



HAL
open science

Etude des interactions entre le climat urbain et le CO₂ : modélisation des flux de CO₂ et application à l'échelle d'une ville

Marine Goret

► To cite this version:

Marine Goret. Etude des interactions entre le climat urbain et le CO₂ : modélisation des flux de CO₂ et application à l'échelle d'une ville. Sciences de la Terre. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2019. Français. NNT : 2019INPT0119 . tel-04169779

HAL Id: tel-04169779

<https://theses.hal.science/tel-04169779>

Submitted on 24 Jul 2023

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.



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (Toulouse INP)

Discipline ou spécialité :

Océan, atmosphère, climat

Présentée et soutenue par :

Mme MARINE GORET

le vendredi 6 décembre 2019

Titre :

Etude des interactions entre le climat urbain et le CO₂: modélisation des flux de CO₂ et application à l'échelle d'une ville

Ecole doctorale :

Sciences de l'Univers de l'Environnement et de l'Espace (SDU2E)

Unité de recherche :

Groupe d'étude de l'Atmosphère Météorologique (CNRM-GAME)

Directeur(s) de Thèse :

M. VALÉRY MASSON

MME MARIE-PIERRE MOINE

Rapporteurs :

M. GIANPAOLO BALSAMO, ECMWF READING

Mme IRENE XUEREF-REMY, AIX-MARSEILLE UNIVERSITE

Membre(s) du jury :

M. GIANPAOLO BALSAMO, ECMWF READING, Président

M. GEORGES NAJJAR, UNIVERSITE STRASBOURG, Membre

Mme MARIE-PIERRE MOINE, CERFACS, Membre

M. PATRICK STELLA, AGROPARISTECH, Membre

M. ROBERT SCHOETTER, METEO FRANCE TOULOUSE, Invité

M. VALÉRY MASSON, METEO FRANCE TOULOUSE, Membre

Remerciements

Ça y est, c'est la fin. La fin de la thèse. La fin de trois années de d'expédition au pays de la recherche. Ça n'aura pas été un long fleuve tranquille, j'ai connu des moments de doutes et de déprimés, mais si s'était à refaire, je crois que je recommencerais.

Je recommencerais par curiosité, parce que je crois que la meilleure manière de savoir si quelque chose nous plaît, c'est de tester ! Je recommencerais parce qu'une thèse c'est une opportunité unique de vivre pleins d'expériences extraordinaires. Une thèse c'est aussi des rencontres, et je tiens, ici, à remercier toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à la réussite de ma thèse.

Je commencerai la liste de remerciements par les toutes premières personnes qui m'ont accueillie lors de mon arrivée au CNRM, en pleins mois d'août. Arrivée que l'on pourrait comparer à un parachutage en plein désert ;-). Merci à Quentin, Maxime et Jeanine qui m'ont aidé à trouver une première oasis : mon bureau avec un PC linux ! Une fois connectée à ma messagerie, j'y trouvai un message de mon directeur de thèse, premier indice pour démarrer mon périple :

Bonjour Marine,

Si tu lis ce message, c'est que ton installation à TURBAU s'est bien passée.

Bienvenue dans l'équipe.

D'ici à ce que je revienne, il faudrait que tu fasses un peu de bibliographie sur le climat urbain en général, et sur les émissions et flux de CO2 en particulier. Tu peux avoir accès à la bibliothèque scientifique du CNRS (accès à web of science par exemple) : <http://biblioplanets.inist.fr/>

Comme base de départ (plus simple que de fouiller tout web of science ou science direct au hasard) : Tu peux explorer la biblio dans la newsletter de l'International Association for Urban Climate (IAUC). Il y a une page de référence biblio à chaque fois faite par Matthias Demuzere. <http://www.urban-climate.org/>

Rappel: le urban flux network : <http://ibis.geog.ubc.ca/urbanflux/>

Valéry

PS: Je te donne mes légumes cette semaine (mardi 16h30). J'espère que ce message t'arrivera à temps. Il s'autodétruira dans 30sec.

Et voilà, s'était parti pour trois ans ! Trois ans pendant lesquelles j'ai pu, bien sûr, compter sur l'aide de mon directeur de thèse Valéry Masson et de ma co-directrice Marie-Pierre Moine.

Valéry, dans cette histoire, tu étais un peu le pilote dans son avion, pas toujours facile de te saisir au vol pour solliciter ton aide :-!. Tu as suivi cette thèse de loin, depuis les airs, en faisant juste une petite escale dans les moments les plus critiques pour me filer un coup de main :-). Cet encadrement a du bon et du mauvais. Je me suis parfois sentie seule, abandonnée en plein désert, mais en même temps, j'ai pu profiter d'une grande liberté. J'ai eu le loisir de tester différents chemins, de suivre de mauvaises pistes (dont tu n'as jamais entendu parler), de me perdre, et parfois, de découvrir des sentiers qui m'ont mené vers de belles découvertes (cela je te les ai montrés bien sûr :-)!). Cette thèse, c'est la mienne, tu m'as indiqué la direction, mais je suis fière de pouvoir dire que c'est moi qui ai choisi le chemin à suivre. Merci pour la confiance que tu as su m'accorder, merci aussi pour les (trop rares) discussions scientifiques, toujours très instructives. De cette aventure je retiendrai ta gentillesse, ton optimisme, ton sens physique hors du commun et ton ouverture d'esprit qui te permet de t'engager dans des travaux multidisciplinaire dont l'originalité n'est plus à démontrer.

Marie-Pierre, toi, tu as plutôt été en mode souterrain : tu sortais la tête de temps en temps pour voir où j'en étais. Tu as longtemps attendu que la plateforme CLUE soit au cœur de mon travail, ça y est, c'est chose faite maintenant que j'ai terminé ma thèse;-)! Merci à toi de m'avoir fait découvrir cette plateforme qui allie climat urbain et modélisation numérique, je ne pouvais rêver mieux ! Un grand merci pour tes gribouillis qui ont grandement amélioré la qualité de mon manuscrit. Merci aussi pour les commentaires (et les dessins) humoristiques qui m'ont aidée à garder le sourire lors de la correction du manuscrit.

William, un immense merci pour le traitement, retraitement et re-retraitement des données de flux de CO₂. Sans ton travail, la thèse n'aurait pas été la même. Merci d'avoir patiemment répondu à mes (nombreuses) questions sur la complexe thématique du traitement des flux de CO₂.

Thierry, merci pour le support OpenPALM. Tu as toujours su trouver une réponse à mes questions, même les plus originales, et même lorsqu'il a fallu redévelopper du code !

PA, tu as été un co-bureau formidable. J'étais heureuse que l'on puisse partager, au cours de nos thèses respectives, nos doutes, nos difficultés mais aussi nos réussites ! Merci pour tes réflexions (plus ou moins philosophiques) et pour ta compagnie pendant la pause de 16h, pause essentielle dans mon rythme de travail. J'ai eu bien du mal à trouver un autre compagnon de pause après ton départ :-(. Mention spéciale pour les katas, *mae gueri* et autres démonstrations de karaté ! Encore bravo pour ta superbe soutenance de thèse, et je te souhaite de continuer à t'épanouir en modélisant tes éoliennes, avec passion. Je compte sur toi pour produire l'électricité verte de demain !

Tim, tu as eu la difficile tâche d'être un co-bureau aussi formidable que PA. Je dois reconnaître que tu as relevé le défi avec brio, bien que je n'ai jamais vraiment réussi à te faire faire la pause à 16h (fin, c'est ce que tu crois, j'avais fini par trouver la combine : faire la pause dans le bureau, sans te dire officiellement qu'on faisait

une pause!). Courage pour les IBM, tu vas y arriver! Gros bisous à tes deux chats. J'aime autant la mousse au chocolat que tu aimes le fromage...

Robert, merci pour ton aide, merci d'avoir répondu à chacune de mes questions. Je pense que j'ai (enfin) compris comment utiliser les données MAPUCE. Je vais pouvoir exporter ces connaissances de l'autre côté de la passerelle :-). J'espère qu'on continuera à collaborer, je compte sur toi pour être mon fournisseur officiel de données urbaines;-)!

Aude, merci pour ta gentillesse. Merci beaucoup pour tes précieux conseils d'amélioration de mes présentations orales. Ils m'ont permis de prendre du recul et de mieux mettre en valeur mon travail. Une fois que tu es passée par là, tout paraît plus clair! Bravo pour la cohésion que tu apportes dans l'équipe VILLE.

Cécile, merci pour les conseils et pour l'aide que tu m'as proposée lors du sprint final :-). Merci d'avoir modifié ton emploi du temps rien que pour assister à ma thèse! Et à bientôt sur un tapis de pilâtes;-).

Merci à tous les (ex)-thésards/CDD de l'équipe, pour le dynamisme et la bonne ambiance que vous apportez. Merci Guillaume de m'avoir permis de participer à une campagne de mesure :-). Merci Benjamin d'avoir partagé les photos de ton voyage en Chine. Les cris des pandas, s'était mémorable! Merci Shirley pour ton énergie et ton sens de l'organisation, et tes précieux conseils culinaires (des conseils de fabrication du caramel au beurre salé, ça vaut de l'or!). Merci Emilie pour ta gentillesse. Merci Thomas pour tes précieuses remarques pour la soutenance :-). Merci Eva de m'avoir fait découvrir ton Aveyron natal, grâce à toi, j'ai pu (enfin) goûter le fameux gâteau à la broche :-). Erwan, c'est avec plaisir que je te cède mon bureau, et je suis sûre que tu vas faire une thèse magnifique, il y a des bonnes ondes qui flottent dans ce bureau...

Merci à tous les membres des équipes SURFACE et VEGEO sans qui les pauses cafés ne seraient pas les mêmes!

Merci au support administratif qui fait toujours un travail irréprochable, et ce malgré un contexte compliqué. Merci en particulier à toi Régine pour ta grande gentillesse et pour la crista-Régine qui dope nos plantes vertes :-). Merci Manon pour ton efficacité! Ouria, merci pour la gestion des inscriptions que tu supervises d'une main de maître. Merci de défendre les droits des doctorants, et merci pour les délicieux biscuits...

Merci également au support informatique. Merci pour votre disponibilité, votre efficacité et votre gentillesse. Vous avez toujours eu une réponse à mes problèmes, et vous avez même le pouvoir de retrouver les dossiers perdus!!!

Merci à ma nouvelle équipe Datasciences et Consultance. En particulier, merci Béatrice et Ludovic de vous être montré (très) patients, et de m'avoir laissé finir ma thèse avant de prendre mon nouveau poste!

Un immense merci à l'ensemble de mon jury de thèse. Merci de vous être déplacés et d'avoir surmonté la grève pour assister à ma soutenance! Gianpaolo, merci pour ta gentillesse, merci d'avoir accepté d'être rapporteur de la thèse et d'avoir assuré la présidence du jury. Irène, merci pour ton rapport ultra-détaillé et d'une grande rigueur. Merci de t'être accrochée pour suivre la soutenance, malgré les difficultés techniques (pas de partage d'écran, et questions au téléphone!). Patrick,

merci d'avoir suivi mon travail, tout au long de ces trois ans. Merci pour les pistes d'explications aux biais d'ISBA (j'ai pas encore eu le temps d'y réfléchir, mais je garde ça dans un coin de ma tête). Georges, un immense merci de t'être déplacé jusqu'à Toulouse, tenter de prendre quatre avions en temps de grève sur une seule journée, chapeau! Merci pour l'intérêt que tu portes à mes travaux. On sera sûrement amenés à se revoir pour étudier les îlots de chaleur sur Strasbourg. À très vite!

Merci à mes ami.e.s qui m'ont aidée à garder le moral dans les périodes difficiles. Merci à Gaëlle et Marion pour les repas/pique-nique/boycotte du restaurant administratif. Quel plaisir de manger du *fait maison* en profitant du soleil :-)! Gwenn, merci pour les soirées filles et à bientôt pour un cours de cuisine dispensé par une docteure en météo (je ne suis pas sûre que ça améliore la qualité des cours :-!). Alex, nos chemins se croisent rarement, mais c'est toujours un plaisir de discuter avec toi et/ou de faire du shopping!

Oliver, merci pour les cours de beach. Ils m'ont permis de garder la tête hors de l'eau (mais pas hors du sable!) lors de la rédaction du manuscrit. J'ai pu profiter du soleil estival, malgré cette période de travail intense, et faire le plein de bonne humeur et d'interactions sociales, et ce à une minute en vélo de mon bureau!

Lionel, merci pour les cours de karaté (désolé PA, mais sur ce coup, tu t'es fait dépasser). J'y ai trouvé un but à atteindre et une source de motivation quand le but de ma thèse était caché derrière une épaisse couche de brouillard. Merci pour ta patience, ta bienveillance et tes nombreux conseils. Ta passion est contagieuse et ton enseignement d'une grande qualité technique et pédagogique. Merci pour tout.

Papa et Maman, merci pour votre soutien. Un grand merci pour vous êtes magnifiquement occupés du pot de thèse (et merci à tous ceux qui ont rapporté quelque chose, c'était délicieux :-P). Crêpes maisons et cidres bretons, l'essentiel était là! Et merci d'avoir fait le déplacement jusqu'à Toulouse rien que pour moi! J'espère que cette soutenance de thèse a réparé l'absence de remise de diplôme digne de ce nom pour mon diplôme d'ingé. En tout cas, je crois que j'ai gagné le droit de me faire appeler "docteure météo" pour un petit bout de temps...

Gaëlle, m'a petite sœur préférée (et adorée aussi ne t'inquiète pas;-)). Tu as gagné la médaille de la plus téméraire pour assister à la soutenance de ta sœur : ne pas faire ton stage à l'étranger, et prendre un covoit, qui t'obligeait à te lever ultra tôt :-(; tout ça pour venir à Toulouse malgré deux avions annulés coup sur coup! Et le tout avec trois pralulines dans tes bagages :-P. Un grand merci pour ta présence. Merci de m'avoir supportée pendant ces longues années d'études, et en particulier pendant les années prépa¹. Bon courage pour les six derniers mois de ta vie étudiante, j'espère que tu trouveras un joli stage, en Australie ou ailleurs. Gros bisous.

De gros bisous et un immense merci à toute la famille (cousins, cousines, oncles, tantes et grands-parents). Merci à tous pour votre bienveillance et vos encouragements.

1. Euh d'ailleurs, j'ai mis un peu de bazar dans ta chambre la dernière que je suis passée chez les parents, tu n'oubliera pas de ranger;-).

Saïd, merci pour ton soutien sans faille tout au long de ces trois ans de thèse. Merci d'avoir toujours été là pour me remonter le moral dans les moments les plus difficiles (et tu es bien placé pour savoir qu'il y en a eu). Merci de m'avoir fait bénéficier de ton expérience de tout jeune docteur pour m'éviter de tomber dans (certains) pièges. Je n'aurai probablement jamais fait cette thèse si tu ne m'y avais pas incitée alors merci de m'avoir poussée à partir à la découverte du monde de la recherche. Merci pour les cadeaux. Merci pour ton sourire.

Petit chat, merci pour ta présence à mes côtés, merci pour le réconfort que tu m'apportes. Je t'aime.

Résumé

Climat et CO₂ sont intimement liés. Le lien entre les deux et si bien établi que les objectifs de limitation du réchauffement climatique s'expriment en quantité maximale d'équivalent CO₂ que l'on s'autorise à émettre.

La quantité de CO₂ présente dans l'atmosphère à un instant donné est le résultat d'échanges et d'équilibres complexes entre l'atmosphère et la surface terrestre. Cette dernière est composée non seulement des océans, de la végétation et des sols naturels mais également des villes.

Les échanges entre l'atmosphère et les surfaces urbaines proviennent majoritairement de quatre contributeurs : les émissions des bâtiments, le trafic routier, la respiration humaine et la végétation urbaine. Deux de ces contributeurs dépendent du climat : les bâtiments et la végétation. En effet, aux hautes et aux moyennes latitudes, les émissions des bâtiments sont fortement liées au chauffage, et fluctuent donc avec la température extérieure. La végétation quant à elle croît et s'épanouit plus ou moins vite en fonction des conditions météo-climatiques et plus particulièrement de la température, des précipitations et de l'ensoleillement. Le CO₂ émit par la ville est ensuite transporté à travers l'atmosphère suivant la circulation atmosphérique locale qui est le résultat de la situation synoptique modifiée par la présence de la ville.

Il existe donc, à l'échelle de la ville, des interactions fortes entre climat et CO₂ : le bilan carbone de la ville dépend du climat local, et le transport du CO₂ à travers l'atmosphère est influencé par la circulation atmosphérique induite par la ville.

Cette thèse vise à étudier ces interactions. Pour cela, on a ajouté la modélisation des échanges de CO₂ entre les surfaces urbaines et l'atmosphère dans le modèle de micro-climat urbain TEB. Cela a permis de vérifier que les processus physiques qui relient les émissions/captations de CO₂ en ville et le climat urbain étaient bien identifiés et compris. Le modèle a été évalué sur deux cas d'étude permettant chacun d'évaluer plus spécifiquement l'un des contributeurs aux échanges de CO₂ ville/atmosphère qui soit météo-sensible : les bâtiments sur le site de Toulouse, et la végétation sur le site de Kumpula (Finlande). Ces deux sites ont prouvé la capacité du modèle à reproduire les échanges de CO₂ entre les surfaces urbaines et l'atmosphère ainsi que leurs cycles journaliers et saisonniers. Le site de Toulouse a souligné l'importance de connaître finement le comportement énergétique des habitants pour simuler les émissions de CO₂ des bâtiments. Celui de Kumpula a démontré la capacité du modèle ISBA, conçu pour décrire les interactions entre la végétation en milieu non urbain et l'atmosphère, à décrire les échanges de CO₂ entre la végétation urbaine et l'atmosphère.

Le modèle, ainsi validé, a été utilisé pour réaliser des simulations d'émissions de CO₂ par les bâtiments à l'échelle de l'ensemble de l'agglomération urbaine de Toulouse. Ces simulations ont mis à nouveau en évidence l'intérêt de la bonne connaissance des comportements énergétique des habitants : sur notre cas d'étude (quatre jours en hiver), l'abaissement de 2 °C de la température de consigne du chauffage la nuit réduit de 33% les émissions de CO₂. Lors de ces simulations, le transport du CO₂ émis par la ville à travers l'atmosphère a également été suivi. On a ainsi mis en évidence que, malgré une situation météorologique de vent calme, le panache de CO₂ créé par la ville se dissipe rapidement (moins d'une journée), ce qui limite l'augmentation de la concentration en CO₂ au-dessus de la ville. Des simulations sur d'autres villes sont nécessaires pour savoir si ce résultat se généralise.

