL dans laquelle ont lieu les échanges (soit l'ensemble de la maille si la couche est au-dessus des toits, soit le volume dans le canyon de la couche k). S_{V_*} et S_{H_*} désignent les recouvrements verticaux et horizontaux des surfaces respectives.

Dans cette approche, toutes les contributions des couverts naturels sont considérées au niveau du sol et interviennent donc au premier niveau de la grille TEB-SBL uniquement. La description de la canopée arborée TEB a nécessité de modifier l'ensemble des équations présentées ici pour tenir compte de la redistribution des flux turbulents sur la verticale et de l'effet de traînée des arbres.

6.2.2 Distribution des flux de chaleur et d'humidité des couverts naturels

Après avoir attribué une part des flux turbulents issus de la végétation urbaine à chacune des strates végétalisées, on souhaite redistribuer sur la verticale les flux appartenant

aux arbres afin de simuler à hauteur réaliste l'altération des conditions microclimatiques au sein du canyon. On suppose que les flux turbulents de la végétation haute sont proportionnels à la densité de feuillage et se déterminent pour chaque niveau vertical k de la grille TEB-SBL selon :

$$Q_{H_t}(k) = \frac{LAD(k)}{LAI} Q_{H_t} \quad (6.25)$$

$$Q_{E_t}(k) = \frac{LAD(k)}{LAI} Q_{E_t} \quad (6.26)$$

Pour rappel, LAI est l'indice surfacique foliaire ($\text{m}^2 \text{m}^{-2}$) et LAD est la densité surfacique foliaire ($\text{m}^2 \text{m}^{-3}$). Celle-ci est calculée ici comme la proportion de l'épaisseur totale de la canopée arborée présente dans chaque couche TEB-SBL :

$$LAD(k) = \frac{d_t(k)}{h_t - h_{tk}} LAI \quad (6.27)$$

avec $d_t(k)$ l'épaisseur de feuillage dans la couche k et $h_t - h_{tk}$ l'épaisseur totale du houppier, h_t étant la hauteur de la canopée arborée et h_{tk} la hauteur du tronc. Toutes ces distances sont exprimées en mètres.

Ces flux turbulents de chaleur sensible et de chaleur latente sont désormais inclus dans les équations d'évolution du profil de température et d'humidité du TEB-SBL s'ajoutant aux contributions initiales des jardins intervenant uniquement au premier niveau TEB-SBL (Figure 6.1c) :

$$\left. \frac{\partial T(k)}{\partial t} \right|_{TEB} = \frac{Q_{H_R}}{\rho C_p} \frac{S_{H_R}(k)}{V_{air}(k)} + \frac{Q_{H_r}}{\rho C_p} \frac{S_{H_r}(k)}{V_{air}(k)} + \frac{Q_{H_g}}{\rho C_p} \frac{S_{H_g}(k)}{V_{air}(k)} \quad (6.28)$$

$$+ \frac{Q_{H_w}}{\rho C_p} \frac{S_{V_w}(k)}{V_{air}(k)} + \frac{Q_{H_t}(k)}{\rho C_p} \frac{V_{grid}}{V_{air}(k)} \delta_t \quad (6.29)$$

$$\left. \frac{\partial q(k)}{\partial t} \right|_{TEB} = \frac{Q_{E_R}}{\rho} \frac{S_{H_R}(k)}{V_{air}(k)} + \frac{Q_{E_r}}{\rho} \frac{S_{H_r}(k)}{V_{air}(k)} + \frac{Q_{E_g}}{\rho} \frac{S_{H_g}(k)}{V_{air}(k)} \quad (6.30)$$

$$+ \frac{Q_{E_t}(k)}{\rho} \frac{V_{grid}}{V_{air}(k)} \delta_t \quad (6.31)$$

avec δ_t la fraction de recouvrement de la canopée arborée dans le canyon et V_{grid} le volume d'air total de la maille de ville.

6.2.3 Effets aérodynamiques de la canopée arborée

La présence de la canopée arborée modifie également l'écoulement aérodynamique au sein du canyon. Pour le prendre en compte dans les équations de TEB-SBL, on définit désormais un terme de traînée supplémentaire (noté C_{dt}) propre à cette canopée arborée.

Les équations d'évolution de la quantité de mouvement et de l'énergie cinétique turbulente deviennent :

$$\left. \frac{\partial U}{\partial t} \right|_{TEB} = C_{dbld} U(k)^2 \frac{S_{V_w}(k)}{V_{air}(k)} - u_*^2 \frac{S_{H_R}(k)}{V_{air}(k)} + C_{dt} U(k)^2 LAD(k) \delta_t \quad (6.32)$$

$$\left. \frac{\partial E}{\partial t} \right|_{TEB} = C_{dbld} U(k)^3 \frac{S_{V_w}(k)}{V_{air}(k)} + C_{dt} U(k)^3 LAD(k) \delta_t \quad (6.33)$$

La littérature scientifique fournit de nombreuses études (AUMOND et al., 2013; CASSIANI, GG KATUL et ALBERTSON, 2008; DUPONT et BRUNET, 2008; KRAYENHOFF, SANTIAGO et al., 2015) ayant recours à une valeur optimisée de ce coefficient de traînée sectionnel pour les houppiers d'arbres. Depuis l'étude de Gabriel KATUL (1998), ce coefficient est pris constant tel que :

$$C_{dt} = 0.20 \quad (6.34)$$

On s'attend à une diminution de la vitesse du vent *via* l'effet de freinage des feuillage sur les écoulements après l'implémentation de la canopée arborée dans le calcul du profil de vent. Les flux turbulents seront minorés par la présence des houppiers d'arbres faisant obstacle au vent et augmentant la résistance aérodynamique.

Évaluation du microclimat d'un canyon végétalisé réel sous climat chaud et aride

Sommaire

7.1	Données expérimentales	130
7.2	Expérience numérique	135
7.3	Évaluation des variables microclimatiques	138
7.4	Évaluation de la transpiration des arbres	140
7.5	Conditions de confort thermique dans le canyon	142

Un exercice d'évaluation des performances du modèle TEB à simuler les conditions microclimatiques d'un canyon végétalisé a été mené pour un cas réel, sur le site expérimental de Sde-Boqer en Israël. Les résultats obtenus avec la version TEB-Veg de A. LEMONSU, V. MASSON et al. (2012) et ceux de la nouvelle version implémentée dans le cadre de la thèse, comprenant l'ensemble des développements réalisés sur les bilans thermo-radiatif, d'énergie et d'eau à la surface et les effets aérauliques liés à la présence d'arbres en milieu urbain, ont été comparés entre eux et confrontés aux observations *in situ*.

7.1 Données expérimentales

Afin de réaliser une évaluation des récents développements de TEB nous avons utilisé des données expérimentales récoltées lors de la campagne de terrain conduite par SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL (2009) sur le campus de Sde-Boqer dans la région aride des Hauts-Plateaux du désert du Negev au sud de l'Israël (30.85 ° N, 34.78 ° E, 475 m d'altitude, Figure 7.1) durant l'été 2007.

La région est caractérisée par des étés chauds et secs et des hivers froids (SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL, 2009). Les fluctuations de température diurnes et d'humidité relative sont grandes, avec des maxima et minima journaliers en été au-dessus et en-dessous de la zone de confort thermique, respectivement (BITAN et RUBIN, 1994).

Sur le site, deux cours adjacentes, identiques en termes de géométrie et de matériaux, ont été agencées selon six stratégies d'aménagement. Elles consistent en différentes combinaisons de sol nu, de pelouse ou d'arbres accompagnées éventuellement de filets étendus au sommet des cours pour l'ombrager. Ces filets présentent une opacité nominale de 70 %, ce qui est similaire à l'interception mesurée du rayonnement solaire par les arbres. Leur étendue spatiale et leur géométrie ont été adaptées pour se rapprocher autant que possible de celles des arbres présents dans l'autre cour. Les cas "Filet-Sol nu" et "Arbre-Pelouse" sont illustrés par la Figure 7.2.

La cour arborée possède deux spécimens de *Prosopis juliflora* et un *Tipuana tipu*. Ces deux essences d'arbres sont communes dans les régions arides et sont réputées pour être économes en termes de consommation d'eau (KREMMER et GALON, 1996). L'essence *Durban grass* a été sélectionnée pour la pelouse car elle est capable de pousser à l'ombre et requiert un minimum d'ensoleillement direct de trois heures par jour seulement. Un système d'irrigation au goutte-à-goutte a été installé pour chaque arbre alors que la pelouse a été arrosée par aspersion chaque matin à 06:00 pendant approximativement 12 min, ce qui suffit à compenser les pertes en eau journalières. Les deux systèmes d'irrigation ont été programmés afin de fournir à chaque type de végétation une quantité suffisante en eau



FIGURE 7.1 – Vue aérienne du site expérimental. Source : communication personnelle (E. Erell)

pour permettre une évapotranspiration illimitée.

Les cours ont été instrumentées de façon à documenter le microclimat local (*i.e.* les variables météorologiques à l'intérieur du canyon urbain) et de caractériser la variabilité du confort thermique extérieur selon l'aménagement choisi. Les données microclimatiques recueillies durant l'expérimentation concernaient la température de l'air, l'humidité relative, la pression de vapeur, et la vitesse du vent à 1.5 m au-dessus du sol au centre de la cour (A. LEMONSU, V. MASSON et al., 2012, et Figure 7.3).

En complément, des mesures radiatives ont été effectuées sur le toit (rayonnement incident, remontant et net) et des températures de surface (murs, pavés, pelouse selon la stratégie) ont été enregistrées. De plus, l'évapotranspiration de la pelouse a été estimée par



FIGURE 7.2 – Photos des cours instrumentées comprenant un sol pavé et un filet (à droite) et de la pelouse et des arbres (à gauche). Source : SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL (2009)

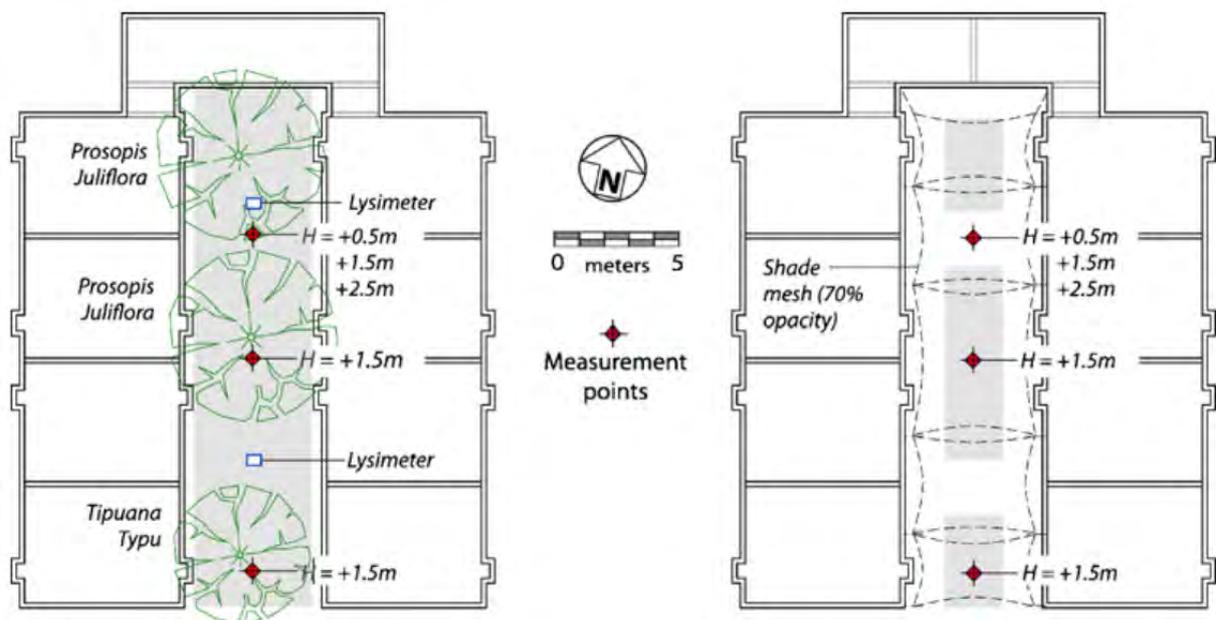


FIGURE 7.3 – Plan montrant la localisation des points de mesure dans les deux cours instrumentées, avec les arbres dans la cour ouest (à gauche) et avec le filet d’ombrage dans la cour est (à droite). Selon les scénarios, le sol est couvert partiellement de pelouse ou de sol nu. Leur emplacement est indiqué par la zone grisée sur le schéma de gauche pour la pelouse et sur le schéma de droite pour le sol nu, le reste de la surface au sol étant pavé. Source : SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL (2009)

des mini-lysimètres sur mesure et celle des arbres par la méthode de GASH et GRANIER (2007) à l'aide de sondes cylindriques insérées dans l'aubier.

Enfin, des données climatiques de référence ont été acquises depuis la station météorologique située à 400 m au nord-ouest du site expérimental dans une zone ouverte désertique (Figure 7.1). Elle fournit la température et l'humidité de l'air à 1.5 m au-dessus du sol, la vitesse et la direction du vent à 10 m, et la température de surface du sol.

L'image des températures radiantes de surface du canyon combinant pelouse et arbres illustre l'importance de l'effet d'ombrage de la canopée arborée, avec des différences atteignant 20 ° C (Figure 7.4) entre les points exposés et les points ombragés au sol.

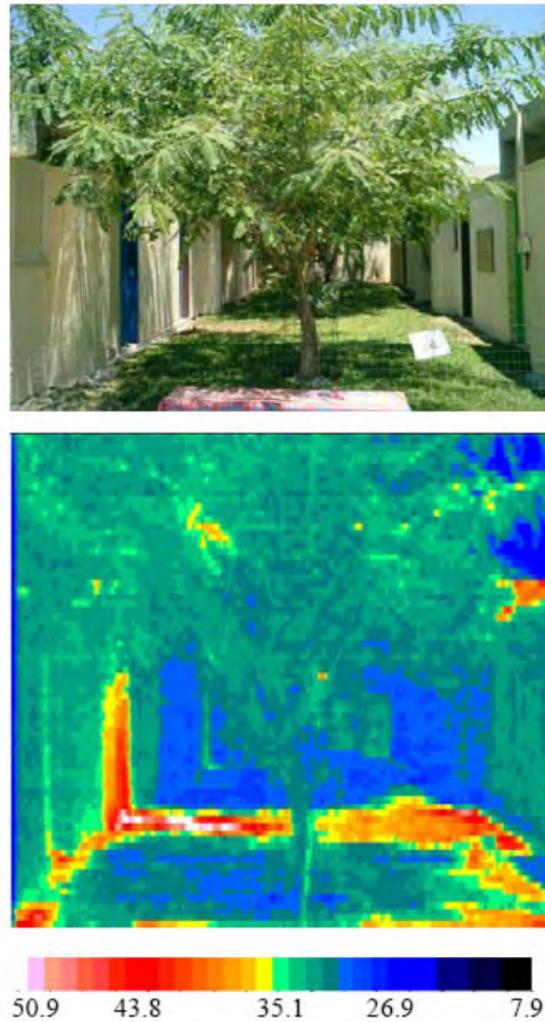


FIGURE 7.4 – Photographies dans le visible (en haut) et dans l’IR (en bas) de la cour semi-fermée du site expérimental Sde-Boqer aménagée avec de l’herbe et des arbres à 12:20 LST le 17 juillet 2007. Source : SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL (2011)

7.2 Expérience numérique

L'objectif étant ici de tester la nouvelle configuration du modèle TEB représentant la canopée arborée, l'exercice de simulation se concentre sur un seul aménagement de cour, à savoir le cas avec du sol pavé et du sol nu, et des arbres (dont la fraction de recouvrement atteint 70 % du canyon).

La journée d'étude est le 8 juillet 2007. Les données climatiques, enregistrées sur le site de référence décrit dans la section précédente, sont utilisées pour forcer le modèle en mode autonome ou *offline* avec des conditions météorologiques réelles (Figure 7.5). Conformément à la méthode appliquée et décrite par A. LEMONSU, V. MASSON et al. (2012), les données de température et d'humidité de l'air mesurées à 1.5 m au-dessus du sol à la station météorologique de référence sont corrigées par méthode itérative afin d'être re-calculés au-dessus du niveau des bâtiments, à 10 m de hauteur.

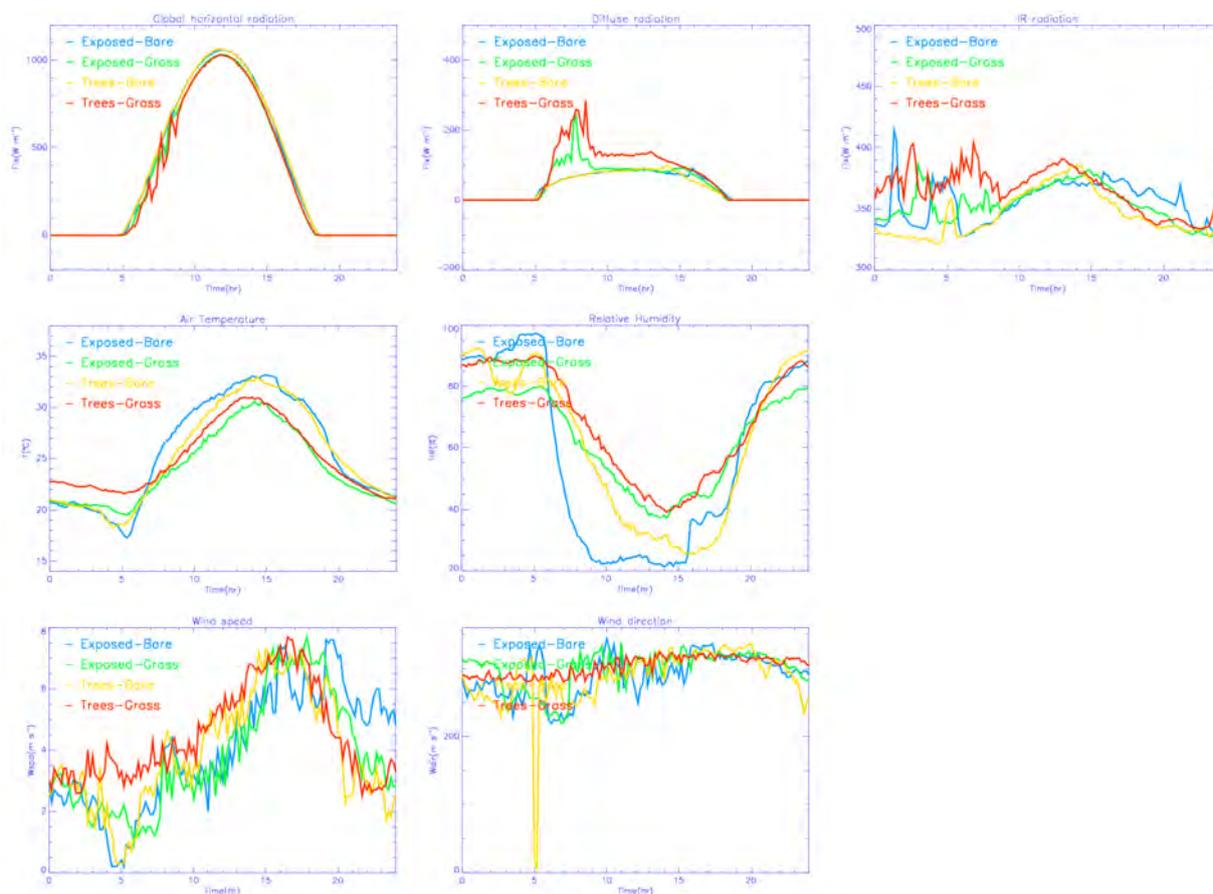


FIGURE 7.5 – Conditions météorologiques observées à la station de référence durant les périodes expérimentales.

TABLE 7.1 – Paramètres d’entrée de TEB relatifs aux caractéristiques radiatives et thermiques des surfaces imperméables. Source : A. LEMONSU, V. MASSON et al., 2012; SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL, 2009, 2011.

		Couche externe	Couche centrale	Couche interne
Propriétés du toit		<i>béton léger</i>	<i>béton léger</i>	<i>béton léger</i>
Albédo	(-)	0.40	-	-
Emissivité	(-)	0.90	-	-
Conductivité thermique	(W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.70	0.70	0.70
Capacité thermique	(kJ K ⁻¹ m ⁻³)	616.	616.	616.
Epaisseur	(m)	0.04	0.04	0.04
Propriétés du mur		<i>béton léger</i>	<i>béton léger</i>	<i>béton léger</i>
Albédo	(-)	0.35	-	-
Emissivité	(-)	0.90	-	-
Conductivité thermique	(W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.70	0.70	0.70
Capacité thermique	(kJ K ⁻¹ m ⁻³)	616.	616.	616.
Epaisseur	(m)	0.01	0.04	0.07
Propriétés de la route		<i>béton dense</i>	<i>sol</i>	<i>sol</i>
Albédo	(-)	0.40	-	-
Emissivité	(-)	0.90	-	-
Conductivité thermique	(W m ⁻¹ K ⁻¹)	0.70	0.70	0.70
Capacité thermique	(kJ K ⁻¹ m ⁻³)	1776.	1280.	1280.
Epaisseur	(m)	0.05	0.1	1.

La simplicité de la morphologie des rues-canyons du site expérimental est un atout pour leur simulation à l’aide du modèle de canopée urbaine TEB car elle concorde avec les hypothèses d’un unique canyon décrit par une hauteur moyenne des bâtiments dont les toits sont plats. La configuration simple permet ici de faire tourner le modèle sur un seul point de grille, i.e. sur la base de données descriptives uniformes de la typo-morphologie du lieu et des propriétés des matériaux des surfaces aux sol et des bâtiments. Ces données sont adaptées au scénario d’aménagement simulé.

La plupart des paramètres d’entrée de TEB a pu être correctement renseignée grâce à la description très détaillée du site expérimental fournie par SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL (2009). Les bâtiments sont constitués de béton léger, de même que les murs et le toit. Les pavés sont également des éléments en béton de couches fines de 4 cm, disposés sur le sol naturel. L’ensemble des surfaces imperméables est de couleur claire dont l’albédo est plutôt élevé. Les propriétés thermiques et radiatives des toits, murs, et routes, listées dans le Tableau 7.1, restent inchangées quelque soit l’aménagement.

De même que dans A. LEMONSU, V. MASSON et al. (2012), dans le but de représenter les canyons du site expérimental de manière conforme au concept de canyon infini et sans intersections de TEB, un motif élémentaire composé d’un bâtiment et d’une cour est décrit pour chaque simulation. Les paramètres géométriques sont présentés dans le Tableau 7.2.

TABLE 7.2 – Paramètres d’entrée de TEB relatifs à la typo-morphologie du site et aux propriétés de la végétation, selon les deux versions du modèle TEB-Veg et TEB-Urbtree.

		TEB-Veg	TEB-Urbtree
Paramètres géométriques			
Fraction de bâtiments	(-)	0.35	0.35
Fraction de couverts naturels au sol	(-)	0.45	0.
Fraction de recouvrement des arbres	(-)	-	0.70
Densité de surface de murs	(-)	0.71	0.71
Hauteur des bâtiments	(m)	3.	3.
Rapport d’aspect du canyon	(-)	0.55	0.55
Propriétés de la végétation			
Fraction de végétation	(-)	1.	1.
Indice foliaire (LAI)	(-)	2	2
Hauteur des arbres	(m)	-	3
Hauteur du tronc	(m)	-	2
Longueur de rugosité	(m)	0.3	0.3
Albédo (visible)	(-)	0.20	0.20
Albédo (IR)	(-)	0.30	0.30
Emissivité	(-)	0.95	0.95

La configuration du site correspond à des occupations du sol de 35 % pour les bâtiments, 45 % pour le pavé et 20 % pour le sol nu. Si l’on considère uniquement l’intérieur de la cour, la surface au sol se compose donc pour 69 % de pavé et pour 31 % de sol nu. Quant aux arbres, ils représentent une fraction de recouvrement de 70 % à l’intérieur du canyon. Les bâtiments mesurent 3 m de haut et le rapport d’aspect de la rue est de 0.55. La composante directionnelle de l’ensoleillement est mieux prise en compte grâce au renseignement de l’orientation réelle des cours dans TEB (12° à l’est du nord géographique).

Enfin, les différences entre les deux versions du modèle sont relatives à la représentation de la végétation dans le canyon. Dans la version initiale TEB Ref, toute la végétation est plaquée au sol. Par conséquent, pour représenter dans le modèle la fraction très élevée de recouvrement des arbres, la fraction de végétation au sol est fixée à 70 % du canyon (soit 45 % à l’échelle de la maille complète. Par contre, la nouvelle version TEB Urbtree permet de dissocier la fraction de sol nu et la fraction de recouvrement des arbres, en se basant sur les données réelles. Pour la version TEB Urbtree, on définit également une hauteur d’arbres de 3 m et une hauteur de tronc de 2 m. L’ensemble des paramètres est présenté dans le Tableau 7.2.

7.3 Évaluation des variables microclimatiques

Les sorties des simulations sont comparées aux observations pour les variables microclimatiques de température de l'air et humidité spécifique de l'air dans le canyon, et pour la vitesse du vent à 1.5 m au-dessus du sol. Les températures de surface des façades exposées est et ouest et de la canopée arborée sont aussi comparées. Les cycles diurnes de ces différentes variables sont présentés en Figure 7.6. Les scores statistiques (RMSE et biais) sont comparés dans le Tableau 7.3.

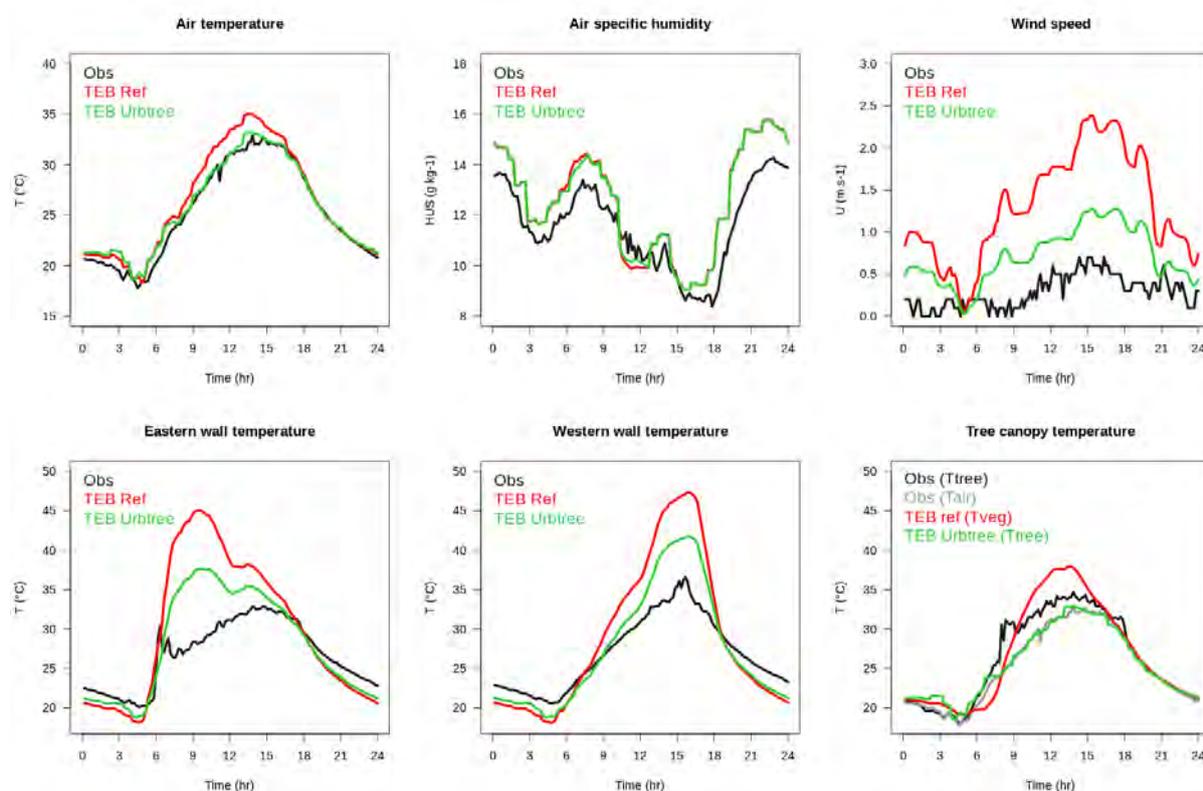


FIGURE 7.6 – Comparaison des résultats obtenus entre TEB Ref (courbes rouges) et la nouvelle version comprenant l'implémentation des arbres ou TEB Urbtree (courbes vertes) avec les observations issues du site expérimental à Sde Boqer dans la cour agencée selon le mode Arbres-Sol nu. Les variables météorologiques (température et humidité spécifique de l'air, vitesse du vent) correspondent aux forçages à 10 m au-dessus du sol. Les températures de surface du sol sont séparées entre la face exposée à l'est et celle exposée à l'ouest. La température du feuillage des arbres mesurée est comparée à la température de la végétation placée au sol dans l'ancienne version et à la température de la canopée arborée dans la version implémentée. La température de l'air simulée au milieu du canyon est donnée pour indication.

Une très bonne concordance est observée entre la température de l'air mesurée et simulée entre 07:00 et 24:00 avec la nouvelle version de TEB. Le biais chaud présent dans l'ancienne version est corrigé grâce à l'atténuation du rayonnement par les arbres désormais prise en compte dans TEB Urbtree. Il persiste néanmoins un biais positif de 1-2 ° C la nuit (de 00:00 à 07:00), parfois renforcé dans la nouvelle version.

L'humidité spécifique de l'air simulée par TEB est majoritairement plus élevée que celle mesurée. Cependant les cinétiques des humidités mesurées et simulées restent synchrones. L'introduction d'une canopée arborée explicite dans le modèle abaisse légèrement l'humidité de l'air entre 06:00 et 09:00 approximativement, et l'augmente autour du midi solaire. En début de matinée, l'effet d'ombrage de l'arbre limite l'évaporation du sol puis le flux de transpiration de la végétation haute devient plus important que celui de la végétation basse aux heures les plus ensoleillées. Toutefois, le diagnostic d'humidité spécifique de l'air semble peu sensible aux présents développements.

L'amplitude des variations de vitesse du vent sont plus importantes dans les simulations que dans les mesures. Un abatement très significatif de l'écoulement de l'air est observé avec la nouvelle version (jusqu'à - 1.5 m s⁻¹ dans l'après-midi) grâce à l'implémentation d'un nouveau coefficient de traînée lié à la présence de la végétation arborée. Alors que l'ancienne version de TEB surestimait largement les mesures (par exemple d'environ 2 m s⁻¹ à 15:00) les nouveaux résultats atténuent ce biais de vitesse excessive pour se rapprocher des mesures. Notons que le forçage de vitesse du vent provient des mesures issues du site de référence en milieu ouvert et sans obstacles notables et ne reflète donc pas les conditions d'écoulement dans la rue aménagée. Ce test constitue une vérification de l'abaissement de la vitesse du vent dans la nouvelle simulation en termes relatifs et non une confrontation fidèle à la réalité des écoulements dans la cour.

TABLE 7.3 – Résultats statistiques comparant les performances en termes de RMSE et de biais des deux versions de TEB testées : la version référence de TEB-Veg et la nouvelle version avec implémentation d'une canopée arborée explicite.

		Ref		Urbtree	
		RMSE	Biais	RMSE	Biais
T _{air}	(° C)	1.42	+1.06	0.79	+0.48
q _{air}	(g kg ⁻¹)	1.25	+0.95	1.21	+0.94
U	(m s ⁻¹)	1.14	+1.02	0.48	+0.43
T _{w_{east}}	(° C)	7.04	+3.20	3.82	+1.38
T _{w_{west}}	(° C)	5.53	+2.08	3.07	+0.67
T _{tree}	(° C)	2.06	+0.46	1.87	-0.77
Q _{E_{tree}}	(W m ⁻²)	183.80	-135.47	193.14	-143.87

Les températures de surface des murs, aussi bien pour le mur exposé à l'est que pour

celui exposé à l'ouest, sont très largement surestimées par la version TEB Ref (jusqu'à plus de 20 ° C en matinée) avec une forte amplitude qui n'est pas retrouvée dans les observations. La nouvelle version TEB Urbtree modère ce biais de température de surface excessive de moitié environ le matin et d'un tiers l'après-midi. Une importante surestimation persiste néanmoins, probablement en raison d'une sous-estimation des effets d'ombrage des arbres dans le modèle. Dans la soirée et la nuit, on observe au contraire une sous-estimation des températures de surface dans les simulations. La version TEB Urbtree permet d'améliorer légèrement ces résultats en simulant des températures de surface sensiblement plus chaudes la nuit que TEB Ref.

Enfin, pour la comparaison à la température de la végétation arborée (température mesurée au niveau du feuillage), il est important de préciser que dans la version TEB Ref, on ne dispose que d'une température composite des couverts naturels (notée T_{Veg} sur la Figure 7.6). D'autre part, la représentation de la végétation urbaine comme une surface au sol, quelque soit sa nature (strate herbacée ou arborée), modifie les échanges radiatifs ayant lieu dans le canyon. Compte tenu de ces approximations, on constate que la température T_{Veg} simulée par TEB Ref présente une amplitude diurne bien supérieure à celle observée avec une surestimation en journée de près de 5 ° C. Rappelons que les développements de la version Urbtree ont permis de définir la température de surface des feuilles comme la température de l'air au niveau vertical défini par le schéma TEB-SBL le plus proche de la mi-hauteur de la canopée arborée. On constate au vu de la comparaison aux observations que cette hypothèse est acceptable. Une sous-estimation de quelques degrés de la température en journée est relevée (l'air étant en réalité plus frais que la température des feuilles) mais le modèle se compare très bien aux observations la nuit.