Lors de cette thèse, on a étudié les interactions climat/CO₂ à l'échelle d'une ville. Par la suite, il serait intéressant de réaliser des simulations en climat futur ou bien en mode couplé avec des modèles de climat afin d'étudier les rétroactions entre les liens climat/CO₂ aux échelles locale et globale.

Abstract

Climate and CO₂ are closely tied. The link between them is so well established that the objectives for global warming mitigation are expressed in terms of the maximum amount of CO₂ equivalent that can be emitted.

The amount of CO₂ present in the atmosphere at a given time is the result of complex exchanges and equilibriums between the atmosphere and the earth's surface. The latter is composed not only of oceans, vegetation and natural soils, but also cities.

Exchanges between the atmosphere and urban surfaces come mainly from four contributors : building emissions, road traffic, human respiration and urban vegetation. Two of these contributors depend on climate : buildings and vegetation. Buildings emissions, at least at high and medium latitudes, are strongly related to space heating, and therefore fluctuate with the outside temperature. As for the vegetation, its growth and open-up speed depends on the weather and climate conditions and more particularly on temperature, precipitation and solar radiation. The CO₂ emitted by the city is then transported through the atmosphere by the local atmospheric circulation which is the result of the synoptic situation modified by the city's influence.

Therefore there are strong interactions between climate and CO₂ at the city scale : the city's carbon footprint depends on the local climate, and the transport of CO₂ through the atmosphere is influenced by the atmospheric circulation induced by the city.

The aim of this thesis is to study these interactions. That's why, the modeling of CO₂ exchanges between urban surfaces and the atmosphere has been added to the urban micro-climate model TEB. This allows to verify that the physical processes that link CO₂ emissions/uptakes in the city and the urban climate are well identified and understood. The model is evaluated on two case studies each of which specifically assessed one of the contributors to city/atmosphere CO₂ exchanges that is weather-sensitive : the buildings on the Toulouse site (France), and the vegetation on the Kumpula site (Finland). These two sites demonstrate the model's ability to reproduce CO₂ exchanges between urban surfaces and the atmosphere as well as their daily and seasonal cycles. The Toulouse site underlines the importance of a detailed knowledge of the inhabitants' energy behaviour in order to simulate the CO₂ emissions of buildings. Kumpula site demonstrates the ability of the ISBA model, designed to describe the interactions between non-urban vegetation and the atmosphere, to describe the CO₂ exchanges between urban vegetation and the atmosphere.

The model, thus validated, is used to carry our simulations of CO₂ emissions from buildings on the scale of the entire urban agglomeration of Toulouse. These simulations once again highlighted the necessity of a good knowledge of the inhabitant's energy behaviors : on our case study (four days in winter), the 2 °C reduction of the night-time space heating setpoint temperature reduces CO₂ emissions by 33%. During these simulations, the transport of CO₂ emitted by the city through the atmosphere is also monitored. This shows that, despite a calm wind situation, the CO₂ plume created by the city dissipates rapidly (less than a day), limiting the increase in CO₂ concentration over the city. Simulations on other cities are needed to determine if this result can be generalized.

During this thesis, we studied climate/CO₂ interactions at the city scale. In the future, it would be interesting to carry out simulations in future climate or in coupled mode with climate models in order to study the feedback between local and global climate/CO₂ links.

Introduction

Depuis la seconde moitié du xx^e siècle, on observe un réchauffement de la température moyenne à la surface de la Terre. Ainsi, selon un récent rapport de l'organisation mondiale de la météorologie [WMO, 2018], les vingt années les plus chaudes jamais enregistrées ont été mesurées au cours des vingt-deux dernières années. Le réchauffement s'est encore accéléré ces cinq dernières années puisqu'avec une température moyenne supérieure de 0,2 °C à la période 2011-2015, la période 2015-2019 devrait être la plus chaude jamais mesurée.

Le réchauffement de la surface terrestre s'observe **également au niveau national**. En France, l'année 2018 est la plus chaude enregistrée par Météo-France depuis le début du xx^e siècle. Plus récemment, l'été dernier (2019), deux épisodes de canicules exceptionnels ont eu lieu, du 25 au 30 juin et du 21 au 26 juillet. Lors de la canicule de juillet, la barre des 40° C à été dépassée dans de nombreuses villes du pays (Paris, Lille, Nancy, Rennes ou encore Bordeaux), et plusieurs records de température ont été battus.

Ce réchauffement, inédit dans l'histoire de la Terre par sa rapidité, entraîne **des changements sans précédents** : montée du niveau de la mer, multiplication des épisodes de vagues de chaleur, fonte des glaciers, augmentation des épisodes de fortes précipitations... Ces changements ont **des conséquences néfastes aussi bien pour les milieux naturels que pour les populations humaines** [GIEC, 2018].

Les causes du réchauffement climatique sont connues. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) estime qu'**il est extrêmement probable que l'élévation des températures de surface de la Terre, observée depuis le milieu du xx^e siècle, soit attribuable en totalité aux activités humaines** [IPCC, 2014]. En effet, depuis la révolution industrielle au milieu du XIX^e siècle, la quantité de gaz à effet de serre d'origine anthropique présente dans l'atmosphère n'a cessé d'augmenter, si bien que les concentrations dans l'atmosphère des principaux gaz à effet de serre (CO₂, CH₄ et N₂O) atteignent aujourd'hui des niveaux sans précédents, depuis au moins 800 000 ans.

Le CO₂ est le principal gaz à effet de serre d'origine anthropique, et l'augmentation de sa concentration dans l'atmosphère est aujourd'hui identifiée comme étant la première cause du réchauffement climatique. Par conséquent, si l'humanité veut limiter ce dernier ainsi que les conséquences néfastes qui en découlent, elle doit réduire ses émissions de CO₂.

Les villes ont un rôle important à jouer dans la réduction de ces émissions puisqu'elles **sont responsables d'environ 70% des émissions de CO₂ d'origine anthropique** [Seto *et al.*, 2014]. Cette place prépondérante des villes dans les émissions de CO₂ peut sembler surprenante au regard de la surface qu'elles occupent (moins de 3% des terres immergées, Schneider *et al.* [2009]), mais, elle s'explique par

la part important de la population mondiale qui vit en ville : plus de 55% [United Nations, 2019].

Les émissions de CO₂ en ville proviennent majoritairement des bâtiments, du trafic routier, de la respiration humaine, de la respiration des sols naturels et de la végétation, des industries et des centrales thermiques. Ces émissions sont, pour une partie, **compensées par la photosynthèse des plantes.** La contribution de ces différents éléments au bilan carbone des villes **dépend des conditions météo-climatique.** En effet, pour effectuer la photosynthèse, les plantes ont besoin d'eau et de soleil. Lorsque ces ressources se font rares, l'activité photo-synthétique est réduite. La température extérieure a également un rôle crucial dans le bilan carbone des villes. La respiration des végétaux et des sols naturels augmente avec la température. De plus, une grande partie des émissions de CO₂ associées aux bâtiments est due à la régulation thermique à l'intérieur des bâtiments et dépend donc fortement de la température extérieure. Aux hautes et aux moyennes latitudes les émissions proviennent des systèmes de chauffage dont l'activité augmente avec la baisse des températures extérieures. Aux basses latitudes, la régulation thermique consiste en l'utilisation de systèmes de climatisation. Ceux-ci n'émettent généralement pas de CO₂ localement car ils fonctionnent à l'électricité. Cependant, la plupart du temps, l'électricité utilisée provient de la combustion d'énergies fossiles et a donc entraîné l'émissions de CO₂ lors de sa production. Dans les années à venir, sous l'effet du réchauffement climatique, une hausse des émissions de CO₂ associées aux systèmes de climatisation et une baisse de celles associées aux systèmes de chauffage est à prévoir. Les émissions de CO₂ par le trafic routier sont également, dans une moindre mesure, affectée par les conditions météo-climatique puisque l'utilisation de la climatisation dans les véhicules peut entraîner une surconsommation de carburant de l'ordre de 20 à 30%.

Les éléments présentés ci-dessus permettent de dessiner **une boucle de rétroaction entre le climat et les émissions de CO₂ en ville** à l'échelle globale. En effet, le paragraphe précédent montre que la quantité de CO₂ émise par les villes dépend du climat local (température, précipitations, ensoleillement). Or, ces émissions de CO₂ sont rejetées dans l'atmosphère où elles participent à l'augmentation de la concentration en gaz à effet de serre et donc à la modification du climat à l'échelle planétaire (réchauffement climatique). Ce dernier influence à son tour le climat local des villes.

Aujourd'hui, les modèles climatiques prennent en compte les interactions entre le climat et les émissions ou captation de CO₂ par la végétation et les océans via des systèmes de modélisation couplées. En revanche, les liens entre le climat et les émissions de CO₂ par les villes ne sont que partiellement considérés : la quantité de carbone rejetée par les villes est estimée à partir de cadastres d'émissions actuels et de projections d'évolution de la quantité d'émissions. Ainsi, la rétroaction du climat sur le niveau d'émission des villes n'est pas directement pris en compte. La prise en compte de cette dernière constitue une piste intéressante pour améliorer les projections du climat futur. **Pour prendre en compte cette rétroaction, il faut, en premier lieu, disposer d'un modèle de climat qui soit capable de simuler les émissions de CO₂ des surfaces urbaines, en fonction des conditions météo-climatique.**

INTRODUCTION

Cette thèse cherche à répondre à ce besoin. Les travaux s'articulent de la manière suivante : les deux premiers Chapitres présentent l'état de l'art des connaissances sur respectivement, la météorologie urbaine et le CO₂ en ville. Le Chapitre 3 décrit l'ajout de la modélisation des échanges de CO₂ entre les surfaces urbaines et l'atmosphère dans le modèle de micro-climat urbain TEB. Le modèle est ensuite comparé aux observations sur deux cas d'études, permettant chacun d'évaluer plus particulièrement le modèle sur l'un des contributeurs très fortement météo-sensible des échanges de CO₂ ville/atmosphère. À savoir, les bâtiments pour le Chapitre 4 et la végétation pour le Chapitre 5. Le dernier Chapitre propose une première utilisation du modèle à l'échelle d'une ville entière. On y étudie l'impact du raffinement de la modélisation des bâtiments sur les émissions de CO₂ associées à ces derniers ainsi que le transport des ces émissions au-dessus de la ville et de la campagne environnante. Les conclusions et perspectives de la thèse sont présentées en fin de manuscrit.

Sommaire

Introduction	xi
1 Météorologie urbaine	1
1.1 La couche limite	4
1.1.1 La couche de surface	4
1.1.2 Au dessus de la couche limite de surface	4
1.2 Bilan d'énergie de la surface	6
1.3 Particularités du micro-climat urbain	7
1.3.1 L'îlot de chaleur urbain	7
1.3.2 Couverture nuageuse et précipitation	10
1.4 Approches d'étude du climat urbain	11
1.4.1 Observations	11
1.4.2 Modélisation	12
1.5 Discussion	14
2 Le CO₂ en ville	17
2.1 Sources et puits de CO ₂ en ville	20
2.1.1 Trafic routier	20
2.1.2 Bâtiments	21
2.1.3 Végétation	21
2.1.4 Respiration humaine	21
2.1.5 Autres sources	21
2.2 Concentration ou flux de CO ₂	21
2.2.1 Concentration de CO ₂	21
2.2.2 Flux de CO ₂	23
2.3 Méthodes d'estimation des flux de CO ₂	25
2.3.1 Inventaire	25
2.3.2 Modélisation inverse	27
2.3.3 Mesures directes	28
2.3.4 Méthodes de décomposition des mesures directes	28
2.3.5 Modélisation numérique	29
2.4 Méthode de la covariance des turbulences	30
2.4.1 Principe et hypothèses	30
2.4.2 Instrumentation	31
2.4.3 Erreurs de mesure et corrections associées	32
2.4.4 Qualité de la mesure	33
2.4.5 Représentativité de la mesure	34

2.5	Discussion	39
2.6	Objectifs de la thèse	40
3	Modélisation des flux de CO₂	43
3.1	Stratégie de modélisation	46
3.2	Modélisation des flux de CO ₂	46
3.2.1	Bâtiments	46
3.2.2	Végétation	49
3.2.3	Trafic	53
3.2.4	Respiration humaine	53
3.3	Discussion	54
4	CAPITOUL : évaluation des flux de CO₂	55
4.1	Description du site et des données	58
4.1.1	Mesure des flux de CO ₂	59
4.1.2	Préparation des données d'entrée pour la simulation TEB	66
4.2	Évaluation de TEB	72
4.2.1	Sensibilité des flux de CO ₂ associés aux bâtiments	72
4.2.2	Évaluation du modèle avec la configuration de référence	75
4.2.3	Conclusion	82
4.3	Estimation du CO ₂ émis par les bâtiments	83
4.3.1	Flux provenant des perches	83
4.3.2	Méthode de décomposition des flux de CO ₂	85
4.3.3	Qualité de la reconstruction du cycle sans chauffage	90
4.3.4	Décomposition des flux de CO ₂ : isolement du chauffage	90
4.3.5	Conclusion	92
4.3.6	Discussion	92
4.4	Discussion	93
5	Kumpula : évaluation de la végétation	95
5.1	Description du site et des données	98
5.1.1	Mesure des flux de CO ₂	98
5.1.2	Préparation des données pour TEB	99
5.1.3	Stratégie de modélisation	106
5.2	Méthodes de modélisation de la végétation urbaine	106
5.2.1	Influence des patches de végétation	108
5.2.2	Influence de la version d'ISBA	115
5.2.3	Influence de la nature du lien TEB/ISBA	117
5.2.4	Conclusion	120
5.3	Évaluation du modèle sur le site de Kumpula	121
5.3.1	Flux de chaleur	121
5.3.2	Flux de CO ₂	122
5.4	Discussion	126

6 Simulations de panaches de CO₂	129
6.1 Stratégie de modélisation	132
6.1.1 Présentation de l'étude	132
6.1.2 La plateforme CLimat Urbain Etude (CLUE)	132
6.1.3 Adaptation de la plateforme CLUE	135
6.2 Description du site d'étude et des données	136
6.2.1 Zone d'étude	136
6.2.2 Description de l'occupation des sols	137
6.2.3 Situation météorologique	141
6.3 Étude du panache de CO ₂ associé aux bâtiments	147
6.3.1 Présentation de la situation météorologique	147
6.3.2 Évolution du panache de CO ₂ à l'échelle de la ville	150
6.3.3 Comparaison des configurations sur des points d'intérêt	159
6.4 Discussion	160
Conclusion et perspectives	163
A Caractéristiques des types de végétation dans TEB-veg	167
B Paramètres pour la simulation du cas CAPITOUL	169
C Article publié	171
Bibliographie	193
Liste des sigles	203

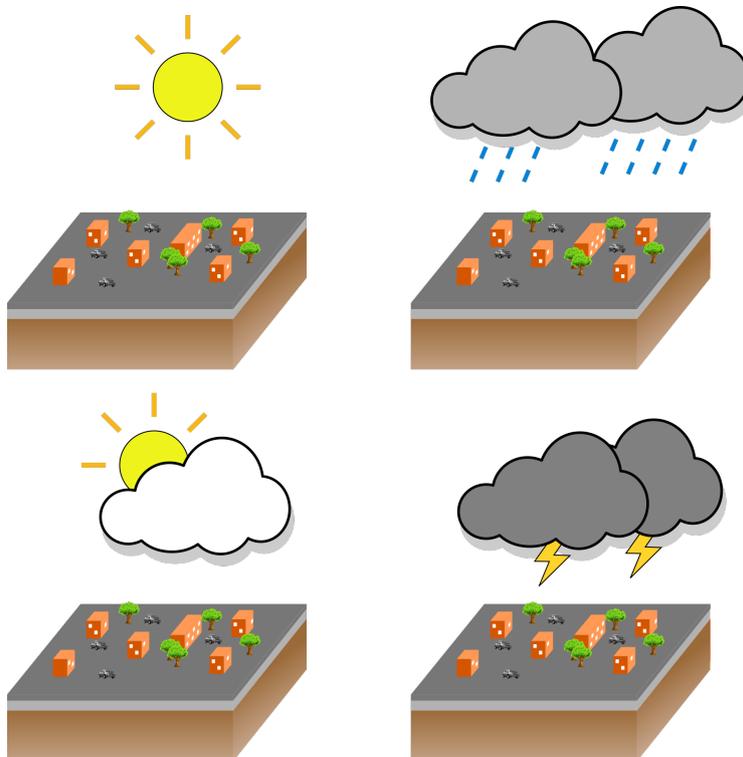
On ne comprend pas ce qu'est la science de la chaussure, quand on ne comprend pas ce qu'est la science.

Platon

1

Météorologie urbaine

Ce premier chapitre a pour but de poser les bases de météorologie urbaine nécessaires à la compréhension du manuscrit. La Section 1.1 donne la définition des différentes couches de l'atmosphère présentes au-dessus de la ville. La Section 1.2 explique le bilan d'énergie de la surface. Les spécificités du micro-climat urbain sont décrites en Section 1.3 et les deux principales approches d'études du climat urbain (observation et modélisation) sont exposées en Section 1.4.



Sommaire

1.1	La couche limite	4
1.1.1	La couche de surface	4
1.1.2	Au dessus de la couche limite de surface	4
1.2	Bilan d'énergie de la surface	6
1.3	Particularités du micro-climat urbain	7
1.3.1	L'îlot de chaleur urbain	7
1.3.2	Couverture nuageuse et précipitation	10
1.4	Approches d'étude du climat urbain	11
1.4.1	Observations	11
1.4.2	Modélisation	12
1.4.2.1	Les types de modèles	12
1.4.2.2	Conditions aux limites des modèles	13
1.4.2.3	Le modèle TEB	14
1.5	Discussion	14

1.1 La couche limite

La **couche limite atmosphérique** (CLA) est la couche de l'atmosphère directement influencée par la surface terrestre. Son épaisseur varie au cours de la journée. C'est la nuit qu'elle est la plus fine : elle mesure alors quelques centaines de mètres. Au matin, sous l'effet du rayonnement solaire, le sol se réchauffe. Par convection la chaleur se transmet à l'air situé juste au-dessus du sol ce qui crée de l'instabilité : l'air chaud, plus léger, s'élève, donnant naissance à des mouvements ascendants. Ces ascendances prennent de l'importance au cours de la journée : elles brassent une couche d'air de plus en plus grande, augmentant progressivement la hauteur de la CLA jusqu'à des hauteurs de l'ordre du kilomètre. Au coucher du soleil, la source de chaleur disparaît, les ascendances perdent rapidement de leur intensité et la hauteur de la couche limite diminue.

Au dessus des villes, la couche limite atmosphérique est appelée **couche limite urbaine** (CLU). L'épaisseur de la CLU varie à peu près de la même manière que celle d'une couche limite classique. Cependant, à la différence de la campagne, en ville, il persiste des sources de chaleur secondaires une fois le soleil couché. On peut par exemple citer le déstockage de la chaleur accumulée pendant la journée par les matériaux urbains ou encore la chaleur produite par le trafic routier. Ces sources secondaires entraînent une diminution plus progressive de la hauteur de la CLU car elles continuent d'alimenter des mouvements ascendants après le coucher du soleil. Il est fréquent que les mouvements de convections perdurent toute la nuit et que la CLU ne se stabilise pas.

1.1.1 La couche de surface

La partie de la CLU la plus proche de la surface est appelée **couche de surface**. Elle comprend la sous-couche de rugosité et la sous-couche inertielle (Figure 1.1a).

La **sous-couche de rugosité** s'étend du sol jusqu'à environ deux fois la hauteur moyenne des bâtiments [Grimmond *et al.*, 2002]. À l'intérieur de cette couche, l'influence de chaque élément du relief urbain (bâtiment, arbre...) est perceptible. La partie de cette sous-couche située entre le sol et le niveau des toits des bâtiments forme la **canopée urbaine**.

La **sous-couche inertielle** (SCI) se situe juste au-dessus de la sous-couche de rugosité. Les effets des différents éléments de surface y sont mélangés. Les observations faites dans cette couches sont représentatives de zones de la taille d'un quartier. L'effet de rugosité de la surface y est nettement visible : le vent augmente avec l'altitude selon un profil logarithmique. Dans la SCI, les flux de chaleur et de CO₂ sont quasiment constants avec l'altitude ce qui lui vaut d'être parfois appelée *constant flux layer* en anglais.

Le découpage de la couche limite de surface à la campagne est semblable à celui des villes, si ce n'est que la canopée urbaine y est absente (Figure 1.1b).

1.1.2 Au dessus de la couche limite de surface

En journée (Figures 1.1a et 1.1b), la couche de surface interagit avec l'air situé au-dessus, donnant naissance à la **couche de mélange**. À l'intérieur de cette couche,

1.1. LA COUCHE LIMITE

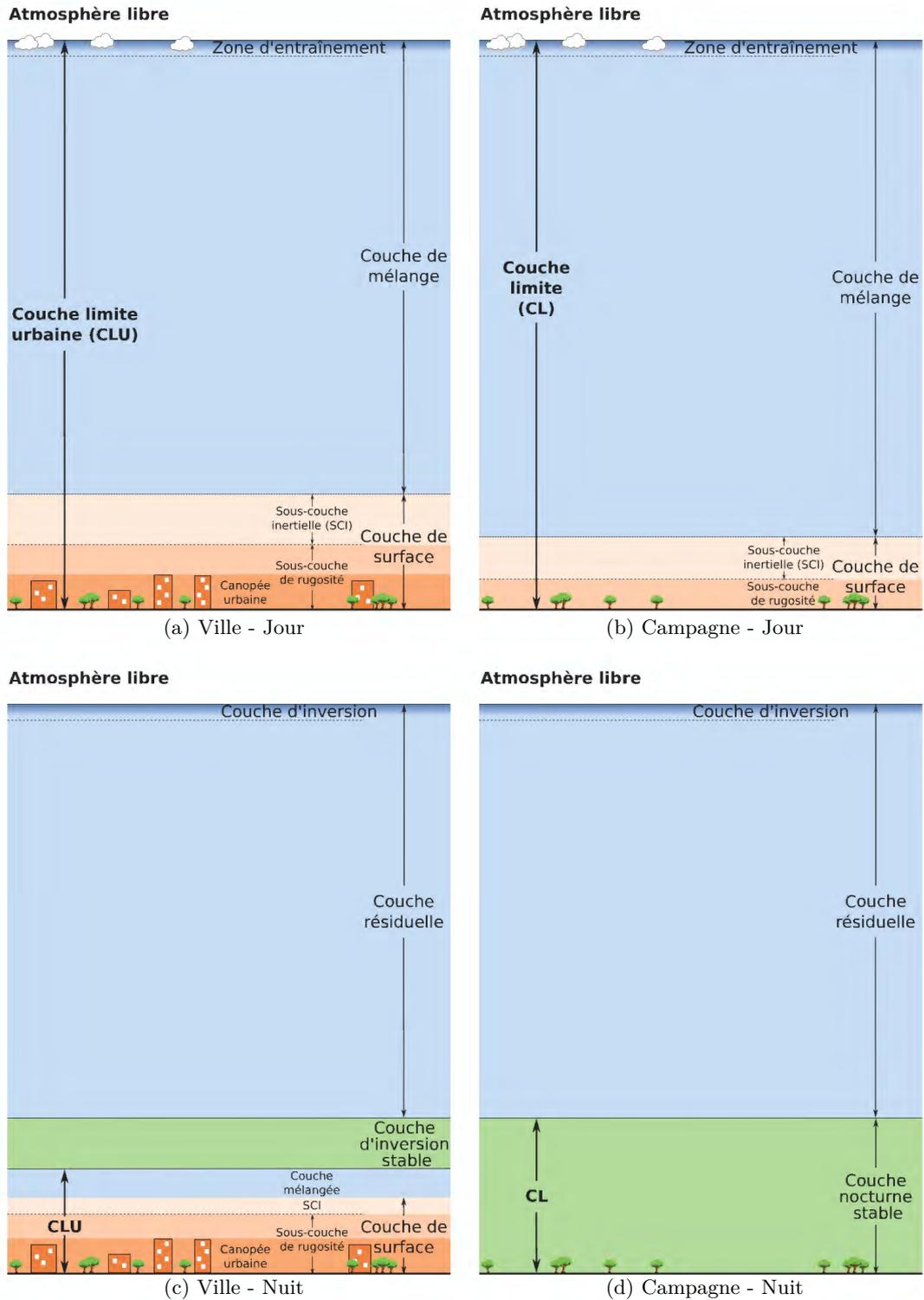


FIGURE 1.1 – Représentation schématique des différentes couches atmosphériques en fonction du type de surface (ville ou campagne) et de la période de la journée (nuit ou jour).

les différentes masses d'air sont fortement brassées, ce qui a pour conséquence d'homogénéiser les caractéristiques physiques (température potentielle, teneur en vapeur d'eau, vitesse et direction du vent) sur toute l'épaisseur de la couche. La couche de mélange représente environ 90% de la couche limite, elle est surplombée par une inversion thermique qui agit comme un plafond empêchant les masses d'air chaud de s'élever plus haut. Tout en haut de la couche de mélange, se trouve une **zone d'entraînement**. Quelques masses d'air chaud parviennent à percer le plafond de l'inversion avec l'inertie de la vitesse verticale acquise au cours de leur ascension dans la CLU. Ces masses d'air restent néanmoins plus lourdes (car plus humides et plus froides) que les masses d'air situées juste au-dessus de la couche limite (dans l'atmosphère libre). Une fois leur énergie cinétique épuisée, elle redescendent dans la couche de mélange, et entraînent avec elles de l'air moins pollué, moins humide et plus chaud.

La nuit, en ville (Figure 1.1c), les mouvements ascendants perdent de leur intensité puisque la principale source de chaleur (le soleil) est absente. À la campagne (Figure 1.1d), il n'y a plus aucune source de chaleur, les mouvements ascendants disparaissent, et la masse d'air se stratifie (la température potentielle de l'air augmente avec l'altitude) et devient stable, donnant naissance à une **couche nocturne stable**. Cette dernière se propage au-dessus de la ville par advection où elle forme une **couche d'inversion stable** qui limite l'expansion verticale des ascendances. Par définition, la CLU se limite alors à la couche de surface (sous-couche de rugosité et sous-couche inertielle) surmontée par une fine couche mélangée. À la campagne, la couche limite est restreinte à la couche nocturne stable. Les masses d'air situées au-dessus de la couche d'inversion stable ou de la couche nocturne stable forment la **couche résiduelle**. Le haut de la couche résiduelle est marqué par une couche d'inversion qui empêche les interactions entre la couche résiduelle et l'atmosphère libre situé au-dessus.

1.2 Bilan d'énergie de la surface

Le bilan d'énergie de la surface (SEB pour Surface Energy Balance) est l'élément clé de l'interaction surface/atmosphère. Il permet de quantifier l'énergie reçue par la surface et la manière dont elle est restituée.

La surface reçoit de l'énergie par rayonnement. Une partie de ce rayonnement provient du soleil, qui émet dans les domaines de l'ultra-violet, du visible et du proche infrarouge. Le rayonnement solaire peut arriver directement jusqu'à la surface terrestre (rayonnement direct) ou bien faire l'objet de multiples réflexions (rayonnement diffus). L'autre partie du rayonnement reçu par la surface arrive sous forme de rayonnement infra-rouge émis ou réfléchi par l'atmosphère (Figure 1.2). Le rayonnement reçu par la surface terrestre est soit réfléchi, soit réémis dans l'infra-rouge soit absorbé par la surface. Le bilan à la surface du sol de tous ces échanges radiatifs (rayonnements reçus, émis et réfléchis dans les différentes longueurs d'onde) est appelé **rayonnement net** (RN).

Une partie de l'énergie absorbée par la surface se diffuse vers les couches plus profondes du sol, par le phénomène de **conduction** (G). L'autre est transmise à l'atmosphère, soit sans changement d'état physique, c'est la **chaleur sensible** (H)

1.3. PARTICULARITÉS DU MICRO-CLIMAT URBAIN

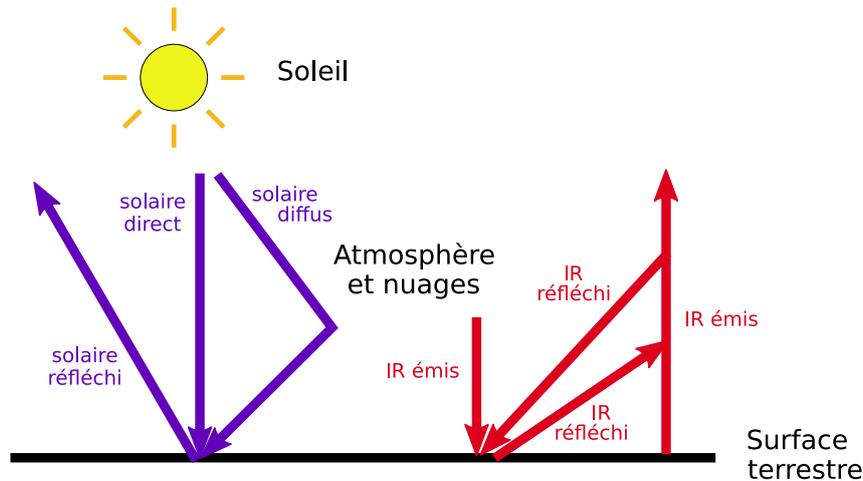


FIGURE 1.2 – Bilan radiatif terrestre. Le rayonnement effectivement absorbé par la surface est le rayonnement net (RN).

ou bien avec un changement d'état physique (par exemple évaporation d'eau liquide), c'est la **chaleur latente** (LE).

Le bilan d'énergie de la surface peut donc se résumer par l'équation :

$$RN = G + H + LE \quad (1.1)$$

En ville, en plus de l'énergie reçue par rayonnement la surface reçoit l'énergie générée par les activités humaines (trafic automobile, chauffage...), encore appelée **chaleur anthropique** (QF). Le bilan d'énergie de la surface s'écrit alors :

$$QF + RN = G + H + LE \quad (1.2)$$

Une représentation schématique des bilans d'énergie en milieux urbain et rural est proposée sur la Figure 1.3.

QN , RN , G , H et LE constituent des flux d'énergie (quantité d'énergie qui passe à travers une surface, ici la surface terrestre). Généralement, on les exprime par unité de surface (en $W m^{-2}$). Rigoureusement, il s'agit donc de densités de flux, mais pour simplifier le discours, on parlera simplement de flux dans la suite du manuscrit.

Par convention, le sens positif des flux correspond au sens des échanges d'énergie décrit plus haut : RN et QF apportent de l'énergie à la surface, G , H et LE consomment l'énergie de la surface. Lorsque les flux sont négatifs, l'échange d'énergie se fait dans le sens inverse de celui décrit plus haut. Par exemple, la nuit, le flux de rayonnement net (RN) est négatif : la surface perd de l'énergie par rayonnement (cf. partie haute de la Figure 1.3).

1.3 Particularités du micro-climat urbain

1.3.1 L'îlot de chaleur urbain

L'**îlot de Chaleur Urbain** (ICU) désigne la différence de température entre la ville et la campagne environnante. Ce phénomène, qui est probablement la caractéristique la plus perceptible du micro-climat urbain, a été mis en évidence dès le

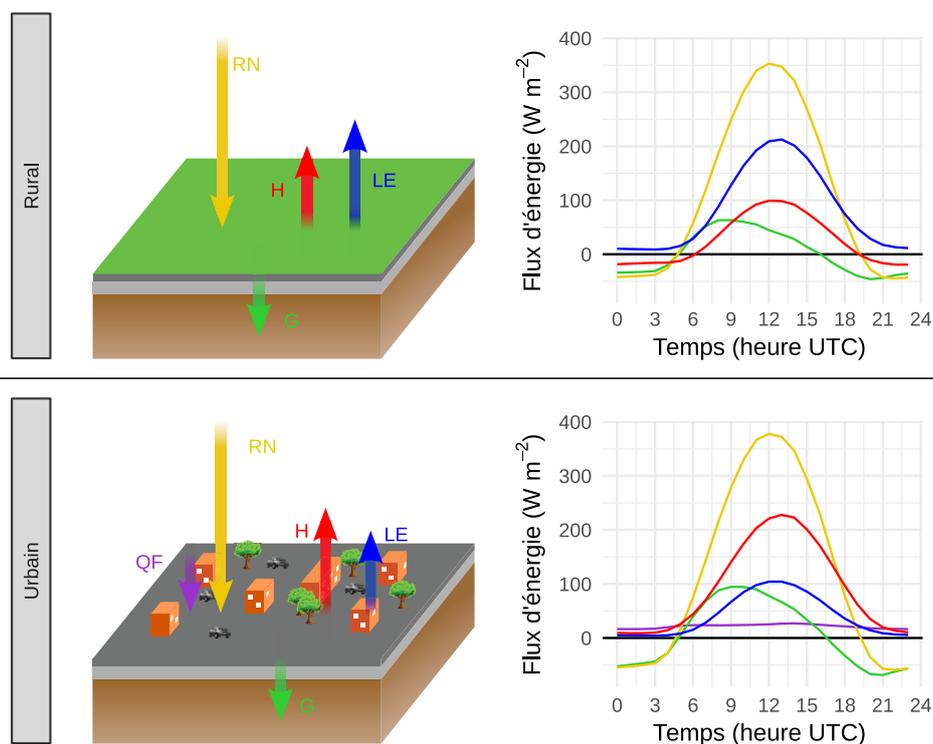


FIGURE 1.3 – Bilan d'énergie de la surface en milieux urbain et rural. Représentation schématique à gauche et cycle journalier typique à droite.

XIX^e siècle. En 1820, le britannique Luke Howard remarque qu'en moyenne, sur les neuf ans d'observations recueillies, la température nocturne au centre de Londres est supérieure de 2,1 °C à celle de la campagne environnante. La Figure 1.4 montre l'îlot de chaleur observé la nuit au-dessus de la ville de Birmingham (Angleterre).

L'ICU est surtout **un phénomène nocturne** qui est dû à un refroidissement de l'air plus lent en ville qu'à la campagne. En ville, les matériaux utilisés pour **le revêtement des sols et des bâtiments stockent de la chaleur** pendant la journée. Une fois le soleil couché, ces matériaux vont progressivement rejeter la chaleur accumulée, et ainsi limiter le refroidissement de l'air ambiant. À l'inverse, à la campagne, le sol naturel et la végétation emmagasinent peu de chaleur pendant la journée (leur capacité thermique est beaucoup plus faible que celle des matériaux artificiels) et l'air se refroidit rapidement dès que le soleil disparaît.

Une explication complémentaire à l'effet d'îlot de chaleur urbain est la **faible présence d'eau** en ville (peu de végétation, de lacs et de sols naturels). Or, l'eau consomme une partie de l'énergie solaire reçue par le sol en passant de la phase liquide à la phase gazeuse. Ce phénomène a lieu non seulement au-dessus des lacs et des sols naturels, mais aussi au-dessus de la végétation ; on parle alors d'évapotranspiration.