7.4 Évaluation de la transpiration des arbres

Le flux de chaleur latente simulé par TEB pour la partie végétation est ici comparé au flux d'évapotranspiration maximum mesuré en $L h^{-1}$ et converti en $W m^{-2}$. Quelque soit la version du modèle, on observe une sous-estimation importante (de plus de 50 %) du flux de chaleur latente simulé par TEB.

Les paramètres physiologiques utilisés pour la simulation du métabolisme de l'arbre sont des valeurs standards attribuées à la classe des arbres dits tropicaux à feuilles larges, comme le sont *Prosopis juliflora* et *Tipuana tipu*. Le changement de classe, avec par exemple la classe des feuillus de zones tempérées, n'améliore pas les résultats. La différence entre l'humidité observée et l'humidité saturante correspondant aux conditions de température à cette période est élevée, donc la pression de vapeur est importante, ce qui devrait favoriser l'extraction de l'eau par les plantes *via* l'évapotranspiration. La végétation au sol

réagit à l'irrigation qui a lieu à 06:00 au bénéfice de sa transpiration alors que dans la nouvelle version une réponse à l'apport d'eau supplémentaire s'observe plus tard chez l'arbre. L'après-midi, le houppier transpire plus que la végétation au sol. L'humidité du sol varie peu entre les deux simulations. En revanche, nous ne disposons d'aucune donnée sur le statut en eau du sol durant l'expérimentation. D'après SHASHUA-BAR, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL (2009) l'irrigation est suffisante pour permettre une pleine évapotranspiration, c'est pourquoi nous avons paramétré TEB de façon à reproduire des conditions sans stress hydrique. La quantité $\Delta k J m^{-2}$ pour l'expérience Arbres-Sol nu est cohérente avec les flux de chaleur latente exprimés ici en $W m^{-2}$ donc une erreur de conversion peut être écartée. Cette faiblesse de TEB à reproduire une forte évapotranspiration reste à explorer.

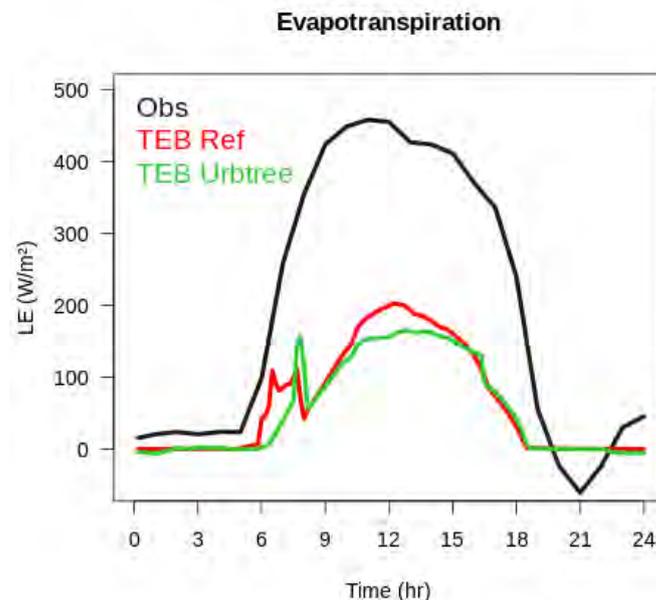


FIGURE 7.7 – Cycle diurne du flux de chaleur latente en $W m^{-2}$ observé (courbe noire), simulé par la version TEB-Veg (courbe rouge) et la version implémentée (courbe verte).

En conclusion, pour l'ensemble des variables testées on obtient de meilleurs scores avec la nouvelle version de TEB, exceptée une augmentation non significative du biais positif concernant l'humidité spécifique, peu sensible aux développements effectués (Tableau 7.3). Les variables de température de l'air, de vitesse du vent, et de température de surface des murs sont celles qui sont le plus impactées par les développements effectués sur le transfert thermo-radiatif et l'effet aéraulique des arbres dans le canyon. La température du feuillage des arbres n'est pas diagnostiquée en tant que tel mais approximée par la température de l'air au niveau de la canopée végétale. Les variations d'humidité de l'air sont correctement saisies par le modèle mais les simulations diffèrent des observations en valeur absolue, sauf

autour du midi solaire lorsque le profil vertical d’humidité montre une humidité de l’air très homogène.

7.5 Conditions de confort thermique dans le canyon

L’indice de confort UTCI (pour *Universal Thermal Climate Index*) est diagnostiqué dans le modèle TEB pour un individu situé au milieu du canyon au soleil ($UTCI_{sun}$) ou à l’ombre ($UTCI_{shade}$). Il tient compte de la température de l’air, de la pression de vapeur d’eau, de la vitesse du vent et de la température radiante moyenne. Les détails du calcul de l’UTCI, implémenté dans TEB par PIGEON (2011) et des modifications apportées pour intégrer l’effet des arbres sur le confort thermique des piétons sont dans l’Annexe E.

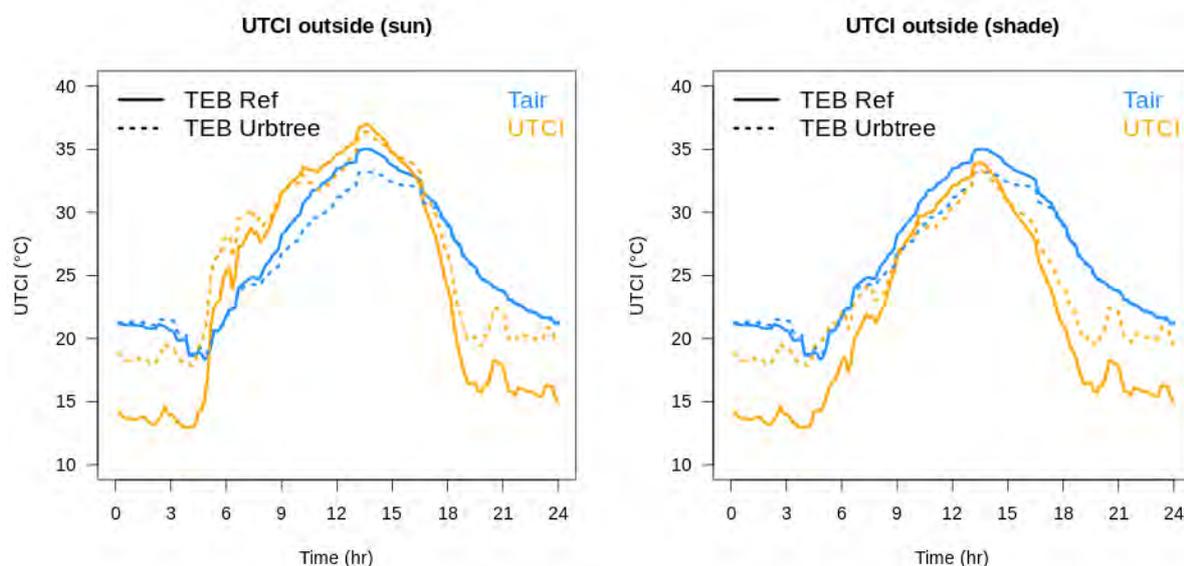


FIGURE 7.8 – Comparaison des UTCI calculés pour un piéton exposé au soleil (à gauche) ou un piéton à l’ombre (à droite) et de la température de l’air à 2 m dans le canyon.

La Figure 7.8 présente la comparaison des températures de l’air dans le canyon et des UTCI calculés par TEB selon la version Ref ou Urbtree, afin d’évaluer l’impact de la nouvelle paramétrisation tenant compte de la canopée arborée sur les conditions de confort thermique.

Comme cela a été discuté précédemment, la température de l’air diagnostiquée dans les deux versions varie peu la nuit, avec un faible réchauffement autour de 03:00. En revanche, un refroidissement significatif est produit en journée avec la version comprenant une ca-

nopée arborée explicite. Pour la version TEB Ref qui traite la végétation au sol, l'UTCI montre une amplitude plus importante que la température de l'air. La nuit, l'UTCI est bien plus froid que la température de l'air (de près 7 ° C). En journée, l'UTCI est inférieur à la température de l'air lorsqu'il est calculé pour un individu à l'ombre et supérieur à la température de l'air pour un individu au soleil du fait de la contribution de rayonnement solaire direct. La nouvelle version TEB Urbtree montre des résultats très différents. On note une légère diminution de l'UTCI par rapport à TEB Ref autour du midi solaire (que ce soit dans le cas à l'ombre ou au soleil). Par contre la nuit, les émissions IR de la canopée arborée ont un fort impact sur la température radiante de sorte que l'UTCI diminue beaucoup moins que dans TEB Ref.

Finalement, ces simulations nous indiquent que la nuit, on n'observe aucun stress thermique pour le jour étudié car l'UTCI est compris entre +9 et +26 ° C. En revanche, de 07:00 à 18:00 l'UTCI passe progressivement de valeurs caractéristiques d'un stress thermique modéré (de +26 à +32 ° C) à élevé (de +32 à +38 ° C). La durée d'exposition à un stress thermique élevée est de plusieurs heures pour un piéton non protégé. À l'ombre, il n'est de quelques minutes seulement. La présence d'arbres améliore le confort thermique autour du midi solaire. Malgré un ressenti thermique plus chaud la nuit, il n'induit pas une menace pour le confort car l'UTCI est bien en-dessous de 26 ° C (environ 20 ° C). Entre 07 :00 et 08 :00 environ les arbres semblent provoquer un stress thermique modéré dans le cas d'un piéton exposé au soleil. Néanmoins, ce risque est à mettre en perspective avec le gain observé autour du midi solaire. De plus, la forte sous-estimation de l'évapotranspiration dans le modèle vue précédemment ne permet pas de rendre compte pleinement du pouvoir rafraîchissant des canopées arborées.

Conclusions et perspectives

7.6 Conclusions

Afin d'examiner certains des processus physiques reliés à la présence de végétation dans les environnements urbains, *e.g.* pour des enjeux microclimatiques, hydrologiques ou de consommation d'énergie des bâtiments, la modélisation est définitivement un outil nécessaire. Le modèle TEB a été raffiné et amélioré dans le but de représenter explicitement les arbres de rue et leurs impacts sur les transferts radiatifs, énergétiques, et aérauliques. La nouvelle paramétrisation est basée sur les hypothèses simples de TEB : (1) une géométrie peu détaillée sans arrangement spécifique des surfaces au sol et (2) un unique facteur de vue appliqué aux calculs radiatifs pour chaque surface émettrice et réceptrice.

Pour prendre en compte la canopée arborée dans TEB, il était requis d'ajouter une nouvelle strate végétalisée sur le plan vertical, qui puisse ombrager la route, les murs et la végétation basse. Cette modification a conduit à des calculs d'échanges radiatifs plus complexes, mais a été réalisée avec le souci de préserver un certain niveau de simplicité et de limiter le nombre de nouveaux paramètres d'entrée pour TEB. Il est important de souligner que le modèle est conçu pour modéliser des villes entières, pour lesquelles il peut simuler la variabilité climatique locale relative à l'hétérogénéité du paysage urbain à l'échelle du quartier. Cela signifie que les temps de calcul doivent être acceptables, et que les données urbaines d'entrée doivent être disponibles ou faciles à définir. Dans cette optique, la végétation haute est ici décrite en utilisant seulement cinq paramètres d'entrée : la fraction de recouvrement des arbres, la hauteur des arbres et des troncs, le LAI et leur albédo.

Cette caractérisation simplifiée de la végétation haute induit nécessairement certaines incertitudes sur les échanges radiatifs solaires. Elles ont été estimées grâce à une comparaison entre TEB et le modèle d'ensoleillement à haute résolution spatiale SOLENE. Sur la base d'une géométrie idéalisée de canyons urbains avec différents agencements de végétation, TEB est évalué au regard du rayonnement solaire total absorbé par les éléments qui composent le canyon. Les simulations TEB en été ont rassemblé les meilleurs résultats pour toutes les configurations et surfaces considérées, ce qui est précisément la saison la plus pertinente pour évaluer l'effet de rafraîchissement des arbres à feuillage caduc sous climat tempéré. Les résultats statistiques ont démontré une bonne capacité de TEB à résoudre le bilan radiatif de canyons sans végétation en dépit de l'utilisation d'un unique facteur de vue du ciel pour chaque facette de la scène urbaine. Concernant les canyons végétalisés, on a noté une variabilité élevée des résultats statistiques selon l'agencement de végétation. Les plus grandes incertitudes sont obtenues pour les flux de rayonnement solaire reçus et absor-

bés par la végétation haute. Les biais obtenus sont néanmoins acceptables : -15.96 ± 15.93 W m^{-2} . La sous-estimation systématique des flux atteignant la nouvelle strate arborée est expliquée par une approche par fractions de recouvrement dans TEB où les bords de la couronne ne sont pas représentés. Les interactions entre les potentielles lignées d'arbres ou la diffusion et le piégeage intra-canopée sont aussi négligés. Les résultats présentés comprennent l'effet d'approches divergentes dans la formulation du processus de transmission à travers les arbres entre TEB et SOLENE, alors même que aucun de ces deux modèles ne puisse être considéré comme référence à ce stade pour ce point.

La paramétrisation des échanges en rayonnement solaire à l'intérieur du canyon est maintenant plus réaliste : les effets d'ombrage sur les surfaces verticales et au sol mais aussi l'ombrage des bâtiments sur les arbres sont calculés. Ceci est réalisé en ajoutant une nouvelle fraction de recouvrement spécifique décrivant l'étendue horizontale de la végétation haute. Les réflexions infinies à l'intérieur du canyon sont aussi conditionnées par des termes de transmissivité calculés par paires de surfaces en interaction. Cette étude démontre le perfectionnement qu'ont permis les nouveaux développements sur le calcul des flux de rayonnement solaire absorbé à l'intérieur du canyon entre l'ancienne version référence de TEB et la version implémentée. Dans la version actuelle, les arbres peuvent intercepter et absorber le rayonnement solaire direct au niveau de la canopée plutôt que depuis le sol. Conséquemment, les murs et le sol sont plus ombragés. Les fractions de végétation haute et basse sont maintenant explicitement dissociées. Seules les fractions de pelouse et de sol nu contribuent à la fraction de jardin. De cette manière, la fraction de route, définie telle que $1 - \delta_g$, est indépendante de la couverture arborée. Cela conduit à une pondération des flux à l'échelle du canyon plus réaliste. Le rapport d'aspect a un impact significatif sur l'albédo du canyon : il décroît avec un rapport d'aspect croissant. Pour les canyons avec des rapports d'aspect de $h/w = 0.5$, l'albédo des canyons végétalisés avec une explicite strate arborée est systématiquement plus faible que celui de canyons non obstrués. Les arbres situés dans le canyon peuvent plus aisément absorber le rayonnement solaire incident que les surfaces au sol le peuvent. Pour les rapports d'aspect plus grands, l'impact des arbres est dépendant de la balance entre d'une part, leurs facteurs de vue et réflectivité supérieurs au regard de ceux des surfaces artificielles, et d'autre part, de leur effet de piégeage du rayonnement solaire, réduisant ou augmentant l'absorption totale d'énergie solaire par le canyon, respectivement. L'albédo du canyon est aussi plus sensible à la végétation pour les formes urbaines $h/w = 1$ ou dans les cas de canyons $h/w = 2$ lorsque l'épaisseur de couronne d'arbre est ajustée au regard de la profondeur de la rue.

Le développement de nouveaux facteurs de vue et de transmissivités moyennes dédiés aux échanges entre les facettes urbaines et la végétation haute au milieu du canyon ont également bénéficié aux calculs des échanges en IR pour tenir compte de la canopée arborée. Une approximation de la température du feuillage des arbres a été choisie, basée sur la température de l'air diagnostiquée à la mi-hauteur du houppier.

Ces travaux se sont poursuivis par l'étude des échanges d'énergie. Si l'approche adoptée pour la résolution du bilan thermo-radiatif avec les arbres est plutôt sophistiquée et est capable de simuler correctement les principaux processus physiques réels, une approche plus simple a été retenue pour la modification du bilan d'énergie. L'architecture actuelle de TEB ne permet d'utiliser le code ISBA qu'une seule fois, c'est pourquoi la végétation urbaine est modélisée selon un mode 'big leaf' où les couverts naturels partagent un bilan d'énergie unique. Néanmoins, l'agrégation des flux de rayonnements solaire et IR reçus à la fois par la végétation haute et la végétation basse de manière séparée apporte une information réaliste au calcul du bilan d'énergie global de la végétation urbaine. Ce travail constitue une première étape qui pourra être affinée par la suite, notamment en calculant des bilans d'énergie propres à chacune des strates végétales. La paramétrisation des effets aérodynamiques des arbres en contexte urbain est largement inspirée de la littérature existante. Elle tient compte de la discrétisation verticale de la densité surfacique de feuilles (ou LAD). Cette approche est bien adaptée au schéma de résolution de la couche limite de surface ou TEB-SBL.

En complément à ce travail focalisé sur les arbres de rue, une étude a été menée afin d'étudier l'influence de l'environnement péri-urbain sur le bilan d'énergie d'une pelouse. Elle a pu être réalisée grâce aux données collectées lors de la campagne expérimentale FluxSAP 2012 dans un jardin privé situé à Nantes dans un quartier résidentiel à morphologie homogène. L'exploitation des mesures météorologiques, de température et humidité du sol à différentes profondeurs nous a permis de mettre en évidence l'influence de l'environnement local sur les échanges turbulents entre la végétation et l'atmosphère en milieu urbain. On a pu constater la sensibilité du modèle de végétation ISBA à la paramétrisation du profil de texture du sol (qui détermine les propriétés hydrologiques du sol sur la base fonctions de pédo-transfert empiriques, et régit les variations de contenus en eau) et de la longueur de rugosité aérodynamique. En effet, la longueur de rugosité utilisée pour le calcul du bilan d'énergie d'une pelouse dans un environnement hétérogène doit être définie en fonction de l'envergure des plus grands obstacles présents dans l'environnement immédiat de la surface considérée.

L'évaluation des développements par la confrontation à des mesures acquises sur un site expérimental en Israël a mis en exergue le fort impact des nouvelles paramétrisations sur la simulation du microclimat urbain (température de l'air et vitesse du vent) et les températures de surface des murs et du sol. Ces résultats sont encourageants et démontrent l'intérêt de représenter de manière plus réaliste la canopée arborée. Une importante sous-estimation du flux d'évapotranspiration a été relevée durant l'expérience numérique, qu'il conviendra d'investiguer plus amplement. L'acquisition de données complémentaires sur le contenu en eau du sol ou d'éventuelles spécificités physiologiques des spécimens d'arbres plantés sur le site pourrait apporter des réponses à ce déficit. Les améliorations obtenues sur la simulation du micro-climat laisse présager une meilleure prédiction du confort thermique

pour les prochaines études.

Afin d'affiner les actuelles paramétrisations il est recommandé de poursuivre les efforts d'évaluation de TEB en milieu hétérogène avec des mesures *in situ* où les arbres sont des éléments architecturaux structurants du paysage urbain. La comparaison des champs de micro-météorologie (température et humidité de l'air, vitesse du vent) sur des profils verticaux peut se révéler utile.

7.7 Perspectives

Le raffinement de la paramétrisation de la végétation urbaine proposé dans le cadre de cette thèse a mis en évidence des résultats encourageants qui doivent malgré tout être confortés et approfondis au travers d'autres cas réels. D'autres exercices d'évaluation permettront de mieux quantifier les apports et les limites des résultats obtenus sur les problématiques de prédiction du microclimat, mais aussi du confort thermique. Néanmoins, la confrontation de simulations numériques modélisant des mailles d'au moins 250 m de côté à des mesures de terrain très locales est loin d'être un exercice trivial. En effet, les diagnostics fournis par les modèles représentent les champs moyens de variables physiques alors qu'en réalité le paysage urbain offre une forte hétérogénéité de ces mêmes variables. Afin de valider le bilan radiatif en infrarouge de TEB il conviendrait d'utiliser, par exemple, une température de surface agrégée du sol ou des murs à partir d'images de caméras thermiques plutôt que le résultat d'une seule mesure locale. Ce type de changement de conception des futures campagnes expérimentales nécessite donc en amont un travail approfondi de coopération entre expérimentateurs et modélisateurs. Le suivi du statut en eau du sol et de la température du sol à différentes profondeurs ne devront pas être négligés. Enfin, la mesure des profils verticaux des champs de température et humidité de l'air permettront d'affiner la résolution verticale des exercices de comparaison entre observations et simulations. L'ensemble de ces suggestions devrait améliorer la configuration des paramètres d'entrée des modèles mais aussi donner un crédit plus important aux conclusions futures si les évaluations exploitent de manière plus rigoureuse et systématique les différents aspects du bilan d'énergie d'un site.

Une des principales perspectives à donner à ce travail est d'explorer d'autres systèmes végétalisés et notamment les façades végétales. La présente paramétrisation de la végétation haute pourrait être adaptée aux effets des enveloppes végétales sur les parois verticales en milieu urbain, modifiant fortement le bilan d'énergie de la surface. Les murs végétalisés représentent un fort enjeu de végétalisation de la ville dans des rues, soit trop étroites pour accueillir des arbres, soit dont les bâtiments sont très hauts et pour lesquels il n'est pas judicieux d'ajouter une canopée végétale obstruant la rue et limitant le rafraîchissement la

nuit.

En outre, le couplage de cette nouvelle version avec une meilleure représentation de l'hydrologie en milieu urbain permettra de mieux quantifier la ressource en eau disponible pour la végétation urbaine et ainsi maintenir leur pouvoir d'évapotranspiration, associé à une partie de leur pouvoir rafraîchissant. Une collaboration avec des chercheurs en hydrologie de l'IFSTTAR est déjà en cours sur ces questions. Dans ce cadre, une version de TEB incluant le sous-sol en milieu urbain sous les routes et les bâtiments, comme cela est déjà fait pour les sols naturels, et les processus hydrologiques associés, a été développée très récemment et est en cours d'évaluation.

Enfin, le fonctionnement des arbres est susceptible d'être différent en contexte urbain en raison des multiples contraintes locales qu'impose ce milieu hétérogène. Les espaces verts et les arbres d'alignement sont soumis à de fortes pollutions et de fréquentes interventions de gestion. Le scellement du sol modifie grandement la disponibilité en eau dans le sol pour les plantes et les arbres. L'ombrage des bâtiments a aussi un effet sur la disponibilité en énergie solaire pour l'efficacité de la photosynthèse et l'évapotranspiration. Des travaux visant à adapter la modélisation des processus physiologiques des arbres urbains dans le modèle ISBA pourraient être envisagés mais nécessitent dans ce cas des données expérimentales très spécifiques difficiles à acquérir.

Comme cela a déjà été évoqué précédemment, il est à mon sens primordial d'associer systématiquement à ces nouveaux développements une réflexion sur les données d'entrée requises. On dispose aujourd'hui en milieu urbain, en particulier pour les villes françaises, de données de typo-morphologie à haute résolution et relativement homogènes sur l'ensemble du territoire. Néanmoins, la qualification des couverts naturels en milieu urbain, que ce soit en termes d'occupation du sol, de distinction des strates, et de descriptions des propriétés de ces couverts, reste une limitation forte pour les bases de données d'entrée des modèles de climat urbain. Certaines villes se dotent aujourd'hui d'un inventaire de leur végétation. Il serait intéressant de vérifier à l'avenir que ces bases de données puissent être accessibles, à un format facilement exploitable à grande échelle pour la communauté scientifique et contenant des informations compatibles avec les besoins en paramètres d'entrée des modèles. Même si les images satellites se généralisent, il faudrait les coupler à d'autres sources d'information pour les utiliser (par exemple la topographie pour extraire la hauteur des éléments). La prescription de la hauteur des troncs reste problématique, sauf si les classifications permettent de définir les essences.

Finalement, sur la base de cette nouvelle de TEB, plus sophistiquée et plus réaliste pour la prise en compte de la végétation haute, de nouvelles études d'impact pourraient être conduites et des stratégies adaptatives de végétalisation pourraient être évaluées plus précisément. Ces nouvelles paramétrisations devraient en effet permettre de mieux quantifier les effets sur le microclimat dans l'espace extérieur, mais également les conditions

de confort thermique dans les rues et dans les bâtiments, voire même les consommations d'énergie des bâtiments liées à l'usage du chauffage en hiver et de la climatisation en été. En outre, des scénarios plus raffinés pourraient être envisagés quant aux choix de végétation à mettre en place, et aux essences arborées choisies.

Troisième partie

**Annexes liées aux développements de
TEB dans le cadre du travail de thèse**

Facteurs de vue

Les facteurs de vue du ciel pour la route, le jardin et le mur (Eq. A.1, A.2) aussi bien que les facteurs de vue entre éléments restent inchangés par rapport à la version initiale des calculs radiatifs dans TEB (décrits dans V. MASSON (2000) et A. LEMONSU, V. MASSON et al. (2012)) :

$$\Psi_{rs} = \Psi_{sr} = \sqrt{\left(\frac{h}{w}\right)^2 + 1} - \frac{h}{w} \quad (\text{A.1})$$

$$\Psi_{wr} = \Psi_{ws} = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{h}{w} + 1 - \sqrt{\left(\frac{h}{w}\right)^2 + 1} \right)}{\frac{h}{w}} \quad (\text{A.2})$$

$$\Psi_{sw} = 1 - \Psi_{sr} \quad (\text{A.3})$$

$$\Psi_{ww} = 1 - 2\Psi_{ws} = \frac{\sqrt{\left(\frac{h}{w}\right)^2 + 1} - 1}{\frac{h}{w}} \quad (\text{A.4})$$

$$\Psi_{rw} = 1 - \Psi_{rs} = 1 - \left(\sqrt{\left(\frac{h}{w}\right)^2 + 1} - \frac{h}{w} \right) \quad (\text{A.5})$$

Les facteurs de vue du ciel Ψ_{*s} représentent la fraction de ciel vue par la surface considérée (* pouvant désigner r, la route ou w, un mur), comparé à la fraction de ciel qu'une surface horizontale plane pourrait voir en l'absence d'obstruction (sur 180 °). Plus les bâtiments sont bas, plus Ψ_{rs} tend vers 1 et Ψ_{ws} vers 0.5 (car le mur voit au maximum une moitié de ciel, soit 90 °). À l'inverse, plus les bâtiments sont hauts, plus les facteurs de vue du ciel tendent vers 0 et le rayonnement sera piégé par les différentes facettes du canyon ; une moindre part d'énergie s'en échappera.

Pour la canopée arborée, le facteur de vue du ciel et les facteurs de vue depuis la route

et les murs sont calculés au milieu du canyon et à mi-hauteur de la canopée (h_{cw}) :

$$\Psi_{st} = \sqrt{\left(\frac{h}{w} \cdot \frac{h - h_{cw}}{h}\right)^2 + 1} - \left(\frac{h}{w} \cdot \frac{h - h_{cw}}{h}\right) \quad (\text{A.6})$$

$$\Psi_{rt} = \sqrt{\left(\frac{h}{w} \cdot \frac{h_{cw}}{h}\right)^2 + 1} - \left(\frac{h}{w} \cdot \frac{h_{cw}}{h}\right) \quad (\text{A.7})$$

$$\Psi_{wt} = 1 - \frac{1}{2}(\Psi_{st} + \Psi_{rt}) \quad (\text{A.8})$$

Ψ_{st} et Ψ_{rt} sont calculés de la même manière que pour Ψ_{sr} au milieu du canyon mais sont ajustés à l'aire $[h_{cw} - h]$ et l'aire $[0 - h_{cw}]$, respectivement. Ψ_{wt} est calculé comme le terme complémentaire de Ψ_{st} et Ψ_{rt} sur 2π et pour un seul mur (aussi bien que Ψ_{ws} et Ψ_{ww}). On a normalisé Ψ_{wt} pour l'exprimer sur un π seulement.

Transmissivité moyenne au rayonnement pour la canopée arborée dans le canyon

Les réflexions multiples du rayonnement solaire à l'intérieur du canyon (comme détaillé dans V. MASSON (2000) et A. LEMONSU, V. MASSON et al. (2012)) sont maintenant affectées par la présence d'arbres dont le feuillage intercepte, réfléchit et absorbe une part de l'énergie. La transmissivité du rayonnement à travers le feuillage de la canopée arborée est variable selon la manière dont les rayons traversent le feuillage et la distance qu'ils parcourent. En fonction de la position de la couronne d'arbre à l'intérieur du canyon et de l'orientation dominante du rayonnement (*e.g.* un rayon depuis le ciel vers le sol ou depuis le mur vers le sol n'atteint pas le feuillage de la même manière), ces rayons peuvent traverser toute l'épaisseur du feuillage ou seulement une petite portion. La distribution verticale des feuilles dans les couronnes d'arbres a aussi un impact sur la transmissivité. Différentes fonctions de transmissivité (désignées par τ_{12} pour les échanges entre l'élément 1 et l'élément 2) sont calculés selon les surfaces impliquées dans les échanges radiatifs. On distingue quatre cas d'échanges radiatifs, en émettant l'hypothèse que les fonctions de transmissivité sont symétriques, *i.e.*, un échange entre l'élément 1 à l'élément 2 est équivalent dans le sens inverse : entre les surfaces au sol et le ciel ($\tau_{rs} = \tau_{sr}$) ou un mur ($\tau_{rw} = \tau_{wr}$), entre un mur et le ciel ($\tau_{ws} = \tau_{sw}$), entre un mur et l'autre mur (τ_{ww}). Pour chaque cas on admet, d'après S.-H. LEE et S.-U. PARK (2008), que la majorité des échanges radiatifs ont lieu dans une zone spécifique du canyon, pour laquelle le *Leaf Area Density* (LAD_t exprimé en m^2 de surface de feuilles par m^3 de volume) est calculé :

$$\tau_{rs} = 1 - \delta_t \left[1 - \exp\left(-k \int_0^h LAD_t dz\right) \right] \quad (\text{B.1})$$

$$\tau_{rw} = 1 - \delta_t \left[1 - \exp\left(-k \int_0^{\frac{h}{2}} LAD_t dz\right) \right] \quad (\text{B.2})$$

$$\tau_{ws} = 1 - \delta_t \left[1 - \exp\left(-k \int_{\frac{h}{2}}^h LAD_t dz\right) \right] \quad (\text{B.3})$$

$$\tau_{ww} = 1 - \delta_t \left[1 - \exp\left(-k \int_0^h LAD_t dz\right) \right] \quad (\text{B.4})$$

Les limites des intégrales impliquées dans le calcul des fonctions de transmissivité ont été définies de manière cohérente avec les secteurs de canyon balayés par les facteurs de vue associés. Par exemple, Eq. 3.9 exprime le rayonnement solaire diffus incident atteignant la route depuis le ciel. Cette formulation est typiquement basée sur le facteur de vue du ciel de la route Ψ_{rs} qui balaie une aire couvrant toute la hauteur de bâtiment. On a ajouté une fonction de transmissivité τ_{rs} traduisant le ratio entre l'épaisseur de la couronne d'arbre à l'intérieur du canyon et l'étendue verticale de l'aire d'intérêt, ici $[0 - h]$.

Notons que ces expressions sont en accord avec celle appliquée dans Eq. 3.3 dans laquelle LAD_t est intégré sur l'entière épaisseur du feuillage, ce qui est équivalent au LAI_t . Comme mentionné auparavant, sachant que la couronne d'arbre est décrite comme un parallépipède rectangle avec une répartition homogène des feuilles, un profil vertical uniforme de LAD est appliqué ici.

Absorption totale du rayonnement solaire par la résolution de réflexions infinies

Pour les calculs de rayonnement solaire, le modèle TEB prend en compte un nombre infini de réflexions entre tous les éléments composant le canyon urbain. À chaque réflexion, le rayonnement isotrope intercepté par un élément donné (1) après réflexions sur l'un des autres éléments (2) est conditionné par le facteur de vue de (2) depuis (1) désigné par Ψ_{12} (voir Annexe A), la transmissivité radiative moyenne τ_{12} (voir Annexe B). La réflexion est ensuite déterminée d'après les propriétés réfléchives de (1). Comme vu dans la section 3.2.4, le rayonnement de courte longueur d'ondes total absorbé par chaque élément du canyon ou redirigé vers le ciel est fonction de réflexions infinies R_∞ , G_∞ , A_∞ , B_∞ , et T_∞ qui sont encore inconnues à ce stade. Ces termes comprennent la première réflexion de chaque élément : R_0 , G_0 , A_0 , B_0 , T_0 . Pour la route, le jardin, et les murs, R_0 , G_0 , A_0 et B_0 dépendent simplement du rayonnement solaire incident atteignant la surface et de son albédo. Depuis les équations 3.15, 3.16, 3.17, 3.18 et 3.19, on peut déduire la part réfléchie ayant lieu à l'absorption $n^{\text{ième}} + 1$ comme le terme complémentaire de la $n^{\text{ième}} + 1$ réception du rayonnement solaire pour les éléments opaques du canyon seulement, soit la route, le jardin, le mur A et le mur B, respectivement. On obtient par exemple pour la route et le mur A, respectivement :

$$R_0 = \alpha_r (S_r^\downarrow + S_r^\uparrow) \quad (\text{C.1})$$

$$R_{n+1} = R_0 + \alpha_r [\Psi_{rw}\tau_{rw}W_n + c_{rt}\Psi_{rt}\delta_t T_n] \quad (\text{C.2})$$

$$A_0 = \alpha_w (S_w^\downarrow + S_w^\uparrow) \quad (\text{C.3})$$

$$A_{n+1} = A_0 + \alpha_w [\Psi_{ww}\tau_{ww}B_n + \Psi_{wr}\tau_{wr}(\delta_r R_n + \delta_g G_n) + c_{wt}\Psi_{wt}\delta_t T_n] \quad (\text{C.4})$$

Les coefficients spécifiques associés aux facteurs de vue reliés à la végétation haute dans les calculs des réflexions de courte longueur d'ondes sont définies tels que :

$$c_{rt} = 0 \quad (C.5)$$

$$c_{wt} = \frac{1 - \Psi_{st}}{2 - \Psi_{st} - \Psi_{rt}} \quad (C.6)$$

Seules les réflexions depuis les arbres vers le ciel ou la partie supérieure des murs sont autorisées. Comme expliqué dans la section 3.2.4, ce mode de réflexion par les feuilles durant la première réflexion, qui est de loin la plus énergétique, est plus probable d'avoir lieu plutôt que d'une manière isotropique. Ce postulat peut être aisément contourné en fixant les coefficients précédents à 1.