Si l'îlot de chaleur est un phénomène très largement décrit, **la question de sa définition précise reste ouverte**. En effet, on s'accorde en général sur le fait que l'îlot de chaleur est l'anomalie positive de température due à la ville. Mais, comment mesurer cette anomalie ? La méthode la plus classique est celle suivie

1.3. PARTICULARITÉS DU MICRO-CLIMAT URBAIN

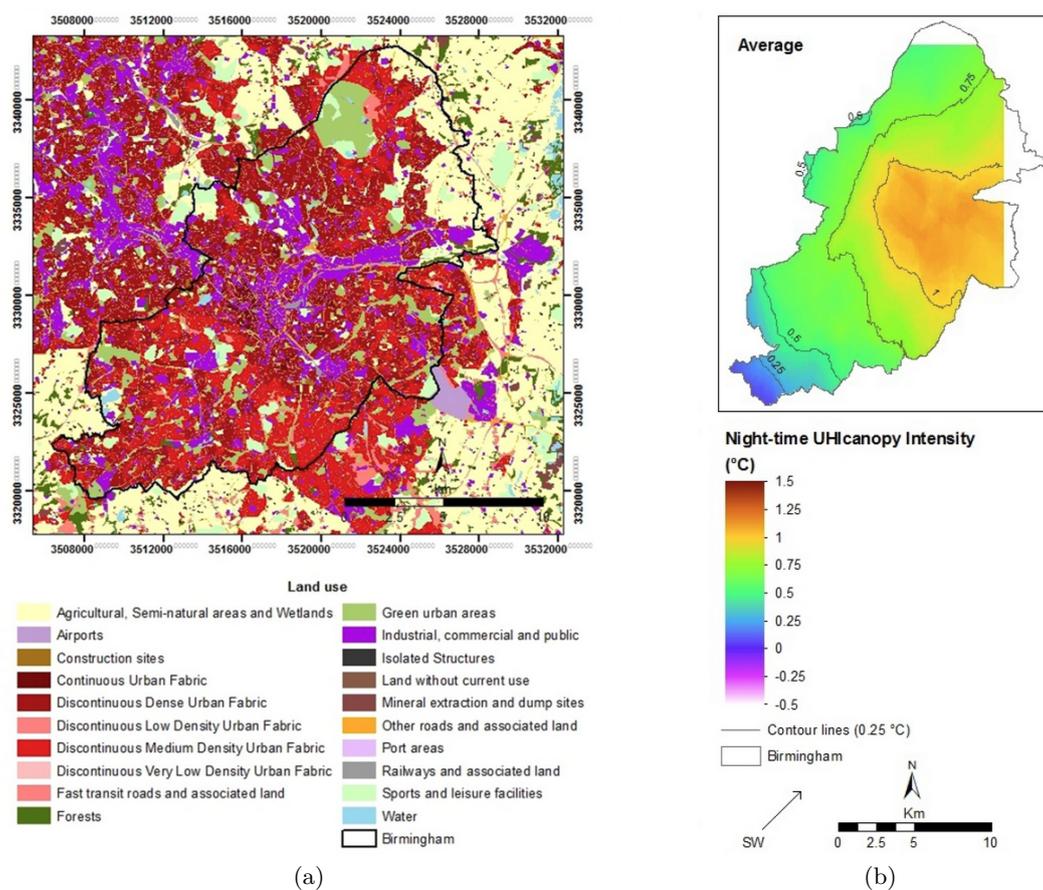


FIGURE 1.4 – Ilot de chaleur sur la ville de Birmingham, deuxième ville la plus peuplée d’Angleterre après Londres, avec plus d’un million d’habitants. Carte d’occupation de la ville (a), et température moyenne mesurée à trois mètres au-dessus du sol pendant l’été 2013, lorsque les conditions atmosphériques étaient neutres ou stables. Les mesures de température proviennent du réseau de mesure du laboratoire de climat urbain de Birmingham, les données ont été interpolées par krigeage. Source : Azevedo *et al.* [2016].

par Luke Howard qui consiste à faire la différence entre la température mesurée en ville, et la température mesurée à la campagne. Cependant, les termes "ville" et "campagne" sont loin d'être précis, et selon les points de mesures choisis, l'ICU mesuré peut varier de plusieurs degrés. Pour remédier en partie à ce flou, Stewart et Oke [2012] définissent des **Zones Climatiques Locales (LCZ)** avec pour objectif de découper la ville en **zones homogènes** du point de vue de la morphologie urbaine et de l'occupation des sols qui vont se comporter de manière similaire **du point de vue climatique**. À titre d'exemple, Leconte [2014] propose la description de l'ICU sur la ville de Nancy par LCZ. Une autre méthode pour estimer l'îlot de chaleur urbain est d'utiliser **la modélisation**. On peut alors faire deux simulations, une première en prenant en compte la ville, et une deuxième en la remplaçant par de la végétation. La différence entre les deux simulations permet de calculer **un îlot de chaleur spatialisé**.

1.3.2 Couverture nuageuse et précipitation

Les études sur l'effet des villes sur la couverture nuageuse et les précipitations sont plus récents et plus rares que celles sur l'îlot de chaleur, probablement parce qu'il s'agit d'un sujet plus complexe à aborder. La première campagne de grande ampleur à s'intéresser aux interactions entre les villes et les précipitations est probablement la campagne METROMEX (Metropolitan Meteorological Experiment) qui a eu lieu pendant les années 1970 au-dessus de la ville de Saint Louis (États-Unis) [Changnon, 1981].

La couverture nuageuse comme les précipitations constituent des champs discontinus qui sont par nature, plus difficiles à appréhender à partir d'observations ponctuelles (pluviomètre) que des champs continus. L'arrivée et la généralisation d'instruments de télédétection (satellite, radar) permet de résoudre cette difficulté.

Trois processus physiques expliquent l'impact des villes sur la couverture nuageuse et les précipitations [Hidalgo *et al.*, 2008 ; Oke *et al.*, 2017] : **la circulation associée à l'ICU, l'effet de rugosité de la ville et la pollution de l'air plus importante en ville**.

Lorsque le vent synoptique est plutôt faible, **une circulation est associée à l'îlot de chaleur urbain**. L'air chaud situé au-dessus de la ville s'élève et crée une branche ascendante ainsi qu'une dépression au niveau du sol. Une brise de la campagne vers la ville se met alors en place en basses couches. La circulation est complétée par un flux en altitude qui va du centre ville vers la campagne et par une branche subsidente au-dessus de la campagne. L'îlot de chaleur entraîne ainsi un mouvement de convection. Celui-ci peut être suffisant pour générer des cumulus et des précipitations, notamment en été lorsque l'atmosphère est particulièrement instable [Bornstein et Lin, 2000 ; Inoue et Kimura, 2004].

Lorsque le vent synoptique s'intensifie, **l'effet de rugosité de la ville** prédomine sur la circulation associée à l'ICU. Le vent est ralenti au niveau de la ville et il a tendance à passer au-dessus de celle-ci ou bien en périphérie. Il se crée alors une ascendance au vent de la ville, et une subsidence sous son vent. Les études menées jusqu'à présent concluent qu'il est peu probable que ce phénomène à lui seul crée des précipitations. En revanche, il est à l'origine du phénomène de séparation ou de

bifurcation des orages qui ont tendance à éviter la zone urbanisée, et à passer en marge de la ville [Niyogi *et al.*, 2010].

L'air est **plus pollué** en ville qu'en milieu rural, et comporte donc plus de noyaux de condensation (poussière, particules fines...). Pour une même quantité d'eau, on aura plus de gouttelettes, et une taille des gouttelettes plus petites en milieu urbain que rural. Davantage d'humidité est donc nécessaire en ville pour que la taille des gouttelettes dépasse le seuil critique à partir duquel elles commencent à tomber sous forme de précipitations. La conséquence sur les précipitations dépend du type de précipitations. Pour les **précipitations stratiformes**, les nombreux noyaux de condensations, tendent à inhiber les précipitations [Rosenfeld, 2000; Borys *et al.*, 2003]. Pour les **précipitations convectives**, les villes ont en général pour effet d'allonger la phase de développement des nuages : les précipitations auront lieu plus tardivement, mais seront plus intenses. Dans ce cas, le développement des nuages a lieu au-dessus de la ville, et les précipitations sous le vent de la ville. Cependant, lorsque les polluants sont de grandes tailles et qu'ils forment des noyaux de condensation géant ($>1 \mu\text{m}$), l'effet s'inverse : la ville peut supprimer les précipitations convectives. En effet, la taille importante des polluants va entraîner une croissance rapide de la taille des gouttelettes et des cristaux de glace qui s'accompagne d'ascendances particulièrement fortes. En conséquence, des mouvements de subsidence importants, accompagnés de masse d'air très froid se mettent en place. Ces mouvements de subsidence particulièrement intenses peuvent alors empêcher le développement de l'orage [van den Heever et Cotton, 2007; Han *et al.*, 2014].

Ainsi, plusieurs études récentes ont mis en évidence l'impact des villes sur les précipitations et la couverture nuageuse. Cependant, il faut garder à l'esprit, que cet **impact n'est significatif que lorsque les phénomènes météorologiques mis en jeu sont d'échelle locale**. Les villes ont surtout un impact en été, lors d'événements de type convectif, où la surface joue un rôle majeur dans le développement nuageux et la formations des précipitations associées. Dès lors qu'on parle de dynamique de plus grande échelle, comme les perturbations d'échelle synoptique, l'effet des villes devient négligeable.

1.4 Approches d'étude du climat urbain

Pour étudier des processus physiques, en règle générale, deux grandes approches sont possibles : **l'observation et la modélisation**. L'étude du climat urbain n'échappe pas à la règle. Les différentes méthodes d'observation et de modélisation sont décrites ci-après.

1.4.1 Observations

La conscience que la ville modifie le climat local est relativement ancienne dans l'histoire de la météorologie (XIX^e siècle avec Luke Howard). En conséquence, les stations météorologiques des services météorologiques nationaux sont généralement placées en dehors des villes afin de ne pas être perturbées par celles-ci.

L'étude du climat urbain fait l'objet d'une instrumentation spécifique, au cœur des villes qui s'est développée dans la deuxième moitié du XX^e siècle. **Les techniques**

d'instrumentations sont diverses et variées. Les mesures peuvent être prises in-situ ou bien par télédétection (RADAR, LIDAR...). Les instruments sont installés de manière fixe ou bien embarqués à bord d'avions, de véhicules instrumentés ou encore de satellites. Les mesures sont prises lors de campagnes de mesures, qui font l'objet d'instrumentation intenses, généralement de courtes durées (quelques mois voire un an ou deux); ou bien avec des stations fixes pour lesquelles les durées de mesures sont plus longues (plusieurs années).

Les paramètres généralement mesurés sont la température, l'humidité, le vent, les flux turbulents (chaleur latente et sensible) ainsi que le rayonnement. Dans le cadre de réseaux fixes à l'échelle d'une ville, la quantité de paramètres mesurés est souvent plus restreinte, mais, **la température est quasiment systématiquement relevée afin de permettre l'étude de l'îlot de chaleur urbain.**

L'emplacement exact des capteurs est un élément important à considérer car en ville, les valeurs des paramètres météorologiques peuvent varier rapidement d'un point de mesure à l'autre, en fonction par exemple de l'ensoleillement, de l'exposition au vent ou encore du type de surface dans l'environnement immédiat. En règle général, plus les mesures seront prises en altitude (par rapport au niveau du sol), plus elles seront représentatives d'une zone importante.

1.4.2 Modélisation

1.4.2.1 Les types de modèles

Les observations recueillies lors de campagnes de mesures ou par les réseaux fixes, peuvent être utilisées pour construire des **modèles empiriques**. Ceux-ci consistent à calibrer un modèle statistique en s'appuyant sur les observations. Ces modèles ont l'avantage d'être particulièrement simples, et peu coûteux à utiliser. Ils nécessitent tout de même de récolter un nombre d'observations assez conséquent pour que le modèle soit robuste. Il est important de chercher à échantillonner le maximum de situations lors de la campagne de mesure car, par nature, les modèles empiriques ne peuvent décrire que des situations proches de celles rencontrées lors de la prise de mesure.

Les **modèles réduits** consistent à recréer une ville à échelle réduite, souvent de manière idéalisée (représentation des bâtiments par des cubes). Les modèles réduits sont particulièrement utiles pour étudier en détail et comprendre les processus physiques du climat urbain car leur petite taille permet une instrumentation plus simple que celle de villes réelles. De plus, l'environnement proche des modèles réduits peut être contrôlé de façon fine, en particulier, ils peuvent être étudiés en soufflerie ce qui permet de maîtriser le flux d'air. Ces modèles ont ainsi permis d'améliorer la compréhension de phénomènes tels que la modification de l'écoulement par les bâtiments ou les échanges thermiques entre les différentes surfaces urbaines [Kanda, 2006]. Cependant, leur taille réduite n'a pas que des avantages. Par exemple, il n'est pour l'instant pas possible de construire des modèles réduits avec une inertie thermique similaire à celle de la ville réelle. Ceci empêche d'utiliser ce type de modèle pour étudier précisément la temporalité des échanges de chaleur entre l'atmosphère et les bâtiments.

La dernière famille de modèle est celle des **modèles numériques**. Les plus

précis d'entre eux sont les **modèles de CFD** (Computational Fluid Dynamic) : ils représentent explicitement chaque obstacle du milieu urbain (bâtiments, arbres...) et résolvent les équations de la mécanique des fluides. La résolution de ce type de modèle est très fine (de l'ordre du mètre) et l'écoulement de l'air autour des bâtiments est décrit de manière très précise. Les coûts de calculs associés à ce type de modèle sont particulièrement élevés. En conservant un coût de calcul raisonnable, il est possible de représenter des domaines de la taille d'une place voire d'un quartier. En revanche, la représentation d'une ville entière est pour l'instant impossible.

Si l'on veut modéliser numériquement un domaine de la taille d'une ville, **il faut paramétriser l'effet de la ville**. Plusieurs stratégies existent. La plus ancienne consiste à **adapter un schéma de description du sol naturel et de la végétation**. Cela permet de bénéficier de l'expérience des sciences climatiques et météorologiques, qui utilisent les schémas de description du sol naturel et de la végétation depuis plusieurs décennies. Deux approches sont possibles pour adapter le schéma, soit augmenter la longueur de rugosité de la surface au niveau de la ville [Bottema, 1997], soit ajouter une force de frottement comme cela est fait pour modéliser les forêts [Urano *et al.*, 1999 ; Dupont *et al.*, 2004].

La deuxième stratégie pour paramétriser la ville consiste à utiliser des **modèles de canopée urbaine** [Mills, 1997 ; Ca *et al.*, 1999 ; Masson, 2000 ; Kusaka *et al.*, 2001 ; Martilli, 2002]. Comme leur nom l'indique, ils représentent la canopée urbaine c'est-à-dire l'espace entre le sol et le toit des bâtiments. Avec ce type de modèle, on conserve la structure en trois dimensions des bâtiments : la ville est représentée par un **canyon urbain** composé d'une route, de deux murs et d'un toit. Les bilans d'énergie de chaque surface du canyon (murs, route et toit) sont calculés séparément, et les interactions radiatives entre la route et les murs sont traitées explicitement. **C'est ce type de modèle qui sera utilisé dans la thèse.**

1.4.2.2 Conditions aux limites des modèles de canopée urbaine

Dans les modèles de canopée urbaine, **seuls les échanges verticaux** entre la surface et l'atmosphère **sont considérés**. Les échanges horizontaux sont négligés. Les seules conditions aux limites nécessaires sont donc celles à la limite entre le domaine du modèle de canopée urbaine, et l'atmosphère. Cette limite est différentes suivant le nombre de couches atmosphériques que contient le modèle de canopée.

Dans les **modèles à une couche**, c'est l'ensemble de la canopée urbaine (bâtiment, air dans le canyon urbain...) qui est paramétrisé. La limite entre le modèle de canopée et l'atmosphère se situe à quelques mètres au-dessus du niveau des toits des bâtiments. Les conditions aux limites à ce niveau peuvent provenir d'**observations** issues de campagnes de mesures ou bien de **modèles atmosphériques**. Les modèles atmosphériques peuvent être utilisés en **mode couplé** (le modèle de canopée urbaine et le modèle atmosphérique interagissent au cours de la simulation) ou bien en **mode forcé** (la rétroaction du modèle de canopée urbaine sur le modèle atmosphérique n'est pas prise en compte).

Pour les **modèles de canopée à plusieurs couches atmosphériques**, les interactions entre la surface (représentée par le modèle de canopée) et l'atmosphère peuvent se faire soit uniquement au-dessus du niveau des toits (comme pour les

modèles à une couche), soit à plusieurs niveaux verticaux (au-dessus du niveau des toits, ainsi qu'à un ou plusieurs niveaux dans le canyon urbain). Dans ce dernier cas, les conditions aux limites doivent être précisées à chacun des niveaux d'interactions. Généralement, elles proviennent d'un **modèle atmosphérique utilisé en mode couplé**.

1.4.2.3 Le modèle TEB

Le modèle TEB (Town Energy Balance, Masson [2000]) utilisé dans cette thèse est un **modèle de canopée urbaine**. Ici, il sera utilisé en mode **multi-couches** [Hamdi et Masson, 2008] : l'interaction surface/atmosphère se fait à un seul niveau (au dessus du niveau des toits), en dessous de ce niveau d'interaction, l'atmosphère est divisé en plusieurs couches, les paramètres physiques (température, vent, humidité) sont calculés à chaque niveau.

TEB fait partie du modèle d'interaction surface/atmosphère **SURFEX** (SURface EXternalisée). Dans SURFEX, une stratégie de modélisation par patch est appliquée : chaque maille du domaine est découpée en quatre patchs, correspondant aux quatre types de surfaces définis dans le modèle (ville, végétation/sols naturels, lacs/rivière et océan). Chaque patch est traité de manière séparée, par un modèle adapté au type de surface. Les variables physiques sont ensuite moyennées au niveau de la maille, en pondérant en fonction de la taille de chaque patch. On obtient ainsi les valeurs moyennes des variables physiques au niveau de la maille. Dans cette thèse, **on utilise TEB pour traiter les surfaces urbaines, et ISBA pour la végétation et les sols naturels**. Les lacs et les rivières sont représentés par une modélisation simple, s'appuyant sur ISBA et la formule de Charnock. Aucun modèle d'océan n'est utilisé, puisqu'il n'y a pas d'océan dans les domaines de simulation.

1.5 Discussion

Les villes constituent des **territoires particuliers d'un point de vue météorologique**. L'urbanisation des surfaces modifie les échanges surface/atmosphère et donne lieu à un climat spécifique : le micro-climat urbain. Le développement de campagnes de mesures météorologiques en ville a permis de mettre en évidence la présence d'une **couche limite** particulière au-dessus de la ville, **qui se stabilise rarement la nuit**.