Lors de la première réflexion de la canopée arborée, la part du rayonnement solaire direct reçue est corrigée par le flux transmis (voir Eq. 3.2) :

$$T_0 = \alpha_t \left[\left(S_t^\downarrow - S_t^{\gg} \right) + S_t^\downarrow \right] \quad (C.7)$$

Quelques incertitudes demeurent à propos de la pertinence des facteurs de vue que l'on pourrait formuler pour représenter les contributions réfléchies depuis les autres surfaces à n aux $n^{\text{ièmes}} + 1$ absorptions ou réflexions par la canopée arborée, aussi bien que pour la potentielle absorption de l'énergie au sein de la couronne de l'arbre. Conséquemment, le flux solaire réfléchi par les arbres à $n + 1$ a été déterminé comme le terme résiduel en supposant que la $n^{\text{ième}}$ réflexion solaire provenant de chaque élément (route, jardin, mur A, mur B) qui n'a pas été reçu par la route, le jardin, le mur A, le mur B ou qui ne retourne pas vers le ciel à $n + 1$ est reçu par les arbres.

Durant chaque inter-réflexion, une part du $n^{\text{ième}}$ flux réfléchi est potentiellement disponible pour la $(n + 1)^{\text{ième}}$ réflexion ou absorption est intercepté par la végétation haute. Cette part interceptée liée à la présence du feuillage sur le chemin des rayons diffus vers chaque élément récepteur ou le ciel sont formulés de la manière suivante :

$$I_s(n+1) = \Psi_{sr}(1 - \tau_{sr})(\delta_r R_n + \delta_g G_n) + \Psi_{sw}(1 - \tau_{sw}) \frac{A_n + B_n}{2} \quad (\text{C.8})$$

$$I_r(n+1) = \Psi_{rw}(1 - \tau_{rw}) \frac{A_n + B_n}{2} \quad (\text{C.9})$$

$$I_g(n+1) = \Psi_{rw}(1 - \tau_{rw}) \frac{A_n + B_n}{2} \quad (\text{C.10})$$

$$I_{w_A}(n+1) = \Psi_{wr}(1 - \tau_{wr})(\delta_r R_n + \delta_g G_n) + \Psi_{ww}(1 - \tau_{ww}) B_n \quad (\text{C.11})$$

$$I_{w_B}(n+1) = \Psi_{wr}(1 - \tau_{wr})(\delta_r R_n + \delta_g G_n) + \Psi_{ww}(1 - \tau_{ww}) A_n \quad (\text{C.12})$$

Enfin, le flux solaire qui est intercepté par les arbres à $(n+1)$ est exprimé comme la somme des interceptions sur le chemin des éléments récepteurs du canyon ou du ciel :

$$I_t(n+1) = \frac{1}{\delta_t} \left(I_s(n+1) + \delta_r I_r(n+1) + \delta_g I_g(n+1) + \frac{2h}{w} \frac{I_{w_A}(n+1) + I_{w_B}(n+1)}{2} \right) \quad (\text{C.13})$$

L'énergie solaire qui est réfléchiée par les arbres à $(n+1)$ est donc :

$$T_{n+1} = \alpha_t I_t(n+1) \quad (\text{C.14})$$

Les formulations peuvent être simplifiées en rassemblant les équations pour les murs en une seule expression pour un mur moyen selon :

$$W(n+1) = \frac{A(n+1) + B(n+1)}{2} \quad (\text{C.15})$$

Ainsi, après un nombre infini de réflexions, le système d'équations peut être écrit :

$$R_\infty = R_0 + \alpha_r \left[\Psi_{rw} \tau_{rw} W_\infty + c_{rt} \Psi_{rt} \delta_t T_\infty \right] \quad (\text{C.16})$$

$$G_\infty = G_0 + \alpha_g \left[\Psi_{rw} \tau_{rw} W_\infty + c_{rt} \Psi_{rt} \delta_t T_\infty \right] \quad (\text{C.17})$$

$$W_\infty = W_0 + \alpha_w \left[\Psi_{ww} \tau_{ww} W_\infty + \Psi_{wr} \tau_{rw} (\delta_r R_\infty + \delta_g G_\infty) + c_{wt} \Psi_{wt} \delta_t T_\infty \right] \quad (\text{C.18})$$

$$T_\infty = T_0 + \frac{\alpha_t}{\delta_t} \left[(\Psi_{sw}(1 - \tau_{sw}) + \Psi_{rw}(1 - \tau_{rw}) + \Psi_{ww}(1 - \tau_{ww})) W_\infty \right. \\ \left. + (\Psi_{sr}(1 - \tau_{sr}) + \Psi_{wr}(1 - \tau_{wr})) (\delta_r R_\infty + \delta_g G_\infty) \right] \quad (\text{C.19})$$

Par conséquent, on résout le système linéaire de quatre équations à quatre inconnues :

$$R_\infty = R_0 + \mathcal{F}_{rw} W_\infty + \mathcal{F}_{rt} T_\infty \quad (\text{C.20})$$

$$G_\infty = G_0 + \mathcal{F}_{gw} W_\infty + \mathcal{F}_{gt} T_\infty \quad (\text{C.21})$$

$$W_\infty = W_0 + \mathcal{F}_{ww} W_\infty + \mathcal{F}_{wr} R_\infty + \mathcal{F}_{wg} G_\infty + \mathcal{F}_{wt} T_\infty \quad (\text{C.22})$$

$$T_\infty = T_0 + \mathcal{F}_{tw} W_\infty + \mathcal{F}_{tr} R_\infty + \mathcal{F}_{tg} G_\infty \quad (\text{C.23})$$

Les facteurs géométriques sont calculés comme suit :

$$\mathcal{F}_{rw} = \Psi_{rw} \tau_{rw} \alpha_r \quad (\text{C.24})$$

$$\mathcal{F}_{rt} = c_{rt} \Psi_{rt} \delta_t \alpha_r \quad (\text{C.25})$$

$$\mathcal{F}_{gw} = \Psi_{rw} \tau_{rw} \alpha_g \quad (\text{C.26})$$

$$\mathcal{F}_{gt} = c_{rt} \Psi_{rt} \delta_t \alpha_g \quad (\text{C.27})$$

$$\mathcal{F}_{wr} = \Psi_{wr} \tau_{wr} \delta_r \alpha_w \quad (\text{C.28})$$

$$\mathcal{F}_{wg} = \Psi_{wr} \tau_{wr} \delta_g \alpha_w \quad (\text{C.29})$$

$$\mathcal{F}_{ww} = \Psi_{ww} \tau_{ww} \alpha_w \quad (\text{C.30})$$

$$\mathcal{F}_{wt} = c_{wt} \Psi_{wt} \delta_t \alpha_w \quad (\text{C.31})$$

$$\mathcal{F}_{tw} = [\Psi_{sw}(1 - \tau_{sw}) + \Psi_{rw}(1 - \tau_{rw}) + \Psi_{ww}(1 - \tau_{ww})] \frac{1}{\delta_t} \alpha_t \quad (\text{C.32})$$

$$\mathcal{F}_{tr} = [\Psi_{sr}(1 - \tau_{sr}) + \Psi_{wr}(1 - \tau_{wr})] \frac{\delta_r}{\delta_t} \alpha_t \quad (\text{C.33})$$

$$\mathcal{F}_{tg} = [\Psi_{sr}(1 - \tau_{sr}) + \Psi_{wr}(1 - \tau_{wr})] \frac{\delta_g}{\delta_t} \alpha_t \quad (\text{C.34})$$

La résolution du système d'équations donne les expressions suivantes pour les réflexions

multiples sur les arbres, les murs, la route et le jardin :

$$\begin{aligned}
T_\infty = & \left(\frac{1 - \mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rw} - \mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gw} - \mathcal{F}_{ww}}{\mathcal{D}} \right) T_0 \\
& + \left(\frac{\mathcal{F}_{tr}(1 - \mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gw} - \mathcal{F}_{ww}) + \mathcal{F}_{wr}(\mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gw} + \mathcal{F}_{tw})}{\mathcal{D}} \right) R_0 \\
& + \left(\frac{\mathcal{F}_{tg}(1 - \mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rw} - \mathcal{F}_{ww}) + \mathcal{F}_{wg}(\mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rw} + \mathcal{F}_{tw})}{\mathcal{D}} \right) G_0 \\
& + \left(\frac{\mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rw} + \mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gw} + \mathcal{F}_{tw}}{\mathcal{D}} \right) W_0
\end{aligned} \tag{C.35}$$

$$\begin{aligned}
W_\infty = & \left(\frac{\mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rt} + \mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gt} + \mathcal{F}_{wt}}{\mathcal{D}} \right) T_0 \\
& + \left(\frac{\mathcal{F}_{wr}(1 - \mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gt}) + \mathcal{F}_{tr}(\mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gt} + \mathcal{F}_{wt})}{\mathcal{D}} \right) R_0 \\
& + \left(\frac{\mathcal{F}_{wg}(1 - \mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rt}) + \mathcal{F}_{tg}(\mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rt} + \mathcal{F}_{wt})}{\mathcal{D}} \right) G_0 \\
& + \left(\frac{1 - \mathcal{F}_{rt}\mathcal{F}_{tr} - \mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gt}}{\mathcal{D}} \right) W_0
\end{aligned} \tag{C.36}$$

$$\begin{aligned}
R_\infty = & \left(\frac{\mathcal{F}_{rw}(\mathcal{F}_{rt}\mathcal{F}_{wr} + \mathcal{F}_{gt}\mathcal{F}_{wg} + \mathcal{F}_{wt}) + \mathcal{F}_{rt}(1 - \mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rw} - \mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gw} - \mathcal{F}_{ww})}{\mathcal{D}} \right) T_0 \\
& + \left(1 + \frac{\mathcal{F}_{rw}(\mathcal{F}_{wr}(1 - \mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gt}) + \mathcal{F}_{tr}(\mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gt} + \mathcal{F}_{wt})) + \mathcal{F}_{rt}(\mathcal{F}_{tr}(1 - \mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gw}) + \mathcal{F}_{wr}(\mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gw} + \mathcal{F}_{tw}))}{\mathcal{D}} \right) R_0 \\
& + \left(\frac{\mathcal{F}_{rw}(\mathcal{F}_{wg}(1 - \mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rt}) + \mathcal{F}_{tg}(\mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rt} + \mathcal{F}_{wt})) + \mathcal{F}_{rt}(\mathcal{F}_{tg}(1 - \mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rw} - \mathcal{F}_{ww}) + \mathcal{F}_{wg}(\mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rw} + \mathcal{F}_{tw}))}{\mathcal{D}} \right) G_0 \\
& + \left(\frac{\mathcal{F}_{rt}(\mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rw} + \mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gw} + \mathcal{F}_{tw}) + \mathcal{F}_{rw}(1 - \mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rt} - \mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gt})}{\mathcal{D}} \right) W_0
\end{aligned} \tag{C.37}$$

$$\begin{aligned}
G_\infty = & \left(\frac{\mathcal{F}_{gw}(\mathcal{F}_{rt}\mathcal{F}_{wr} + \mathcal{F}_{gt}\mathcal{F}_{wg} + \mathcal{F}_{wt}) + \mathcal{F}_{gt}(1 - \mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rw} - \mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gw} - \mathcal{F}_{ww})}{\mathcal{D}} \right) T_0 \\
& + \left(\frac{\mathcal{F}_{gw}(\mathcal{F}_{wr}(1 - \mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gt}) + \mathcal{F}_{tr}(\mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gt} + \mathcal{F}_{wt})) + \mathcal{F}_{gt}(\mathcal{F}_{tr}(1 - \mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gw}) + \mathcal{F}_{wr}(\mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gw} + \mathcal{F}_{tw}))}{\mathcal{D}} \right) R_0 \\
& + \left(1 + \frac{\mathcal{F}_{gw}(\mathcal{F}_{wg}(1 - \mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rt}) + \mathcal{F}_{tg}(\mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rt} + \mathcal{F}_{wt})) + \mathcal{F}_{gt}(\mathcal{F}_{tg}(1 - \mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rw} - \mathcal{F}_{ww}) + \mathcal{F}_{wg}(\mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rw} + \mathcal{F}_{tw}))}{\mathcal{D}} \right) G_0 \\
& + \left(\frac{\mathcal{F}_{gt}(\mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rw} + \mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gw} + \mathcal{F}_{tw}) + \mathcal{F}_{gw}(1 - \mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rt} - \mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gt})}{\mathcal{D}} \right) W_0
\end{aligned} \tag{C.38}$$

Le dénominateur est exprimé comme suit :

$$\begin{aligned}
\mathcal{D} = & (1 - \mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rw} - \mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gw} - \mathcal{F}_{ww})(1 - \mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rt} - \mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gt}) \\
& - (\mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rt} + \mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gt} + \mathcal{F}_{wt})(\mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rw} + \mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gw} + \mathcal{F}_{tw})
\end{aligned} \tag{C.39}$$

Quatrième partie

Annexes liées aux développements de
TEB historiques ou présents en
dehors du travail de thèse

Équations d'évolution de la température des surfaces artificielles

La surface urbaine présente une forte hétérogénéité du fait de sa forme et des matériaux de construction. TEB vise à estimer les flux radiatifs et turbulents issus du couvert urbain qui interagissent avec l'atmosphère. Pour cela, la température de surface des toits (T_R), de la route (T_r) et des murs (T_{w_A}, T_{w_B}) sont calculés afin d'assurer une précision suffisante de la représentation des différents termes du bilan d'énergie de surface.

Par ailleurs, afin de traiter les flux de conduction vers ou depuis l'intérieur des bâtiments (pour le toit ou le mur) ou le sol (route), chaque type de surface est discrétisé en plusieurs couches (Fig. 2.3).

Les équations décrivant l'évolution de la température des couches (représentative du milieu de la couche) sont basées sur les bilans d'énergie. Par convention, la couche avec l'indice $_1$ est celle en contact avec l'air (soit la couche la plus superficielle). Les équations prognostiques pour les couches de surface du toit, du mur (A ou B) ou de la route peuvent être écrites de manière générique telles que :

$$C_{\star_1} \frac{\partial T_{\star_1}}{\partial t} = (1 - \delta_{snow\star}) \frac{1}{d_{\star_1}} (S_{\star}^* + L_{\star}^* - H_{\star} - LE_{\star} - G_{\star_{1,2}}) + \delta_{snow\star} \frac{1}{d_{\star_1}} (G_{\star_{snow,1}} - G_{\star_{1,2}}) \quad (\text{D.1})$$

où les indices \star désignent R , r ou w , décrivant le toit, la route ou le mur, respectivement. Cette convention est utilisée dans l'ensemble de ce manuscrit. T_{\star_k} est la température à la $k^{\text{ième}}$ couche de la surface considérée (dans les équations au-dessus, $k = 1$). C_{\star_k} représente la capacité thermique, λ_k la conductivité thermique et d_{\star_k} l'épaisseur de la couche.

Les flux S_{\star}^* , L_{\star}^* , H_{\star} , LE_{\star} , $G_{\star_{1,2}}$ et $G_{\star_{snow,1}}$ font référence aux flux de rayonnement solaire net, de rayonnement IR net, de chaleur sensible, de chaleur latente et de conduction de chaleur entre la couche de surface et la couche sous-jacente, conduction de chaleur entre la base du manteau neigeux et la surface, respectivement. $\delta_{snow\star}$ est la fraction de neige sur la surface (qui est toujours nulle sur les surfaces verticales).

Il est supposé que la couche de surface de chaque surface est suffisamment fine pour que

la température moyenne de la couche puisse être utilisée pour évaluer les flux radiatifs et turbulents de surface. Cela signifie que les températures de surface T_\star sont calculées telles que :

$$T_\star = T_{\star_1}$$

Par souci de clarté, l'indice $_1$ sera retiré dans le reste du manuscrit.

Les autres températures évoluent selon une simple équation de conduction de chaleur. Pour la $k^{\text{ième}}$ couche :

$$C_{\star_k} \frac{\partial T_{\star_k}}{\partial t} = \frac{1}{d_{\star_k}} (G_{\star_{k-1,k}} - G_{\star_{k,k+1}}) \quad (\text{D.2})$$

Les conditions de couche limite pour le toit et les murs sont données par la température interne au bâtiment alors que celle de la route est représentée par un flux nul à la limite inférieure. Les flux entre la $n^{\text{ième}}$ couche (la couche interne) et le matériel sous-jacent sont alors :

$$G_{R_{n,n+1}} = \lambda_n \frac{T_{R_n} - T_{i_{bld}}}{\frac{1}{2}(d_{R_n})} \quad (\text{D.3})$$

$$G_{w_{n,n+1}} = \lambda_n \frac{T_{w_n} - T_{i_{bld}}}{\frac{1}{2}(d_{w_n})} \quad (\text{D.4})$$

$$G_{r_{n,n+1}} = 0 \quad (\text{D.5})$$

Le détail des équations d'évolution de température est consultable dans la documentation scientifique de SURFEX v8.0 à l'adresse <http://www.umr-cnrm.fr/surfex//>.

Diagnostic du confort thermique dans TEB

E.1 Principe général de l'UTCI

Le confort thermique des individus n'est pas simplement relié à la température de l'air. Il est associé à un ensemble de paramètres environnementaux influençant le ressenti (notamment l'ensoleillement, le vent, l'humidité...). Le niveau d'activité de l'individu, ses vêtements, son âge, et autres caractéristiques liées à son métabolisme, sont aussi des paramètres d'influence. On trouve dans la littérature différents indices de confort thermique, plus ou moins sophistiqués, les plus avancés reposant sur des modèles de thermorégulation du corps humain.

Un diagnostic d'indice de confort thermique a été implémenté dans le modèle TEB dans le cadre des études d'impact menées ces dernières années dans l'équipe, afin de pouvoir évaluer la vulnérabilité des populations aux conditions microclimatiques dans les rues et dans les bâtiments. L'indice choisi est le *Universal Thermal Climate Index* (UTCI, www.utci.org), proposé par l'action COST 730 pour mettre facilement à disposition des services météorologiques publics, des systèmes de santé publique, ou des responsables de la planification urbaine, un modèle physiologique d'évaluation de l'environnement thermique plus performant et plus réaliste (Fig. E.1). L'UTCI correspond à une température équivalente pour un environnement de référence qui générerait les mêmes contraintes thermiques que l'environnement réel, cet environnement de référence étant défini par une humidité relative de 50 % et une température radiante égale à la température de l'air. Le calcul de l'UTCI repose sur un modèle multi-nœuds complexe de thermorégulation du corps humain (Fiala et al. 2001), en prenant comme condition une personne marchant à 4 km h^{-1} avec un métabolisme de base de 135 W m^{-2} . La réponse du modèle étant multidimensionnelle (température du corps, taux de transpiration, humidité de la peau, etc.), un indice à une seule dimension est calculé par analyse en composante principale. Pour nos travaux, le modèle de thermorégulation n'est pas appliqué car trop complexe et coûteux, mais approché par une équation de régression polynomiale du 6^{ème} ordre proposée par Bröde et al. (2009) permettant un résultat avec une erreur inférieur au degré. C'est cette équation, dont le code

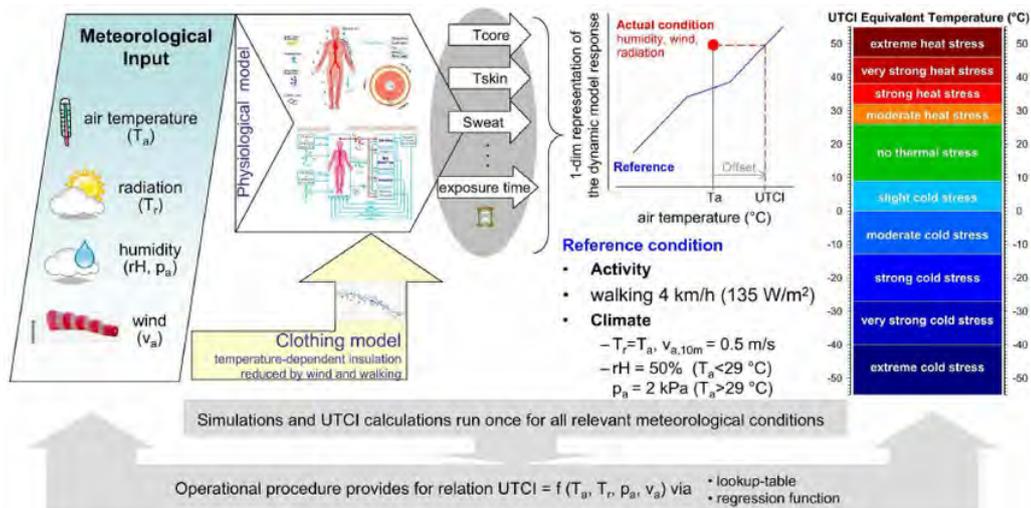


FIGURE E.1 – Principe du calcul de l’UTCI. Source : Bröde et al. (2013)

source est mis à disposition en ligne (www.utci.org), qui a été implémentée dans TEB.

E.2 Implémentation de l’UTCI dans TEB

Le calcul de l’UTCI selon l’équation de régression polynomiale proposée par Bröde et al. (2009) (non détaillée ici) nécessite quatre paramètres microclimatiques : la température de l’air à 2 m au-dessus du sol, la pression de vapeur d’eau au même niveau, la vitesse du vent à 10 m, et la température radiante moyenne. Cette équation a été implémentée dans TEB pour calculer trois UTCI différents, associés à un individu (1) dans la rue au soleil, (2) dans la rue à l’ombre des bâtiments, et (3) dans le bâtiment, de sorte que pour chaque situation, les variables microclimatiques doivent être adaptées.

Les données microclimatiques utilisées pour les calculs des trois UTCI sont détaillées dans le Tableau E.1. Pour la température et l’humidité de l’air et pour la force du vent, ces données sont directement fournies par le modèle. Le calcul de la température radiante a été implémenté dans TEB. Pour l’intérieur du bâtiment, la température radiante est calculée comme une moyenne pondérée de la température des surfaces intérieures. Pour l’environnement extérieur, les contributions proviennent du rayonnement solaire incident direct (pour la personne au soleil) et diffus, du rayonnement solaire réfléchis sur les surfaces environnantes (sol et façades), du rayonnement IR incident, et des émissions IR des surfaces environnantes (sol et façades, également).

Le rayonnement solaire direct est pondéré par un facteur f_p de surface projetée pour

TABLE E.1 – Variables microclimatiques disponibles dans TEB pour le calcul de l’UTCI.

	UTCI dans la rue au soleil	UTCI dans la rue à l’ombre	UTCI dans le bâtiment
Température de l’air	Température de l’air dans le canyon à 2 m calculée par TEB-SBL	Température de l’air dans le canyon à 2 m calculée par TEB-SBL	Température à l’intérieur du bâtiment
Humidité de l’air	Humidité de l’air dans le canyon à 2 m calculée par TEB-SBL	Humidité de l’air dans le canyon à 2 m calculée par TEB-SBL	Humidité de l’air à l’intérieur du bâtiment
Vitesse du vent	Vitesse du vent dans le canyon à 10 m calculée par TEB-SBL	Vitesse du vent dans le canyon à 10 m calculée par TEB-SBL	Valeur par défaut fixée à 0.5 m s^{-1}
Température radiante	Température radiante calculée à partir du rayonnement solaire incident direct et diffus, du rayonnement solaire après réflexions dans le canyon, du rayonnement atmosphérique et des émissions IR des éléments du canyon	Température radiante calculée à partir du rayonnement solaire incident diffus, du rayonnement solaire après réflexions dans le canyon, du rayonnement atmosphérique et des émissions IR des éléments du canyon	Température radiante incluant les émissions IR des surfaces intérieures (murs, vitrages, planchers) et des charges internes

l’individu qui dépend de l’élévation du soleil γ (exprimé ici en $^\circ$) selon la formulation de Fanger (1970) :

$$f_p = 0.308 \cos \left\{ \gamma \left(1 - \frac{\gamma^2}{48402} \right) \right\} \quad (\text{E.1})$$

Les autres flux, supposés isotropes dans les hypothèses de calculs radiatifs de TEB, sont pondérés par les facteurs de forme de l’individu par rapport aux éléments considérés, i.e. Ψ_{bs} , Ψ_{bg} , Ψ_{bw} pour le ciel, le sol et les murs, respectivement.

Finalement, la température radiante s’exprime pour la personne au soleil selon l’expression :

$$T_{mrt} = \left[\frac{a_b}{\sigma \epsilon_b} \left(\frac{f_p}{\sin(\gamma)} S^\downarrow + \Psi_{bs} S^\downarrow + \Psi_{bw} S_w^{ref} + \psi_{bg} S_g^{ref} + \Psi_{bs} L^\downarrow + \psi_{bw} L_w^\uparrow + \psi_{bg} L_g^\uparrow \right) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (\text{E.2})$$

On prescrit un coefficient d’absorption dans le solaire (a_b) et une émissivité (ϵ_b) pour le corps humain prescrits à 0.7 et 0.97, respectivement. Si la personne est à l’ombre, le premier terme $\frac{f_p}{\sin(\gamma)} S^\downarrow$ n’est pas pris en compte.

E.3 Prise en compte de la canopée arborée

La nouvelle paramétrisation de canopée urbaine implémentée dans TEB nécessite d'adapter les calculs des contributions radiatives pour l'UTCI dans l'espace extérieur.

D'une part, les contributions initiales de rayonnement solaire diffus et d'émissions IR (détaillées dans l'équation précédente) sont corrigées pour le ciel et pour les murs de l'effet d'atténuation du rayonnement lors du passage au travers de la canopée arborée. Ces coefficients d'atténuation sont ceux déjà présentés dans l'Annexe B, calculés en fonction du profil de densité surfacique foliaire, i.e. τ_{sr} pour l'atténuation entre le ciel et la route et τ_{wr} pour l'atténuation entre le mur et la route.

D'autre part, la canopée arborée contribue elle-même au flux total de rayonnement IR reçu par l'individu, du fait de sa propre émission IR (fonction de sa température et de son émissivité) et des ré-émissions du rayonnement IR qu'elle reçoit du sol et des murs. Notons que par hypothèse, on a supposé dans le calcul des réflexions du rayonnement solaire que les arbres ne renvoient le rayonnement solaire que vers le haut (Cf Section 3.2.4). Par conséquent, il n'y a pas de contribution de rayonnement solaire diffus des arbres dans le calcul de la température radiante.

On obtient finalement pour la personne au soleil l'expression :

$$T_{mrt} = \left[\frac{a_b}{\sigma \epsilon_b} \left(\frac{f_p}{\sin(\gamma)} S^\downarrow + \tau_{sr} \Psi_{bs} S^\downarrow + \tau_{wr} \Psi_{bw} S_w^{ref} + \psi_{bg} S_g^{ref} + \tau_{sr} \Psi_{bs} L^\downarrow + \tau_{wr} \psi_{bw} L_w^\uparrow + \psi_{bg} L_g^\uparrow + \psi_{bt} L_t^\uparrow \right) \right]^{\frac{1}{4}} \quad (\text{E.3})$$

avec les émissions IR des arbres :

$$L_t^\uparrow = (1 - \tau_{sr}) \left\{ \sigma \epsilon_t T_t^4 + (1 - \epsilon_t) \Psi_{tr} L_g^\uparrow + (1 - \epsilon_t) (1 - \Psi_{tr}) L_w^\uparrow \right\} \quad (\text{E.4})$$

**Publication scientifique dans revue à
comité de lecture de rang A parue
durant la thèse**



Implementation of street trees within the solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8.0

Emilie C. Redon¹, Aude Lemonsu¹, Valéry Masson¹, Benjamin Morille², and Marjorie Musy²

¹CNRM UMR 3589, Météo-France/CNRS, Toulouse, France, 42 Avenue Gaspard Coriolis, 31057 Toulouse CEDEX 1, France

²Ecole nationale supérieure d'Architecture de Nantes, UMR 1563, Quai François Mitterrand, 44262 Nantes CEDEX 2, France

Correspondence to: Aude Lemonsu (aude.lemonsu@meteo.fr)

Received: 20 June 2016 – Published in Geosci. Model Dev. Discuss.: 1 August 2016

Revised: 4 January 2017 – Accepted: 9 January 2017 – Published: 25 January 2017

Abstract. The Town Energy Balance (TEB) model has been refined and improved in order to explicitly represent street trees and their impacts on radiative transfer: a new vegetated stratum on the vertical plane, which can shade the road, the walls, and the low vegetation has been added. This modification led to more complex radiative calculations, but has been done with a concern to preserve a certain level of simplicity and to limit the number of new input parameters for TEB to the cover fraction of trees, the mean height of trunks and trees, their specific leaf area index, and albedo. Indeed, the model is designed to be run over whole cities, for which it can simulate the local climatic variability related to urban landscape heterogeneity at the neighborhood scale. This means that computing times must be acceptable, and that input urban data must be available or easy to define. This simplified characterization of high vegetation necessarily induces some uncertainties in terms of the solar radiative exchanges, as quantified by comparison of TEB with a high-spatial-resolution solar enlightenment model (SOLENE). On the basis of an idealized geometry of an urban canyon with various vegetation layouts, TEB is evaluated regarding the total shortwave radiation flux absorbed by the elements that compose the canyon. TEB simulations in summer gathered best scores for all configurations and surfaces considered, which is precisely the most relevant season to assess the cooling effect of deciduous trees under temperate climate. Mean absolute differences and biases of 6.03 and $+3.50 \text{ W m}^{-2}$ for road, respectively, and of 3.38 and $+2.80 \text{ W m}^{-2}$ for walls have been recorded in vegetationless canyons. In view of the important incident radiation flux, exceeding 1000 W m^{-2} at solar noon, the mean absolute percentage differences of 3 %

for both surfaces remain moderate. Concerning the vegetated canyons, we noted a high variability of statistical scores depending on the vegetation layout. The greater uncertainties are found for the solar radiation fluxes received and absorbed by the high vegetation. The mean absolute differences averaged over the vegetation configurations during summertime are $21.12 \pm 13.39 \text{ W m}^{-2}$ or $20.92 \pm 10.87 \%$ of mean absolute percentage differences for the total shortwave absorption, but these scores are associated with acceptable biases: $-15.96 \pm 15.93 \text{ W m}^{-2}$.

1 Introduction

For counteracting the adverse environmental effects that can result from continuous process of urban expansion, numerous projects of local urban planning or design support and favor the preservation and reintroduction of vegetation in the city. From an environmental point of view, the natural soils and vegetation play a important role and bring significant benefits in different sectors (Nowak and Dwyer, 2007; Mullaney et al., 2015). They act at a microclimate level through the processes of soil water evaporation and of transpiration of plants (Qiu et al., 2013). These processes cool the ambient air (Zhang et al., 2013) and mitigate the effect of the urban heat island (Feyisa et al., 2014; Önder and Akay, 2014; Alavipanah et al., 2015). High vegetation, particularly street trees in dense urban neighborhoods, create shadow areas that can locally improve the thermal comfort of pedestrians (Spangenberg et al., 2008; Shashua-Bar et al., 2011; Coutts et al., 2015; de Abreu-Harbach et al., 2015;

Joshi and Joshi, 2015) and reduce the radiation penetration in buildings in summer (Akbari et al., 1997, 2001; Simpson, 2002; Abdel-Aziz et al., 2015; Ko et al., 2015). For some years now, green roofs are implemented more intensively in cities. The cooling effects they induce on air temperature at pedestrian level are lesser than in those of trees or ground-based vegetation but they modify the energy budget at roof level (Taleghani et al., 2016). Nonetheless, they help to reduce the temperature fluctuations of structural roofs and to better insulate buildings (Hien et al., 2007; Kokogiannakis et al., 2011). Many studies highlighted their efficiency for significant energy savings for heating and air conditioning (Jim, 2014). The implementation of pervious soils, whether at the ground or on buildings, also enables a more effective and sustainable management of rainwater by the storage of water in the soil and the decrease of surface water runoff (Armson et al., 2013; Yao et al., 2015; Zhang et al., 2015). Besides microclimatic and hydrological impacts, the urban vegetation is identified as a biodiversity reservoir for fauna and flora in cities (Alvey, 2006). It also plays its part in architectural atmospheres, and more widely in the perception of environmental quality by the population. The green spaces in an urban environment are generally perceived very positively by inhabitants because they are places of wellness, detente, and user friendliness (Bertram and Rehdanz, 2015; Bowen and Parry, 2015).

In order to investigate some of the physical processes related to the presence of vegetation in an urban environment, e.g., for microclimate, hydrology, or building energy consumption issues, the modeling is definitely a necessary tool. It is also pretty relevant and powerful to assess greening strategies by quantifying the potential impacts, and it consequently enables to answer to some important expectations of public stakeholders and urban planners.

The Town Energy Balance (TEB) urban canopy model (Masson, 2000) is applied today for many studies of climate change impacts at city scale. Among the numerous strategies of adaptation to climate change, and attenuation of the urban heat island, the benefits of urban environment greening has been investigated through more or less realistic scenarios. Kounkou-Arnaud et al. (2014) and de Munck (2013) have proposed and tested some strategies of ground-based vegetation implementation for the city of Paris (France). They have evaluated the cooling potential of this vegetation through the evapotranspiration process during summer. They investigated and quantified the impacts in terms of decrease of air temperature inside the streets, as well as improvement of thermal comfort conditions outside and inside buildings. The works of de Munck (2013) have also addressed the issues of building energy consumption and of water resource at multiyear and seasonal scales.