La principale caractéristique du climat urbain est la présence d'un **îlot de chaleur** au-dessus de la ville. Les mécanismes responsables de cet îlot de chaleur sont connus et compris (modification du bilan de surface et des échanges énergétiques surface/atmosphère par la ville). Le développement des **modèles de canopée urbaine** au début des années 2000 a largement contribué à la compréhension de l'îlot de chaleur en permettant de modéliser une ville entière, avec des coûts de calcul raisonnable.

L'observation du climat urbain a montré que les villes influencent également **la couverture nuageuse et les précipitations**. Plusieurs processus d'explication de cette influence des villes sont identifiés, mais il s'agit de dynamiques complexes, et davantage d'études sont nécessaires pour mieux les comprendre.

La compréhension des échanges énergétiques ville/atmosphère et du phénomène d'îlot de chaleur constituait la première étape pour évaluer **l'impact des villes sur le climat régional, voire mondial**. Maintenant que ces processus sont compris, on peut s'intéresser aux gaz à effet de serre rejetés par les villes. Ceux-ci n'ont pas d'effet localement, et ne contribuent pas à l'îlot de chaleur. En effet, la sur-concentration de gaz à effet de serre due à une ville n'est détectable que dans la couche limite. L'épaisseur de cette dernière est bien trop faible comparée à l'épaisseur de l'atmosphère pour créer un effet de serre notable. De plus, le temps de présence du CO_2 au-dessus de la ville est trop court pour qu'un quelconque effet de serre ait le temps de se mettre en place. En revanche, **les gaz à effet de serre rejetés par les villes** s'ajoutent aux gaz à effet de serre d'origine anthropiques rejetés en-dehors des villes, et **participent ainsi au réchauffement climatique à l'échelle planétaire**.

Dans cette thèse, on se concentre sur le principal gaz à effet de serre d'origine anthropique, le CO_2 . L'état de l'art sur le CO_2 rejeté par les villes est présenté dans le chapitre suivant.

Résumé

- Contrairement à la couche limite en milieu rural, la couche limite urbaine reste généralement instable toute la nuit.
- En ville, le bilan d'énergie de la surface s'écrit $QF + RN = G + H + LE$ avec QF le flux de chaleur anthropique, RN le rayonnement net, G le flux de conduction, H le flux de chaleur sensible et LE le flux de chaleur latente.
- Un micro-climat spécifique existe au-dessus des villes. Sa caractéristique principale est la présence d'un îlot de chaleur urbain. Les villes modifient également la couverture nuageuse et les précipitations.
- Il existe principalement deux approches pour étudier le climat urbain : l'observation et la modélisation. Ces approches sont complémentaires.
- Le modèle de climat urbain TEB utilisé dans cette thèse est un modèle de canopée urbaine avec plusieurs couches atmosphériques.

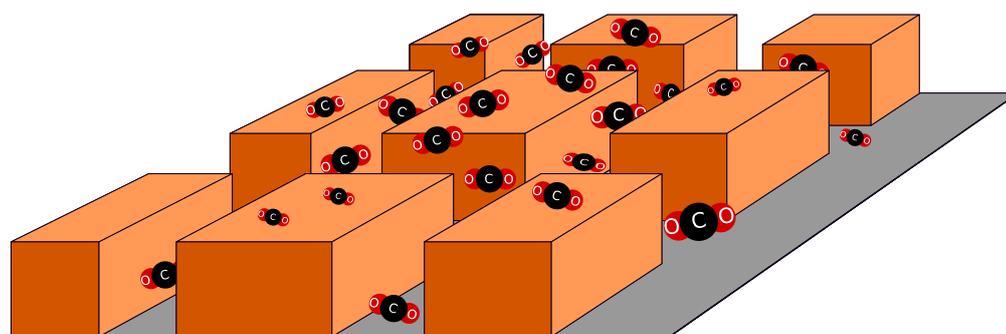
*Je ne cherche pas à connaître les réponses, je
cherche à comprendre les questions.*

Confucius

2

Le CO₂ en ville

Ce chapitre présente l'état de l'art sur la thématique du CO₂ en milieu urbain. Les sources et puits principaux sont décrits en Section 2.1. Le CO₂ peut être quantifié à l'aide de la concentration en CO₂ dans l'atmosphère ou des flux de CO₂. Les différences entre ces deux grandeurs sont détaillées en Section 2.2. Les différentes méthodes d'estimation des flux sont présentées en Section 2.3. Parmi ces différentes méthodes, la méthode de mesure des flux par la covariance des turbulences, qui sera utilisée dans la suite du manuscrit, est détaillée en Section 2.4.



Sommaire

2.1 Sources et puits de CO₂ en ville	20
2.1.1 Trafic routier	20
2.1.2 Bâtiments	21
2.1.3 Végétation	21
2.1.4 Respiration humaine	21
2.1.5 Autres sources	21
2.2 Concentration ou flux de CO₂	21
2.2.1 Concentration de CO ₂	21
2.2.2 Flux de CO ₂	23
2.3 Méthodes d'estimation des flux de CO₂	25
2.3.1 Inventaire	25
2.3.2 Modélisation inverse	27
2.3.3 Mesures directes	28
2.3.4 Méthodes de décomposition des mesures directes	28
2.3.4.1 Modèles statistiques	29
2.3.4.2 Mesures isotopiques	29
2.3.5 Modélisation numérique	29
2.4 Méthode de la covariance des turbulences	30
2.4.1 Principe et hypothèses	30
2.4.2 Instrumentation	31
2.4.3 Erreurs de mesure et corrections associées	32
2.4.3.1 Correction de Webb	32
2.4.3.2 Décalage temporel	32
2.4.3.3 Rotation	33
2.4.4 Qualité de la mesure	33
2.4.4.1 Précipitations	33
2.4.4.2 Stationnarité et intensité de la turbulence	33
2.4.4.3 Complétion des données	34
2.4.5 Représentativité de la mesure	34
2.4.5.1 Zone d'influence	34
2.4.5.2 Stockage de CO ₂	36
2.5 Discussion	39
2.6 Objectifs de la thèse	40

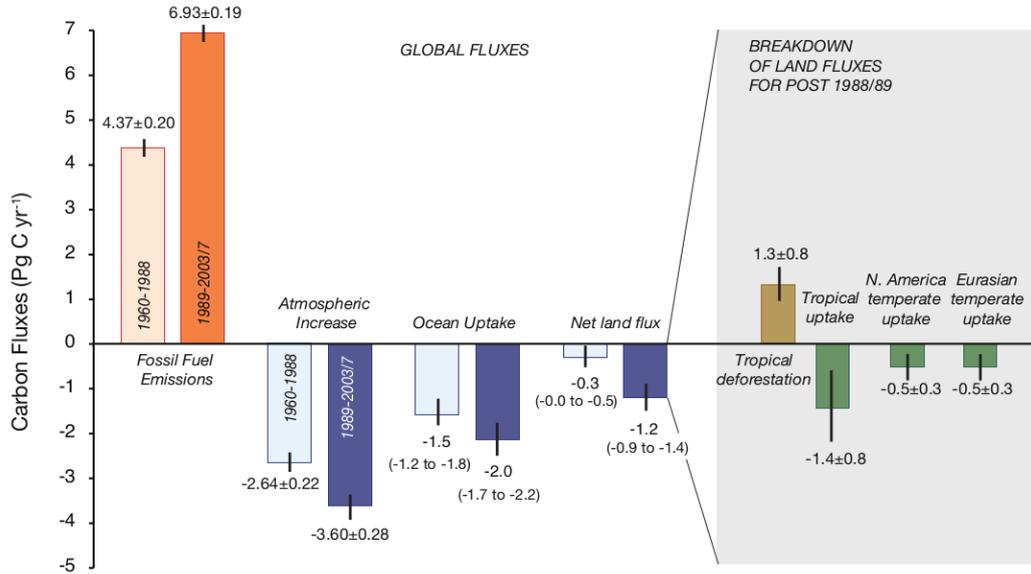


FIGURE 2.1 – Estimation des puits et sources de carbone à l'échelle planétaire pour les périodes 1960-1988 et 1989-2003/7. Source : Sarmiento *et al.* [2010].

Les villes contribuent de façon non négligeable aux émissions de gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique. **En considérant uniquement les gaz émis localement, les villes représentent 30 à 40% de GES d'origine anthropique** [Satterthwaite, 2008]. Leur contribution est encore plus grande si l'on prend aussi en compte les émissions induites par les villes comme par exemple les émissions de centrales électriques alimentant des villes, mais situées en dehors du périmètre de ces villes. Ici, on s'intéresse plus particulièrement au **CO₂** car il est le **principal gaz à effet de serre d'origine anthropique**. Le CO₂ est un gaz chimiquement stable, une fois émis, il reste dans l'atmosphère jusqu'à ce qu'il en soit extrait par un puits de carbone (végétation ou océan cf. Figure 2.1). Son temps de résidence moyen est de quatre ans [Harde, 2017].

2.1 Sources et puits de CO₂ en ville

2.1.1 Trafic routier

Le trafic routier est une source majeure de CO₂. Par exemple, dans la région d'Helsinki en Finlande, il représente 17% des émissions et est ainsi la principale source de CO₂ après les centrales énergétiques [Vesala *et al.*, 2008a]. Dans les régions plus chaudes, le trafic est en général la source principale : il est responsable d'environ 70% des émissions à Mexico au Mexique [Velasco *et al.*, 2014] et à Heraklion en Grèce [Stagakis *et al.*, 2019].

2.1.2 Bâtiments

Les rejets de CO₂ par le bâti sont liés au **confort thermique** (chauffage et climatisation) ainsi qu'**aux activités ménagères** (cuisine, production d'eau chaude...). Ils peuvent être évalués grâce à la connaissance de la répartition de la production d'énergie entre les différentes énergies (électricité, fioul, gaz naturel...). Il est à noter que dans le cas de l'électricité, le rejet de CO₂ est délocalisé au niveau du site de production de l'électricité qui est généralement situé hors de la ville. **Aux moyennes et hautes latitudes, les bâtiments représentent une source non négligeable de CO₂** : Nemitz *et al.* [2002] ont évalué qu'ils comptent pour 52% du flux total à Edimbourg (Ecosse).

2.1.3 Végétation

La végétation rejette du CO₂ la nuit (**respiration**) et en consomme le jour (**photosynthèse**). **Elle est surtout active l'été** et c'est à cette période de l'année que son effet est le plus notable. Généralement, l'effet de la photosynthèse ne permet pas de contrebalancer les émissions de CO₂ par la ville, et le flux net reste positif tout au long de la journée [Grimmond *et al.*, 2002]. Velasco *et al.* [2014] estiment que la végétation est responsable de 1,4% des émissions à Mexico (Mexique)

2.1.4 Respiration humaine

Dans le cas de **villes très densément peuplées**, le CO₂ rejeté par la **respiration humaine** contribue de façon non négligeable au flux total. Stagakis *et al.* [2019] ont estimé la contribution de la respiration humaine à 19% du flux total, ce qui en fait la deuxième source d'émissions derrière le trafic.

2.1.5 Autres sources

Ponctuellement, suivant les villes, d'autres sources de CO₂, liées à l'**activité économique et/ou industrielle** peuvent exister. Comme par exemple les usines, les ports ou les aéroports ou encore des centrales pour la production électrique.

2.2 Concentration ou flux de CO₂

2.2.1 Concentration de CO₂

Lorsque l'on parle de CO₂, sa concentration dans l'atmosphère est probablement la première grandeur à laquelle on pense. **La plus longue série** de mesures directes de la concentration en CO₂ est celle obtenue à **Mauna Loa** (Hawaï) depuis 1956 à l'initiative de Charles David Keeling (Figure 2.2). Cette série a permis de mettre en évidence que sous l'effet des activités humaines, la concentration en CO₂ **ne cesse d'augmenter depuis la deuxième moitié du xx^e siècle et qu'elle a ainsi franchi la barre des 400 ppm en 2013**. Elle montre également que la concentration de CO₂ présente un **fort cycle annuel**. Ce cycle est dû à la végétation qui capte davantage de CO₂ au printemps et en été qu'aux autres saisons.

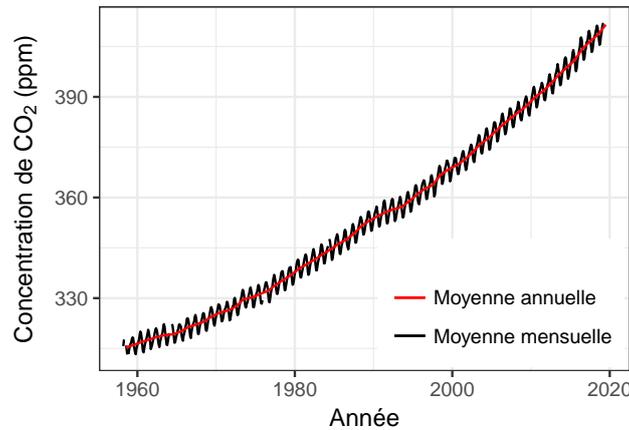


FIGURE 2.2 – Concentration en CO₂ dans l’atmosphère mesurée à l’observatoire de Mauna Loa (Hawaï). Il s’agit de la plus longue série de concentration de CO₂ mesurée de manière directe. Source : Dr. Pieter Tans, NOAA/ESRL (www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/) et Dr. Ralph Keeling, Scripps Institution of Oceanography (scrippsco2.ucsd.edu/).

La concentration de CO₂ mesurée à **Mauna Loa** correspond à la **concentration de fond** de l’atmosphère car les mesures sont effectuées en altitude (3350 m) et il y a très peu de sources et de puits de CO₂ à proximité de l’observatoire. La seule source notable est le volcan de Mauna Loa, mais les mesures sont invalidées lorsque le vent provient du volcan.

En ville, la concentration en CO₂ est une **variable complexe** : elle le résultat de la superposition de **la concentration de fond de l’atmosphère et du CO₂ émis/capté localement, auxquelles s’ajoutent les effets de la variation de la hauteur de la couche limite au cours de la journée** (cf. Section 1.1). Un cycle journalier de concentration de CO₂ typique du milieu urbain est représenté sur la Figure 2.3. On observe un pic de concentration en début de matinée (7 UTC), puis une diminution de la concentration jusque vers 15-16 UTC. Cette diminution est due à l’augmentation de l’épaisseur de la couche limite tout au long de la journée, qui a pour effet de mélanger des masses d’air faiblement chargées en CO₂ (provenant de la couche résiduelle puis de l’atmosphère libre) avec les masses d’air urbaines, elles, fortement chargées. Après 16 UTC, la hauteur de la couche limite diminue, le CO₂ émis par la ville est confiné dans un volume d’air de plus en plus restreint : la concentration en CO₂ augmente. L’augmentation de la concentration se poursuit jusqu’en début de matinée où l’augmentation de l’épaisseur de la couche limite va permettre un renouvellement de l’air.

Les **émissions locales de CO₂** ont un impact sur le cycle journalier de la concentration en CO₂. Néanmoins, **leur effet est difficilement identifiable** car il est mélangé avec les effets des autres paramètres qui influencent la concentration en CO₂ en ville : la variation de la hauteur de la couche limite et la variation de la concentration de fond.

2.2. CONCENTRATION OU FLUX DE CO₂

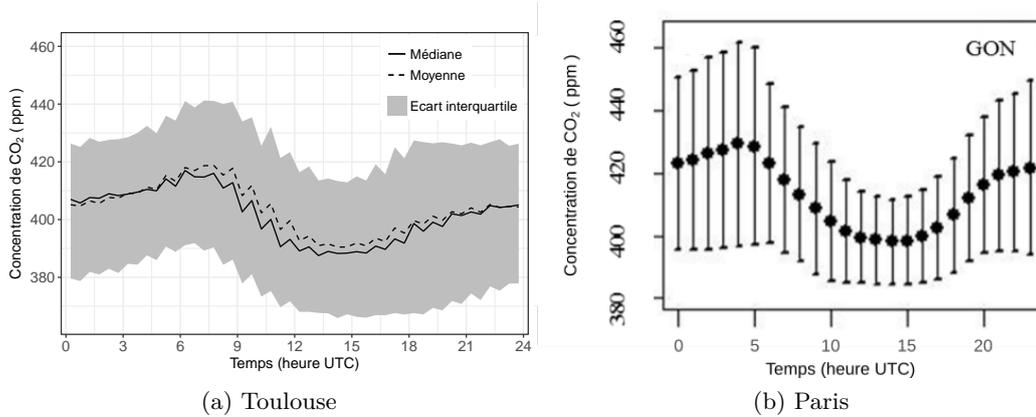


FIGURE 2.3 – Cycle journalier moyen de la concentration en CO₂. (a) Mesures effectuées en centre-ville de Toulouse, lors de la campagne CAPITOUL pendant un an [Masson *et al.*, 2008]. Les données proviennent du mât installé au-dessus du bâtiment commercial le plus haut du quartier (Monoprix). (b) Mesures effectuées sur le site de Gonesse, au nord-est de Paris, dans le cadre du projet CO₂-MEGAPARIS. Les barres d'erreur représentent un écart-type. Source : Xueref-Remy *et al.* [2018]

2.2.2 Flux de CO₂

La mesure des **flux de CO₂ permet de quantifier la quantité de CO₂ qui passe à travers une surface**. On considère une surface horizontale, située au-dessus des toits des bâtiments. Par convention, les molécules de CO₂ qui traversent la surface vers le haut (depuis le sol, vers l'atmosphère) sont comptées positivement et celles qui la traversent vers le bas, négativement. Un flux positif correspond donc à une émission de CO₂ par la ville et un flux négatif à une captation de CO₂.

Les flux de CO₂ permettent d'accéder **directement à la quantité de CO₂ émis ou capté par la ville**, et donc à l'importance des sources et puits de CO₂.

De même que pour les flux de chaleur, les flux de CO₂ sont généralement exprimés par unité de surface ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) et sont donc, rigoureusement des densités de flux. Dans la suite du manuscrit, on parlera plus simplement de flux.

Le cycle journalier de flux de CO₂ est très différent du cycle journalier de concentration de CO₂. Sur les sites urbains peu végétalisés, les flux sont maximaux le jour, lorsque l'activité humaine est importante : trafic automobile, température de consigne du chauffage plus élevée que la nuit (Figure 2.4a). Sur les sites moins urbanisés, avec davantage de végétation, la captation du CO₂ par les plantes, par le phénomène de photosynthèse, est visible sur le cycle. On observe alors une diminution des flux en milieu de journée, avec parfois des flux négatifs (Figure 2.4b).