For such modeling exercises, TEB had been previously improved in order to explicitly represent urban vegetation within the canyon and to parameterize at small scale the radiative and energetic interactions between the built-up covers

and the vegetation (Lemonsu et al., 2012). All types of vegetation are however managed as a ground-based layer: leaves can be in shade of buildings but do not create shadow effects themselves on roads or buildings. With the current developments, we attempt to remedy this lack by modifying the solar radiation budget of tree-filled canyons. The tree layer can now shade ground-based surfaces and walls. In this way, interception, transmission, or absorption of solar radiation by this additional non-opaque surface are computed. These implementations are evaluated by a comparison with simulations provided by a microscale radiation model: SOLENE, developed at the CERMA laboratory in Nantes, France.

2 Urban high-vegetation modeling

Until recently, very few urban climate models were able to take into account natural soils and vegetation. This fact constitutes a significant limitation in modeling the radiative and energetic exchanges in urban environments, according to the results of the intercomparison exercise of urban models performed by Grimmond et al. (2011). Most of models that already included vegetation were based on the tiling approach which consists of dealing separately with impervious covers and natural covers with distinct parameterizations and without microscale interactions between vegetation and built-up elements. However, an important effort has been conducted these last years in order to improve the representation of physical processes related to the presence of vegetation in urban climate models. Suburban and residential areas are characterized by an abundant vegetation (all types combined), while trees are predominant in cities. This feature of most cities has motivated the concern of improving urban microclimate modeling in such areas. Krayenhoff et al. (2014) present an exhaustive literature review of existing models and their characteristics.

Many different approaches are currently applied for implementing high vegetation and its implication in calculation of radiative and energetic exchanges. Among single-layer models with integrated vegetation schemes, Lee and Park (2008) were the first to deal with effects of trees in urban canyons in their vegetated urban canopy model (VUCM). The foliage layer is explicitly represented in the middle of the canyon above the ground. It is characterized by a cover fraction of the canyon, a thickness, and a vertical profile of leaf area density (LAD). The trunks are assumed to be transparent, as it is often the case in vegetation models. Radiation budget is computed for shortwave radiation (direct and diffuse components) by accounting for shadowing effects of trees on buildings and ground-based surfaces and of buildings on trees, as well as multiple reflections, and for longwave radiation with one reflection. The hypothesis of Lambertian reflectance is applied by considering each element of the canyon as a uniform surface (with uniform albedo, emissivity, and temperature). For each of them, the view factors in relation to sur-

rounding elements are computed at the center of the surface. The attenuation of radiation by leaves is included in equations when shortwave or longwave radiation crosses the foliage. It depends on transmissivity properties of foliage – inspired by works of Yamada (1982) for forest canopies – that follow an exponential law based on the LAD profile and a modulation factor depending on vegetation type. More recently, Young et al. (2015) have developed and tested a similar parameterization for street trees (Turban) in the single-column reading urban model (SCRUM, Harman and Belcher, 2006; Porson et al., 2009). The tree canopy is explicitly described as a rectangle located in the middle of the canyon and assumed to be lower than building height. The view factors for both fully visible and partially occluded facets due to the presence of the foliage are calculated in an analytic manner, based on Hottel’s crossed string construction (Hottel, 1954). The model implemented by Ryu et al. (2015) considers two explicit and symmetric trees with circular crowns. The Monte Carlo algorithm developed by Wang (2014) is executed once at the beginning of the simulation and subsequently transformed into simple relations to determine view factors for which trees are involved. Shortwave and longwave radiation exchanges but also sensible and latent heat exchanges and root water uptake processes are represented.

The building effect parameterization with trees (BEP-Tree) model is the first multilayer model of urban energy exchange and flow at the neighborhood scale that includes trees and both their radiative (Krayenhoff et al., 2014) and dynamic (Krayenhoff et al., 2015) effects on buildings. View factors are also computed using a Monte Carlo ray-tracing approach. The clustered distribution of tree crowns is taken into account through a unique clumping factor for all the vegetation of the canyon. Tree foliage can be present both within and above the canyon and above the roofs.

For large eddy simulations (LESs) in an urban environment, a vegetated urban canopy model (VUC) has been integrated by Tavares et al. (2015) in the advanced regional prediction system (ARPS) model. This ARPS-VUC version distinguishes the tree canopy from natural soils and ground-based vegetation. The radiative calculations are however rather simplified in relation to dynamics. The net radiation flux decreases exponentially from the top of urban canopy to the ground depending on the canopy density which includes both tree vegetation and buildings. For a microscale urban climate model such as ENVI-met (Bruse and Flerer, 1998), the fine meshing enables to resolve explicitly each element which composes the urban environment by distinguishing buildings, impervious and natural ground-based surfaces, vegetation, and air. Absorption coefficients of radiation by vegetation (based on an exponential formulation) are calculated at each vertical level, according to the vertical profile of LAD. The SOLENE-microclimat model (based on the SOLENE radiative model) is able to represent the evaporative, shading, and insulating characteristics of green walls and roofs, modeled as surfaces (Malys, 2012). The trees are

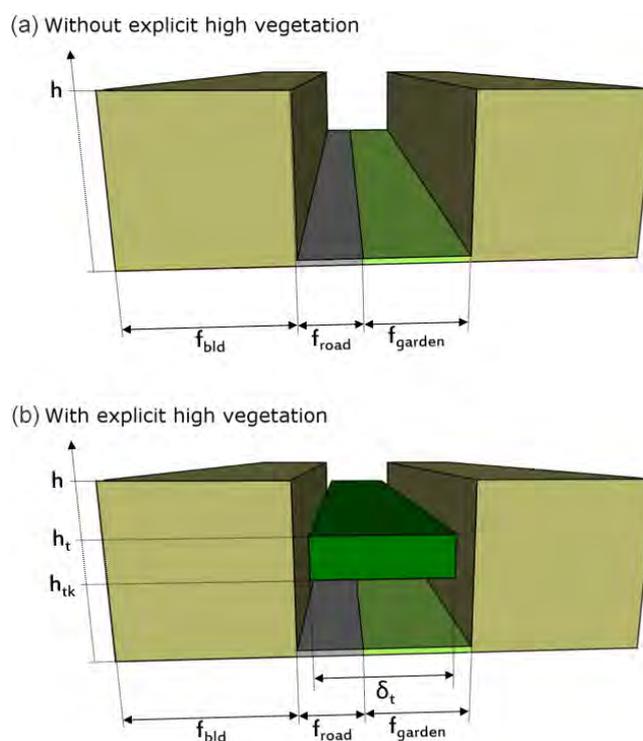


Figure 1. Comparison of the spatial arrangement of elements composing the urban canyon and of associated geometric parameters applied in the TEB model in the reference case (top) and in the case with explicit high vegetation (bottom).

modeled as porous volumes in the airflow model and as semi-transparent crowns in the radiative model; the energy balance (evaporative, convective, and radiative fluxes) being coupled to these models (Robitu et al., 2006). This balance leads to the assessment of leaves and air temperatures.

3 General concept of TEB and urban trees representation

3.1 Description of urban areas in TEB

At each mesoscale model grid point, TEB describes the average characteristics of the local environment by a single urban canyon composed of a ground-based surface bordered by two flat-roof buildings of same height. The urban environment is thus described in TEB based on four distinct elements that compose the urban canyons: “roof”, “wall”, and for the ground-based surfaces, a combination of impervious and natural covers referred to as “road” and “garden”, respectively (Fig. 1).

A set of geometric parameters are defined to describe the canyon (Table 1): cover fractions of buildings and gardens (the remaining fraction is assumed to be the roadways), mean building height, and wall area density. Impervious covers are also characterized by radiative and thermal properties de-

Table 1. Main descriptive parameters of the urban canyon, including vegetation, in the TEB model. The parameters followed by an asterisk are the input data prescribed by user, the other ones are computed in the model using the input parameters.

Parameters	Symbol	Unit
Cover fraction of buildings*	f_{bld}	–
Cover fraction of ground-based natural covers (garden)*	f_{garden}	–
Proportion of bare soil in gardens*	δ_{nv}	–
Proportion of low vegetation in gardens	$\delta_{\text{lv}} = 1 - \delta_{\text{nv}}$	–
Cover fraction of tree canopy*	δ_{t}	–
Mean building height*	h	m
Wall plan area ratio*	r_w	–
Canyon aspect ratio	$h/w = 0.5r_w/(1 - f_{\text{bld}})$	–
Height of tree canopy*	h_{t}	m
Height of trunk*	h_{tk}	m
Mid-height of tree's crown	$h_{\text{cw}} = (h_{\text{t}} + h_{\text{tk}})/2$	m
Sky view factor of wall, road, garden, tree	$\Psi_{\text{ws}}, \Psi_{\text{rs}}, \Psi_{\text{gs}}, \Psi_{\text{ts}}$	–
View factor of road, tree from wall	$\Psi_{\text{wr}}, \Psi_{\text{wt}}$	–
View factor of wall, tree from road	$\Psi_{\text{rw}}, \Psi_{\text{rt}}$	–
View factor of wall, road from tree	$\Psi_{\text{tw}}, \Psi_{\text{tr}}$	–
Leaf area index of low vegetation in gardens*	LAI_{g}	$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$
Leaf area index of tree canopy*	LAI_{t}	$\text{m}^2 \text{m}^{-2}$
Leaf area density of tree canopy	LAD_{t}	$\text{m}^2 \text{m}^{-3}$
Albedo of wall, road, garden, tree*	$\alpha_{\text{w}}, \alpha_{\text{r}}, \alpha_{\text{g}}, \alpha_{\text{t}}$	–
Emissivity of wall, road, garden, tree*	$\epsilon_{\text{w}}, \epsilon_{\text{r}}, \epsilon_{\text{g}}, \epsilon_{\text{t}}$	–

pending on construction materials: albedo and emissivity are prescribed for outdoor surface coating of roofs, walls, and roads; thermal conductivity and heat capacity are defined for the ensemble of materials composing buildings and roadways. For each urban facet (roof, walls, and road) separately, the model computes a radiation budget and a surface energy balance. It also resolves an equation of temperature evolution with a single surface temperature associated with each facet.

For natural soils and vegetation, the radiative and energetic exchanges with atmosphere, as well as the hydrological and thermal processes in the ground, are parameterized with the interaction soil–biosphere–atmosphere model (ISBA) model (Noilhan and Planton, 1989). The vegetation stratum is described in the ISBA model as an aggregation of bare soil, low stratum (grass), and high stratum (trees) of vegetation. This vegetation stratum is characterized by composite descriptive and physiologic properties that are calculated starting from properties of these different types of natural covers. They include albedo and emissivity (depending of proportion of bare soil and vegetation), leaf area index, stomatal resistance, and roughness length. Note that some of those properties can evolve seasonally, but also in the event of snowfall which modifies radiative properties. The vegetation stratum is connected with a soil column, with which hydrological and thermal properties are associated depending on soil texture and water content evolution (Boone et al., 1999).

This reference version of TEB is based on two important simplifications. First, there is no explicit spatial arrangement of the garden within the canyon. They are only represented

as land cover fractions. In addition, the vegetation stratum, even if it can be composed of trees (through the definition of specific physiological properties), is always placed on the ground without vertical extent. This means that shadow effects on the ground and buildings related to the presence of high vegetation are not taken into account, and that there is no vertical distribution of turbulent energy exchanges between vegetation and atmosphere.

3.2 General principles of solar radiation exchange parameterization in TEB

The present study describes the improvements of the radiation budget calculations in TEB by the implementation of explicit high vegetation. Consequently, this section is focused on the description of the radiative exchanges in the initial version of TEB. The parameterization of turbulent heat fluxes and of heat conduction processes, as well as the calculations of microclimate parameters within the canyon, are not presented here but they are detailed by Masson (2000), Lemonsu et al. (2004), Hamdi and Masson (2008), Masson and Seity (2009), and Lemonsu et al. (2012).

The TEB urban canyons are assumed to be of infinite length so that there is no street intersection. The radiative calculations are consequently done on a two-dimensional plane which crosses the canyon according to an axis perpendicular to the street direction. Two main options are available for radiative calculations: (1) a street orientation can be prescribed, so that the two walls of the canyon (referred to as “wall A” and “wall B”) are managed separately; or (2) the

hypothesis of isotropic orientation of streets is applied, and in this case, walls are managed together (implying that they will have identical temperature evolutions).

The shortwave and longwave radiation budgets are resolved in TEB for each element composing the urban canyon (roofs, walls, road, ground-based vegetation, and now tree canopy) with the aim of determining the energy absorbed by each element that is used afterward to compute the surface energy budget.

More specifically for the shortwave radiation budget, three contributions are considered for a given element:

1. The direct solar radiation received before any reflections depends on zenith angle since the incident direct radiation is unidirectional, street orientation, and canyon aspect ratio.
2. The diffuse solar radiation received before any reflections depends on the sky view factor of the considered element since the diffuse radiation is assumed to be isotropic.
3. Finally, the total shortwave radiation received after multiple reflections within the canyon is computed. After a first reflection on one of the elements of the canyon, initial contributions of direct and diffuse radiation are isotropic and are treated the same way. The part of radiation received by a given element then depends on the view factors of all the other elements and on their albedo to determine the reflected radiation part.

Although this paper focuses on resolution and evaluation of the shortwave radiation budget, it is worth to note that the validation of our shortwave radiation scheme contributes to verifying our future longwave radiation scheme. Indeed, the same view factors used for the multiple reflections will be applied to the longwave radiation interactions within the canyon. The longwave exchanges are computed following a linear approximation of the Stefan–Boltzmann law. For numerical stability purposes, an implicit formulation is applied for longwave radiation budgets; it includes the surface temperatures at the previous numerical time step and at the current time step.

3.3 Inclusion of a high-vegetation stratum for solar radiation calculation

To take into account the tree canopy in TEB, it is required to add a new vegetated stratum on the vertical plane, which can shade the road, the walls, and the low vegetation. This modification led to more complex radiative calculations, but is done with a concern to preserve a certain level of simplicity and to limit the number of new input parameters for TEB. This is motivated by the type of applications which are conducted with the TEB model, and more generally with the SURFEX land surface modeling platform (Masson et al., 2013) which TEB is part of. The system is frequently applied

over domains of several hundred square kilometers with horizontal resolutions between a few hundred meters and a few kilometers and can be run for long time periods up to several years in the cases of climatic studies (e.g., Lemonsu et al., 2013; de Munck, 2013, in French). This means that computing times must be acceptable, and that urban input data must be available or easy to define.

The arrangement of tree canopy is described here using three parameters only (Fig. 1 and Table 1): its cover fraction (δ_t), i.e., the proportion of canyon which is covered by the foliage stratum on the horizontal plane, as well as the mean height of trees (h_t), and the mean height of trunks (h_{tk}). In the current version of TEB (official SURFEX v8.0), urban trees are assumed to be less tall than surrounding buildings and systematically confined inside the canyon so that they cannot provide shade for roofs. This hypothesis is in accordance with common urban planning specifications for street tree management in Europe (in French, Municipality of Toulouse, 2008; City of Westminster, 2009; Barcelona City Council, 2011). These documents ensure a satisfactory juxtaposition of trees with urban structures for dwellers. Minimum distances between trunks or crowns and walls or balconies are strictly imposed to avoid problems such as excessive obstruction of crowns facing windows, disruption of underground services by roots or subsidence of buildings. These widespread practices are also applied in private gardens or suburban areas and tend to avoid shadow on roofs even if street trees can be taller than buildings. Design with trees shading roofs is statistically sparse and their impact on surface balance is limited. At this stage, the application of TEB to low-density neighborhoods is restricted if trees can significantly shade buildings. They are probably located in high latitudes where incoming fluxes are lower than in mid-latitudes or low latitudes, and this potential bias would only occur in the early morning or late evening, when the zenith angle is large but the solar radiation flux far less energetic than around noon.

For now, the shape of the foliage and the vertical distribution of leaves are not defined. The crowns of trees are considered as rectangular parallelepipeds (namely computed as a rectangular cross-section in a two-dimensional plane perpendicular to the street axis) with homogeneous foliage which is described by a leaf area index (LAI_t) and an albedo (α_t). It is however possible to vary the LAI during the year, in order to simulate the seasonal cycle of deciduous trees. The high-vegetation cover fraction is a combination of the sum of widths of crowns in the plane perpendicular to the street axis but also takes into account the presence or lack of gaps between crowns lengthwise along the canyon. Note that trunks are not taken into account in radiative calculations. The tree vegetation stratum is considered as a partially transparent element for shortwave radiation. A part of the incident radiation received by trees is transmitted through the foliage. The part of radiation which is not transmitted is consequently re-

flected or absorbed, depending on albedo. These processes and the associated calculations are detailed hereafter.

4 Solar radiation absorption of vegetated street canyon surfaces

In this part, equations related to the implementation of a tree layer into the TEB model are presented. In order to calculate these terms in TEB, Sect. 4.1 and 4.2 describe how direct and diffuse solar radiation fluxes reach canyon surfaces. Then, absorption is obtained by separately resolving the first absorption of total shortwave radiation on each surface and the sum of absorbed shortwave radiation after infinite reflections within the canyon.

4.1 Direct solar radiation received by each element

The foliage of trees plays a role of obstruction and attenuation of incident direct solar radiation (S_t^\downarrow) for the other elements of the urban canyon. Consequently, to determine the direct solar radiation received by each element of the canyon, we need to first solve the equations related to high vegetation.

The direct solar radiation potentially reaching the top of trees by geometrically taking into account the shading of buildings depends on building height (h), canyon aspect ratio (h/w), street orientation (θ_{can}), zenith and azimuth angles (λ , θ_{sun}), as well as tree height (h_t):

$$S_t^\downarrow = S_t^\downarrow \max \left[0; 1 - \frac{h}{w} \left(\frac{h - h_t}{h} \right) \tan(\lambda) \sin |\theta_{\text{sun}} - \theta_{\text{can}}| \right]. \quad (1)$$

As previously explained, this radiation flux is partially transmitted through the foliage (S_t^{\gg}), whereas the remaining solar radiation is reflected (S_t^\uparrow) or absorbed (S_t^*):

$$S_t^\downarrow = S_t^{\gg} + S_t^\uparrow + S_t^*. \quad (2)$$

The proportion of direct solar radiation transmitted through the foliage is estimated by the Beer–Lambert law (Campbell and Norman, 1989) where the leaf area index (LAI_t , expressed in m^2 of leaves per m^2 of ground) of tree canopy and an extinction coefficient (k) are involved. The extinction coefficient is fixed to 0.5, a default value corresponding to a homogeneous distribution of leaves in terms of density and orientation (in other words, a spherical leaf angle distribution):

$$S_t^{\gg} = S_t^\downarrow \exp(-k\text{LAI}_t). \quad (3)$$

The reflected radiation part simply depends on the part of incident solar radiation untransmitted through the foliage and on the albedo of trees (α_t):

$$S_t^\uparrow = \alpha_t S_t^\downarrow \left(1 - \exp(-k\text{LAI}_t) \right). \quad (4)$$

Finally, the incident direct solar radiation part absorbed by trees is neither transmitted nor reflected and calculated as the residual term from Eq. (2):

$$S_t^* = (1 - \alpha_t) S_t^\downarrow \left(1 - \exp(-k\text{LAI}_t) \right). \quad (5)$$

The direct solar radiation received by the ground (indiscriminately road or garden fraction) is deduced by correcting the incident solar radiation above the canyon from the interception of radiation by high-vegetation canopy (i.e., reflected and absorbed radiation weighted by high-vegetation cover fraction, referred to as δ_t), and then from the shading effects of buildings (according to Lemonsu et al., 2012). The same equations are obtained for road (S_r^\downarrow) and garden (S_g^\downarrow):

$$S_r^\downarrow = \left(S^\downarrow - \delta_t \left(S_t^\uparrow + S_t^* \right) \right) \max \left[0; 1 - \frac{h}{w} \tan(\lambda) \sin |\theta_{\text{sun}} - \theta_{\text{can}}| \right]. \quad (6)$$

In this way, tree foliage is assumed to be uniformly distributed across the canyon at the height of the trees (h_t), consistently with Eq. (1).

The direct solar radiation which is not received by high vegetation, road or garden is assigned to the sunlit wall, whereas the opposite wall is in the shadow. By convention in TEB in the case of an oriented canyon, we define wall A as the most sunlit wall and wall B as the shaded one.

$$S_{wA}^\downarrow = \left(S^\downarrow - S_r^\downarrow - \delta_t \left(S_t^\uparrow + S_t^* \right) \right) \frac{w}{h} \quad (7)$$

$$S_{wB}^\downarrow = 0 \quad (8)$$

Note that shading effects of high vegetation on roofs are not represented, since urban trees are less tall than buildings by definition in the current version of TEB (SURFEX v8.0).

4.2 Diffuse solar radiation received by each element

The incoming diffuse solar radiation (S^\downarrow) is assumed to emit isotropically. Each urban surface of the canyon (wall, road, and garden) receives a part of diffuse solar radiation according to the sky view factor of the surface Ψ_* (see Appendix A) and the mean radiative transmissivity between the sky and the given surface τ_{*s} (see Appendix B). Note that the sky view factor of “wall” is defined at mid-height of buildings; for ground-based surfaces “road” and “garden”, a single sky view factor $\Psi_{rs} = \Psi_{gs}$ is defined at the center of the street (Masson, 2000; Lee and Park, 2008). The following equations are obtained for “road” (same expression for “garden”) and for “wall”:

$$S_r^\downarrow = S^\downarrow \Psi_{rs} \tau_{rs} \quad (9)$$

$$S_w^\downarrow = S^\downarrow \Psi_{ws} \tau_{ws}. \quad (10)$$

We admit that the residual flux of diffuse solar radiation which is not intercepted in the canyon by previous surfaces

reaches the tree canopy:

$$S_t^\downarrow = \frac{S^\downarrow - \left(\delta_r S_r^\downarrow + \delta_g S_g^\downarrow + \frac{2h}{w} S_w^\downarrow \right)}{\delta_t}. \quad (11)$$

This method presents two major advantages: (1) the diffuse solar radiation budget is always closed, and (2) the computed diffuse solar radiation flux for the high vegetation is already corrected from the transmitted part, reaching the other surfaces.

The fluxes of each surface are expressed here according to the total ground-based surface of the canyon, with δ_r and δ_g the cover fractions of road and garden in the canyon ($\delta_r + \delta_g = 1$), respectively.

4.3 First absorption of total shortwave radiation by each element

The first absorption of total shortwave radiation $S^*(0)$, before any reflections, is only a function of the total shortwave radiation received by the considered element and of its albedo (α_*). The same expression is obtained for walls and ground-based surfaces (* which stands for “r”, “g”, “w_A”, or “w_B”):

$$S_*^*(0) = (1 - \alpha_*) \left(S_*^\downarrow + S_t^\downarrow \right). \quad (12)$$

For the tree canopy, the part of absorbed direct solar radiation is corrected by the transmitted flux:

$$S_t^*(0) = (1 - \alpha_t) \left[\left(S_t^\downarrow - S_t^{\gg} \right) + S_t^\downarrow \right]. \quad (13)$$

S_t^\downarrow includes the transmitted flux S_t^{\gg} (see Eq. 2) contrary to S_t^\downarrow which is calculated as a residual flux (Eq. 11), corrected from the transmitted flux.

4.4 Sum of total shortwave radiation absorbed by each element

Our goal is to compute the total shortwave radiation absorption for each element $S^*(\infty)$ by taking into account an infinite number of reflections between all elements composing the urban canyon. At each reflection, the isotropic radiation intercepted by a given element, (1), after reflections on one of the other elements, (2), is conditioned by the view factor of (2) from (1), referred to as Ψ_{12} (see Appendix A), the mean radiative transmissivity τ_{12} (see Appendix B), and the absorption is then determined according to reflective properties of (1). Using a single view factor in TEB radiation calculations is obviously a limitation for accurately representing the various contributions of canyon’s surfaces to high vegetation. Additionally, we have a poor knowledge of the forward scattering or trapping effects occurring within the crowns. Because of the description of the canopy as a surface, TEB neglects these processes, but the attenuation and transmission applied at the top of the canopy (see Eqs. 3, 4, and 5 arising

from Eq. 1) could be adjusted in order to implicitly include these phenomena. To ensure a closing system, we define the total absorbed shortwave radiation by high vegetation as the remaining shortwave radiation, after accounting for absorption and reflection from the total incident solar radiation by all other elements of the canyon. This requires calculating the part of shortwave radiation which leaves the canyon towards the sky. The terms R_∞ , G_∞ , A_∞ , B_∞ , and T_∞ make reference to the sum of total shortwave radiation reflected by each surface, respectively, after an infinite number of reflections (see detailed resolution in Appendix C). Here is the expression of the total absorbed solar flux per surface:

$$S_s^*(\infty) = \Psi_{sr} \tau_{sr} (\delta_r R_\infty + \delta_g G_\infty) + \Psi_{sw} \tau_{sw} \frac{A_\infty + B_\infty}{2} + \Psi_{st} \delta_t T_\infty \quad (14)$$

$$S_r^*(\infty) = S_r^*(0) + (1 - \alpha_r) \left[\Psi_{rw} \tau_{rw} \frac{A_\infty + B_\infty}{2} + c_{rt} \Psi_{rt} \delta_t T_\infty \right] \quad (15)$$

$$S_g^*(\infty) = S_g^*(0) + (1 - \alpha_g) \left[\Psi_{rw} \tau_{rw} \frac{A_\infty + B_\infty}{2} + c_{rt} \Psi_{rt} \delta_t T_\infty \right] \quad (16)$$

$$S_{wA}^*(\infty) = S_{wA}^*(0) + (1 - \alpha_w) [\Psi_{wr} \tau_{wr} (\delta_r R_\infty + \delta_g G_\infty) + \Psi_{ww} \tau_{ww} B_\infty + c_{wt} \Psi_{wt} \delta_t T_\infty] \quad (17)$$

$$S_{wB}^*(\infty) = S_{wB}^*(0) + (1 - \alpha_w) [\Psi_{wr} \tau_{wr} (\delta_r R_\infty + \delta_g G_\infty) + \Psi_{ww} \tau_{ww} A_\infty + c_{wt} \Psi_{wt} \delta_t T_\infty] \quad (18)$$

$$S_t^*(\infty) = \frac{1}{\delta_t} \left[\left(S_t^\downarrow + S^\downarrow \right) - \left(S_s^*(\infty) + \delta_r S_r^*(\infty) + \delta_g S_g^*(\infty) + \frac{2h}{w} \frac{S_{wA}^*(\infty) + S_{wB}^*(\infty)}{2} \right) \right]. \quad (19)$$

The view factors related to the high-vegetation stratum are expressed in Appendix A. Specific coefficients are applied, in the shortwave scheme only, to constrain the reflections from the high vegetation toward the sky and the top part of walls. In nature, the solar radiation is mainly redirected upwards by the receiving face of sunlit leaves in the top of crown during the first reflection. We suggest here to neglect the small amount of shortwave radiation which the tree stratum is supposed to reflect to the low part of the canyon during multiple reflections in favor of realistically representing the upward isotropic first reflection of solar radiation, which is by far the most energetic reflection. Solar reflection calculations are fully explained in Appendix C. As previously mentioned, view factors used for the multiple reflections in the shortwave radiation scheme will be applied to the longwave radiation interactions within the canyon in future works.

5 Comparative exercise with the SOLENE model

An objective and exhaustive assessment of the new solar radiation calculations in TEB related to the inclusion of tree layer effects is not an easy exercise, essentially due to the lack of experimental data. Indeed, very few measurements for documenting radiative effects of trees in an urban environment are available (Park et al., 2012). The objective here is to quantify the performances of TEB in simulating the different contributions of the solar radiation budget for the ensemble of urban facets and vegetation. For this purpose, we compare TEB with the SOLENE software, which is a high-spatial-resolution solar and lighting architectural model and which is used in this work as a reference. Various configurations of urban canyons with street trees (that differ in terms of vegetation density and spatial distribution) are studied so that the capacities and limits of the TEB geometric approach can be highlighted and evaluated.

5.1 General presentation of the SOLENE model

The SOLENE model (Miguet and Groleau, 2002; Robitu et al., 2006; Groleau and Mestayer, 2013) incorporates a radiative transfer scheme based on the radiosity method which is applied to meshed scenes with triangular facets, particularly adapted to complex geometries (Bouyer et al., 2011; Malys et al., 2014). This model provides a good tool to study urban radiation distinguishing solar radiations (separate direct and diffuse components, 0.3–2.5 μm) and infrared thermal radiations (2.5–18 μm).

In this research work, we consider the shortwave radiation scheme only. The incoming direct solar radiation is calculated by considering the sun as a point source, related to solar height (following the formula in De Blichambaut, 1963) and angle of incidence of rays at the surface (Miguet, 2000). The incoming diffuse part of solar radiation is represented as a non-uniform distribution coming from a sky vault defined by a hemisphere of infinite radius, which is meshed using a geodesic triangulation. The luminance values that are mapped on the hemisphere are derived from the Perez model (Perez et al., 1993). This model, based on five sky clearness and brightness parameters, provides statistical distribution depending on weather type represented. Multiple reflections are computed assuming that the surfaces are Lambertian and opaque for urban surfaces while the vegetation surfaces are semitransparent (Robitu et al., 2006). Solar simulations are performed in successive stages. The first one, based on geometric procedures, determines the visibility considering solar masks between two mesh elements or a mesh element and a sky patch of the sky vault model (including sun). View factors (including sky view factors) are produced for each mesh. The second stage calculates the solar radiation fluxes received by each mesh element for the time step. Then, the multiple reflections are computed by the radiosity method.

This last stage provides the net solar flux received by each mesh as well as absorbed and reflected parts.

The trees have been implemented from the evolution of SOLENE into the microclimate model named SOLENE-microclimat (Robitu et al., 2006). In this new model, the trees are geometrically modeled by their external envelope and are considered as semitransparent. Therefore, a percentage of the solar radiation is transmitted by the tree canopy according to a transmission coefficient (fixed to 0.5) and directionally reaches the other elements of the urban scene. The intercepted part of the solar radiation flux is either reflected or absorbed, depending on the tree albedo. Radiative properties of the high vegetation are homogeneously applied to all the meshes which belong to the surface of vegetation blocks. A separate balance is computed for each mesh using specific view factors. Currently, no explicit foliage elements or intracanalopy processes (as forward scattering) are represented in the radiative model of trees in SOLENE-microclimat.

5.2 Configuration of numerical experiments

5.2.1 Canyon modeling in SOLENE

The urban canyon geometry chosen for building SOLENE's mockups is as simple as possible to reflect the hypotheses of TEB: an infinite street (150 m in length in the mockups) bordered by two identical buildings with flat roofs. As shown in Fig. 2, it is defined here in three different urban canyon forms corresponding to aspect ratios (referred to as h/w) of 0.5, 1, and 2. For the first two aspect ratios, the building height is 8 m and the width of the street is 16 m for $h/w = 0.5$ and 8 m for $h/w = 1$. For $h/w = 2$, building height is 16 m and width of the street is 8 m.

For each of these urban canyons, 13 different vegetation layouts are prescribed (Fig. 3), as well as a control case without vegetation. The vegetation blocks are rectangular parallelepipeds representing the three-dimensional tree crowns, without the trunk. These solid volumes are continuous lengthwise along the canyon. Depending on the configurations, the trees can be organized in single or double rows. According to a cut plan through the canyon, the tree crowns can fill 30, 60, or 90 % of canyon width. For the three aspect ratios, height of trees is prescribed to 5 or 7.5 m with trunks of 2.5 or 5 m, so that the thickness of tree canopy varies between 2.5 and 5 m. Additional configurations (referred to as $h/w = 2$ rescaled vegetation) are tested, for which height of trees is prescribed to 10 or 15 m with trunks of 5 or 10 m, depending on the thickness and the location of the crown (cf. Fig. 2). In other words, vegetation layer is doubly thicker and higher than $h/w = 0.5$ and $h/w = 1$ cases for each vegetation configuration in order to rescale it for higher buildings and verify the effect of adapted vegetation layouts regarding the typology of the street. For all experiments, the leaf area index of trees is prescribed to 1, and the albedo is prescribed

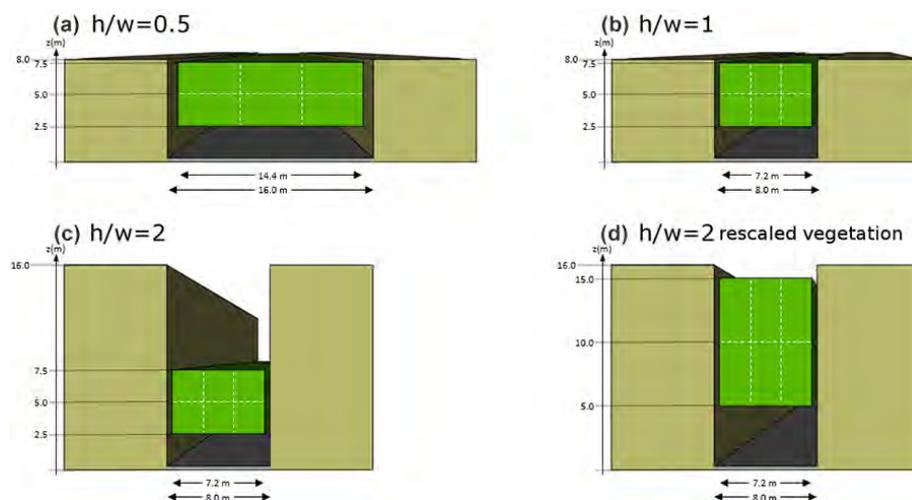


Figure 2. Description of simple geometries of an urban canyon selected for the comparison between TEB and SOLENE simulations. For each of them, the potential location of tree canopy is illustrated by dotted rectangles.

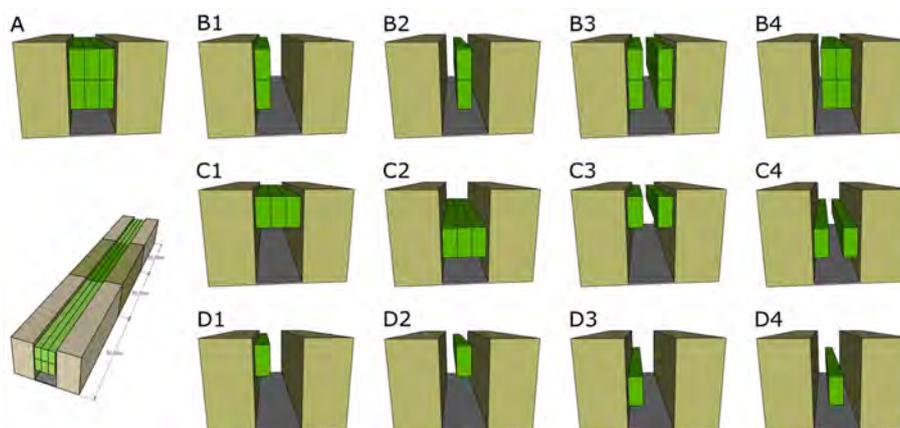


Figure 3. Description of the SOLENE mockup and presentation of the ensemble of vegetation layouts selected for the comparison between TEB and SOLENE simulations. The cases are presented here for the example of the urban canyon with $h/w = 2$ rescaled vegetation (see Sect. 5.2.1 and Fig. 2 for further explanations).

to 0.25 for road, 0.30 for walls, and 0.25 for trees. All configurations are described in Figs. 1, 2, 3, and Table 2.

To treat the ensemble of configurations, 55 digital mockups (52 canyons with vegetation and 3 canyons without vegetation) have been built with the computer-aided design (CAD) software Salome V7_4_0. All mockups have been meshed by the GMSH software which is a finite element mesh generator. We have applied a non-uniform meshing here, with a characteristic length of only 1 m in order to refine the spatial discretization of vegetation blocks, whose smallest ones for some of the vegetation layouts do not exceed 2.4 m width and 2.5 m height.

Each canyon is projected following the four street orientations 0, 45, 90, and 135° (degrees from geographical north, in the counter trigonometric direction). A specific location (defined by latitude and longitude) must be prescribed for

astronomic calculations. The city of Nantes (France) is chosen in an arbitrary manner (46° N, 1° E). The solar radiation exchanges are then calculated for a single daily cycle, and under sunlight conditions covering the four seasons by selecting dates close to equinoxes and solstices of the year 2010, i.e., 20 March, 21 June, 23 September, and 23 December of 2010. Note also that the Perez model (see Sect. 5.1) has been parameterized in order to generate perfectly clear cloudless skies.

5.2.2 Canyon modeling in TEB

In the same way, TEB is run for equivalent configurations to SOLENE configurations, respecting hypotheses, approaches, and spatial resolution differences between the two models. For TEB simulations, the geometrical parameters describing

Table 2. List of input parameters for the ensemble of simulations performed with TEB.

Parameters	A	B1	B2	B3	B4	C1	C2	C3	C4	D1	D2	D3	D4
f_{bld}	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
f_{garden}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
δ_{t}	0.9	0.3	0.3	0.6	0.6	0.9	0.9	0.6	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3
h	8 (for $h/w = 0.5$, $h/w = 1$, $h/w = 2$ – classical case); 16 (for $h/w = 2$ – rescaled vegetation)												
r_{w}	0.5 (for $h/w = 0.5$); 1.0 (for $h/w = 1$); 2.0 (for $h/w = 2$ – classical and rescaled vegetation cases)												
h_{t}	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	7.5	5.0	7.5	5.0	7.5	7.5	5.0	5.0
h_{tk}	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	5.0	2.5	5.0	2.5	5.0	5.0	2.5	2.5
LAI_{t}	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
τ_{sr}	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
α_{r}	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
α_{w}	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
α_{t}	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

the urban canyon form, as well as the height of trees and trunks, are comparable to those of SOLENE simulations. But the different spatial arrangements of trees simulated by SOLENE are simply prescribed as cover fractions in TEB. As a result, some configurations (e.g., B1 and B2 with different horizontal locations or B3 and B4 with different numbers of tree lines, shown in Fig. 3) cannot be distinguished by the TEB approach, and are associated with the same cumulative cover fraction of tree canopy in TEB. In this manner, interactions between tree lines are not taken into account in TEB, contrary to SOLENE, where rays are attenuated at each time they cross a mesh belonging to a vegetated envelope. All geometric features of both sets of simulations with SOLENE and TEB are summarized in Table 2. In SOLENE, the incident radiation is roughly attenuated by 50 % once it crosses a mesh which belongs to a vegetation envelope. In terms of process modeling, the formulation of transmissivity of radiation through the foliage in TEB is simplified here for the evaluation stage. In order to be consistent with the SOLENE approach, the exponential attenuation expressing a maximum interception (including the leaf area index) in Eqs. (3), (4), and (5) is replaced by 0.5. The same way, the formulation proposed in Appendix B (Eqs. B1, B2, B3, and B4) for modulating the radiation attenuation depending on the likely path of rays and based on the leaf area density profile, is substituted here by the expression $1 - 0.5(\text{LAD}/\text{LAI})$, so that the maximum attenuation is 0.5 when all thickness of tree canopy is passed through. Note also that TEB is forced by the same conditions of incoming solar radiation than those calculated for the roofs in SOLENE. Using a unique forcing for each component (direct or diffuse) of the solar radiation from the SOLENE simulations, TEB forcings do not take into account the non-uniform distribution of incoming diffuse solar radiation. From this imprecision differences result from 1 to 4 % between the fluxes of the two walls, de-

pending on their orientation, for studied aspect ratios during summertime (sensitive analysis not shown).

5.2.3 Comparison method

Finally, 880 solar radiation simulations are performed with both TEB and SOLENE models. For each of them, hourly outputs are stored. They include the direct and diffuse solar radiation received by the separated elements (road, walls, and tree) before multiple reflections, as well as the total short-wave radiation absorbed by the separate elements after multiple reflections. The main objective of the comparative exercise is to evaluate the cover fraction approach of TEB against a model (SOLENE) resolving the urban radiation budget at fine scale and with trees explicitly represented by geometrical elements. For this purpose, gaps between the simulations of received direct or diffuse solar radiation fluxes by canyon surfaces have been investigated. During multiple reflections, the radiation is assumed to be isotropic in both TEB and SOLENE models. Reflections from the high vegetation in TEB are also omnidirectional but just constrained upwards (in other words, they are based on π) in order to represent more realistically the first and, by far, the most energetic reflection (see details in Sect. 4.4 and Appendix C). To compare the simulations of these two models, only the central part of the SOLENE's mockup is used in order to avoid any boundary effects (see the scheme in Fig. 3). For each flux, the values calculated by SOLENE are summed over all grid points that compose each element of the canyon (separately, the road, the two walls, and the trees). Finally, for both models, the fluxes are weighted to be expressed according to the total ground-based surface of the canyon, so that they can be compared to each other and compared to the incoming radiation. Note that tables with statistical scores presented hereafter have been fulfilled with the same procedure, i.e., the mean absolute difference (MAD in W m^{-2}), the mean absolute percentage difference (MAPD in %) computed from

Table 3. Statistical scores for absorbed shortwave radiation flux by surfaces regarding the seasons.

Config.–surf. Units	Winter			Spring			Summer			Autumn		
	MAD W m ⁻²	MAPD %	Bias W m ⁻²	MAD W m ⁻²	MAPD %	Bias W m ⁻²	MAD W m ⁻²	MAPD %	Bias W m ⁻²	MAD W m ⁻²	MAPD %	Bias W m ⁻²
No vegetation												
Road	2.13	43	+2.02	7.45	18	+4.47	6.03	3	+3.50	5.35	17	+4.21
Walls	0.81	4	+0.42	2.99	2	+0.91	3.38	3	+2.80	1.86	2	+1.06
All												
Road	2.67	108	+2.63	10.32	63	+9.22	16.31	24	+15.56	9.46	63	+9.07
Walls	1.75	13	+1.58	6.34	13	+4.77	9.39	14	+8.15	5.82	13	+4.86
Tree	3.13	53	-1.20	12.15	31	-7.29	21.12	21	-15.96	12.03	31	-7.31

the mean daily fluxes, and the mean bias (bias in W m⁻²), according to following equations:

$$\text{MAD} = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_o} \sum_{k=1}^{n_h} \sum_{l=1}^{n_t} |F_{\text{SOL}}(i, j, k, l) - F_{\text{TEB}}(i, j, k, l)|}{n_s \cdot n_o \cdot n_h \cdot n_t} \quad (20)$$

$$\text{MAPD} = 100 \cdot \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_o} \sum_{k=1}^{n_h} \left| \frac{F_{\text{SOL}}(i, j, k) - F_{\text{TEB}}(i, j, k)}{F_{\text{SOL}}(i, j, k)} \right|}{n_s \cdot n_o \cdot n_h} \quad (21)$$

$$\text{Bias} = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} \sum_{j=1}^{n_o} \sum_{k=1}^{n_h} \sum_{l=1}^{n_t} (F_{\text{SOL}}(i, j, k, l) - F_{\text{TEB}}(i, j, k, l))}{n_s \cdot n_o \cdot n_h \cdot n_t} \quad (22)$$

The indexes *i, j, k, l* refer to as season, street orientation, aspect ratio of the street, and hour of the day, respectively, with *n_s* = 4, *n_o* = 4, *n_h* = 3, *n_t* = 24. We also run simulations of the *h/w* = 2 additional cases where canyons are greened with a rescaled vegetation (see Sect. 5.2.1 and Fig. 2).

6 Results

6.1 General analysis and seasonal effects

Table 3 presents the statistical scores computed for the shortwave radiation absorbed by the different elements of the canyon for both cases (with and without vegetation). Since multiple reflections are treated differently between TEB and SOLENE, these results are used to show the magnitude of variability of differences related to the presence of vegetation in the canyon or the considered season. Results are presented here by gathering the experiments performed with different street orientations and different vegetation layouts, but by distinguishing the seasons. In the light of the mean biases, the TEB model tends to systematically overestimate the absorption by road and walls compared to SOLENE (up to +16 and +8.5 W m⁻² for road and walls, respectively), and to un-

derestimate the absorption by trees (up to -16 W m⁻²), regardless of the configuration or the season. Considering that the temperate climate is characterized by four distinct seasons with contrasting sunshine, air temperature, and humidity conditions, seasonal analysis was undertaken. Analysis of the results for each season separately indicates that relative differences (MAPD) are particularly high for wintertime simulations for road and trees, due to a very low incoming solar radiation in that period. Nonetheless, the associated MAD and biases are acceptable (less than 3.5 and ±3 W m⁻², respectively). Summer is the season which provides the best results in terms of MAPD when the canyon is tree filled (less than 25 %) or not (3 %). This season is also the most relevant to be examined here because our first concern is to improve the simulation of the potential cooling effect of street trees in a urban environment, submitted to a strong urban heat island at this period. The evaluation is focused on effects of deciduous trees which are typical and widely present in cities under temperate climate. Such trees are leafless during winter, so that they have a negligible impact on thermal comfort and energy demand in this season. That is why we focus on the summertime example hereafter, to assess the TEB performances for simulating the solar radiative exchanges in idealized canyons, vegetated or not.

6.2 The case of urban canyons without vegetation

The radiative calculations in TEB are first evaluated for the cases without vegetation. Several comparisons with observations of radiation fluxes at neighborhood scale have been performed (Masson et al., 2002; Lemonsu et al., 2004, 2010; Pigeon et al., 2008). They have shown a good capacity of the model in computing the upward shortwave and longwave radiation at the top of the urban canopy, in real case configurations. But these evaluation exercises have not allowed us to analyze separately the radiative contributions of various elements that compose the urban environment. Such a model–model comparison in a controlled framework is ideal to deeply investigate and evaluate the TEB radiation parameterizations.

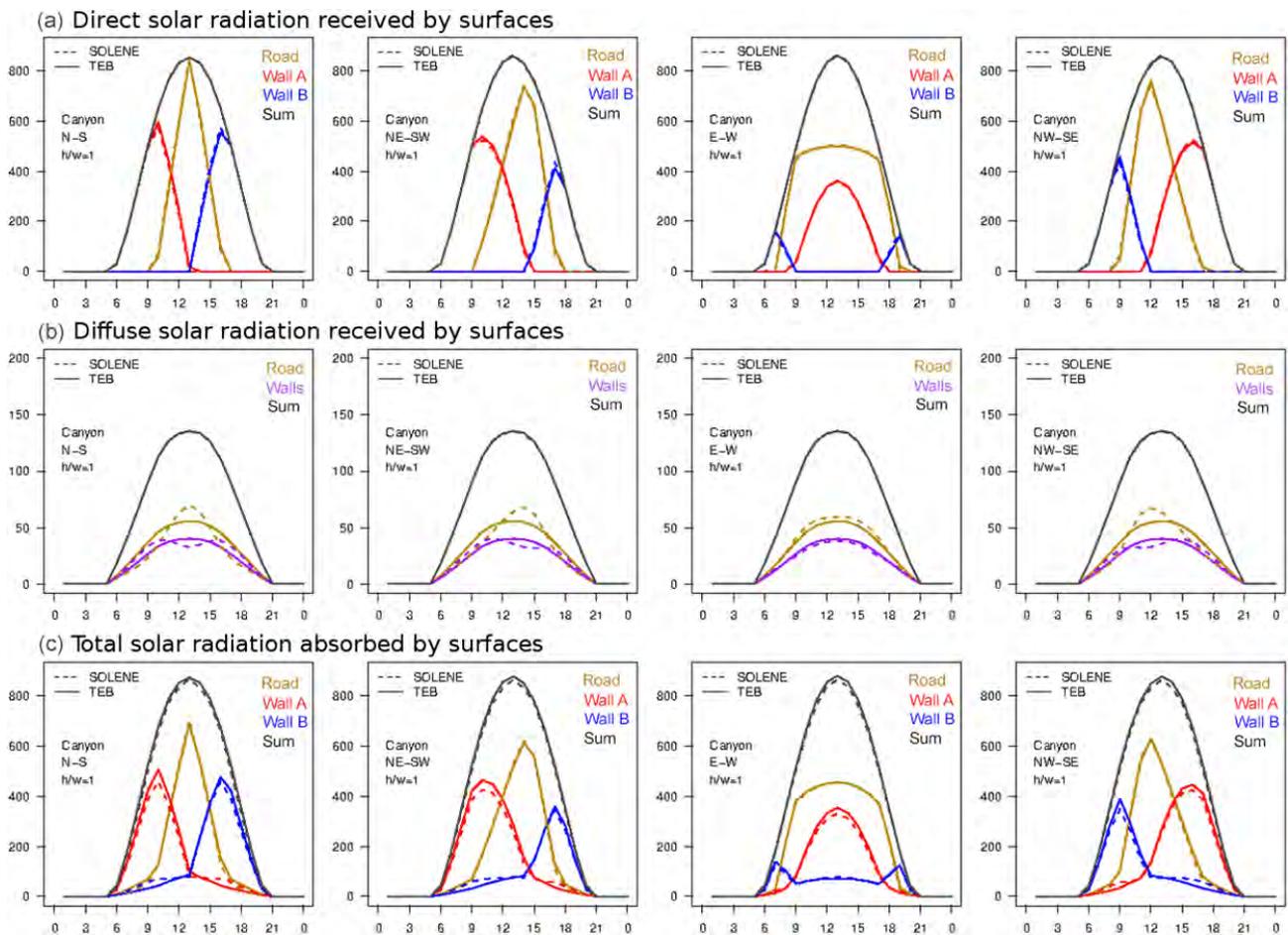


Figure 4. Comparison of TEB and SOLENE simulations of hourly direct (top) and diffuse (middle) solar radiation fluxes (W m^{-2}) received by urban facets before multiple reflections, and total shortwave radiation fluxes (W m^{-2}) absorbed by urban facets after inter-reflections (bottom) for urban canyons without vegetation. The results are presented here only for the aspect ratio equal to 1 and for the four street orientations during a summer day.

Both direct and diffuse solar radiation received by the road and the separate walls before any reflections, as well as the total shortwave radiation absorbed by these surfaces, are studied. An example of daily cycle is presented in Fig. 4 for the case where $h/w = 1$ and the four street orientations, for the summer season. The scatterplots integrate all the hourly fluxes simulated for the three aspect ratios, the four street orientations, and the four seasons (Fig. 5). As expected, they demonstrate a strong positive linear relationship between fluxes calculated by SOLENE and TEB ($R^2 \geq 0.99$ except for diffuse solar radiation absorbed by roads: $R^2 = 0.979$) despite various meteorological conditions.

The comparison between SOLENE and TEB simulations for the direct solar radiation received by road and walls before any reflections highlights very good results. TEB is able to reproduce the geometrical effects of the canyon on radiation penetration according to the time of the day, as well as the street orientation. For northeast–southwest and northwest–southeast-oriented streets, TEB correctly simu-

lates the dissymmetry of fluxes between the two walls, as well as the temporal shift in peak of radiation received by the road in comparison with the north–south-oriented street. For the east–west street case, the direct radiation received by the road is marked by a plateau effect between 08:00 and 19:00 LT. The two walls have different behaviors: the wall most exposed to the sun receives the maximum direct radiation at solar noon, whereas the most shaded wall receives direct radiation only early in the morning and late in the afternoon. The scores confirm the good performances of TEB: MAD are 4.39 and 2.49 W m^{-2} , and biases are -0.28 and $+0.40 \text{ W m}^{-2}$ for road and walls, respectively (Table 4). They are associated with low MAPD of only 1 % for both road and walls.

In the calculation of diffuse solar radiation, TEB does not consider the two walls separately. Therefore, the diffuse solar radiation flux is compared between the composite wall of TEB and the average of the diffuse solar radiation fluxes received by separate walls of the SOLENE simulations (Fig. 4).

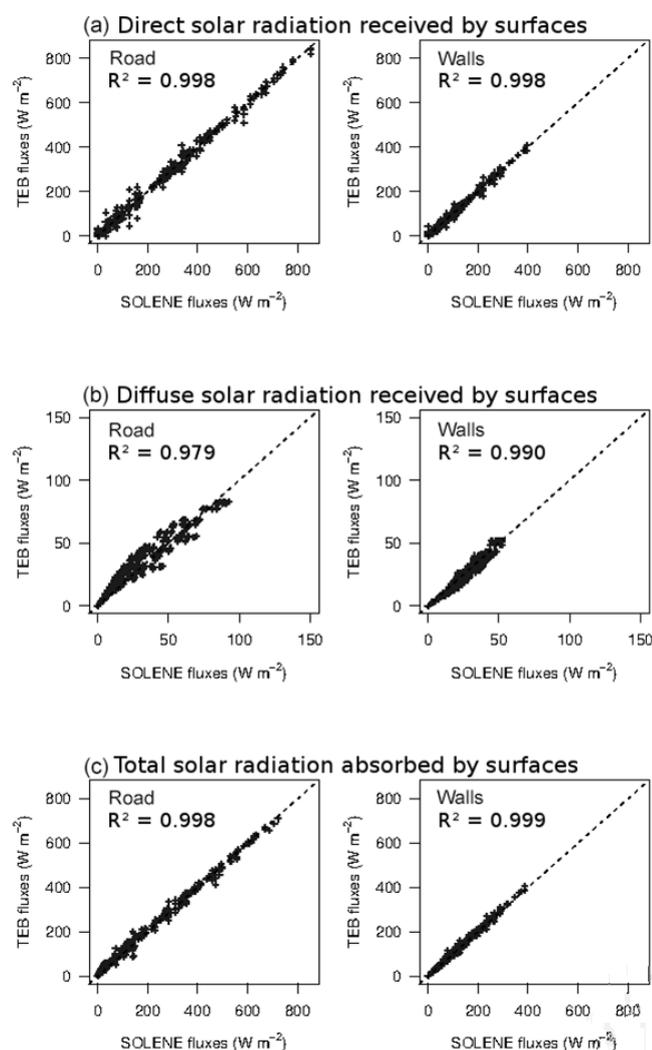


Figure 5. Scatterplots comparing TEB and SOLENE simulations of hourly direct (top) and diffuse (middle) solar radiation fluxes (W m^{-2}) received by urban facets before multiple reflections, and total shortwave radiation fluxes (W m^{-2}) absorbed by urban facets after inter-reflections (bottom) for urban canyons without vegetation. Each scatterplot gathers the hourly fluxes simulated for the four seasons, the three aspect ratios, and the four street orientations.

By considering an average surface, TEB underestimates the diffuse solar radiation received by walls in the morning and the afternoon, and it overestimates it at solar noon. On the contrary, it overestimates the diffuse solar radiation received by the road in the morning and the afternoon, and it underestimates it at solar noon. In this case, MAD and biases remain weak (less than 3.5 and $\pm 1 \text{ W m}^{-2}$, respectively) because the involved fluxes are not very high (depending on the season, the diffuse component is only 15–25 % of the total incident solar radiation), but MAPD values are slightly higher than for direct solar radiation, reaching 7 and 5 % for road and walls, respectively (Table 5). However, these discrepancies

have no impact on performances of TEB neither at daily scale on fluxes of walls nor on instantaneous cumulated canyon fluxes. Moreover, the dissymmetry of received diffuse solar radiation fluxes is no longer observed in east–west-oriented cases.

Finally, the total shortwave radiation absorbed by road and walls is well estimated by TEB despite the simplified hypotheses of the model and the use of a unique sky view factor by the surface: MAD and biases are 6.03 and $+3.50 \text{ W m}^{-2}$ for road, respectively, and 3.38 and $+2.80 \text{ W m}^{-2}$ for walls (Table 6). In view of the important incident radiation flux, exceeding 1000 W m^{-2} at solar noon, the MAPD of 3 % for both surfaces remains moderate.

6.3 The case of urban canyons with vegetation

The same evaluations are conducted for vegetated canyons. The statistical scores are computed as previously (see Eqs. 20, 21, 22) but by accounting for the 13 vegetation layouts. We also computed additional cases of vegetation layouts for the configurations referred to as “ $h/w = 2$ rescaled vegetation” (see Sect. 5.2.1 and Fig. 2 for further explanations). As an example, a comparison of hourly fluxes is presented in Fig. 6 for the layout A and an aspect ratio $h/w = 1$, and for the summer daily cycle. This configuration is one of the most simple and comparable layouts between the two models: trees are 7.5 m high (i.e., almost the same height as buildings), tree crowns have a 5 m thickness; they are centered in the middle of the canyon and cover 90 % of the canyon width on the horizontal plane.

The daily evolution of direct solar radiation received by the different elements of the canyon can be compared to the case without vegetation (Fig. 4). The same patterns are obtained, whether for walls or road and the four street orientations, with an attenuation due to the presence of trees. Here, a significant part of direct incoming solar radiation is intercepted by the foliage. Due to its partial transparency properties, the foliage allows at least half of radiation fluxes to pass through (see Sect. 5.2.2). As a result, the urban surfaces (walls and road) receive less incoming direct radiation but are never totally obstructed by trees. These processes are correctly simulated by TEB with some limitations: due to the expression of direct solar radiation intercepted by high vegetation at the top of the crown, which is treated as a horizontal surface in TEB (Eq. 1), the fluxes reaching the trees in TEB are globally underestimated compared to the SOLENE fluxes that include contributions on the vertical faces of the crown envelope (Fig. 7a, all seasons and configurations). Consequently, the solar radiation which is not intercepted by the tree layer in TEB simulations is assigned to the road and the bottom of walls. This leads for the configuration A to MAD values of 9.27 , 3.52 , and 6.22 W m^{-2} for road, walls, and trees, respectively, and MAPD values of 14, 5, and 4 % only (Table 4). The thicker the crown, the greater the difference associated with the tree (D1 vs. B1 or D2 vs. B2), particularly when the

Table 4. Statistical scores for direct solar radiation received by surfaces before multiple reflections for summertime.

Config. Units	Road			Walls			Tree		
	MAD W m^{-2}	MAPD %	Bias W m^{-2}	MAD W m^{-2}	MAPD %	Bias W m^{-2}	MAD W m^{-2}	MAPD %	Bias W m^{-2}
No veg.	4.39	1	-0.28	2.49	1	+0.40	-	-	-
A	9.27	14	+8.73	3.52	5	-1.55	6.22	4	-5.43
B1	11.01	9	+9.11	10.84	6	+2.12	19.22	32	-13.17
B2	23.09	26	+22.51	8.26	8	+2.25	27.71	37	-26.76
B3	16.77	22	+16.47	11.25	20	+10.14	37.07	30	-36.78
B4	20.80	29	+20.42	7.09	8	-0.94	19.44	17	-18.35
C1	9.10	14	+8.55	3.51	5	-1.57	5.96	4	-5.18
C2	13.81	21	+13.47	5.89	9	-4.98	4.13	3	-3.17
C3	8.39	9	+7.79	9.77	16	+8.67	25.58	22	-25.24
C4	11.58	13	+11.15	4.77	4	+1.58	14.13	18	-13.91
D1	11.38	6	+6.40	10.03	5	+1.29	14.95	29	-8.86
D2	15.84	17	+15.29	8.29	8	+2.23	20.52	30	-19.56
D3	6.17	4	+3.90	7.82	4	-1.68	15.14	20	-0.21
D4	19.38	21	+18.62	5.05	5	-3.57	14.10	23	-11.11

Table 5. Statistical scores for diffuse solar radiation received by surfaces before multiple reflections for summertime.

Config. Units	Road			Walls			Tree		
	MAD W m^{-2}	MAPD %	Bias W m^{-2}	MAD W m^{-2}	MAPD %	Bias W m^{-2}	MAD W m^{-2}	MAPD %	Bias W m^{-2}
No veg.	3.35	7	+0.87	1.70	5	-0.43	-	-	-
A	1.91	15	+1.37	1.51	9	+1.07	3.51	20	-3.50
B1	2.99	14	+1.91	1.83	8	+1.09	4.10	43	-4.10
B2	4.03	29	+3.79	1.64	7	+0.79	5.38	49	-5.38
B3	3.10	24	+2.75	2.88	27	+2.72	8.22	44	-8.22
B4	3.37	30	+3.21	1.47	6	+0.74	4.71	32	-4.71
C1	1.89	14	+1.31	1.50	11	-0.55	1.73	13	-0.24
C2	1.90	14	+1.35	1.60	4	-0.19	1.94	12	-0.88
C3	2.43	13	+1.52	1.69	12	+1.38	4.36	28	-4.36
C4	2.37	13	+1.50	1.69	5	+0.52	2.61	22	-2.47
D1	2.82	10	+1.31	1.53	3	+0.36	2.05	26	-2.05
D2	3.27	20	+2.73	1.40	5	+0.25	3.25	35	-3.25
D3	2.80	9	+1.10	1.63	3	-0.11	1.20	17	-0.86
D4	3.54	22	+3.07	1.62	5	-0.65	1.84	27	-1.72

tree rows are away from the walls (B1 vs. B2, D1 vs. D2, or D3 vs. D4), contrary to a continuous tree layer occupying almost the entire width of the canyon (A, C1, C2).

As expressed in Eqs. (9) and (10), the diffuse solar radiation fluxes received by road and walls (walls are managed together as an average surface), depends on the sky view factor of the given surface and on an attenuation coefficient of the incoming radiation through the foliage. Regarding all seasons and configurations combined, the received solar radiation by ground-based surfaces is also overestimated while the diffuse solar radiation flux reaching tree crowns is underestimated in the TEB simulations (Fig. 7b). Remember that the diffuse solar radiation received by the trees is calcu-

lated in TEB as the residual part of the incoming diffuse solar radiation flux which was not received by road and walls (see Eq. 11). Contrasted results are obtained for the vertical surfaces regardless of the vegetation layouts, in particular between double-row or centered trees (B3 vs. B4). As previously discussed in Sect. 5.4, these defects are related to the use of a single sky view factor for each surface, which is computed at mid-height of buildings for walls and in the middle of the street for road. In addition, the isotropic nature of the diffuse solar radiation leads to an exacerbation of the underestimation of the received flux by the high vegetation, particularly in cases where the side surface of vegetation envelopes is larger: for example, thick crowns with longer

Table 6. Statistical scores for total shortwave radiation absorbed by surfaces after multiple reflections for summertime.

Config. Units	Road			Walls			Tree		
	MAD W m^{-2}	MAPD %	Bias W m^{-2}	MAD W m^{-2}	MAPD %	Bias W m^{-2}	MAD W m^{-2}	MAPD %	Bias W m^{-2}
No veg.	6.03	3	+3.50	3.38	3	+2.80	–	–	–
A	13.30	26	+12.98	9.30	17	+8.84	7.76	5	–2.16
B1	13.31	14	+11.91	11.64	15	+11.19	21.15	28	–16.95
B2	24.27	32	+23.79	10.36	12	+9.61	30.82	38	–29.47
B3	21.82	36	+21.64	21.05	45	+21.04	52.46	35	–50.33
B4	23.13	39	+22.82	9.44	13	+7.81	20.59	17	–17.28
C1	12.04	23	+11.81	5.26	8	+3.98	6.31	5	–0.61
C2	16.15	30	+15.83	3.99	5	–1.43	8.72	7	+4.08
C3	13.23	19	+13.01	16.10	29	+16.10	40.15	29	–37.89
C4	15.95	23	+15.67	9.28	13	+9.15	24.09	21	–19.77
D1	12.45	11	+9.29	8.10	8	+6.78	14.12	24	–8.65
D2	17.19	21	+16.70	8.05	8	+6.73	20.32	27	–18.57
D3	9.09	9	+7.24	5.25	4	+4.02	14.04	14	+0.11
D4	20.06	25	+19.52	4.21	4	+2.09	13.97	22	–9.95

sides and vegetation layouts including two rows where the number of sides is doubled (A vs. B3, C1 vs. C3). Considering the extremely vegetated canyon A, MAPD values are 15, 9 and 20% for road, walls, and tree, respectively, corresponding to MAD values of 1.91, 1.51, and 3.51 W m^{-2} (Table 5). Globally, the estimation of the diffuse solar radiation received by the road and walls are acceptable regarding the MAPD, which are $\leq 30\%$. However, the relative differences associated with the tree layer are contrasted (from 12 to 49%), depending on the characteristics of the vegetation layout.

For the same configuration, when comparing TEB results to the SOLENE simulations as reference, the total shortwave radiation absorbed by the different elements of the canyon is simulated with correct daily dynamics (Fig. 6). Despite similar temporal behavior of the fluxes, their magnitudes can greatly diverge, especially for the road and tree surfaces with some MAPD values greater than 30% and some biases greater than $\pm 25 \text{ W m}^{-2}$ (Table 6). The global scatterplot (Fig. 7c, all seasons and configurations) confirms the trends previously found and the absorbed flux by the trees is underestimated. The predictability based on SOLENE results is also weaker ($R^2 = 0.954$). These poor performances of TEB regarding the statistical scores have to be interpreted with caution. This work aims at evaluating the cost in terms of performances of TEB to simulate a correct allocation of radiative fluxes for each facet of the canyon in spite of a simple geometric approach based on cover fractions and a unique view factor per interaction. For example, the tree fraction is computed as a cumulative fraction of all crowns in the street in TEB. Thus, the interactions between tree lines are not allowed, contrary to those in SOLENE. However, the consequences of some other divergent assumptions can alter TEB scores by the comparison of the absorbed fluxes even if nei-

ther one or the other model is the truth (as it would have been in observations), and SOLENE can not be considered as the reference simulation for these points. Indeed, the way to calculate the transmissivity during multiple reflections is dissimilar between the two models (see Sect. 5.2.3). TEB code computes infinite isotropic reflections using a unique view factor for each facet of the canyon and mean radiative transmissivity terms. The formulation of the mean radiative transmissivity terms is based on strong hypotheses on the potential attenuation of rays: they express the ratio between the sector of canyon scanned by the view factor associated with the studied interaction and the thickness of crown contained in this canyon sector (see Appendix B). In addition, reflections from the high vegetation are constrained upwards in TEB (see Sect. 4.4 and Appendix C for full explanations). On the contrary, SOLENE radiative scheme computes isotropic multiple reflections within the canyon for each triangular mesh, using the radiosity method. The vegetation envelopes here are strictly semitransparent because the penetration of light through the foliage can not be modulated by the leaf area density. Whatever the foliage thickness which is crossed, as soon as a ray reaches a cell of vegetation envelope in SOLENE, this radiation is attenuated by half.

Further works (not shown) have investigated the sensitivity of TEB results and performances according to the characteristics of the different vegetation layouts. They do not demonstrate clear and systematic patterns when studying the impact of (1) tree horizontal coverage (or the tree fraction), (2) tree canopy height compared to the building height, and (3) tree location – centered or on the side – in the canyon on the MAD and difference percentages recorded. It could be explained by the interaction between opposite effects regarding the vegetation layout characteristics.