Sur les sites fortement hétérogènes, les flux de CO₂ présentent une grande **variabilité spatiale**. La zone à proximité de la tour de mesure du site de Kumpula à Helsinki en Finlande, peut être découpée en trois secteurs : un secteur urbain au nord, un secteur routier au sud-est et des jardins au sud-ouest. Les cycles journaliers mesurés dans chaque secteur sont très différents (Figure 2.5). Dans les secteurs urbain et routier, les flux restent toujours positifs : ils oscillent autour de $4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en moyenne dans le secteur urbain, et ils varient entre 3 et $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ dans le secteur routier. Dans le secteur à dominante jardins, l'activité de la photosynthèse est

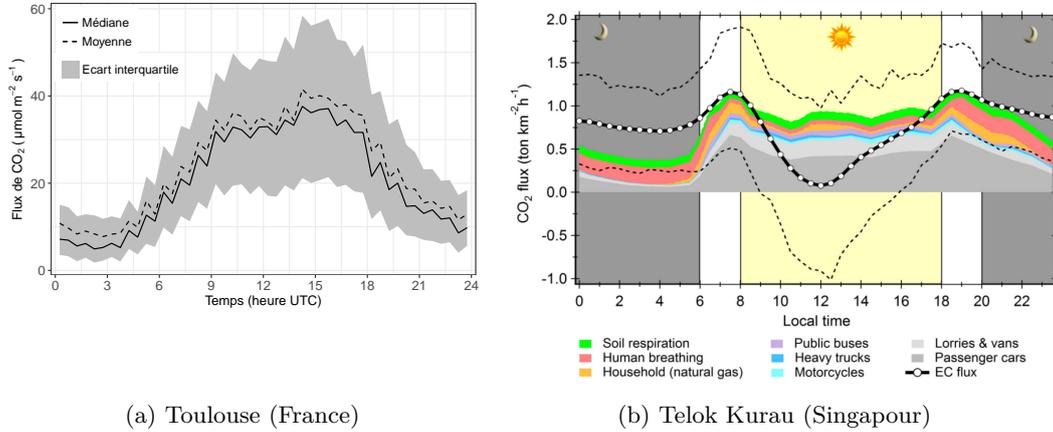


FIGURE 2.4 – Cycles journaliers moyens de flux de CO₂ mesurés (a) au centre ville de Toulouse (site fortement bâti), lors de la campagne CAPITOUL de mars 2004 à février 2005 au niveau du mât installé au dessus du Monoprix [Masson *et al.*, 2008] et (b) sur le site de Telok Kurau à Singapour (site fortement végétalisé) entre octobre 2010 et juin 2012 (source : Velasco *et al.* [2013]).

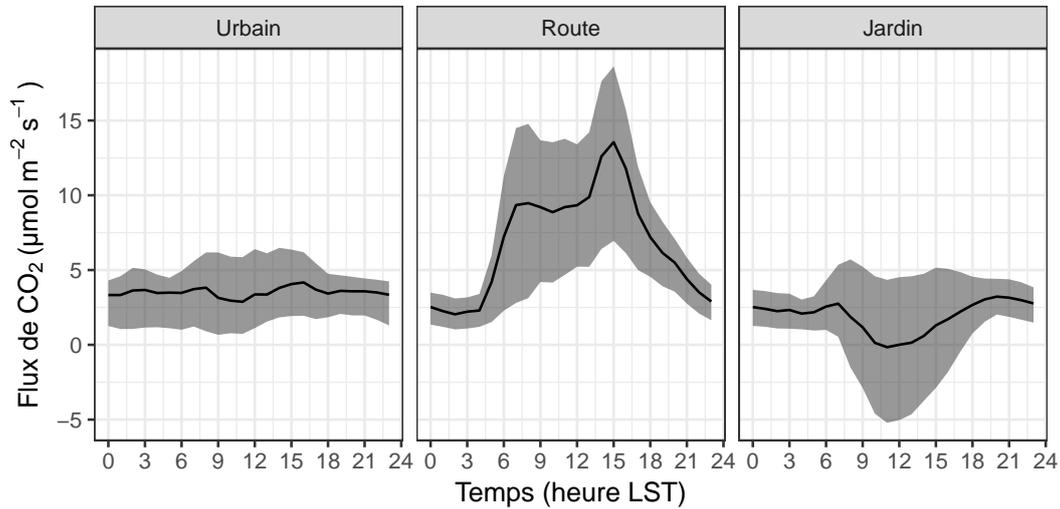


FIGURE 2.5 – Cycles journaliers moyens de flux de CO₂ mesurés sur le site de Kumpula à Helsinki (Finlande) entre juillet 2007 et décembre 2013 (cf. Section 5.1.1). Les mesures sont séparées en trois groupes : urbain, route et jardin, en fonction de la direction de provenance du vent. Les surfaces grisées représentent l'écart interquartile.

2.3. MÉTHODES D'ESTIMATION DES FLUX DE CO₂

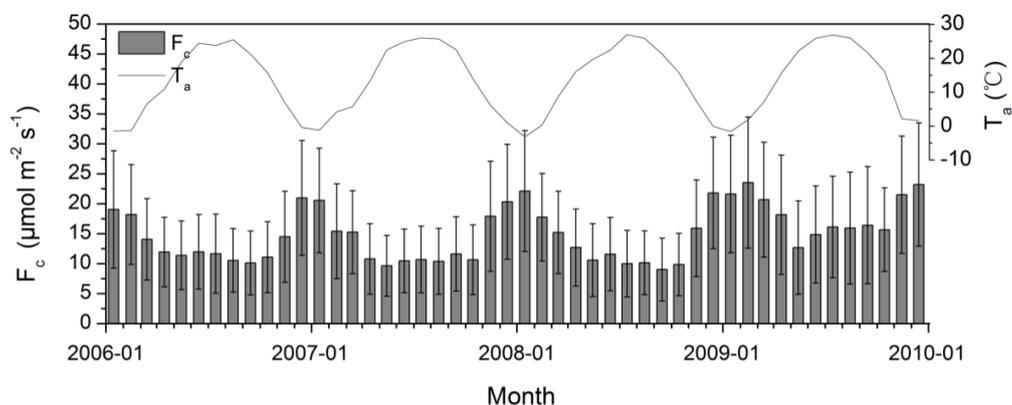


FIGURE 2.6 – Moyennes mensuelles de la température de l'air et des flux de CO₂ observés entre janvier 2006 et janvier 2010 dans une zone urbaine située dans le nord-ouest de Pékin (Chine). Les barres d'erreur représentent l'écart-type. Source : Liu *et al.* [2012]

clairement visible, les flux sont moins forts en milieu de journée, les valeurs les plus basses sont observées vers 12 LST, le flux moyen est alors proche de 0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Cette grande variabilité spatiale se retrouve à Essen en Allemagne, où la zone observée se découpe en un secteur urbain à l'est et un parc au sud-ouest [Kordowski et Kuttler, 2010].

En plus du cycle journalier et de la variabilité spatiale, on observe une **variabilité inter-saisonnière** des flux de CO₂, en particulier dans les régions avec des différences de température importante d'une saison à l'autre. En effet, il existe une corrélation entre la température de l'air et l'intensité des flux de CO₂ (Figure 2.6, Soegaard et Møller-Jensen [2003]) puisque plus il fait froid, plus il y a de rejets de CO₂ dus au chauffage des bâtiments. Ainsi, à Toulouse (France), les flux de CO₂ sont bien plus élevés en DJF qu'en JJA (Figure 2.7a). Dans la zone autour du site de mesure à Helsinki (Finlande), les bâtiments n'émettent pas de CO₂ localement car ils sont alimentés par un réseau de chaleur. On observe tout de même une variabilité inter-saisonnière qui s'explique par une activité de la végétation plus grande en JJA qu'en DJF (Figure 2.7b, [Järvi *et al.*, 2012]). En revanche, pour la ville de Auckland (Nouvelle-Zélande), située dans la zone subtropicale, les différences saisonnières, notamment en matière d'ensoleillement et de température, sont moins marquées, et la variabilité des flux de CO₂ est faible [Weissert *et al.*, 2016 ; Roth *et al.*, 2017].

2.3 Méthodes d'estimation des flux de CO₂

2.3.1 Inventaire

La méthode de l'inventaire est la méthode la plus ancienne pour estimer les émissions de CO₂. Elle consiste à répertorier l'ensemble des sources et puits dans la zone d'étude, puis à évaluer l'importance de chacun des termes. La contribution de chaque terme est évaluée en s'appuyant sur des données de consommation de carburant ou des données d'activité auxquelles on applique des facteurs d'émissions. L'inventaire est aujourd'hui une méthode de référence. Au niveau international, il

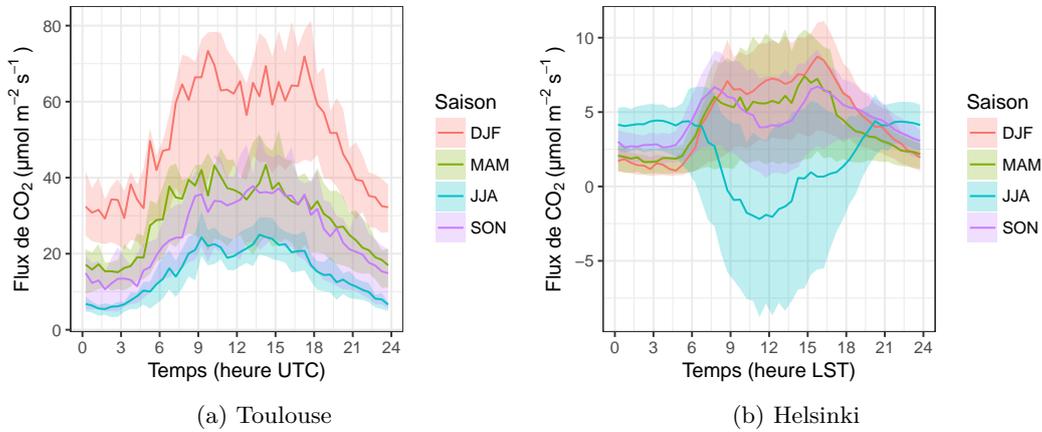


FIGURE 2.7 – Cycles journaliers moyens par saison des flux de CO₂ mesurés respectivement (a) lors de la campagne CAPITOU (mars 2004 – février 2005), au centre ville de Toulouse (France), au niveau du mât de mesure, et (b) sur le site de Kumpula à Helsinki (Finlande) entre juillet 2007 et décembre 2013. Les surfaces colorées représentent l'écart interquartile.

existe un guide méthodologique rédigé par les experts du GIEC pour construire les inventaires nationaux [Eggleston *et al.*, 2006] ainsi qu'une norme associée (norme ISO 14064-1). À l'échelle de la France, la méthodologie utilisée pour les inventaires nationaux officiels est décrite dans un rapport du CITEPA [2019], et l'association Bilan Carbone coordonne et diffuse la méthode Bilan Carbone® qui permet aux organisations de comptabiliser l'ensemble de leur émissions de gaz à effet de serre (dont le CO₂).

Comme les estimations par inventaires s'appuient principalement sur les quantités de carburant consommées, elles sont pertinentes pour estimer les flux de CO₂ associés à la consommation de combustibles. En revanche, les estimations sont moins précises pour les flux de CO₂ associés à la végétation. Une estimation approximative de ces flux peut être obtenue en s'appuyant sur les caractéristiques de la végétation (densité de biomasse, arbre à feuilles caduques ou persistantes, végétation haute ou basse). Pour obtenir une estimation plus précise, il faut connaître les conditions climatiques.

La qualité et la résolution des inventaires dépendent de celles des bases de données initiales. En règle générale, plus on cherche une haute résolution temporelle et/ou spatiale, plus l'incertitude sur les émissions de CO₂ est importante. À l'échelle globale, l'incertitude est estimée à moins de 10% [Andres *et al.*, 2014]. Il existe plusieurs inventaires globaux à haute résolution qui répertorient les émissions de CO₂ dues à la consommation d'énergies fossiles. Hutchins *et al.* [2017] comparent quatre d'entre eux. La résolution temporelle varie entre l'année et le mois, et la résolution spatiale varie entre le kilomètre et le dixième de degré (~10 km). Ces inventaires à l'échelle globale utilisent des proxy tels que la densité de population ou la lumière nocturne visible depuis l'espace pour désagréger les émissions de CO₂. Cette étape entraîne des erreurs importantes : l'incertitude sur les données est estimée à plus de 100% localement [Hogue *et al.*, 2016 ; Andres *et al.*, 2016].

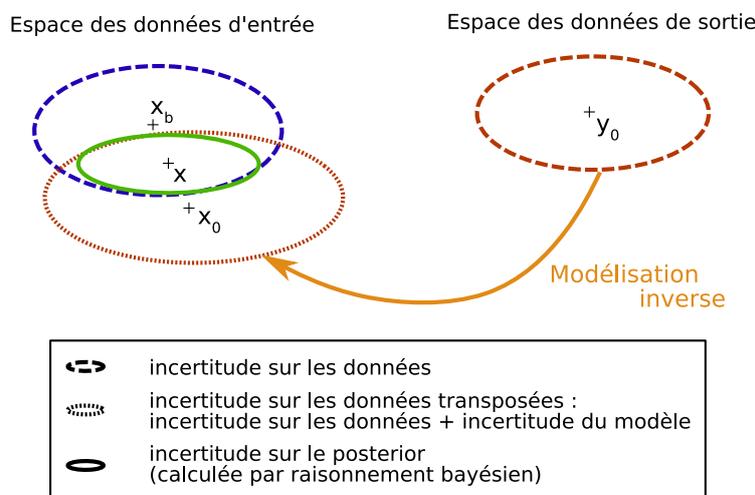


FIGURE 2.8 – Représentation schématique de la réduction de l'incertitude sur les données d'entrée d'un modèle en combinant modélisation inverse et raisonnement bayésien. Les données d'entrée sont notées x_b , les données de sortie y_0 . La modélisation inverse permet de transposer les données de sortie dans l'espace des données d'entrée (x_0). Par inférence bayésienne, l'estimation des données d'entrée est améliorée (x), et l'incertitude associée est réduite (l'incertitude sur x est inférieure à celle sur x_b).

2.3.2 Modélisation inverse

La modélisation inverse consiste à **utiliser un modèle à l'envers de ce pour quoi il a été initialement conçu** : on cherche les entrées du modèle qui permettent d'obtenir les sorties que l'on souhaite. Combinée à un raisonnement bayésien, la modélisation inverse permet de réduire l'incertitude sur les données d'entrée du modèle. Le raisonnement est le suivant : on dispose d'informations sur des données d'entrée du modèle (x_b), avec une certaine incertitude, ainsi que d'informations sur des données de sortie du modèle (y_0), avec également une incertitude associée (Figure 2.8). On souhaite pouvoir combiner ces deux sources d'information. Or, l'espace des données d'entrée et l'espace des données de sorties sont deux espaces différents qui ne sont pas comparables. On utilise alors la modélisation inverse pour transposer l'information dont on dispose sur les données de sorties du modèle (valeurs et incertitude associée) dans l'espace des données d'entrée (x_0 sur la Figure 2.8). L'incertitude sur l'information ainsi transposée est la combinaison de l'incertitude initiale sur les données et de l'incertitude associée au modèle, qui ne reproduit qu'imparfaitement la réalité. On applique ensuite un raisonnement bayésien classique : l'information sur les données d'entrée constitue le prior (x_b), l'information sur les données de sortie transposée dans l'espace des données d'entrée constitue les observations supplémentaires (x_0). Le prior et les observations sont combinés pour obtenir un postérieur (x). Si le modèle utilisé et les informations sur les données de sortie sont d'assez bonnes qualités, l'incertitude sur le postérieur est réduite par rapport au prior. À noter que pour que le raisonnement fonctionne, un lien doit exister entre les données d'entrée et les données de sortie connues.

La modélisation inverse peut être appliquée aux flux de CO₂, en prenant les flux aussi bien comme des données d'entrée ou de sortie du modèle. Dans le premier

cas, où **les flux sont des données d'entrée**, la modélisation inverse va permettre d'**améliorer l'estimation des flux** de CO₂ à partir de mesures de la concentration en CO₂ [Ciais *et al.*, 2010]. L'estimation a priori des flux de CO₂ est donnée par des inventaires, et on utilise un modèle de transport atmosphérique en mode inverse pour transposer l'information apportée par les mesures de concentration de CO₂ en information sur les flux. Ce type de méthode a été utilisé lors des projets CO₂-MEGAPARIS, MEGACITIES et INFLUX pour évaluer les flux de CO₂ respectivement au-dessus de Paris [Bréon *et al.*, 2015], Los Angeles [Feng *et al.*, 2016] et Indianapolis [Lauvaux *et al.*, 2016]. La réduction de l'incertitude sur les données de flux de CO₂ permet ainsi d'évaluer le bilan carbone d'une ville entière avec une incertitude de 25% [Lauvaux *et al.*, 2016], et de pouvoir mesurer les changements à l'échelle décennale dans les émissions de CO₂ de mégapoles [Brioude *et al.*, 2013].

Dans le deuxième cas, **les flux de CO₂ sont des données de sortie** du modèle, c'est par exemple le cas des modèles de surface. La modélisation inverse sert alors à **réduire l'incertitude sur les paramètres internes du modèle** [Santaren *et al.*, 2007].

2.3.3 Mesures directes

À l'échelle du quartier, les flux de CO₂ peuvent être mesurés directement par la **méthode de la covariance des turbulences**. Cette méthode a déjà été éprouvée en milieu rural : il existe des réseaux qui ont standardisé la méthode, et collectent des mesures de flux dans le monde entier (réseau FLUXNET Baldocchi *et al.* [2001]). En milieu urbain, le nombre de mesures de flux de CO₂ par la méthode de la covariance des turbulences a augmenté fortement au cours des vingt dernières années [Vogt *et al.*, 2006 ; Velasco et Roth, 2010 ; Björkegren et Grimmond, 2018 ; Stagakis *et al.*, 2019]. En général, **les flux mesurés par la méthode de la covariance des turbulences sont en bon accord avec les résultats des inventaires** [Björkegren et Grimmond, 2018].