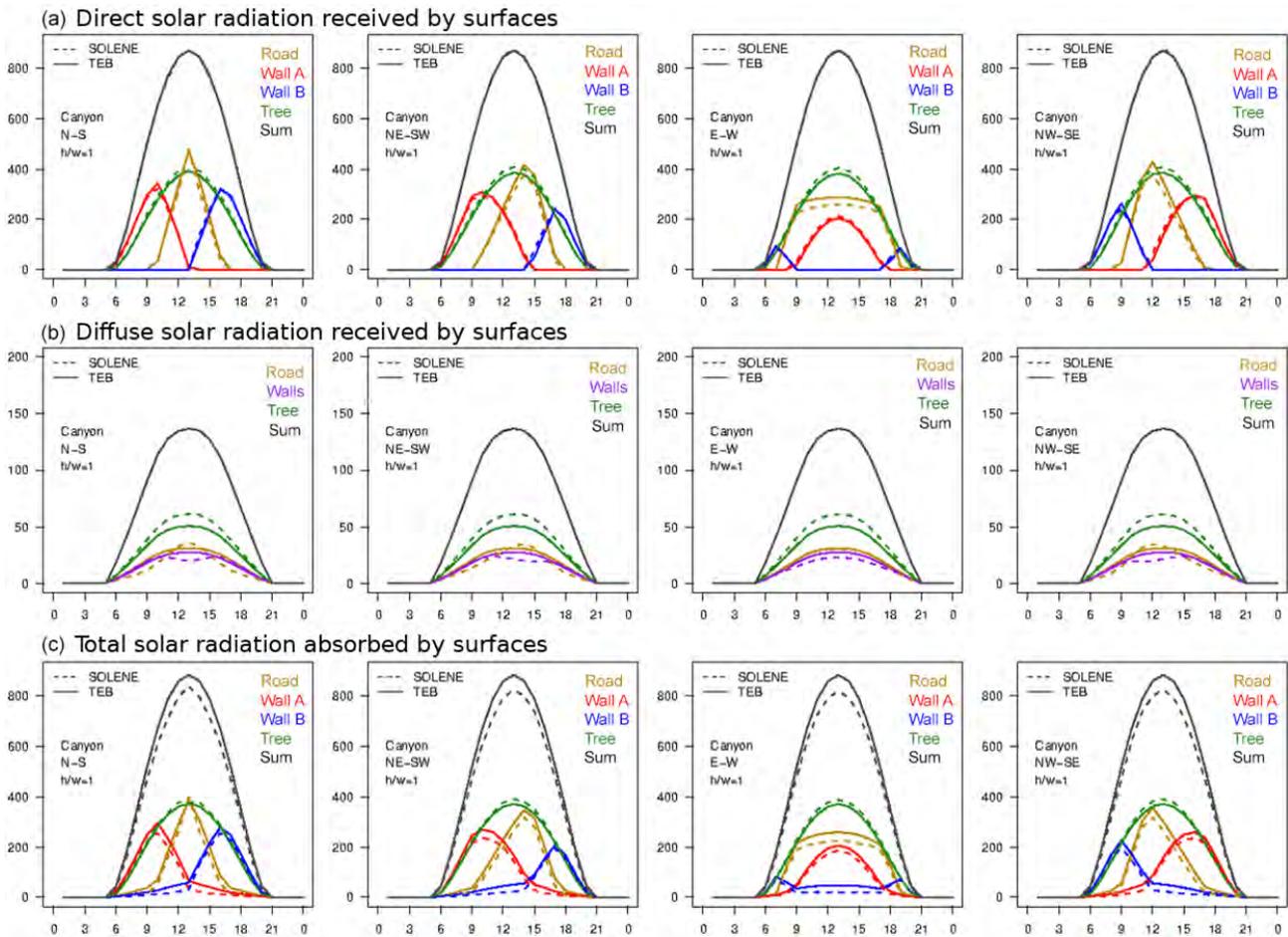


Figure 6. Comparison of TEB and SOLENE simulations of hourly direct (top) and diffuse (middle) solar radiation fluxes (W m^{-2}) received by urban facets before multiple reflections, and total shortwave radiation fluxes (W m^{-2}) absorbed by urban facets after inter-reflections (bottom) for urban canyons with vegetation. The results are presented here only for the aspect ratio equal to 1 and for the four street orientations during a summer day.

6.4 Benefits of TEB developments

In this section, simulations provided by the initial version of TEB and by the implemented version are compared. For this purpose, we use equations in the new version related to the transmission of radiation fluxes from the high vegetation following the expression presented in Eq. (3), adapted when it required the considered leaf area density (see Appendix B for further details).

6.4.1 Analysis of the behavior of absorbed shortwave radiation per canyon surface

The shortwave radiation received and absorbed by the walls and the road can be strongly affected by the presence of tree vegetation. The comparison between the initial version of TEB which deals with vegetation at ground level, and the new version which explicitly includes an additional tree stratum shows differences illustrated in Fig. 8 by taking the ex-

ample of a north–south-oriented canyon with an aspect ratio equal to 1, tree filled by a vegetation layout corresponding to configuration A, during a summer day. Analyzing the fluxes expressed per square meters of the considered surface, artificial surfaces absorb less energy when they are shaded by an explicit tree canopy, while the daily dynamics are similar. At the beginning and the end of the range of lighting hours, trees absorb more energy after the implementation of a real canopy within the canyon instead of initial simulations where the foliage was placed at the ground level. It is explained by the fact that the higher the trees are in the canyon, the more they can receive solar radiation and avoid the shading of buildings. However, around the solar noon, the absorption by the trees is substantially reduced by its transmissivity properties in regards to the initial version where all the urban vegetation surfaces were opaque. As a result, the vegetation absorbs all the solar radiation which is received and not reflected. In the present case, this part is 75 % of the incident solar radiation

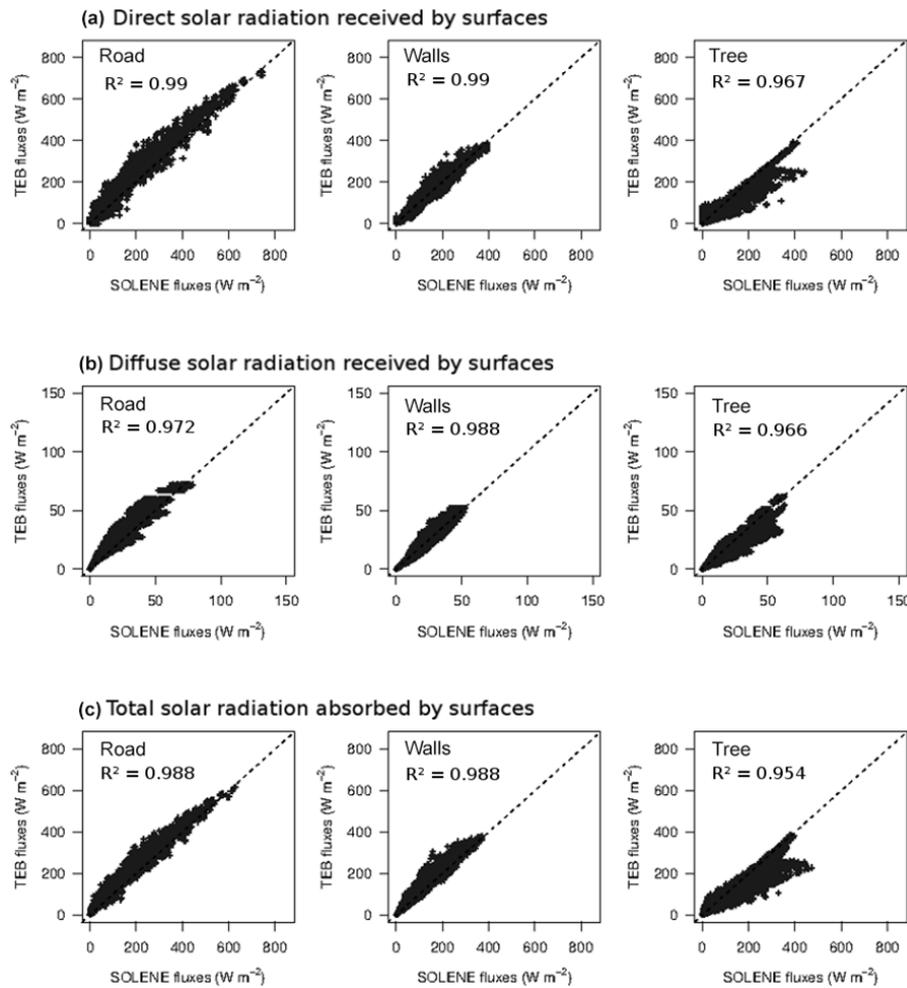


Figure 7. Scatterplots comparing TEB and SOLENE simulations of hourly direct (top) and diffuse (middle) solar radiation fluxes (W m^{-2}) received by facets before multiple reflections, and total shortwave radiation fluxes (W m^{-2}) absorbed by facets after inter-reflections (bottom) for urban canyons with vegetation. Each scatterplot gathers the hourly fluxes simulated for the four seasons, the four aspect ratios, and the four street orientations.

since $\alpha_t = 0.25$. In the new version, 50 % of the received solar radiation is transmitted through the foliage and 75 % of the remaining flux is absorbed by trees, i.e., only 37.5 % of the total shortwave radiation received by trees.

Comparing the fluxes before and after their weighting based on their canyon fraction, the road absorption by squared meters of canyon can extremely vary following the garden fraction at the ground in the initial version. Indeed, in the reference cases, the high vegetation is treated as a ground-based vegetation fraction which is included in the garden fraction (δ_g). This limitation implies that the garden fraction takes the value of the greater fraction between low and high vegetation. Consequently, the road fraction, which is always defined as $1 - \delta_g$, is varying according to the vegetation layout. For example, here, the road fraction is only 0.10. For this experiment, the differences between before and after the weighting of absorbed fluxes by trees is small because the

tree fraction is high ($= 0.90$). In this case, there is no differences for the walls according to the unit of the fluxes since the canyon aspect ratio is $h/w = 1$. For smaller aspect ratios, the fluxes of walls based on the canyon surface will be lower than those calculated by squared meters of wall. On the contrary, for aspect ratios exceeding 1, the fluxes of walls based on the canyon surface will be higher. The new developments have corrected a systematic overestimation bias in the reference version. This can have a significant impact on the simulation of thermal comfort conditions for pedestrians as well as on energy consumption of buildings for air-conditioning usage.

6.4.2 Analysis of an integrated canyon albedo

The albedo of the canyon (α_{can}) is calculated as the ratio between the outgoing shortwave radiation (which is deduced from the difference between the total incoming radiation

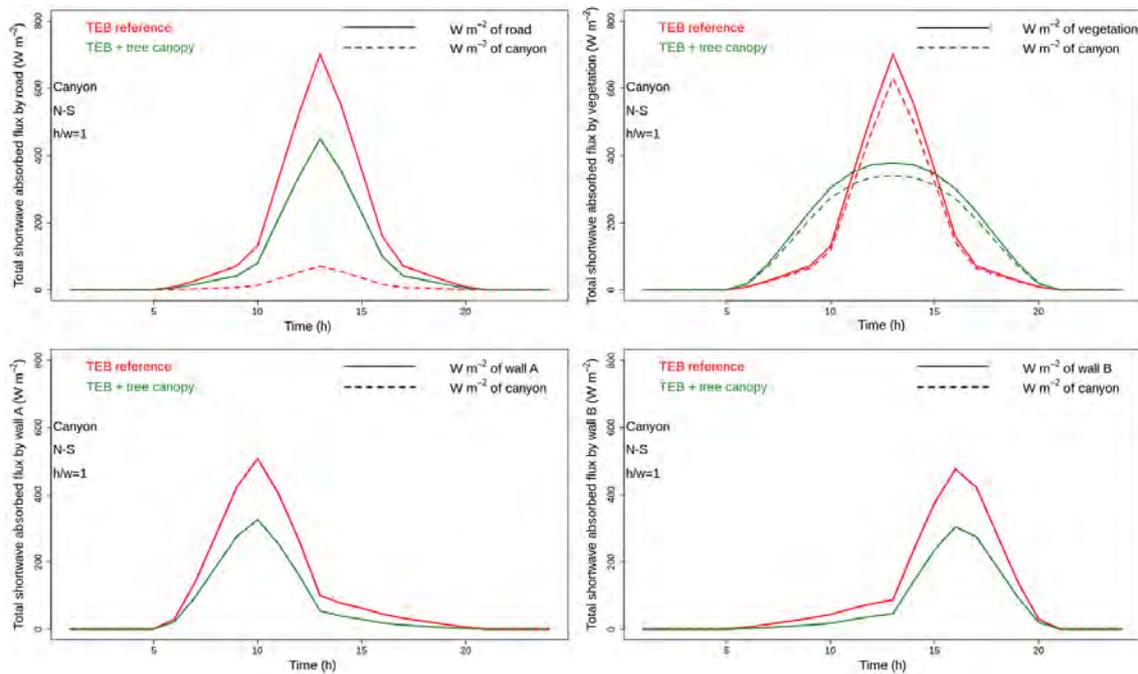


Figure 8. Comparison of the total shortwave radiation flux (W m^{-2}) absorbed by road, walls, and tree between the reference TEB simulations without distinction between low and high vegetation, and the new version including an explicit tree canopy corresponding to configuration A within a north–south-oriented canyon with an aspect ratio of $h/w = 1$ during a summer day. The fluxes are expressed either in W m^{-2} of the considered surface or in W m^{-2} of canyon.

$S_{\text{can}}^{\downarrow} + S_{\text{can}}^{\downarrow}$ and the absorbed radiation S_{can}^*) and the total incoming shortwave radiation:

$$\alpha_{\text{can}} = \frac{(S_{\text{can}}^{\downarrow} + S_{\text{can}}^{\downarrow}) - S_{\text{can}}^*}{(S_{\text{can}}^{\downarrow} + S_{\text{can}}^{\downarrow})}. \quad (23)$$

For each simulation, these fluxes are used at the solar noon in order to compute an instantaneous canyon albedo. The results in summertime are presented as box plots (Fig. 9) that gather all the vegetation layouts, if any, but that distinguish the canyon aspect ratios. Only north–south canyons are represented here. It is a synthetic indicator of TEB enhancement at the scale of the entire canyon, which is crucial when SURFEX is run coupled with an atmospheric model such as the research MESO-NH model (Lafore et al., 1997) or the operational model AROME (Seity et al., 2011) to provide climatic simulations.

The aspect ratio has a significant impact on the canyon albedo: the canyon albedo decreases with an increasing aspect ratio. Since the geometry and radiative properties of the vegetationless canyons and ground-based vegetation canyons in the reference version of TEB are comparable, they provide similar canyon albedos. It is explained by the absence of foliage in the vertical plane and identical albedos of road and garden ($\alpha_r = \alpha_g = 0.25$). For canyons with $h/w = 0.5$ aspect ratios, the albedo of vegetated canyons with an explicit tree

canopy is systematically lower than unobstructed canyons. Trees can more easily absorb the incoming solar radiation than ground-based surfaces. For higher aspect ratios, the impact of trees depends on the balance between their greater sky view factor and reflectivity regarding artificial surfaces and their trapping effect on solar radiation, reducing or increasing the total solar energy absorption by the canyon, respectively. Note also that their relative impact is lower when the thickness of the crown is proportionally small compared to the height of the buildings. For rescaled vegetation cases in deep streets, we observe a greater variability of canyon albedos compared to the same urban form with thinner tree crowns placed in the lower part of the canyon.

7 Conclusions

In order to investigate some of the physical processes related to the presence of vegetation in an urban environment, e.g., for microclimate, hydrology, or building energy consumption issues, the modeling is definitely a necessary tool.

The TEB model has been refined and improved in order to explicitly represent street trees and their impacts on radiative transfer. The new parameterization is based on the simple hypotheses of TEB: (1) a little-detailed geometry without specific spatial arrangement of ground-based surfaces and (2) a

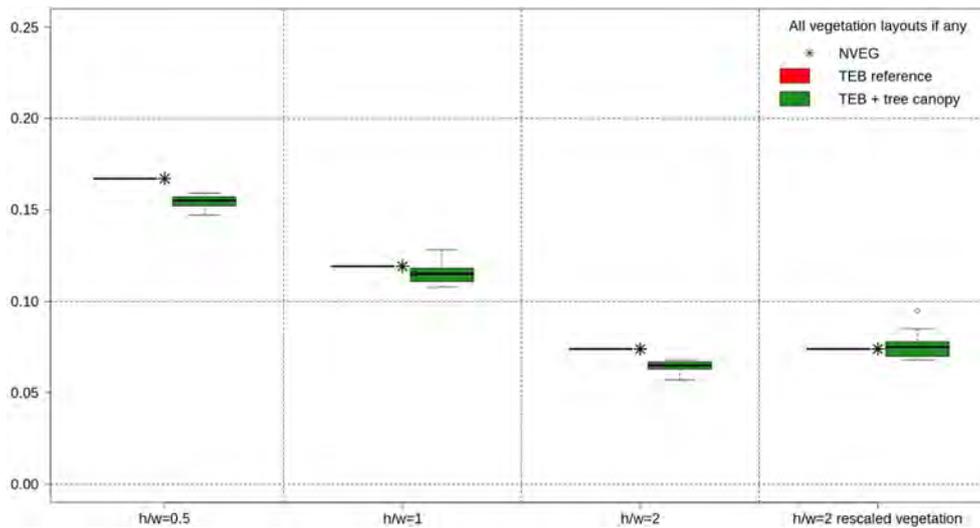


Figure 9. Comparison of the canyon albedo at solar noon between the reference TEB simulations without distinction between low and high vegetation, and the new version including a tree canopy by aspect ratios for all vegetation layouts combined within north–south-oriented canyons during a summer day. See Sect. 5.2.1 and Fig. 2 for further explanations about the $h/w = 2$ rescaled vegetation configurations.

single view factor for each emitting and receiving surface applied for radiative calculations.

To take into account the tree canopy in TEB, it was however required to add a new vegetated stratum on the vertical plane, which can shade the road, the walls, and the low vegetation. This modification led to more complex radiative calculations, but has been done with a concern to preserve a certain level of simplicity and to limit the number of new input parameters for TEB. It is important to emphasize that the model is designed to be run over whole cities, for which it can simulate the local climatic variability related to urban landscape heterogeneities at the neighborhood scale. This means that computing times must be acceptable, and that input urban data must be available or easy to define. Consequently, the high vegetation is described here using only five input parameters: cover fraction of trees, height of trees, height of trunks, leaf area index, and albedo.

This simplified characterization of high vegetation necessarily induces some uncertainties on solar radiative exchanges. We estimated it by carrying out a comparative exercise between TEB and a high-spatial-resolution solar and lighting model (SOLENE). On the basis of an idealized geometry of an urban canyon with various vegetation layouts, TEB is evaluated regarding the total shortwave radiation flux absorbed by the elements that compose the canyon. TEB simulations in summer gathered the best scores for all configurations and surfaces considered, which is precisely the most relevant season to assess the cooling effect of deciduous trees under temperate climate. Statistical scores have demonstrated a good capacity of TEB to solve the radiative balance of canyons without vegetation despite the use of a unique sky view factor for each facet of the urban scene. Mean absolute differences and biases of 6.03 and $+3.50 \text{ W m}^{-2}$ for road, re-

spectively, and of 3.38 and $+2.80 \text{ W m}^{-2}$ for walls have been recorded in vegetationless canyons. In view of the important incident radiation flux, exceeding 1000 W m^{-2} at solar noon, the mean absolute percentage differences of 3% for both surfaces remain moderate. Additionally, it is necessary to put in perspective obtained scores with the fact that they include the error generated by the treatment of walls as a mean wall in TEB in comparison with separate walls in SOLENE considering the diffuse component of the solar radiation. This identified error is no longer existing at the canyon or daily scales. Concerning the vegetated canyons, we noted a high variability of statistical scores depending on the vegetation layout. The greater uncertainties are found for the solar radiation fluxes received and absorbed by the high vegetation. The mean absolute difference averaged over the vegetation configurations during summertime is $21.12 \pm 13.39 \text{ W m}^{-2}$ or $20.92 \pm 10.87\%$ of mean absolute percentage difference for the total shortwave absorption but these scores are associated with acceptable biases: $-15.96 \pm 15.93 \text{ W m}^{-2}$. The systematic underestimation of fluxes reaching the new tree stratum is explained by the cover fraction approach in TEB where sides of the crown are not represented. Interactions between potential tree lines or intra-canopy scattering and trapping are also neglected. Presented scores include the effect of divergent approaches in the formulation of the transmission process through trees between TEB and SOLENE even though neither of the two models could be considered as a reference at this stage for this point.

The parameterization of shortwave radiation exchanges within the canyon is now more realistic: shading effects of trees on vertical and ground-based surfaces but also shading effects of buildings on trees are computed. This is achieved by adding a new specific cover fraction describ-

ing the horizontal extent of high vegetation. Infinite reflections within the canyon are also conditioned to the transmissivity term calculated per pair of exchanging surfaces. This study demonstrated the enhancement of new developments on the computed absorbed shortwave radiation fluxes within the canyon between the former reference version of TEB and the implemented version. In the current version, trees can intercept and absorb the direct solar radiation at the canopy level instead of from the ground. Consequently, the walls and ground are more shaded. High and low vegetation fractions are now explicitly dissociated. The grass and bare soil fractions only contribute to the garden fraction. In this way, the road fraction, defined as $1 - \delta_g$, is independent of the tree cover. This implies that the weighting of fluxes at the canyon scale has become realistic. The aspect ratio has a significant impact on the canyon albedo: the canyon albedo decreases with an increasing aspect ratio. For canyons with $h/w = 0.5$ aspect ratios, the albedo of vegetated canyons with an explicit tree canopy is systematically lower than unobstructed canyons. Trees within the canyon can more easily absorb the incoming solar radiation than ground-based surfaces. For higher aspect ratios, the impact of trees depends on the balance between their greater sky view factor and reflectivity regarding artificial surfaces and their trapping effect on solar radiation, reducing or increasing the total solar energy absorption by the canyon, respectively. Canyon albedo is also

more vegetation responsive for $h/w = 1$ urban forms or in cases where $h/w = 2$ canyons when the tree crown thickness is scaled regarding the depth of the street.

The future developments will focus on the separate calculation of turbulent energy fluxes for ground-based and high vegetation. The aerodynamic effect of trees on air flow within the canyon should also be parameterized. The adaptation of TEB to trees taller than buildings will broaden the range of potential neighborhoods to which its tree model could be applied. Based on this more sophisticated version of TEB, new impact studies could be conducted and greening adaptation strategies could be evaluated more precisely.

8 Code availability

The TEB code is available in open source via the surface modeling platform SURFEX, downloadable at <http://www.cnrm-game-meteo.fr/surfex/>. This Open-SURFEX will be updated at relatively low frequency (every 3 to 6 months) and developments presented here are not yet included in the last version. If you need more frequent updates, or if you need what is not in Open-SURFEX (DrHOOK, FA/LFI formats, GAUSSIAN grid), we invite you to follow the procedure to open a SVN account and to access real-time modifications of the code (see instructions in the previous link).

Appendix A: Sky view and view factors

Sky view factors for road, garden, and wall (Eqs. A1, A2) as well as the view factors between elements remain unchanged in relation to the initial version of the radiative calculations in TEB (described in Masson, 2000 and Lemonsu et al., 2012):

$$\Psi_{rs} = \Psi_{sr} = \sqrt{\left(\frac{h}{w}\right)^2 + 1} - \frac{h}{w} \quad (\text{A1})$$

$$\Psi_{wr} = \Psi_{ws} = \frac{\frac{1}{2}\left(\frac{h}{w} + 1 - \sqrt{\left(\frac{h}{w}\right)^2 + 1}\right)}{\frac{h}{w}} \quad (\text{A2})$$

$$\Psi_{sw} = 1 - \Psi_{sr} \quad (\text{A3})$$

$$\Psi_{ww} = 1 - 2\Psi_{ws} = \frac{\sqrt{\left(\frac{h}{w}\right)^2 + 1} - 1}{\frac{h}{w}} \quad (\text{A4})$$

$$\Psi_{rw} = 1 - \Psi_{rs} = 1 - \left(\sqrt{\left(\frac{h}{w}\right)^2 + 1} - \frac{h}{w}\right). \quad (\text{A5})$$

For the tree canopy, the sky view factor and view factors from road and walls are computed in the middle of the canyon and at mid-height of the crown (h_{cw}):

$$\Psi_{st} = \sqrt{\left(\frac{h}{w} \cdot \frac{h - h_{cw}}{h}\right)^2 + 1} - \left(\frac{h}{w} \cdot \frac{h - h_{cw}}{h}\right) \quad (\text{A6})$$

$$\Psi_{rt} = \sqrt{\left(\frac{h}{w} \cdot \frac{h_{cw}}{h}\right)^2 + 1} - \left(\frac{h}{w} \cdot \frac{h_{cw}}{h}\right) \quad (\text{A7})$$

$$\Psi_{wt} = 1 - \frac{1}{2}(\Psi_{st} + \Psi_{rt}). \quad (\text{A8})$$

Ψ_{st} and Ψ_{rt} are calculated in the same way as Ψ_{sr} in the middle of the canyon but they are adjusted to the $[h_{cw} - h]$ area and the $[0 - h_{cw}]$ area, respectively. Ψ_{wt} is computed as the complementary term of Ψ_{st} and Ψ_{rt} on 2π and for one wall (as well as Ψ_{ws} and Ψ_{ww}). We normalized Ψ_{wt} to express it on one π only.

Appendix B: Mean radiative transmissivity of canyon tree canopy

The multiple reflections of solar radiation inside the canyon (as detailed in Masson, 2000 and Lemonsu et al., 2012) are now affected by the presence of trees whose foliage intercepts, reflects, and absorbs a part of the energy. The transmissivity of radiation through the foliage of tree canopy is variable according to the way the rays cross the foliage and the distance they travel. According to the location of tree crowns inside the canyon and the dominant orientation of radiation (e.g., emissions from sky to ground or from wall to ground do not reach the foliage the same way), these rays can cross all the foliage thickness or only a small portion. The vertical

distribution of leaves in the tree crowns also has an impact on transmissivity.

Different transmissivity functions (referred to as τ_{12} for exchanges between element 1 and element 2) are calculated depending of the surfaces involved in radiative exchanges. One distinguishes four cases of radiation exchanges by hypothesizing that transmissivity functions are symmetric; i.e., exchanges from element 1 to element 2 are equivalent to the reverse way: between ground-based surfaces and sky ($\tau_{rs} = \tau_{sg}$) or wall ($\tau_{rw} = \tau_{gw}$), between wall and sky (τ_{ws}), and between wall and wall (τ_{ww}). For each case, we admit, according to Lee and Park (2008), that majority of radiation exchanges occur in a specific area of the canyon, for which the leaf area density (LAD_t , expressed in m^2 of leaf area per m^3 of volume) is calculated:

$$\tau_{rs} = 1 - \delta_t \left[1 - \exp\left(-k \int_0^h LAD_t dz\right) \right] \quad (\text{B1})$$

$$\tau_{rw} = 1 - \delta_t \left[1 - \exp\left(-k \int_0^{\frac{h}{2}} LAD_t dz\right) \right] \quad (\text{B2})$$

$$\tau_{ws} = 1 - \delta_t \left[1 - \exp\left(-k \int_{\frac{h}{2}}^h LAD_t dz\right) \right] \quad (\text{B3})$$

$$\tau_{ww} = 1 - \delta_t \left[1 - \exp\left(-k \int_0^h LAD_t dz\right) \right]. \quad (\text{B4})$$

The limits of integrals involved in the calculation of the transmissivity functions have been consistently defined with canyon sectors scanned by the associated view factors. For example, Eq. (9) expresses how the diffuse incoming solar radiation reaches the road from the sky. This formulation is typically based on the sky view factor of the road Ψ_{rs} which scans an area covering the entire height of the building. We added a transmissivity function τ_{rs} describing the ratio between the thickness of the tree crown within the canyon and the vertical extent of the area of interest, here $[0 - h]$.

Note that these expressions are in accordance with the one applied in Eq. (3) in which LAD_t is integrated on the entire thickness of foliage so that it is equivalent to LAI_t . As mentioned above, since the tree crown is described as a rectangular parallelepiped with a regular distribution of leaves, a uniform vertical profile of LAD is applied here.

Appendix C: Total shortwave radiation absorption by solving infinite reflections

For solar radiation calculations, the TEB model takes into account an infinite number of reflections between all elements composing the urban canyon. At each reflection, the isotropic radiation intercepted by a given element, (1), after reflections on one of the other elements, (2), is conditioned by the view factor of (2) from (1), referred to as Ψ_{12} (see Appendix A),

the mean radiative transmissivity τ_{12} (see Appendix B), and the reflection is then determined according to reflective properties of (1). As seen in the Sect. 4.4, the total shortwave radiation absorbed by each elements of the canyon or redirected towards the sky is a function of infinite reflections R_∞ , G_∞ , A_∞ , B_∞ , and T_∞ that are still unknowns at this stage. These terms include the first reflection on each element: R_0 , G_0 , A_0 , B_0 , and T_0 . For road, garden, and walls, R_0 , G_0 , A_0 , and B_0 simply depend on the incident solar radiation on the surface and the albedo. From Eqs. (15), (16), (17), (18), and (19), we can deduce the reflected part occurring at the $n+1$ th absorption as the complementary term of the $n+1$ th solar radiation reception for only opaque elements of the canyon, “road”, “garden”, “wall A”, and “wall B”, respectively. As examples, we obtain for road and wall A, respectively:

$$R_0 = \alpha_r \left(S_r^\downarrow + S_r^\uparrow \right) \quad (C1)$$

$$R_{n+1} = R_0 + \alpha_r [\Psi_{rw} \tau_{rw} W_n + c_{rt} \Psi_{rt} \delta_t T_n] \quad (C2)$$

$$A_0 = \alpha_w \left(S_w^\downarrow + S_w^\uparrow \right) \quad (C3)$$

$$A_{n+1} = A_0 + \alpha_w [\Psi_{ww} \tau_{ww} B_n + \Psi_{wr} \tau_{wr} (\delta_r R_n + \delta_g G_n) + c_{wt} \Psi_{wt} \delta_t T_n]. \quad (C4)$$

The specific coefficients associated with the view factors related to the high vegetation in shortwave reflections calculations are defined as

$$c_{rt} = 0 \quad (C5)$$

$$c_{wt} = \frac{1 - \Psi_{st}}{2 - \Psi_{st} - \Psi_{rt}}. \quad (C6)$$

Only reflections from trees to sky or top part of walls are allowed. As explained in Sect. 4.4, this mode of reflection by the leaves during the first reflection, which is by far the most energetic one, is more likely to occur than in an isotropic way. This assumption could be easily bypassed by fixing the previous coefficients to 1.

For the first tree canopy reflection, the part of received direct solar radiation is corrected by the transmitted flux (see Eq. 2):

$$T_0 = \alpha_t \left[\left(S_t^\downarrow - S_t^\uparrow \right) + S_t^\downarrow \right]. \quad (C7)$$

Some uncertainties remain about relevance of sky view or view factors which could formulate to represent reflective contributions from other surfaces at n to the absorption or reflection by the tree layer at $n+1$, as well as potential absorption of energy within the tree’s crown. Consequently, the solar flux reflected by “tree” at $n+1$ has been determined as the residual term by assuming that the n th solar reflection coming from each element (road, garden, wall A, and wall B) which is not received by road, garden, wall A, wall B, or which is not returned to “sky” at $n+1$ is received by “tree”.