La méthode de la covariance des turbulences permet d'obtenir des mesures avec une haute résolution temporelle (de l'ordre de trente minutes). Le développement de cette méthode a ainsi permis de pouvoir mesurer et étudier les cycles journaliers de flux de CO₂ en milieu urbain (Section 2.2.2), ce qui était impossible avec les inventaires. En revanche, on a accès uniquement au flux total de CO₂ au-dessus de la zone de mesure, la répartition par contributeur, elle, reste inconnue.

Des observations de flux de CO₂ mesurés avec la méthode de la covariance des turbulences seront exploitées dans la suite de la thèse. La méthode est décrite en détails ci-après dans la Section 2.4.

2.3.4 Méthodes de décomposition des mesures directes

Ils existent deux grandes méthodes pour **décomposer les mesures de flux de CO₂**, prises par la méthode de la covariance des turbulences entre les différents puits et sources : l'utilisation de **modèles statistiques** et l'exploitation de **mesures isotopiques**.

2.3.4.1 Modèles statistiques

Les modèles statistiques permettent de **décomposer les mesures de flux de CO₂ en s'appuyant sur des données exogènes, semblables à celles utilisées pour les inventaires.**

Plusieurs études ont ainsi isolé la contribution du trafic routier dans les flux de CO₂ en appliquant des régressions linéaires entre des données de comptage de trafic et des données de flux [Nemitz *et al.*, 2002 ; Järvi *et al.*, 2012]. Sur le même principe, Soegaard et Møller-Jensen [2003] isolent la contribution du chauffage, en mettant en relation les données de flux de CO₂ avec la température de l'air.

L'étude la plus complète sur les modèles statistiques est celle de Crawford et Christen [2015]. Elle exploite l'hétérogénéité spatiale du site d'étude (Sunset, Vancouver au Canada) pour caler des modèles statistiques pour chaque contributeur au flux de CO₂ total.

2.3.4.2 Mesures isotopiques

Une autre méthode pour décomposer les flux de CO₂ consiste à mesurer les rapports isotopiques des deux constituants du CO₂ : le carbone et l'oxygène. En effet, les rapports isotopiques varient suivant les sources d'émissions du CO₂ permettant ainsi de **distinguer trois sources : la combustion du gaz naturel, la combustion de l'essence et la respiration biogène** [Pataki *et al.*, 2003, 2007].

La **fréquence de mesure** des rapports isotopiques est **faible** (généralement une semaine) comparée à celle de la mesure des flux de CO₂ (généralement trente minutes). Weissert *et al.* [2016] proposent une méthode pour pouvoir étudier le cycle journalier : ils définissent trois créneaux de trois heures dans la journée. Les échantillons sont collectés pendant plusieurs jours consécutifs, sur un seul créneau horaire. Ils obtiennent ainsi chaque semaine les rapports isotopiques pour trois créneaux horaires différents ce qui permet d'évaluer les variations de la contribution de chaque source de CO₂ d'une période de la journée à l'autre.

2.3.5 Modélisation numérique

Les mesures de flux de CO₂ par la méthode de la covariance des turbulences, combinées avec des modèles statistiques, permettent de mieux comprendre les flux de CO₂ en milieu urbain et d'identifier les principaux puits et sources. Cependant, l'installation de systèmes pour la mesure de flux est coûteuse et les résultats sont seulement représentatifs de l'échelle locale. Dans ce contexte, **la modélisation numérique constitue une technique prometteuse pour estimer les flux de CO₂ à différentes échelles de temps (horaire, journalière, mensuelle, annuelle...) et d'espace (de l'échelle du quartier à la ville entière), à moindre coût.**

Dans la littérature, nous n'avons trouvé que deux études qui traitent de la modélisation des flux de CO₂ : Soegaard et Møller-Jensen [2003] **qui combinent des modèles statistiques** pour l'estimation des flux dus au trafic et aux bâtiments, avec **un modèle numérique** pour l'estimation des flux associés à la végétation et Christen *et al.* [2011] **proposent une modélisation numérique complète en**

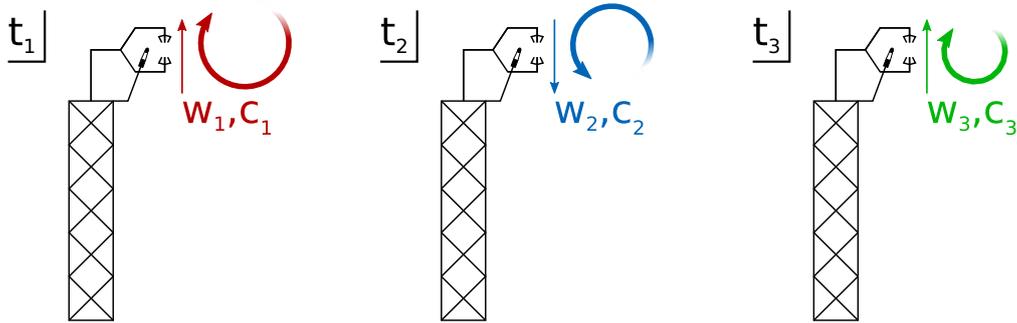


FIGURE 2.9 – Schéma explicatif de la méthode de la covariance des turbulences. Aux temps t_1 , et t_3 , des tourbillons d'air transportent du CO₂ vers le haut avec des concentrations respectives en CO₂ C_1 et C_3 . Au temps t_2 , un tourbillon transporte du CO₂ vers le bas avec une concentration C_2 .

s'appuyant sur quatre sous-modèles indépendants : la respiration humaine est évaluée en utilisant des données de recensements et les émissions du trafic en utilisant des données de comptage combinées avec des journaux de voyages. Les sous-modèles pour la végétation et les bâtiments tiennent compte des conditions météorologiques mesurées pendant un an par une station météorologique urbaine située à proximité du lieu d'étude. Les émissions des bâtiments sont estimées en fonction de la morphologie et du type des bâtiments. Le sous-modèle pour la végétation tient compte de la surface foliaire, de l'ombre et de l'emplacement des arbres. Aux échelles annuelle et mensuelle, le modèle est en bon accord avec les observations.

2.4 Méthode de la covariance des turbulences

2.4.1 Principe et hypothèses

Dans la méthode de la covariance des turbulences, on considère que les mouvements de l'air peuvent être représentés par une succession de petits tourbillons. Chaque tourbillon transporte du CO₂. Pour connaître le flux moyen sur une période on somme la quantité de CO₂ transportée par chaque tourbillon (cf. figure 2.9). La durée des périodes de mesures est en général de trente minutes.

D'un point de vue mathématique, le flux de CO₂ est représenté par :

$$F_{CO_2} = \overline{\rho_{CO_2} \cdot w}$$

avec w la vitesse verticale, et ρ_{CO_2} la masse volumique de CO₂ soit

$$F_{CO_2} = \overline{\rho_a \cdot c \cdot w}$$

avec ρ_a la masse volumique de l'air et $c = \frac{\rho_{CO_2}}{\rho_a}$ le rapport de mélange du CO₂ et de l'air. Chaque terme est ensuite décomposé, selon la méthode de Reynolds, en un terme de moyenne (ici on moyenne sur une période de mesure complète) noté \bar{x} et

2.4. MÉTHODE DE LA COVARIANCE DES TURBULENCES

un terme de fluctuation à la moyenne noté x' . On a donc : $x = \bar{x} + x'$. En appliquant cette décomposition aux termes $w \cdot \rho_a$ et c , le flux de CO₂ se réécrit :

$$F_{CO_2} = \overline{(w \cdot \rho_a + (w \cdot \rho_a)') \cdot (\bar{c} + c')}$$

Après développement, et suppression des termes nuls (la moyenne d'une fluctuation est nulle) on a :

$$F_{CO_2} = \overline{w \cdot \rho_a \cdot \bar{c}} + \overline{(w \cdot \rho_a)' c'}$$

On suppose que le flux vertical d'air sec moyen ($\overline{w \cdot \rho_a}$) est nul (pas de convergences ni de divergences et la masse d'air se conserve).

En appliquant à nouveau la décomposition de Reynolds, mais cette fois sur les termes w et ρ_a , et après développement et simplifications on obtient :

$$F_{CO_2} = \overline{(\bar{w} \cdot \rho'_a + \bar{\rho}_a \cdot w' + \rho'_a \cdot w')' \cdot c'}$$

Soit, en supposant que les fluctuations de densité (ρ'_a) sont négligeables :

$$F_{CO_2} = \overline{\bar{\rho}_a \cdot w' \cdot c'}$$

Le flux de CO₂ s'exprime donc comme la densité de l'air moyenne multipliée par la moyenne du produit des fluctuations de vitesse verticale et de la concentration en CO₂.

2.4.2 Instrumentation

Pour représenter les flux à l'échelle d'un quartier, les mesures doivent être prises dans la sous-couche inertielle, soit à une hauteur supérieure à environ deux fois la hauteur moyenne des bâtiments [Grimmond *et al.*, 2002].

La mesure des flux de CO₂ s'effectue généralement à l'aide d'un **anémomètre ultrasonique** qui mesure le vent dans les 3 dimensions de l'espace, et d'un **analyseur de gaz à infra rouge** qui mesure le rapport de mélange en CO₂. Les mesures sont prises à haute fréquence (de l'ordre de 20 à 30 Hz) afin de capter tous les petits tourbillons [Baldocchi *et al.*, 2001].

Il existe deux types d'analyseurs de gaz pour la mesure du dioxyde de carbone : les **analyseurs de gaz à circuit ouvert** et ceux à **circuit fermé**. En circuit ouvert, la mesure est prise directement dans l'environnement ambiant alors qu'en circuit fermé, un système de pompes collecte un échantillon d'air, puis la mesure est effectuée sur l'échantillon. Järvi *et al.* [2012] montrent que sur leur site d'étude, l'analyseur à circuit fermé produit une mesure de meilleure qualité, avec une plus grande disponibilité, que l'analyseur en circuit ouvert. En effet, le circuit fermé permet de recueillir des données même en cas de précipitations ou de givrage. L'analyseur en circuit ouvert possède également ses avantages, comme par exemple une consommation d'énergie moins importante (il n'y a pas de système de pompes à alimenter) et une nécessité de calibration moins fréquente. Pour une analyse plus détaillée des avantages et inconvénients des deux types d'analyseurs, se référer à [Burba, 2013].

2.4.3 Erreurs de mesure et corrections associées

Lorsqu'on utilise la méthode de la covariance des turbulences, les erreurs commises sont de deux sortes : **les erreurs de représentativité et les erreurs de mesures** [Ran *et al.*, 2016].

Pour limiter les erreurs de représentativité, le site de mesures devra être choisi avec soin (hauteur de mesure appropriée, environnement homogène pour faciliter l'exploitation des données), et les instruments adaptés (mesures à haute fréquences, mesures du vent et du CO₂ aussi colocalisées que possible). Pour s'affranchir des erreurs de mesures, diverses corrections doivent être appliquées aux données brutes.

Les principales sources d'erreurs sont listées ci-après, pour une description plus complète et approfondie, le lecteur pourra se référer à [Burba, 2013]

2.4.3.1 Correction de Webb

Le calcul des flux par la méthode de la covariance des turbulences, nécessite de connaître le rapport de mélange entre le CO₂ et l'air. Or, les analyseurs de gaz mesurent la concentration en CO₂. Pour passer de l'un à l'autre, il faut connaître la masse volumique de l'air, grandeur qui varie en fonction de la température et de l'humidité. **La correction de Webb** [Webb *et al.*, 1980] permet de prendre en compte ces variations. Elle ne vient donc pas corriger une erreur de mesure, mais elle **permet de prendre en compte un effet physique : la dilatation de l'air sous l'effet de l'augmentation de la température ou de l'humidité.**

L'ampleur des corrections, en particulier celles liées à la température, est non négligeable puisque Webb *et al.* [1980] précisent qu'il est courant que la correction soit supérieure à la valeur du flux de CO₂ lui même.

Une méthode pour ne pas avoir à appliquer la correction de Webb consiste à pré-sécher l'air, et à le ramener à une température constante avant d'effectuer les mesures. Cependant, un tel dispositif demande du temps entre l'instant de prélèvement de l'air, et celui de la mesure, ce qui n'est guère compatible avec la méthode de la covariance des turbulences qui requiert une fréquence de mesure élevée.

Les **analyseurs de gaz les plus récents** mesurent, en plus de la concentration en CO₂ de l'air, la température, l'humidité et la pression de l'air à grande vitesse. Ils sont ainsi capables de fournir directement les fractions molaires de CO₂. **La correction de Webb ne doit alors pas être appliquée** pour ces instruments [Burba, 2013].

2.4.3.2 Décalage temporel

La mesure des flux de CO₂ provient de la combinaison de la mesure de la concentration de CO₂ et de la vitesse verticale du vent. Ces deux grandeurs sont **mesurées par des instruments différents ce qui peut créer un décalage temporel** entre les deux séries de mesures. Ce décalage est corrigé en recherchant le décalage qui permet de maximiser la corrélation entre les deux séries.

2.4.3.3 Rotation

En général, l'anémomètre n'est jamais vraiment parallèle au sol. **Pour compenser cette inclinaison de l'instrument, on applique une rotation aux données.** On suppose que la vitesse verticale moyenne sur la durée de mesure du flux (généralement 30 minutes) est nulle, et on fait pivoter les données de manière à ce que cette hypothèse soit vérifiée.

Si l'hypothèse d'une vitesse verticale nulle est valide sur des terrains plats, elle est plus **discutable sur des reliefs complexes tels qu'une ville.** En effet, les bâtiments créent des obstacles à la circulation du vent, ce qui entraîne localement des divergences et/ou convergences. Néanmoins, **dans la littérature,** on suppose généralement que cette hypothèse est vérifiée pour les flux mesurés dans la sous-couche inertielle (assez haut au-dessus des toits des bâtiments), et **la rotation des données est donc appliquée.**

2.4.4 Qualité de la mesure

Les aléas des conditions météorologiques peuvent perturber ponctuellement la qualité des mesures. Les impacts de la stationnarité et de l'intensité de la turbulence ainsi que des précipitations sur la qualité de la mesure sont décrits ci-après. La question de la complétion des données est également abordée.

2.4.4.1 Précipitations

Les précipitations sont **sources d'erreurs de mesure lorsque la concentration en CO₂ est mesurée avec un analyseur de gaz en circuit ouvert.** Les analyseurs de gaz utilisent le principe de la spectroscopie infrarouge. Un émetteur envoie un rayonnement infrarouge à travers l'échantillon d'air à analyser, puis le rayonnement est analysé par un spectromètre. Au cours de son trajet, le rayonnement est plus ou moins atténué en fonction de la concentration en CO₂ et en vapeur d'eau dans l'air. Les précipitations, lorsqu'elles sont présentes, atténuent le rayonnement de manière prononcée, et perturbe le bon fonctionnement de l'instrument. Pour repérer les périodes de précipitations, on regarde l'atténuation du signal. **Une variation élevée de l'atténuation entre deux mesures est caractéristique de précipitations.** Les données présentant une telle atténuation sont retirées afin de ne pas polluer la série de mesures.

2.4.4.2 Stationnarité et intensité de la turbulence

La méthode de la covariance des turbulences repose sur l'hypothèse que l'air est agité par une multitude de petits tourbillons qui transportent les molécules de CO₂ à travers toute la colonne d'air, depuis le sol jusqu'à l'analyseur de gaz. **La stationnarité et l'intensité de la turbulence sont donc essentielles pour obtenir des mesures de bonne qualité.**

Foken *et al.* [2004] proposent deux indicateurs de qualité : l'un pour quantifier la stationnarité de la turbulence, et un deuxième pour mesurer son intensité.

L'indicateur sur la stationnarité de la turbulence consiste à comparer le flux de CO₂ sur l'ensemble de la période d'acquisition de la mesure, (en général 30

minutes), avec la moyenne des flux calculés sur des sous périodes de cinq minutes. Une note de 1 à 9 est ensuite attribuée en fonction de la différence entre les deux valeurs. Lorsque la stationnarité est très bonne, les deux valeurs sont très proches, et la valeur 1 est attribuée.

La validité de **l'indicateur sur l'intensité** de la turbulence est discutable en milieu urbain. Cet indicateur est basé sur des paramétrisations qui ont été déduites de zones d'étude avec de faibles hauteurs de canopée [Thomas et Foken, 2002]. On préférera donc **fixer un seuil de vitesse de friction minimale à atteindre pour garantir l'intensité de la turbulence**.

2.4.4.3 Complétion des données

Les aléas des conditions météorologiques, qui perturbent ponctuellement la qualité de mesure, ainsi que les dysfonctionnements temporaires des instruments entraînent des interruptions dans l'acquisition des données. Il existe **plusieurs méthodes pour compléter les mesures** comme par exemple **l'interpolation linéaire**, **l'utilisation de cycles moyens ou encore les réseaux de neurones** [Järvi *et al.*, 2012].

Dans cette thèse, on fait le choix de **ne pas compléter les données** car les mesures de flux de CO₂ vont être utilisées pour évaluer un modèle. Compléter les données a donc peu d'intérêt car, la complétion n'apporte pas d'information supplémentaire (l'information utilisée pour reconstituer les valeurs manquantes provient de la série non complétée). De plus, quelle que soit la méthode utilisée, l'incertitude sur les valeurs reconstituées par la complétion sera plus grande que celle sur les valeurs mesurées directement. Par conséquent, l'incertitude moyenne sur une série complétée est plus grande que celle sur la série originale (non complétée).

2.4.5 Représentativité de la mesure

La question de la représentativité de la mesure est essentielle pour pouvoir exploiter correctement les mesures. Dans cette section, on aborde les méthodes de calcul de la zone d'influence ainsi que la question du stockage de CO₂ dans le canyon et de son impact sur les flux mesurés.

2.4.5.1 Zone d'influence

La surface influençant la mesure dépend des conditions météorologiques et de la hauteur des instruments de mesure : elle sera **d'autant plus grande que l'atmosphère est stable et les instruments sont haut**. Sa connaissance permet de savoir de quelle zone les données mesurées sont représentatives.