During each inter-reflection, a part of n th reflected flux which is potentially available for the $(n+1)$ th reflection or

absorption is intercepted by high vegetation. This intercepted part related to the presence of foliage on the way of scattered rays towards each receiving element or sky is formulated as the following:

$$I_s(n+1) = \Psi_{sr}(1 - \tau_{sr})(\delta_r R_n + \delta_g G_n) \quad (C8)$$

$$+ \Psi_{sw}(1 - \tau_{sw}) \frac{A_n + B_n}{2}$$

$$I_r(n+1) = \Psi_{rw}(1 - \tau_{rw}) \frac{A_n + B_n}{2} \quad (C9)$$

$$I_g(n+1) = \Psi_{rw}(1 - \tau_{rw}) \frac{A_n + B_n}{2} \quad (C10)$$

$$I_{wA}(n+1) = \Psi_{wr}(1 - \tau_{wr})(\delta_r R_n + \delta_g G_n) + \Psi_{ww}(1 - \tau_{ww}) B_n \quad (C11)$$

$$I_{wB}(n+1) = \Psi_{wr}(1 - \tau_{wr})(\delta_r R_n + \delta_g G_n) + \Psi_{ww}(1 - \tau_{ww}) A_n. \quad (C12)$$

Finally, the solar flux which is intercepted by “tree” at $(n+1)$ is expressed as the sum of interceptions on the way of receiving elements of the canyon or sky:

$$I_t(n+1) = \frac{1}{\delta_t} \left(I_s(n+1) + \delta_r I_r(n+1) + \delta_g I_g(n+1) + \frac{2h}{w} \frac{I_{wA}(n+1) + I_{wB}(n+1)}{2} \right). \quad (C13)$$

The solar energy which is reflected by tree at $(n+1)$ is consequently

$$T_{n+1} = \alpha_t I_t(n+1). \quad (C14)$$

The formulations can be simplified by gathering the equations for walls in a single expression for a mean wall according to

$$W(n+1) = \frac{A(n+1) + B(n+1)}{2}. \quad (C15)$$

As a result, after an infinite number of reflections, the equation system can be written as

$$R_\infty = R_0 + \alpha_r [\Psi_{rw} \tau_{rw} W_\infty + c_{rt} \Psi_{rt} \delta_t T_\infty] \quad (C16)$$

$$G_\infty = G_0 + \alpha_g [\Psi_{rw} \tau_{rw} W_\infty + c_{rt} \Psi_{rt} \delta_t T_\infty] \quad (C17)$$

$$W_\infty = W_0 + \alpha_w [\Psi_{ww} \tau_{ww} W_\infty + \Psi_{wr} \tau_{wr} (\delta_r R_\infty + \delta_g G_\infty) + c_{wt} \Psi_{wt} \delta_t T_\infty] \quad (C18)$$

$$T_\infty = T_0 + \frac{\alpha_t}{\delta_t} \left[(\Psi_{sw}(1 - \tau_{sw}) + \Psi_{rw}(1 - \tau_{rw}) + \Psi_{ww}(1 - \tau_{ww})) W_\infty + (\Psi_{sr}(1 - \tau_{sr}) + \Psi_{wr}(1 - \tau_{wr})) (\delta_r R_\infty + \delta_g G_\infty) \right]. \quad (C19)$$

As a result, we resolve the linear system of four equations with four unknowns:

$$R_\infty = R_0 + \mathcal{F}_{rw}W_\infty + \mathcal{F}_{rt}T_\infty \quad (C20)$$

$$G_\infty = G_0 + \mathcal{F}_{gw}W_\infty + \mathcal{F}_{gt}T_\infty \quad (C21)$$

$$W_\infty = W_0 + \mathcal{F}_{ww}W_\infty + \mathcal{F}_{wr}R_\infty + \mathcal{F}_{wg}G_\infty + \mathcal{F}_{wt}T_\infty \quad (C22)$$

$$T_\infty = T_0 + \mathcal{F}_{tw}W_\infty + \mathcal{F}_{tr}R_\infty + \mathcal{F}_{tg}G_\infty. \quad (C23)$$

The geometric and reflective factors are computed as the following:

$$\mathcal{F}_{rw} = \Psi_{rw} \tau_{rw} \alpha_r \quad (C24)$$

$$\mathcal{F}_{rt} = c_{rt} \Psi_{rt} \delta_t \alpha_r \quad (C25)$$

$$\mathcal{F}_{gw} = \Psi_{rw} \tau_{rw} \alpha_g \quad (C26)$$

$$\mathcal{F}_{gt} = c_{rt} \Psi_{rt} \delta_t \alpha_g \quad (C27)$$

$$\mathcal{F}_{wr} = \Psi_{wr} \tau_{wr} \delta_r \alpha_w \quad (C28)$$

$$\mathcal{F}_{wg} = \Psi_{wr} \tau_{wr} \delta_g \alpha_w \quad (C29)$$

$$\mathcal{F}_{ww} = \Psi_{ww} \tau_{ww} \alpha_w \quad (C30)$$

$$\mathcal{F}_{wt} = c_{wt} \Psi_{wt} \delta_t \alpha_w \quad (C31)$$

$$\mathcal{F}_{tw} = [\Psi_{sw}(1 - \tau_{sw}) + \Psi_{rw}(1 - \tau_{rw}) + \Psi_{ww}(1 - \tau_{ww})] \frac{1}{\delta_t} \alpha_t \quad (C32)$$

$$\mathcal{F}_{tr} = [\Psi_{sr}(1 - \tau_{sr}) + \Psi_{wr}(1 - \tau_{wr})] \frac{\delta_r}{\delta_t} \alpha_t \quad (C33)$$

$$\mathcal{F}_{tg} = [\Psi_{sr}(1 - \tau_{sr}) + \Psi_{wr}(1 - \tau_{wr})] \frac{\delta_g}{\delta_t} \alpha_t. \quad (C34)$$

The resolution of the equation system gives the following expressions for multiple reflections on tree, walls, road, and garden:

$$T_\infty = \left(\frac{1 - \mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rw} - \mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gw} - \mathcal{F}_{ww}}{\mathcal{D}} \right) T_0 + \left(\frac{\mathcal{F}_{tr}(1 - \mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gw} - \mathcal{F}_{ww}) + \mathcal{F}_{wr}(\mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gw} + \mathcal{F}_{tw})}{\mathcal{D}} \right) R_0 + \left(\frac{\mathcal{F}_{tg}(1 - \mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rw} - \mathcal{F}_{ww}) + \mathcal{F}_{wg}(\mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rw} + \mathcal{F}_{tw})}{\mathcal{D}} \right) G_0 + \left(\frac{\mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rw} + \mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gw} + \mathcal{F}_{tw}}{\mathcal{D}} \right) W_0 \quad (C35)$$

$$W_\infty = \left(\frac{\mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rt} + \mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gt} + \mathcal{F}_{wt}}{\mathcal{D}} \right) T_0 + \left(\frac{\mathcal{F}_{wr}(1 - \mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gt}) + \mathcal{F}_{tr}(\mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gt} + \mathcal{F}_{wt})}{\mathcal{D}} \right) R_0 + \left(\frac{\mathcal{F}_{wg}(1 - \mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rt}) + \mathcal{F}_{tg}(\mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rt} + \mathcal{F}_{wt})}{\mathcal{D}} \right) G_0 + \left(\frac{1 - \mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{tr} - \mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gt}}{\mathcal{D}} \right) W_0 \quad (C36)$$

$$R_\infty = \left(\frac{\mathcal{F}_{rw}(\mathcal{F}_{rt}\mathcal{F}_{wr} + \mathcal{F}_{gt}\mathcal{F}_{wg} + \mathcal{F}_{wt}) + \mathcal{F}_{rt}(1 - \mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rw} - \mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gw} - \mathcal{F}_{ww})}{\mathcal{D}} \right) T_0 + \left(1 + \frac{\mathcal{F}_{rw}(\mathcal{F}_{wr}(1 - \mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gt}) + \mathcal{F}_{tr}(\mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gt} + \mathcal{F}_{wt})) + \mathcal{F}_{rt}(\mathcal{F}_{tr}(1 - \mathcal{F}_{wg}\mathcal{F}_{gw}) + \mathcal{F}_{wr}(\mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gw} + \mathcal{F}_{tw}))}{\mathcal{D}} \right) R_0 + \left(\frac{\mathcal{F}_{rw}(\mathcal{F}_{wg}(1 - \mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rt}) + \mathcal{F}_{tg}(\mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rt} + \mathcal{F}_{wt})) + \mathcal{F}_{rt}(\mathcal{F}_{tg}(1 - \mathcal{F}_{wr}\mathcal{F}_{rw} - \mathcal{F}_{ww}) + \mathcal{F}_{wg}(\mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rw} + \mathcal{F}_{tw}))}{\mathcal{D}} \right) G_0 + \left(\frac{\mathcal{F}_{rt}(\mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{rw} + \mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gw} + \mathcal{F}_{tw}) + \mathcal{F}_{rw}(1 - \mathcal{F}_{tr}\mathcal{F}_{tr} - \mathcal{F}_{tg}\mathcal{F}_{gt})}{\mathcal{D}} \right) W_0 \quad (C37)$$

$$\begin{aligned}
G_{\infty} = & \left(\frac{\mathcal{F}_{\text{gw}} (\mathcal{F}_{\text{rt}} \mathcal{F}_{\text{wr}} + \mathcal{F}_{\text{gt}} \mathcal{F}_{\text{wg}} + \mathcal{F}_{\text{wt}}) + \mathcal{F}_{\text{gt}} (1 - \mathcal{F}_{\text{wr}} \mathcal{F}_{\text{rw}} - \mathcal{F}_{\text{wg}} \mathcal{F}_{\text{gw}} - \mathcal{F}_{\text{ww}})}{\mathcal{D}} \right) T_0 \\
& + \left(\frac{\mathcal{F}_{\text{gw}} (\mathcal{F}_{\text{wr}} (1 - \mathcal{F}_{\text{tg}} \mathcal{F}_{\text{gt}}) + \mathcal{F}_{\text{tr}} (\mathcal{F}_{\text{wg}} \mathcal{F}_{\text{gt}} + \mathcal{F}_{\text{wt}})) + \mathcal{F}_{\text{gt}} (\mathcal{F}_{\text{tr}} (1 - \mathcal{F}_{\text{wg}} \mathcal{F}_{\text{gw}}) + \mathcal{F}_{\text{wr}} (\mathcal{F}_{\text{tg}} \mathcal{F}_{\text{gw}} + \mathcal{F}_{\text{tw}}))}{\mathcal{D}} \right) R_0 \\
& + \left(1 + \frac{\mathcal{F}_{\text{gw}} (\mathcal{F}_{\text{wg}} (1 - \mathcal{F}_{\text{tr}} \mathcal{F}_{\text{rt}}) + \mathcal{F}_{\text{tg}} (\mathcal{F}_{\text{wr}} \mathcal{F}_{\text{rt}} + \mathcal{F}_{\text{wt}})) + \mathcal{F}_{\text{gt}} (\mathcal{F}_{\text{tg}} (1 - \mathcal{F}_{\text{wr}} \mathcal{F}_{\text{rw}} - \mathcal{F}_{\text{ww}}) + \mathcal{F}_{\text{wg}} (\mathcal{F}_{\text{tr}} \mathcal{F}_{\text{rw}} + \mathcal{F}_{\text{tw}}))}{\mathcal{D}} \right) G_0 \\
& + \left(\frac{\mathcal{F}_{\text{gt}} (\mathcal{F}_{\text{tr}} \mathcal{F}_{\text{rw}} + \mathcal{F}_{\text{tg}} \mathcal{F}_{\text{gw}} + \mathcal{F}_{\text{tw}}) + \mathcal{F}_{\text{gw}} (1 - \mathcal{F}_{\text{tr}} \mathcal{F}_{\text{rt}} - \mathcal{F}_{\text{tg}} \mathcal{F}_{\text{gt}})}{\mathcal{D}} \right) W_0.
\end{aligned} \tag{C38}$$

The denominator is expressed as the following:

$$\mathcal{D} = (1 - \mathcal{F}_{\text{wr}} \mathcal{F}_{\text{rw}} - \mathcal{F}_{\text{wg}} \mathcal{F}_{\text{gw}} - \mathcal{F}_{\text{ww}}) (1 - \mathcal{F}_{\text{tr}} \mathcal{F}_{\text{rt}} - \mathcal{F}_{\text{tg}} \mathcal{F}_{\text{gt}}) - (\mathcal{F}_{\text{wr}} \mathcal{F}_{\text{rt}} + \mathcal{F}_{\text{wg}} \mathcal{F}_{\text{gt}} + \mathcal{F}_{\text{wt}}) (\mathcal{F}_{\text{tr}} \mathcal{F}_{\text{rw}} + \mathcal{F}_{\text{tg}} \mathcal{F}_{\text{gw}} + \mathcal{F}_{\text{tw}}). \tag{C39}$$

Competing interests. The authors declare that they have no conflict of interest.

Acknowledgements. We acknowledge Laurent Malys for his technical support on the first SOLENE runs. We thank the anonymous reviewers for their helpful comments.

Edited by: T. Poulet

Reviewed by: two anonymous referees

References

- Abdel-Aziz, D. M., Shboul, A. A., and Al-Kurdi, N. Y.: Effects of Tree Shading on Building's Energy Consumption – The Case of Residential Buildings in a Mediterranean Climate, *Am. J. Environ. Eng.*, 5, 131–140, doi:10.5923/j.ajee.20150505.01, 2015.
- Akbari, H., Kurn, D. M., Bretz, S. E., and Hanford, J. W.: Peak power and cooling energy savings of shade trees, *Energ. Buildings*, 25, 139–148, 1997.
- Akbari, H., Pomerantz, M., and Taha, H.: Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas, *Sol. Energy*, 70, 295–310, doi:10.1016/S0038-092X(00)00089-X, 2001.
- Alavipanah, S., Wegmann, M., Qureshi, S., Weng, Q., and Koellner, T.: The Role of Vegetation in Mitigating Urban Land Surface Temperatures: A Case Study of Munich, Germany during the Warm Season, *Sustainability*, 7, 4689–4706, doi:10.3390/su7044689, 2015.
- Alvey, A. A.: Promoting and preserving biodiversity in the urban forest, *Urban For. Urban Gree.*, 5, 195–201, doi:10.1016/j.ufug.2006.09.003, 2006.
- Armson, D., Stringer, P., and Ennos, A. R.: The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK, *Urban For. Urban Gree.*, 12, 282–286, doi:10.1016/j.ufug.2013.04.001, 2013.
- Barcelona City Council: Street Tree Management in Barcelona, Tech. rep., 2011.
- Bertram, C. and Rehdanz, K.: The role of urban green space for human well-being, *Ecol. Econ.*, 120, 139–152, 2015.
- Boone, A., Calvet, J.-C., and Noilhan, J.: Inclusion of a Third Soil Layer in a Land Surface Scheme Using the Force–Restore Method, *J. Appl. Meteorol.*, 38, 1611–1630, doi:10.1175/1520-0450(1999)038<1611:IOATSL>2.0.CO;2, 1999.
- Bouyer, J., Inard, C., and Musy, M.: Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context, *Energ. Buildings*, 43, 1549–1559, doi:10.1016/j.enbuild.2011.02.010, 2011.
- Bowen, K. J. and Parry, M.: The evidence base for linkages between green infrastructure, public health and economic benefit, Tech. rep., 2015.
- Bruse, M. and Fleer, H.: Simulating surface-plant-air interactions inside urban environments with a three dimensional numerical model, *Environ. Modell. Softw.*, 13, 373–384, doi:10.1016/S1364-8152(98)00042-5, 1998.
- Campbell, G. S. and Norman, J. M.: The description and measurement of plant canopy structure, Cambridge University Press, UK, 1989.
- City of Westminster: Trees and the Public Realm (Draft), Tech. Rep. December, 2009.
- Coutts, A. M., White, E. C., Tapper, N. J., Beringer, J., and Livesley, S. J.: Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments, *Theor. Appl. Climatol.*, 124, 55–68, doi:10.1007/s00704-015-1409-y, 2015.
- de Abreu-Harbach, L. V., Labaki, L. C., and Matzarakis, A.: Effect of tree planting design and tree species on human thermal comfort in the tropics, *Landscape Urban Plan.*, 138, 99–109, doi:10.1016/j.landurbplan.2015.02.008, 2015.
- De Blichambaut, C. P.: Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels: méthodes actinométriques, Gauthier-Villars, 1963.
- de Munck, C.: Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville, PhD thesis, Université Toulouse III, available at: <http://oatao.univ-toulouse.fr/9278/>, 2013.
- Feyisa, G. L., Dons, K., and Meilby, H.: Efficiency of parks in mitigating urban heat island effect: An example from Addis Ababa, *Landscape Urban Plan.*, 123, 87–95, doi:10.1016/j.landurbplan.2013.12.008, 2014.
- Grimmond, C. S. B., Blackett, M., Best, M. J., Baik, J.-J., Belcher, S. E., Beringer, J., Bohnenstengel, S. I., Calmet, I., Chen, F., Coutts, A., Dandou, A., Fortuniak, K., Gouvea, M. L., Hamdi, R., Hendry, M., Kanda, M., Kawai, T., Kawamoto, Y., Kondo, H., Krayenhoff, E. S., Lee, S.-H., Loridan, T., Martilli, A., Masson, V., Miao, S., Oleson, K., Ooka, R., Pigeon, G., Porson, A., Ryu, Y.-H., Salamanca, F., Steeneveld, G., Tombrou, M., Voogt, J. A., Young, D. T., and Zhang, N.: Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison, *Int. J. Climatol.*, 31, 244–272, doi:10.1002/joc.2227, 2011.
- Groleau, D. and Mestayer, P. G.: Urban Morphology Influence on Urban Albedo: A Revisit with the SOLENE Model, *Bound.-Lay. Meteorol.*, 147, 301–327, doi:10.1007/s10546-012-9786-6, 2013.
- 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.
- Harman, I. N. and Belcher, S. E.: The surface energy balance and boundary layer over urban street canyons, *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 132, 2749–2768, doi:10.1256/qj.05.185, 2006.
- Hien, W. N., Puay Yok, T. P., and Yu, C.: Study of thermal performance of extensive rooftop greenery systems in the tropical climate, *Build. Environ.*, 42, 25–54, doi:10.1016/j.buildenv.2005.07.030, 2007.
- Hottel, H. C.: Radiant-Heat Transmission, in: Heat Transmission, edited by: Mc Adams, W. H., Mc Graw-Hill, 55–125, 1954.
- Jim, C. Y.: Air-conditioning energy consumption due to green roofs with different building thermal insulation, *Appl. Energy*, 128, 49–59, doi:10.1016/j.apenergy.2014.04.055, 2014.
- Joshi, N. and Joshi, A.: Role of Urban Trees in Amelioration of Temperatures, *Int. J. Res. Stud. Biosci.*, 3, 132–137, 2015.
- Ko, Y., Lee, J.-H., McPherson, E. G., and Roman, L. A.: Long-term monitoring of Sacramento Shade program trees: Tree survival, growth and energy-saving performance, *Landscape Urban Plan.*, 143, 183–191, doi:10.1016/j.landurbplan.2015.07.017, 2015.
- Kokogiannakis, G., Tietje, A., and Darkwa, J.: The role of Green Roofs on Reducing Heating and Cooling Loads: A Database

- across Chinese Climates, *Procedia Environ. Sci.*, 11, 604–610, doi:10.1016/j.proenv.2011.12.094, 2011.
- Koukou-Arnaud, R., Desplat, J., Lemonsu, A., and Salagnac, J.-L.: Epicea : étude des impacts du changement climatique à Paris, *La Météorologie*, 8, 42–48, doi:10.4267/2042/53186, 2014.
- Krayenhoff, E. S., Christen, A., Martilli, A., and Oke, T. R.: A Multi-layer Radiation Model for Urban Neighbourhoods with Trees, *Bound.-Lay. Meteorol.*, 151, 139–178, doi:10.1007/s10546-013-9883-1, 2014.
- Krayenhoff, E. S., Santiago, J. L., Martilli, A., Christen, A., and Oke, T. R.: Parametrization of Drag and Turbulence for Urban Neighbourhoods with Trees, *Bound.-Lay. Meteorol.*, 156, 157–189, doi:10.1007/s10546-015-0028-6, 2015.
- Lafore, J. P., Stein, J., Asencio, N., Bougeault, P., Ducrocq, V., Duron, J., Fischer, C., Hérel, P., Mascart, P., Masson, V., Pinty, J. P., Redelsperger, J. L., Richard, E., and Vilà-Guerau De Arellano, J.: The Meso-NH Atmospheric Simulation System, Part I: Adiabatic formulation and control simulations, *Ann. Geophys.*, 16, 90–109, doi:10.1007/s005850050582, 1997.
- Lee, S.-H. and Park, S.-U.: A Vegetated Urban Canopy Model for Meteorological and Environmental Modelling, *Bound.-Lay. Meteorol.*, 126, 73–102, doi:10.1007/s10546-007-9221-6, 2008.
- 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. Clim.*, 49, 346–362, doi:10.1175/2009JAMC2131.1, 2010.
- Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., and Pearlmutt, 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.
- Lemonsu, A., Koukou-Arnaud, R., Desplat, J., Salagnac, J.-L., and Masson, V.: Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate, *Clim. Change*, 116, 679–692, doi:10.1007/s10584-012-0521-6, 2013.
- Malys, L.: Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville, PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, France, 2012.
- Malys, L., Musy, M., and Inard, C.: A hydrothermal model to assess the impact of green walls on urban microclimate and building energy consumption, *Build. Environ.*, 73, 187–197, doi:10.1016/j.buildenv.2013.12.012, 2014.
- Masson, V.: A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models, *Bound.-Lay. Meteorol.*, 94, 357–397, 2000.
- Masson, V. and Seity, Y.: Including Atmospheric Layers in Vegetation and Urban Offline Surface Schemes, *J. Appl. Meteorol. Clim.*, 48, 1377–1397, doi:10.1175/2009JAMC1866.1, 2009.
- Masson, V., Grimmond, C. S. B., and Oke, T. R.: Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) Scheme with Direct Measurements from Dry Districts in Two Cities, *J. Appl. Meteorol.*, 41, 1011–1026, 2002.
- Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouysse, 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., Salgado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V., and Voltaire, 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.
- Miguet, F.: Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain, PhD thesis, available at: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00546996/>, 2000.
- Miguet, F. and Groleau, D.: A daylight simulation tool for urban and architectural spaces-application to transmitted direct and diffuse light through glazing, *Build. Environ.*, 37, 833–843, doi:10.1016/S0360-1323(02)00049-5, 2002.
- Mullaney, J., Lucke, T., and Trueman, S. J.: A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments, *Landscape Urban Plan.*, 134, 157–166, doi:10.1016/j.landurbplan.2014.10.013, 2015.
- Municipality of Toulouse: CAHIER DE L'ESPACE PUBLIC "LES ESPACES VERTS", Tech. rep., Toulouse, France, 2008.
- Noilhan, J. and Planton, S.: A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models, *Mon. Weather Rev.*, 117, 536–549, 1989.
- Nowak, D. J. and Dwyer, J. F.: Understanding the Benefits and Costs of Urban Forest Ecosystems, in: *Handbook of Urban and Community Forestry in the North East*, 25–46, doi:10.1007/978-1-4020-4289-8_2, 2007.
- Önder, S. and Akay, A.: The Roles of Plants on Mitigating the Urban Heat Islands' Negative Effects, *Int. J. Agric Econom. Dev.*, 2, 18–32, 2014.
- Park, M., Hagishima, A., Tanimoto, J., and Narita, K. I.: Effect of urban vegetation on outdoor thermal environment: Field measurement at a scale model site, *Build. Environ.*, 56, 38–46, doi:10.1016/j.buildenv.2012.02.015, 2012.
- Perez, R., Seals, R., and Michalsky, J.: All-weather model for sky luminance distribution-Preliminary configuration and validation, *Sol. Energy*, 50, 235–245, doi:10.1016/0038-092X(93)90017-1, 1993.
- 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, 159–171, 2008.
- Porson, A., Harman, I. N., Bohnenstengel, S. I., and Belcher, S. E.: How many facets are needed to represent the surface energy balance of an urban area?, *Bound.-Lay. Meteorol.*, 132, 107–128, doi:10.1007/s10546-009-9392-4, 2009.
- Qiu, G. Y., Li, H. Y., Zhang, Q. T., Chen, W., Liang, X. J., and Li, X. Z.: Effects of Evapotranspiration on Mitigation of Urban Temperature by Vegetation and Urban Agriculture, *J. Integr. Agricult.*, 12, 1307–1315, doi:10.1016/S2095-3119(13)60543-2, 2013.
- Robitu, M., Musy, M., Inard, C., and Groleau, D.: Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate, *Sol. Energy*, 80, 435–447, doi:10.1016/j.solener.2005.06.015, 2006.
- Ryu, Y. H., Bou-Zeid, E., Wang, Z. H., and Smith, J. A.: Realistic Representation of Trees in an Urban Canopy Model, *Bound.-*

- Lay. *Meteorol.*, 159, 193–220, doi:10.1007/s10546-015-0120-y, 2015.
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., and Masson, V.: The AROME-France Convective-Scale Operational Model, *Mon. Weather Rev.*, 139, 976–991, doi:10.1175/2010MWR3425.1, 2011.
- Shashua-Bar, L., Pearlmutter, D., and Erell, E.: The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment, *Int. J. Climatol.*, 31, 1498–1506, doi:10.1002/joc.2177, 2011.
- Simpson, J. R.: Improved estimates of tree-shade effects on residential energy use, *Energ. Buildings*, 34, 1067–1076, doi:10.1016/S0378-7788(02)00028-2, 2002.
- Spangenberg, J., Shinzato, P., Johansson, E., and Duarte, D. H. S.: Simulation of the influence of vegetation on microclimate and thermal comfort in the city of São Paulo, *Rev. Soc. Bras. Arborização Urbana*, 3, 1–19, doi:10.1016/j.solener.2005.06.015, 2008.
- Taleghani, M., Sailor, D., and Ban-Weiss, G. A.: Micrometeorological simulations to predict the impacts of heat mitigation strategies on pedestrian thermal comfort in a Los Angeles neighborhood, *Environ. Res. Lett.*, 11, 024003, doi:10.1088/1748-9326/11/2/024003, 2016.
- Tavares, R., Calmet, I., and Dupont, S.: Modelling the impact of green infrastructures on local microclimate within an idealized homogeneous urban canopy, 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9), Toulouse (France), 20–24 July 2015, 1–6, 2015.
- Wang, Z.-H.: Monte Carlo simulations of radiative heat exchange in a street canyon with trees, *Sol. Energy*, 110, 704–713, doi:10.1016/j.solener.2014.10.012, 2014.
- Yamada, T.: A numerical study of turbulent airflow in and above a forest canopy, *J. Meteorol. Soc. Jpn.*, 60, 439–454, 1982.
- Yao, L., Chen, L., Wei, W., and Sun, R.: Potential reduction in urban runoff by green spaces in Beijing: A scenario analysis, *Urban For. Urban Gree.*, 14, 300–308, doi:10.1016/j.ufug.2015.02.014, 2015.
- Young, D. T., Clark, P., Hendry, M., and Barlow, J.: Modelling Radiative Exchange in a Vegetated Urban Street Canyon Model, 9th International Conference on Urban Climate (ICUC9), Toulouse (France), 20–24 July 2015, 1–5, 2015.
- Zhang, B., Xie, G.-d., Li, N., and Wang, S.: Effect of urban green space changes on the role of rainwater runoff reduction in Beijing, China, *Landscape Urban Plan.*, 140, 8–16, doi:10.1016/j.landurbplan.2015.03.014, 2015.
- Zhang, Z., Lv, Y., and Pan, H.: Cooling and humidifying effect of plant communities in subtropical urban parks, *Urban For. Urban Gree.*, 12, 323–329, doi:10.1016/j.ufug.2013.03.010, 2013.

Bibliographie

- ABDEL-AZIZ, Dania M, Abdulsalam Al SHBOUL et Nabeel Y AL-KURDI (2015). « Effects of Tree Shading on Building's Energy Consumption -The Case of Residential Buildings in a Mediterranean Climate ». In : *American Journal of Environmental Engineering* 5.5, p. 131–140.
- AKBARI, Hashem, Ronnen LEVINSON, William MILLER et Paul BERDAHL (2005). « Cool colored roofs to save energy and improve air quality ». In : *Lawrence Berkeley National Laboratory*.
- AKPINAR, Abdullah (2016). « How is quality of urban green spaces associated with physical activity and health ? » In : *Urban Forestry & Urban Greening* 16, p. 76–83.
- ANDERSON, Linda M et H Ken CORDELL (1988). « Influence of trees on residential property values in Athens, Georgia (USA) : A survey based on actual sales prices ». In : *Landscape and Urban Planning* 15.1-2, p. 153–164.
- ANGEL, Shlomo, Jason PARENT, Daniel L CIVCO, Alexander BLEI et David POTERE (2011). « The dimensions of global urban expansion : Estimates and projections for all countries, 2000–2050 ». In : *Progress in Planning* 75.2, p. 53–107.
- ANQUETIL, V. (2010). *Typologies et fonctions écosystémiques de la végétation urbaine : contributions méthodologiques, Mémoire de fin de projet, Institut National d'Horticulture et du Paysage, Centre d'Angers*. Rapp. tech.
- ARMSON, D, P STRINGER et A R ENNOS (2013). « The effect of street trees and amenity grass on urban surface water runoff in Manchester, UK ». In : *Urban Forestry and Urban Greening* 12.3, p. 282–286.
- ARNFIELD, A John (2003). « Two decades of urban climate research : a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island ». In : *International journal of climatology* 23.1, p. 1–26.
- AUMOND, Pierre, Valery MASSON, Christine LAC, Benoit GAUVREAU, Sylvain DUPONT et Michel BERENGIER (2013). « Including the drag effects of canopies : real case large-eddy simulation studies ». In : *Boundary-layer meteorology*, p. 1–16.
- BARCELONA CITY COUNCIL (2011). *Street Tree Management in Barcelona*. Rapp. tech., p. 1–58.
- BEHRENS, Arno, Anton GEORGIEV et Maelis CARRARO (2010). *Future impacts of climate change across Europe*. Rapp. tech. CEPS Working Document No. 324.
- BERLAND, Adam, Sheri A SHIFLETT, William D SHUSTER, Ahjond S GARMESTANI, Haynes C GODDARD, Dustin L HERRMANN et Matthew E HOPTON (2017). « The role of trees in urban stormwater management ». In : *Landscape and Urban Planning* 162, p. 167–177.
- BERRENS, Karla et Laura CALVET-MIR (2016). « Urban garden's ambiances as a key to understand urban space ». In : *Ambiances, tomorrow. Proceedings of 3rd International*

- Congress on Ambiances. Septembre 2016, Volos, Greece.* T. 2. International Network Ambiances ; University of Thessaly, p-587.
- BERTRAM, Christine et Katrin REHDANZ (2015). « The role of urban green space for human well-being ». In : *Ecological Economics* 120, p. 139–152.
- BITAN, A et S RUBIN (1994). « Climatic atlas for physical and environmental planning in Israel ». In : *Ramot Center, Tel Aviv University, Tel Aviv.*
- BOUYER, Julien, Christian INARD et Marjorie MUSY (2011). « Microclimatic coupling as a solution to improve building energy simulation in an urban context ». In : *Energy and Buildings* 43.7, p. 1549–1559.
- BOWLER, Diana E, Lisette BUYUNG-ALI, Teri M KNIGHT et Andrew S PULLIN (2010). « Urban greening to cool towns and cities : A systematic review of the empirical evidence ». In : *Landscape and urban planning* 97.3, p. 147–155.
- BRÖDE, Peter, Dusan FIALA, Krzysztof BŁAŻEJCZYK, Ingvar HOLMÉR, Gerd JENDRITZKY, Bernhard KAMPMANN, Birger TINZ et George HAVENITH (2012). « Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI) ». In : *International journal of biometeorology* 56.3, p. 481–494.
- BROWN, Lester (2001). « Building an Economy for the Earth ». In : *Earth Policy Institute.*
- BUENO, B, G PIGEON, LK NORFORD, K ZIBOUCHE et C MARCHADIER (2012). « Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme ». In : *Geoscientific Model Development* 5, p. 433–448.
- BUENO-BARTHOLOMEI, Carolina Lotufo et Lucila Chebel LABAKI (2003). « How much does the change of species of trees affect their solar radiation attenuation ». In : *International conference on urban climate.* T. 5, p. 267–270.
- BURLS, Ambra (2007). « People and green spaces : promoting public health and mental well-being through ecotherapy ». In : *Journal of Public Mental Health* 6.3, p. 24–39.
- CALFAPIETRA, C, S FARES, F MANES, A MORANI, G SGRIGNA et F LORETO (2013). « Role of Biogenic Volatile Organic Compounds (BVOC) emitted by urban trees on ozone concentration in cities : A review ». In : *Environmental pollution* 183, p. 71–80.
- CAMPBELL, G. S. et J. M. NORMAN (1989). *The description and measurement of plant canopy structure.* UK : Cambridge University Press.
- CARTER, Jeremy G, Gina CAVAN, Angela CONNELLY, Simon GUY, John HANDLEY et Aleksandra KAZMIERCZAK (2015). « Climate change and the city : Building capacity for urban adaptation ». In : *Progress in Planning* 95, p. 1–66.
- CASSIANI, Massimo, GG KATUL et JD ALBERTSON (2008). « The effects of canopy leaf area index on airflow across forest edges : large-eddy simulation and analytical results ». In : *Boundary-layer meteorology* 126.3, p. 433–460.
- CHATZIDIMITRIOU, Angeliki et Simos YANNAS (2016). « Microclimate design for open spaces : Ranking urban design effects on pedestrian thermal comfort in summer ». In : *Sustainable Cities and Society* 26, p. 27–47.

- CITY OF WESTMINSTER (2009). *Trees and the Public Realm (Draft)*. Rapp. tech. December.
- COUTTS, Andrew M, Nigel J TAPPER, Jason BERINGER, Margaret LOUGHNAN et Matthias 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 ». In : *Progress in Physical Geography* 37.1, p. 2–28.
- COUTTS, Andrew M, Emma C WHITE, Nigel J TAPPER, Jason BERINGER et Stephen J LIVESLEY (2016). « Temperature and human thermal comfort effects of street trees across three contrasting street canyon environments ». In : *Theoretical and Applied Climatology* 124.1-2, p. 55–68.
- DANIEL, M, A LEMONSU et V VIGUIÉ (2016). « Role of watering practices in large-scale urban planning strategies to face the heat-wave risk in future climate ». In : *Urban Climate* 33.4, p. 319–331.
- DAVIS, Anthony M. et Thomas F. GLICK (1978). « Urban Ecosystems and Island Biogeography ». In : *Environmental Conservation* 5.4, p. 299–304.
- DAVIS, Robert E, Paul C KNAPPENBERGER, Patrick J MICHAELS et Wendy M NOVICOFF (2003). « Changing heat-related mortality in the United States. » In : *Environmental health perspectives* 111.14, p. 1712.
- DE BRICHAMBAUT, Charles Perin (1963). *Rayonnement solaire et échanges radiatifs naturels : méthodes actinométriques*. Gauthier-Villars.
- DE MUNCK, C. AND LEMONSU, A. (2014). *Les stratégies de végétalisation pour aider la ville à faire face à la canicule*. Rapp. tech.
- DHAINAUT, Jean-François, Yann-Erick CLAESSENS, Christine GINSBURG et Bruno RIOU (2003). « Unprecedented heat-related deaths during the 2003 heat wave in Paris : consequences on emergency departments ». In : *Critical Care* 8.1, p. 1.
- DONOVAN, Geoffrey H et David T BUTRY (2009). « The value of shade : Estimating the effect of urban trees on summertime electricity use ». In : *Energy and Buildings* 41.6, p. 662–668.
- DOUVILLE, H, J-F ROYER et J-F MAHFOUF (1995). « A new snow parameterization for the Meteo-France climate model ». In : *Climate Dynamics* 12.1, p. 21–35.
- DUPONT, Sylvain et Yves BRUNET (2008). « Influence of foliar density profile on canopy flow : a large-eddy simulation study ». In : *Agricultural and forest meteorology* 148.6, p. 976–990.
- EDENHOFER, O, R PICHES-MADRUGA, Y SOKONA, E FARAHANI, S KADNER, K SEYBOTH, A ADLER, I BAUM, S BRUNNER, P EICKEMEIER et al. (2014). *Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change, Summary for policymakers*. Rapp. tech. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- EGLI, Ernst (1951). *Die neue Stadt in Landschaft und Klima : Climate and town districts ; consequences and demands*. Verlag für Architektur.

- ERELL, EVYATAR, DANIEL BONEH, DAVID PEARLMUTTER et P BAR-KUTIEL (2013). « Effect of high-albedo materials on pedestrian thermal sensation in urban street canyons in hot climates ». In : *Proceedings of the PLEA2013 — Sustainable Architecture for a Renewable Future, Munich, Germany*, p. 10–12.
- FIALA, Dusan, George HAVENITH, Peter BRÖDE, Bernhard KAMPMANN et Gerd JENDRITZKY (2012). « UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation ». In : *International journal of biometeorology* 56.3, p. 429–441.
- FOLEY, Jonathan A, Ruth DEFRIES, Gregory P ASNER, Carol BARFORD, Gordon BONAN, Stephen R CARPENTER, F Stuart CHAPIN, Michael T COE, Gretchen C DAILY, Holly K GIBBS et al. (2005). « Global consequences of land use ». In : *science* 309.5734, p. 570–574.
- GAGO, Eulalia Jadraque, Julio ROLDAN, R PACHECO-TORRES et J ORDOÑEZ (2013). « The city and urban heat islands : A review of strategies to mitigate adverse effects ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 25, p. 749–758.
- GASH, JHC et A GRANIER (2007). « A new method of sap flow measurement in tree trunks ». In : *Evaporation. IAHS Press, Wallingford*.
- GREENE, Scott, Laurence S KALKSTEIN, David M MILLS et Jason SAMENOW (2011). « An examination of climate change on extreme heat events and climate–mortality relationships in large US cities ». In : *Weather, Climate, and Society* 3.4, p. 281–292.
- GRIMM, Nancy B, Stanley H FAETH, Nancy E GOLUBIEWSKI, Charles L REDMAN, Jianguo WU, Xuemei BAI et John M BRIGGS (2008). « Global change and the ecology of cities ». In : *science* 319.5864, p. 756–760.
- GRIMMOND, C. S. B. et al. (2011). « Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison ». In : *International Journal of Climatology* 31.2, p. 244–272.
- GRIMMOND, CSB, M BLACKETT, MJ BEST, J BARLOW, JJ BAIK, SE BELCHER, SI BOHNENSTENGEL, I CALMET, F CHEN, A DANDOU et al. (2010). « The international urban energy balance models comparison project : first results from phase 1 ». In : *Journal of applied meteorology and climatology* 49.6, p. 1268–1292.
- GRIMMOND, CSB et Timothy R OKE (1999). « Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form ». In : *Journal of applied meteorology* 38.9, p. 1262–1292.
- GROLEAU, Dominique et Patrice G. MESTAYER (2013). « Urban Morphology Influence on Urban Albedo : A Revisit with the SOLENE Model ». In : *Boundary-Layer Meteorology* 147.2, p. 301–327.
- HAJAT, Shakoor, Sotiris VARDOULAKIS, Clare HEAVISIDE et Bernd EGGEN (2014). « Climate change effects on human health : projections of temperature-related mortality for the UK during the 2020s, 2050s and 2080s ». In : *Journal of epidemiology and community health*, jech–2013.

- 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 ». In : *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47.10, p. 2627–2644.
- HARMAN, I N et S E BELCHER (2006). « The surface energy balance and boundary layer over urban street canyons ». In : *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 132.621, p. 2749–2768.
- HEBBERT, Michael et Vladimir JANKOVIC (2013). « Cities and climate change : the precedents and why they matter ». In : *Urban Studies* 50.7, p. 1332–1347.
- HEISLER, Gordon M (1986). « Energy savings with trees ». In : *Journal of Arboriculture* 12.5, p. 113–125.
- HOTTEL, H. C. (1954). « Radiant-Heat Transmission ». In : *Heat Transmission*. Sous la dir. de W. H. MC ADAMS. Mc Graw-Hill, p. 55–125.
- HSIEH, Chun-Ming, Toshiya ARAMAKI et Keisuke HANAKI (2007). « The feedback of heat rejection to air conditioning load during the nighttime in subtropical climate ». In : *Energy and Buildings* 39.11, p. 1175–1182.
- HUANG, Cunrui, Adrian Gerard BARNETT, Xiaoming WANG, Pavla VANECKOVA, Gerard FITZGERALD et Shilu TONG (2011). « Projecting future heat-related mortality under climate change scenarios : a systematic review ». In : *Environmental health perspectives* 119.12, p. 1681.
- HUANG, YJ, Hashem AKBARI, Haider TAHA et Arthur H ROSENFELD (1987). « The potential of vegetation in reducing summer cooling loads in residential buildings ». In : *Journal of climate and Applied Meteorology* 26.9, p. 1103–1116.
- KALNAY, Eugenia et Ming CAI (2003). « Impact of urbanization and land-use change on climate ». In : *Nature* 423.6939, p. 528–531.
- KATUL, Gabriel (1998). « An investigation of higher-order closure models for a forested canopy ». In : *Boundary-Layer Meteorology* 89.1, p. 47–74.
- KETTERER, Christine et Andreas MATZARAKIS (2014). « Human-biometeorological assessment of heat stress reduction by replanning measures in Stuttgart, Germany ». In : *Landscape and Urban Planning* 122, p. 78–88.
- KLEMM, Wiebke, Bert G HEUSINKVELD, Sanda LENZHOLZER et Bert van HOVE (2015). « Street greenery and its physical and psychological impact on thermal comfort ». In : *Landscape and Urban Planning* 138, p. 87–98.
- KOPPE, Christina, R SARI KOVATS, Bettina MENNE, Gerd JENDRITZKY, Deutscher WETTERDIENST, World Health ORGANIZATION et al. (2004). *Heat-waves : risks and responses*. Rapp. tech. World Health Organization 2004.
- KOUNKOU-ARNAUD, Raphaëlle, Julien DESPLAT, Aude LEMONSU et Jean-Luc SALAGNAC (2014). « Epicea : étude des impacts du changement climatique à Paris ». In : *La Météorologie* 8.84, p. 42–48.

- KRAYENHOFF, E. S., A. CHRISTEN, A. MARTILLI et T. R. OKE (2014). « A Multi-layer Radiation Model for Urban Neighbourhoods with Trees ». In : *Boundary-Layer Meteorology* 151.1, p. 139–178.
- KRAYENHOFF, E. S., J. L. SANTIAGO, A. MARTILLI, A. CHRISTEN et T. R. OKE (2015). « Parametrization of Drag and Turbulence for Urban Neighbourhoods with Trees ». In : *Boundary-Layer Meteorology* 156.2, p. 157–189.
- KREKEL, Christian, Jens KOLBE et Henry WÜSTEMANN (2016). « The greener, the happier ? The effect of urban land use on residential well-being ». In : *Ecological Economics* 121, p. 117–127.
- KREMMER, O et I GALON (1996). « Water Consumption Coefficients for Gardening and Landscape Irrigation ». In : *SHAHAM, Ministry of Agriculture, Israel (in Hebrew)*.
- KUO, Frances E et William C SULLIVAN (2001). « Environment and crime in the inner city : Does vegetation reduce crime ? » In : *Environment and behavior* 33.3, p. 343–367.
- LAAIDI, Karine, Abdelkrim ZEGHNOUN, Bénédicte DOUSSET, Philippe BRETIN, Stéphanie VANDENTORREN, Emmanuel GIRAUDET et Pascal BEAUDEAU (2012). « The impact of heat islands on mortality in Paris during the August 2003 heat wave ». In : *Environmental health perspectives* 120.2, p. 254.
- LAFORE, J. P., J. STEIN, N. ASECIO, P. BOUGEAULT, V. DUCROCQ, J. DURON, C. FISCHER, P. H ? ?REIL, P. MASCART, V. MASSON, J. P. PINTY, J. L. REDELSPERGER, E. RICHARD et J. VIL ? ?-GUERAU DE ARELLANO (1997). « The Meso-NH Atmospheric Simulation System. Part I : Adiabatic formulation and control simulations ». In : *Annales Geophysicae* 16.1, p. 90–109.
- LANDSBERG, Helmut E (1981). *The urban climate*. T. 28. Academic press.
- LANDSBERG, JJ et DBB POWELL (1973). « Surface exchange characteristics of leaves subject to mutual interference ». In : *Agricultural Meteorology* 12, p. 169–184.
- LEE, Hyunjung, Helmut MAYER et Liang CHEN (2016). « Contribution of trees and grasslands to the mitigation of human heat stress in a residential district of Freiburg, Southwest Germany ». In : *Landscape and Urban Planning* 148, p. 37–50.
- LEE, Sang-Hyun et Soon-Ung PARK (2008). « A Vegetated Urban Canopy Model for Meteorological and Environmental Modelling ». In : *Boundary-Layer Meteorology* 126.1, p. 73–102.
- LEICHENKO, Robin (2011). « Climate change and urban resilience ». In : *Current opinion in environmental sustainability* 3.3, p. 164–168.
- 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 ». In : *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49.3, p. 346–362.
- LEMONSU, A., C. S. B. GRIMMOND et V. MASSON (2004). « Modeling the Surface Energy Balance of the Core of an Old Mediterranean City : Marseille ». In : *Journal of Applied Meteorology* 43, p. 312–327.

- 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 ». In : *Geoscientific Model Development* 5.6, p. 1377–1393.
- LEMONSU, A, V VIGUIÉ, M DANIEL et V MASSON (2015). « Vulnerability to heat waves : Impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France) ». In : *Urban Climate* 14, p. 586–605.
- LEMONSU, Aude, Raphaëlle KOUNKOU-ARNAUD, Julien DESPLAT, Jean-Luc SALAGNAC et Valéry MASSON (2013). « Evolution of the Parisian urban climate under a global changing climate ». In : *Climatic Change* 116.3-4, p. 679–692.
- LEMONSU, Aude et Valéry MASSON (2002). « Simulation of a summer urban breeze over Paris ». In : *Boundary-Layer Meteorology* 104.3, p. 463–490.
- LINDBERG, Fredrik, Björn HOLMER et Sofia THORSSON (2008). « SOLWEIG 1.0—Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings ». In : *International Journal of Biometeorology* 52.7, p. 697–713.
- LOBACCARO, Gabriele et Juan A ACERO (2015). « Comparative analysis of green actions to improve outdoor thermal comfort inside typical urban street canyons ». In : *Urban Climate* 14, p. 251–267.
- MALLER, Cecily, Mardie TOWNSEND, Anita PRYOR, Peter BROWN et Lawrence ST LEGER (2006). « Healthy nature healthy people : ‘contact with nature’ as an upstream health promotion intervention for populations ». In : *Health promotion international* 21.1, p. 45–54.
- MALYS, Laurent (2012). « Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d’adaptation pour l’amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville ». Thèse de doct. Ecole Centrale de Nantes, France, p. 1–238.
- MALYS, Laurent, Marjorie MUSY et Christian INARD (2014). « A hydrothermal model to assess the impact of green walls on urban microclimate and building energy consumption ». In : *Building and Environment* 73, p. 187–197.
- MARTILLI, Alberto, Alain CLAPPIER et Mathias W ROTACH (2002). « An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models ». In : *Boundary-Layer Meteorology* 104.2, p. 261–304.
- MASSON, V. (2000). « A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models ». In : *Boundary-Layer Meteorology* 94.3, p. 357–397.
- MASSON, V., L. GOMES, G. PIGEON, C. LIOUSSE, V. PONT, J.-P. LAGOUARDE, J. VOOGT, J. SALMOND, T.R. OKE, J. HIDALGO, D. LEGAIN, O. GARROUSTE, C. LAC, O. CONNAN, S. LACH et P. TULET (2008). « The Canopy and Aerosol Particles Interactions in TOulouse Urban Layer (CAPITOUL) experiment ». In : *Meteorology and Atmospheric Physics* 102, p. 135–157.
- MASSON, V., C. S. B. GRIMMOND et T. R. OKE (2002). « Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) Scheme with Direct Measurements from Dry Districts in Two Cities ». In : *Journal of Applied Meteorology* 41.10, p. 1011–1026.

- MASSON, Valéry et Yann SEITY (2009). « Including Atmospheric Layers in Vegetation and Urban Offline Surface Schemes ». In : *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 48.7, p. 1377–1397.
- MASSON, V et al. (2013). « The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of earth surface variables and fluxes ». In : *Geoscientific Model Development* 6.4, p. 929–960.
- MCMICHAEL, Anthony J, Rosalie E WOODRUFF et Simon HALES (2006). « Climate change and human health : present and future risks ». In : *The Lancet* 367.9513, p. 859–869.
- MEEHL, Gerald A et Claudia TEBALDI (2004). « More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century ». In : *Science* 305.5686, p. 994–997.
- MIGUET, Francis (2000). « Paramètres physiques des ambiances architecturales : Un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain ». Thèse de doct., p. 364.
- MIGUET, Francis et Dominique GROLEAU (2002). « A daylight simulation tool for urban and architectural spaces-application to transmitted direct and diffuse light through glazing ». In : *Building and Environment* 37.8-9, p. 833–843.
- MILFORD, J. R. (1974). « Principles of environmental physics. (E. Arnold, Contemporary Biology series) ». In : *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 100.424, p. 262–262.
- MILLS, Evan, Deborah WILSON et Thomas B JOHANSSON (1991). « Getting started : no-regrets strategies for reducing greenhouse gas emissions ». In : *Energy Policy* 19.6, p. 526–542.
- MILOŠEVIĆ, Dragan D, Ivana V BAJŠANSKI et Stevan M SAVIĆ (2017). « Influence of changing trees locations on thermal comfort on street parking lot and footways ». In : *Urban Forestry & Urban Greening* 23, p. 113–124.
- MOLINA, Mario J et Luisa T MOLINA (2004). « Megacities and atmospheric pollution ». In : *Journal of the Air & Waste Management Association* 54.6, p. 644–680.
- MONTEIRO, Madalena Vaz, Kieron J DOICK, Phillip HANDLEY et Andrew PEACE (2016). « The impact of greenspace size on the extent of local nocturnal air temperature cooling in London ». In : *Urban Forestry & Urban Greening* 16, p. 160–169.
- MORAKINYO, Tobi Eniolu, Ling KONG, Kevin Ka-Lun LAU, Chao YUAN et Edward NG (2017). « A study on the impact of shadow-cast and tree species on in-canyon and neighborhood's thermal comfort ». In : *Building and Environment* 115, p. 1–17.
- MORAKINYO, Tobi Eniolu et Yun Fat LAM (2016). « Simulation study on the impact of tree-configuration, planting pattern and wind condition on street-canyon's microclimate and thermal comfort ». In : *Building and Environment* 103, p. 262–275.
- MORAKINYO, Tobi Eniolu, Yun Fat LAM et Song HAO (2016). « Evaluating the role of green infrastructures on near-road pollutant dispersion and removal : Modelling and measurement ». In : *Journal of environmental management* 182, p. 595–605.

- MUNCK, C. de, A. LEMONSU, V. MASSON, J. Le BRAS et M. BONHOMME (2017). « Evaluating the impacts of greening scenarios on thermal comfort and energy and water consumptions for adapting Paris city to climate change ». In : *Urban Climate*, p. -.
- MUNCK, Cécile de (2013). « Modélisation de la végétation urbaine et stratégies d'adaptation pour l'amélioration du confort climatique et de la demande énergétique en ville ». Thèse de doct. Université Toulouse III, p. 1–219.
- MUNICIPALITY OF TOULOUSE (2008). *CAHIER DE L'ESPACE PUBLIC « LES ESPACES VERTS »*. Rapp. tech. Toulouse, France, p. 1–142.
- MUSY, M. (2014). *Une ville verte, les rôles du végétal en ville*. Editions Quæ.
- NICE, KA, P ISAAC et al. (2012). « The micro-climate of a mixed urban parkland environment ». In : *WSUD 2012 : Water sensitive urban design ; Building the water sensitive community ; 7th international conference on water sensitive urban design*. Engineers Australia, p. 719.
- NOILHAN, J. et S. PLANTON (1989). « A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models ». In : *Monthly Weather Review* 117.3, p. 536–549.
- NOWAK, David J et Daniel E CRANE (2002). « Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA ». In : *Environmental pollution* 116.3, p. 381–389.
- NOWAK, David J, Daniel E CRANE et Jack C STEVENS (2006). « Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States ». In : *Urban forestry & urban greening* 4.3, p. 115–123.
- OKE, Tim R (1982). « The energetic basis of the urban heat island ». In : 108.455, p. 1–24.
- (2006). « Towards better scientific communication in urban climate ». In : *Theoretical and Applied Climatology* 84.1-3, p. 179–190.
- OKE, Tim R, JM CROWTHER, KG MCNAUGHTON, JL MONTEITH et B GARDINER (1989). « The micrometeorology of the urban forest [and discussion] ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences* 324.1223, p. 335–349.
- OKE, TR (1987). « Boundary layer climates. 2nd ». In : *Methuen*, 289p.
- PARK, Minsun, Aya HAGISHIMA, Jun TANIMOTO et Ken Ichi NARITA (2012). « Effect of urban vegetation on outdoor thermal environment : Field measurement at a scale model site ». In : *Building and Environment* 56, p. 38–46.
- PATAKI, Diane E, RJ ALIG, AS FUNG, NE GOLUBIEWSKI, CA KENNEDY, EG MCPHERSON, DJ NOWAK, RV POUYAT et P ROMERO LANKAO (2006). « Urban ecosystems and the North American carbon cycle ». In : *Global Change Biology* 12.11, p. 2092–2102.
- PEARLMUTTER, D., P. BERLINER et E. SHAVIV (2006). « Physical modeling of pedestrian energy exchange within the urban canopy ». In : *Building and Environment* 41, p. 783–795.
- (2007). « Integrated modeling of pedestrian energy exchange and thermal comfort in urban street canyons ». In : *Building and Environment* 42, p. 2396–2409.

- PEREZ, R., R. SEALS et J. MICHALSKY (1993). « All-weather model for sky luminance distribution-Preliminary configuration and validation ». In : *Solar Energy* 50.3, p. 235–245.
- PIGEON, G (2011). *Computation of a thermal comfort index in the teb urban canopy model*. Rapp. tech. Technical Report for the VURCA Project, ANR-08-VULN-013-0x/VURCA.
- PIGEON, G, D. LEGAIND, P. DURAND et V. MASSON (2007). « Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France) ». In : *International Journal of Climatology* 27.14, p. 1969–1981.
- PIGEON, G, A LEMONSU, C SB GRIMMOND, P DURAND, O THOURON et V MASSON (2007). « Divergence of turbulent fluxes in the surface layer : case of a coastal city ». In : *Boundary-layer meteorology* 124.2, p. 269–290.
- PIGEON, G, K ZIBOUCHE, B BUENO, J LE BRAS et V MASSON (2014). « Improving the capabilities of the Town Energy Balance model with up-to-date building energy simulation algorithms : an application to a set of representative buildings in Paris ». In : *Energy and Buildings* 76, p. 1–14.
- PIGEON, Grégoire, Aude LEMONSU, Valéry MASSON et Julia HIDALGO (2008). « De l’observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville ». In : *La Météorologie* 62, p. 39–47.
- PIGEON, Grégoire, Mark A. MOSCICKI, James A. VOOGT et Valéry MASSON (2008). « Simulation of fall and winter surface energy balance over a dense urban area using the TEB scheme ». In : *Meteorology and Atmospheric Physics* 102.3-4, p. 159–171.
- PORSON, Aurore, Ian N. HARMAN, Sylvia I. BOHNENSTENGEL et Stephen E. BELCHER (2009). « How many facets are needed to represent the surface energy balance of an urban area ? » In : *Boundary-Layer Meteorology* 132.1, p. 107–128.
- QIN, Zhihao et A KARNIELI (1999). « Progress in the remote sensing of land surface temperature and ground emissivity using NOAA-AVHRR data ». In : *International journal of remote sensing* 20.12, p. 2367–2393.
- REDON, Emilie C, Aude LEMONSU, Valéry MASSON, Benjamin MORILLE et Marjorie MUSY (2017). « Implementation of street trees within the solar radiative exchange parameterization of TEB in SURFEX v8. 0 ». In : *Geoscientific Model Development* 10.1, p. 385.
- ROBINE, Jean-Marie, SL CHEUNG, S LE ROY, Herman VAN OYEN et François R HERRMANN (2007). « Report on excess mortality in Europe during summer 2003 ». In : *EU Community Action Programme for Public Health, Grant Agreement 2005114*, p. 28.
- ROBINETTE, Gary O (1972). *Plants, people, and environmental quality : A study of plants and their environmental functions*. Rapp. tech. Washington : D.C. : U.S. Department of the Interior, National Park Service.

- ROBITU, Mirela, Marjorie MUSY, Christian INARD et Dominique GROLEAU (2006). « Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate ». In : *Solar Energy* 80.4, p. 435–447.
- RYU, Young Hee, Elie BOU-ZEID, Zhi Hua WANG et James A. SMITH (2015). « Realistic Representation of Trees in an Urban Canopy Model ». In : *Boundary-Layer Meteorology*, p. 1–28.
- SALATA, Ferdinando, Iacopo GOLASI, Andrea de LIETO VOLLARO et Roberto de LIETO VOLLARO (2015). « How high albedo and traditional buildings' materials and vegetation affect the quality of urban microclimate. A case study ». In : *Energy and Buildings* 99, p. 32–49.
- SAVARD, Jean-Pierre L, Philippe CLERGEAU et Gwenaëlle MENNECHEZ (2000). « Biodiversity concepts and urban ecosystems ». In : *Landscape and urban planning* 48.3, p. 131–142.
- SCHAUSER, Inke, Sonja OTTO, Stefan SCHNEIDERBAUER, Alex HARVEY, Nikki HODGSON, Holger ROBRECHT, Daniel MORCHAIN, Joost-Jan SCHRANDER, Maria KHOVANSKAIA, Gamze CELIKYILMAZ-AYDEMIR et al. (2010). « Urban Regions : Vulnerabilities, Vulnerability Assessments by Indicators and Adaptation Options for Climate Change Impacts ». In : *European Topic Centre on Air and Climate Change (ETC/ACC) : Bilthoven*.
- SCHLEUSS, Uwe, Qinglan WU et Hans-Peter BLUME (1998). « Variability of soils in urban and periurban areas in Northern Germany ». In : *Catena* 33.3, p. 255–270.
- SEITY, Y., P. BROUSSEAU, S. MALARDEL, G. HELLO, P. BÉNARD, F. BOUTTIER, C. LAC et V. MASSON (2011). « The AROME-France Convective-Scale Operational Model ». In : *Monthly Weather Review* 139.3, p. 976–991.
- SEKABIRA, K, H ORYEMNDASH, G MUTUMBA, E KAKUDIDI, TA BASAMBA et al. (2011). « Heavy metal phytoremediation by *Commelina benghalensis* (L) and *Cynodon dactylon* (L) growing in urban stream sediments ». In : *International Journal of Plant Physiology and Biochemistry* 3.8, p. 133–142.
- SETO, Karen C, Michail FRAGKIAS, Burak GÜNERALP et Michael K REILLY (2011). « A meta-analysis of global urban land expansion ». In : *PloS one* 6.8, e23777.
- SHACKELL, Aileen et Robin WALTER (2012). *Greenspace Design for Health and Well-being : Practice Guide*. Forestry Commission.
- SHASHUA-BAR, Limor et Michael E 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 ». In : *Energy and Buildings* 31.3, p. 221–235.
- SHASHUA-BAR, Limor, David PEARLMUTTER et Evyatar ERELL (2009). « The cooling efficiency of urban landscape strategies in a hot dry climate ». In : *Landscape and Urban Planning* 92.3, p. 179–186.
- (2011). « The influence of trees and grass on outdoor thermal comfort in a hot-arid environment ». In : *International Journal of Climatology* 31.10, p. 1498–1506.

- SIMON, JC et G LEMAIRE (1987). « Tillering and leaf area index in grasses in the vegetative phase ». In : *Grass and Forage Science* 42.4, p. 373–380.
- SOUCH, CA et C SOUCH (1993). « The effect of trees on summertime below canopy urban climates : a case study Bloomington, Indiana ». In : *Journal of Arboriculture* 19.5, p. 303–312.
- STEFFEN, Will, Jacques GRINEVALD, Paul CRUTZEN et John MCNEILL (2011). « The Anthropocene : conceptual and historical perspectives ». In : *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A : Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 369.1938, p. 842–867.
- STEWART, Iain D (2011). « A systematic review and scientific critique of methodology in modern urban heat island literature ». In : *International Journal of Climatology* 31.2, p. 200–217.
- STREILING, S et A MATZARAKIS (2003). « Influence of single and small clusters of trees on the bioclimate of a city : a case study ». In : *Journal of Arboriculture* 29.6, p. 309–316.
- SULAIMAN, Firdaus Chek, Ramly HASAN et Ely Rouzee JAMALUDDIN (2016). « The Mature Trees in Recreation Areas and Its Role in Enhancing Quality of Life ». In : *Procedia-Social and Behavioral Sciences* 234, p. 289–298.
- SVIREJEVA-HOPKINS, Anastasia, Hans J SCHELLNHUBER et Valeri L POMAZ (2004). « Urbanised territories as a specific component of the Global Carbon Cycle ». In : *Ecological Modelling* 173.2, p. 295–312.
- TAHA, Haider, Hashem AKBARI et Arthur ROSENFELD (1991). « Heat island and oasis effects of vegetative canopies : micro-meteorological field-measurements ». In : *Theoretical and Applied Climatology* 44.2, p. 123–138.
- TAKÁCS, Ágnes, Márton KISS, Angela HOF, Eszter TANÁCS, Ágnes GULYÁS et Noémi KÁNTOR (2016). « Microclimate modification by urban shade trees—an integrated approach to aid ecosystem service based decision-making ». In : *Procedia Environmental Sciences* 32, p. 97–109.
- TAN, Jianguo, Youfei ZHENG, Xu TANG, Changyi GUO, Liping LI, Guixiang SONG, Xinrong ZHEN, Dong YUAN, Adam J KALKSTEIN, Furong LI et al. (2010). « The urban heat island and its impact on heat waves and human health in Shanghai ». In : *International journal of biometeorology* 54.1, p. 75–84.
- TARRAN, Jane (2009). « People and trees : providing benefits, overcoming impediments ». In : *D. Lawry., J. Gardner., & M. Bridget (Eds), Proceedings of the 10th National Street Tree Symposium*, p. 63–82.
- TAVARES, Richard, Isabelle CALMET et Sylvain DUPONT (2015). « Modelling the impact of green infrastructures on local microclimate within an idealized homogeneous urban canopy ». In : *ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment Modelling*, p. 1–6.
- TEBALDI, Claudia, Katharinec HAYHOE, Julie M ARBLASTER et Gerald A MEEHL (2006). « Going to the extremes ». In : *Climatic change* 79.3, p. 185–211.

- THORSSON, Sofia, Joacim ROCKLÖV, Janina KONARSKA, Fredrik LINDBERG, Björn HOLMER, Bénédicte DOUSSET et David RAYNER (2014). « Mean radiant temperature—A predictor of heat related mortality ». In : *Urban Climate* 10, p. 332–345.
- VAN DILLEN, Sonja ME, Sjerp de VRIES, Peter P GROENEWEGEN et Peter SPREEUWENBERG (2012). « Greenspace in urban neighbourhoods and residents' health : adding quality to quantity ». In : *Journal of Epidemiology and Community Health* 66.6, e8–e8.
- VITOUSEK, Peter M, John D ABER, Robert W HOWARTH, Gene E LIKENS, Pamela A MATSON, David W SCHINDLER, William H SCHLESINGER et David G TILMAN (1997). « Human alteration of the global nitrogen cycle : sources and consequences ». In : *Ecological applications* 7.3, p. 737–750.
- WANG, Yafei, Frank BAKKER, Rudolf DE GROOT et Heinrich WÖRTCHE (2014). « Effect of ecosystem services provided by urban green infrastructure on indoor environment : A literature review ». In : *Building and Environment* 77, p. 88–100.
- WANG, Zhi-Hua (2014). « Monte Carlo simulations of radiative heat exchange in a street canyon with trees ». In : *Solar Energy* 110.November 2014, p. 704–713.
- XUE, Fei et Xiaofeng LI (2017). « The impact of roadside trees on traffic released PM 10 in urban street canyon : Aerodynamic and deposition effects ». In : *Sustainable Cities and Society* 30, p. 195–204.
- YAMADA, T. (1982). « A numerical study of turbulent airflow in and above a forest canopy ». In : *Journal of the Meteorological Society of Japan* 60.1, p. 439–454.
- YOSHIDA, Atsumasa, Yumi KATAOKA, Kosuke NII et Shinich KINOSITA (2009). « Energy budget of isolated plant unit in urban space ». In : *ICUC7 - 7th International Conference on Urban Climat*. Citeseer.
- YOUNG, Duick T, Peter CLARK, Maggie HENDRY et Janet BARLOW (2015). « Modelling Radiative Exchange in a Vegetated Urban Street Canyon Model ». In : *ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment Modelling*, p. 1–5.
- ZÖLCH, Teresa, Johannes MADERSPACHER, Christine WAMSLER et Stephan PAULEIT (2016). « Using green infrastructure for urban climate-proofing : An evaluation of heat mitigation measures at the micro-scale ». In : *Urban Forestry & Urban Greening* 20, p. 305–316.

Abstract — Vegetation influences the urban climate, from road to city scale. Street trees implementation is an alternative technic to reduce the urban heat island and to improve the thermal comfort. They modify the radiative et energetic balances by intercepting and absorbing a part of the solar radiation, provide shade, increase the humidity with evapotranspiration, and alter the air flow in the urban canyons. The TEB model is one the rare urban climate models taking into account vegetation. It integrates parameterizations dedicated to low vegetation and green roofs. It can represent the small-scale interactions between mineral surfaces, vegetation and the atmosphere.

During this PhD thesis, a parameterization has been developed to model the radiative, energetic and dynamical effects of street and garden trees in urban spaces. An explicit tree canopy has been integrated into the urban canyon, above gardens but also streets. The ISBA vegetation scheme has been used, and included in TEB, to represent these vegetated entities (both low and high strata). The radiative computations of the TEB model have been improved in order to represent the shading and attenuation of radiation due to trees, as well as all the infra-red interactions between the urban elements. An evaluation of the radiative budget has been done thanks to a comparison with the high-resolution architectural model SOLENE, using numerous different urban canyons with several layouts of tree canopies. Then, the energy fluxes computed by ISBA have been dis-aggregated between contributions from high and low vegetation. Fluxes allocated to the trees have been redistributed on the vertical in order to alter the microclimate at realistic height, i.e. respecting the position of the tree crown. A specific drag force of trees on the airflow is simulated. An evaluation has been done on a real experimental site in a canyon-like courtyard with trees where several microclimatic data were collected. The results show an impressive improvement of the surface temperatures of walls and ground, air temperature and wind speed.

In the future, these implementations will allow to simulate more realistically several adaptation strategies using greening at city scale, and to evaluate their efficiency in terms of urban heat island mitigation, improvement of human comfort and building energy consumption.

Keywords : urban heat island; atmospheric modeling; urban microclimate; urban vegetation; street trees

Résumé — La végétation influence le climat urbain de l'échelle de la rue à l'échelle de la ville. Les arbres de rue, en particulier, constituent une technique alternative à l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain et à l'amélioration du confort thermique. Ils modifient les bilans radiatif et énergétique en interceptant et absorbant une partie du rayonnement solaire incident, créent de l'ombre, augmentent l'humidité relative de l'air par évapotranspiration et modifient également les écoulements d'air dans le canyon urbain. Le modèle TEB est un des rares modèles de climat urbain prenant en compte la végétation. Il intègre des paramétrisations dédiées à la végétation basse dans les canyons urbains et aux toitures végétalisées, et peut représenter les interactions de petite échelle entre les surfaces minéralisées, la végétation et l'atmosphère.

Dans le cadre de cette thèse, une paramétrisation a été implémentée dans TEB pour modéliser les aspects radiatifs, énergétiques et aérauliques liés à la présence d'arbres de rue dans l'espace urbain. Une canopée arborée explicite a été intégrée dans le canyon urbain au-dessus de la chaussée et des jardins. Le modèle ISBA est utilisé pour représenter les strates haute et basse de la végétation. Les calculs radiatifs du modèle TEB ont été modifiés afin de prendre en compte les effets d'ombrage et d'atténuation du rayonnement solaire et IR liés à la présence de cette canopée, et les interactions IR entre l'ensemble des éléments urbains du canyon. Une évaluation du bilan radiatif a été réalisée grâce à une comparaison avec le modèle architectural d'ensoleillement à haute résolution SOLENE, sur la base de simulations de canyons urbains idéalisés et pour différentes configurations d'arbres de rue. Les flux d'énergie calculés par ISBA selon l'approche *big leaf* ont ensuite été désagrégés entre les contributions de la végétation haute et basse. Les flux des arbres ont été redistribués sur la verticale de façon à modifier le microclimat à hauteur réaliste vis-à-vis de la position de la canopée arborée. Un effet de traînée lié à la présence de la canopée arborée a été intégré dans les équations de quantité de mouvement et d'énergie cinétique turbulente résolues par la paramétrisation de couche limite de surface de TEB pour le volume d'air au sein du canyon. Une évaluation en cas réel de cette nouvelle version du modèle a été conduite sur un site expérimental, à savoir une cour semi-fermée aménagée avec des arbres et où ont été collectées différentes variables microclimatiques. Les résultats montrent des améliorations considérables quant à la modélisation des températures de surface des murs et du sol, de la température de l'air sous la canopée arborée, et de la vitesse du vent.

Ces implémentations visent à simuler de façon plus réaliste différentes stratégies d'adaptation par la végétalisation et d'évaluer leurs performances sur l'atténuation de l'îlot de chaleur urbain, le confort thermique, et la consommation d'énergie des bâtiments.

Mots clés : îlot de chaleur urbain ; modélisation atmosphérique, micro-climat urbain ; végétation urbaine ; arbres de rue