La **zone d'influence** est l'ensemble de la zone à l'intérieur de laquelle, le CO₂ émis atteint, à un moment donné, les instruments de mesure. Cette zone tend vers l'infini, car, quel que soit le lieu d'émission du CO₂, au bout d'un certain temps, les particules finissent par atteindre les instruments. En pratique, on définit la zone d'influence comme la zone minimale telle qu'au moins une certaine proportion du CO₂ qui atteint l'analyseur de gaz ait été émis à l'intérieur de la zone. Ici, on retiendra le seuil de 80%. On définit également la **distance d'influence** comme

le rayon du cercle minimal, centrée sur le point de mesure, qui comprend la zone d'influence.

Plusieurs types de modèles existent pour calculer la surface d'influence [Vesala *et al.*, 2008b]. Les modèles les plus simples sont les modèles analytiques, mais ils ne sont pas adaptés à des terrains complexes comme ceux que l'on rencontre en ville. Dans cette thèse, on utilise le **modèle FFP (Flux Footprint Predictions)** proposé par Kljun *et al.* [2015] qui est une paramétrisation basée sur le calcul de rétro-trajectoires par le modèle LPDM-B [Kljun *et al.*, 2002]. Le modèle FFP a été choisi car les longueurs de rugosité des sites urbains étudiés dans cette thèse sont cohérentes avec celles considérées pour construire le modèle de surface d'influence.

Kljun *et al.* [2015] conseillent d'utiliser le modèle FFP au-dessus de la sous-couche de rugosité et en-dessous de la couche d'entraînement (située au sommet de la couche limite). Ce conseil est suivi puisque les mesures de flux de CO₂ utilisées sont prises dans la sous-couche inertielle. Les résultats du modèle ne seront pas conservés lorsque les observations ne remplissent pas la condition de stabilité proposée par Kljun *et al.* [2015] : $-15.5 < z_m/L$, avec z_m la hauteur de mesure et L la longueur de Monin Obukov.

Les paramètres nécessaires pour calculer la surface d'influence avec le modèle FFP sont définis ci-après.

- La **hauteur moyenne des bâtiments** (z_H) est déterminée pour chaque site, en fonction des données disponibles.
- La **longueur de rugosité aérodynamique**¹ (z_0) est fixée à 10% de z_H et la **hauteur de déplacement** (z_d) à 70% de z_H , comme suggéré par Grimmond et Oke [1999].
- La **hauteur de mesure** z_m est égale à la hauteur des instruments de mesure par rapport au sol moins z_d .
- La **hauteur de la couche limite** n'a pas été mesurée lors des campagnes de mesures exploitées. Nous utilisons donc, pour les cas neutres et stables, la formule de Nieuwstadt [1981] comme proposé par Kljun *et al.* [2015]. Pour les cas instables, la zone d'influence est peu sensible à la hauteur de la couche limite. Par conséquent, cette dernière est estimée de manière approximative : on suppose qu'elle est de 250 m la nuit (de 20 UTC à 6 UTC) et de 1000 m le jour (de 6 UTC à 20 UTC).

Le modèle FFP est appliqué pour chaque période de mesure (trente minutes). Une fois la surface d'influence calculée, on en déduit la distance d'influence. Les résultats sont ensuite répartis en vingt-quatre classes en fonction de la direction moyenne du vent pendant la période de mesure (chaque classe représente un secteur de 15°). Puis, les distances d'influence sont moyennées pour obtenir une **distance d'influence moyenne à long terme** pour chaque classe de direction de vent.

1. Hauteur en dessous de laquelle la vitesse du vent est nulle. Au-dessus de cette hauteur, la variation de la vitesse du vent avec l'altitude peut être approximée par un profil logarithmique.

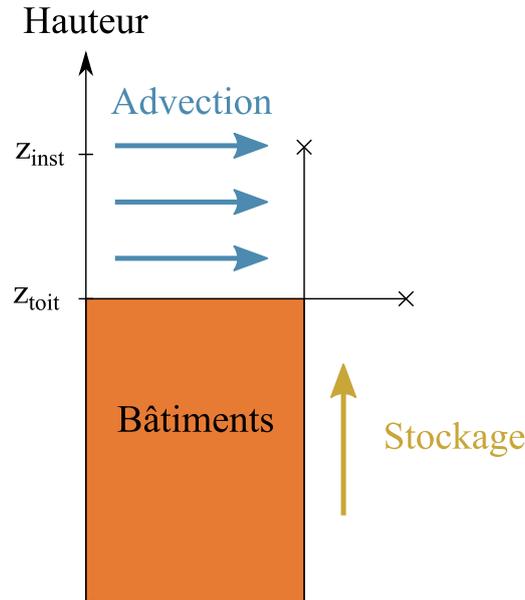


FIGURE 2.10 – Les variations de concentration de CO₂ peuvent être dues à des mouvements verticaux (phénomène de stockage/déstockage) ou horizontaux (phénomène d’advection).

2.4.5.2 Stockage de CO₂

Les flux de CO₂ sont mesurés dans la sous-couche inertielle afin d’avoir des flux représentatifs de l’échelle du quartier. La contrepartie de cette mesure en altitude est qu’elle peut être biaisée par le phénomène de stockage/déstockage de CO₂ dans la colonne d’air située en-dessous des instruments. Crawford *et al.* [2015] ont montré qu’à Vancouver durant la nuit, la concentration en CO₂ est de 50 ppm plus élevée au niveau du sol que 50 m au-dessus. Ce phénomène entraîne des **incertitudes sur la temporalité des émissions de CO₂** : du CO₂ peut être émis au niveau de la surface, s’accumuler dans le canyon, et n’être mesuré par le capteur que quelques heures plus tard.

Le stockage de CO₂ en-dessous du point de mesure peut être estimé à partir des mesures de concentration en CO₂. Deux points de mesure suffisent pour estimer le stockage de CO₂ : le premier à la hauteur des toits des bâtiments et le deuxième à la hauteur des instruments de mesures des flux (placés au-dessus des toits, dans la sous-couche inertielle) [Bjorkegren *et al.*, 2015].

À partir de ces deux points de mesures, ont fait des hypothèses quant au profil de concentration en CO₂ :

- la concentration en CO₂ est homogène entre le sol et le toit des bâtiments ;
- la concentration varie linéairement avec la hauteur entre le toit des bâtiments et le niveau des instruments de mesure.

Les variations au cours du temps de la concentration en CO₂ mesurée peuvent s’expliquer par des **mouvements d’air verticaux ou horizontaux** (Figure 2.10). Les **mouvements verticaux** mélangent la masse d’air et participent ainsi à l’homogénéisation de la concentration en CO₂. Ils entraînent les molécules de CO₂ depuis leur lieu d’émission (au niveau du sol ou des toits des bâtiments) jusqu’au point de

2.4. MÉTHODE DE LA COVARIANCE DES TURBULENCES

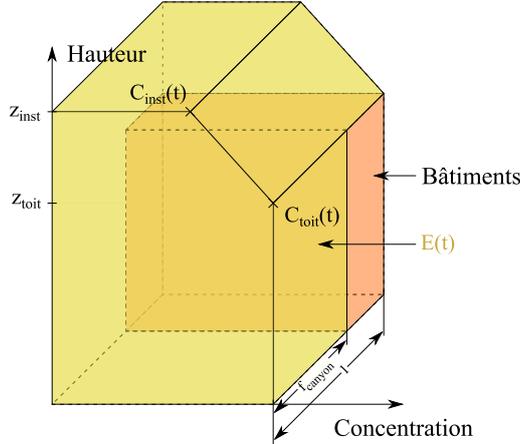


FIGURE 2.11 – Schéma de la quantité surfacique $E(t)$: ensemble du CO_2 contenu dans le volume d'air (en jaune) en-dessous de la hauteur des instruments de mesure des flux par unité de surface. Cette quantité permet de calculer le flux de stockage $Stock_{no_adv}$.

mesure. Au cours de la journée, l'intensité de ces mouvements varie (Section 1.1). Lorsqu'ils sont faibles, le mélange de la colonne d'air est moins efficace, et le CO_2 s'accumule en dessous du niveau de mesure, créant du **stockage** de CO_2 dans le canyon. Les **mouvements horizontaux** sont dus à l'**advection**. Ce phénomène transporte les masses d'air d'un quartier à l'autre de la ville, et de la campagne vers la ville (et inversement). Suivant la trajectoire suivie avant d'arriver à la verticale du point de mesure, les masses d'air peuvent être plus ou moins chargées en CO_2 ce qui entraîne des variations de la concentration en CO_2 mesurée.

Dans la suite, **on propose deux méthodes de calcul du stockage** : la première en supposant que les variations de concentration en CO_2 au niveau des instruments sont dues à des mouvements verticaux et donc qu'il n'y a pas d'advection (le flux de stockage est alors noté $Stock_{no_adv}$), et la deuxième en supposant qu'elle sont dues à des mouvements horizontaux et donc qu'il y a de l'advection (le flux de stockage associé est noté $Stock_{adv}$). La réalité se situe entre ces deux hypothèses (une partie des variations est due à des mouvements verticaux et l'autre à des mouvements horizontaux de la masse d'air). L'utilisation de deux méthodes de calcul va ainsi permettre d'obtenir un encadrement de la valeur du flux de stockage.

On suppose tout d'abord que **les variations de concentration de CO_2 mesurées aussi bien au niveau des instruments que des toits sont dues à des mouvements verticaux** et participent donc au phénomène de stockage/déstockage de CO_2 en dessous du niveau de mesure. On note $E(t)$ l'ensemble du CO_2 contenu dans le volume d'air en-dessous du niveau de mesure des flux de CO_2 par unité de surface. Cette quantité est représentée schématiquement sur la Figure 2.11. Mathématiquement, elle s'écrit :

$$E(t) = C_{toit}(t) * z_{toit} * f_{canyon} + \frac{C_{toit}(t) + C_{inst}(t)}{2} * (z_{inst} - z_{toit}) \quad (2.1)$$

avec $C_{toit}(t)$ et $C_{inst}(t)$ les concentrations en CO_2 mesurées à l'instant t respectivement au niveau des toits et au niveau des instruments, z_{toit} la hauteur des toits

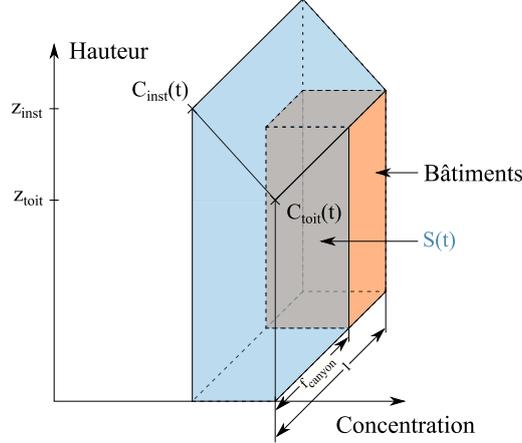


FIGURE 2.12 – Schéma de la quantité surfacique $S(t)$: CO₂ qui provoque une surconcentration en CO₂ dans le volume d'air en dessous de la hauteur des instruments de mesure par rapport à la concentration de fond qu'on suppose mesurée au niveau des instruments par unité de surface. Cette quantité permet de calculer le flux de stockage $Stock_{adv}$.

par rapport au sol, z_{inst} la hauteur des instruments par rapport au sol et f_{canyon} la fraction de sol non occupée par les bâtiments.

Le stockage de CO₂ entre l'instant $t - \Delta t$ et l'instant t est la différence entre le CO₂ contenu dans le volume d'air en dessous du niveau des instruments à l'instant t ($E(t)$), et celui qui y était contenu à l'instant $t - \Delta t$ ($E(t - \Delta t)$). Le flux de stockage à l'instant t s'écrit alors :

$$Stock_{no_adv}(t) = \frac{E(t) - E(t - \Delta t)}{\Delta t}. \quad (2.2)$$

On suppose désormais que **les variations de la concentration en CO₂ mesurée au niveau des instruments sont dues à des mouvements horizontaux de la masse d'air** et donc qu'elles sont attribuables au phénomène d'advection et ne doivent pas être prises en compte dans le calcul du stockage. On fait également l'hypothèse que le phénomène d'advection impacte de manière identique l'air mesuré au niveau des toits et l'air mesuré au niveau des instruments. Par conséquent, **les variations de la sur-concentration en CO₂ mesurées au niveau des toits sont dues à des mouvements horizontaux** et doivent être prises en compte dans le calcul du stockage de CO₂ dans le canyon.

La quantité de CO₂, par unité de surface, qui provoque une surconcentration de CO₂ dans le canyon à l'instant t est notée $S(t)$ (cf. Figure 2.12). Elle s'exprime :

$$S(t) = (C_{toit}(t) - C_{inst}(t)) * \left(z_{toit} * f_{canyon} + \frac{z_{inst} - z_{toit}}{2} \right), \quad (2.3)$$

et le flux de stockage s'écrit alors :

$$Stock_{adv}(t) = \frac{S(t) - S(t - \Delta t)}{\Delta t}. \quad (2.4)$$

Les deux formules de calcul du stockage proposées jusqu'ici **nécessitent de connaître la concentration en CO₂ au niveau des toits. Or, il arrive que cette information ne soit pas disponible.** Dans ce cas, on suppose que la concentration est constante entre le sol et le niveau des instruments, et par conséquent que la concentration au niveau des toits est égale à la concentration au niveau des instruments. Les flux de stockage de CO₂ dans le canyon se réécrivent alors :

$$Stock_{adv}(t) = 0 \quad (2.5)$$

$$Stock_{no_adv}(t) = \frac{C_{inst}(t) - C_{inst}(t - \Delta t)}{\Delta t} * [z_{toit} * (f_{canyon} - 1) + z_{inst}] \quad (2.6)$$

La formule de $Stock_{no_adv}$ est alors équivalente à la formule de calcul du flux de stockage proposée par Crawford et Christen [2014].

Comme suggéré par Crawford *et al.* [2011], on n'appliquera pas de correction relative au stockage de CO₂ sur les mesures de flux. En effet, **en appliquant une correction on risque de compter deux fois le flux de stockage** : une première fois lorsque l'on corrige le flux, et une seconde quelques heures plus tard lorsque le CO₂ est évacué du canyon et arrive au niveau du capteur. **L'importance du stockage de CO₂ sera tout de même évaluée**, et l'incertitude sur les mesures liée à ce phénomène sera systématiquement représentée sur les figures. Lorsqu'une mesure de la concentration au niveau des toits sera disponible, on conservera la plus grande valeur (en valeur absolue) entre les flux de stockage $Stock_{no_adv}$ et $Stock_{adv}$, ceci afin d'avoir une borne supérieure de l'incertitude liée au stockage.

2.5 Discussion

La méthode d'estimation des flux de CO₂ par inventaire consiste à sommer les contributions de chaque source et puits de CO₂. Cette méthode donne des résultats proches des mesures directes du flux total par la méthode de la covariance des turbulences. Le bon accord entre les deux méthodes indique que **les principaux puits et sources de CO₂ en ville sont probablement tous identifiés.**

La méthode de la covariance des turbulences permet de mesurer directement les flux de CO₂ à l'échelle d'un quartier, avec une résolution temporelle de l'ordre de trente minutes. L'étude de ces mesures dévoile une **importante variabilité journalière et inter-saisonnière** des flux. La variabilité journalière est attribuable à la variabilité des activités humaines (plus d'activité en journée que la nuit) ainsi qu'au cycle journalier du soleil (température plus froide et luminosité plus faible la nuit). La variabilité inter-saisonnière, elle, est imputable à la modification des conditions météorologiques au cours de l'année, suivant le cycle naturel des saisons. La mesure de flux sur divers sites révèle des **différences importantes d'une ville à l'autre**, qui s'expliquent, en partie, par des conditions climatiques différentes (température moyenne, fréquence des précipitations...). Les mesures directes des flux de CO₂ ont permis d'identifier **le micro-climat local comme un élément important influençant les flux de CO₂ en milieu urbain**, aux échelles journalière et inter-saisonnière.

Mesurer de manière précise les flux de CO₂ est une première étape pour identifier les éléments clés qui expliquent leur variabilité ainsi que les processus physiques en jeu. Pour aller plus loin, et tester si la connaissance de ces éléments et des processus est suffisante pour prévoir la variabilité des flux, **la modélisation constitue un moyen intéressant.**

Les modèles statistiques sont la première étape dans le processus de modélisation : ils sont simples à mettre en œuvre, et permettent d'étudier la nature des relations qui lient les paramètres clés et les flux de CO₂ (relation linéaire, exponentielle...). Cependant, les modèles statistiques ne sont pas pleinement satisfaisants car ils ne peuvent être utilisés que pour des situations proches des situations mesurées qui ont servies à leur construction. Cette limitation vient du fait que dans ce type de modèle, la loi qui relie les variables prédictives et la variable prédite est estimée de façon simplifiée, on se basant sur les observations. Le processus physique sous-jacent, lui, reste inconnu.

La représentation des processus physiques constitue une étape supplémentaire dans la démarche de modélisation. Elle relève du champ de la **modélisation numérique**. La construction et l'évaluation de modèles numériques permettent de vérifier que les processus physiques qui expliquent les relations entre variables prédictives et prédites (ici les flux de CO₂), sont correctement identifiés et compris.

Une fois les étapes d'évaluation et de validation du modèle numérique effectuées, on dispose d'une reproduction de la réalité qui peut être aisément modifiée. On peut alors facilement, en effectuant une simulation numérique, **étudier les différents processus physiques représentés par le modèle et surtout les interactions qui existent entre eux.**

Dans le domaine des flux de CO₂ en milieu urbain, plusieurs modèles statistiques ont été construits. Il existe également quelques modèles numériques (Section 2.3.5). Cependant, les modèles numériques existants modélisent les différents contributeurs aux flux de CO₂ de manière séparée, et ils n'intègrent pas de modélisation du climat local. Ils ne permettent donc pas d'étudier les interactions qui existent entre les différents contributeurs aux flux de CO₂ et les conditions météorologiques.

2.6 Objectifs de la thèse

Dans cette thèse, on propose d'inclure une modélisation des flux de CO₂ dans le modèle numérique de climat urbain TEB (Chapitre 3). L'ajout de la modélisation des flux de CO₂ va permettre, lors de l'étape d'évaluation du modèle, de vérifier que les processus physiques qui relient les variables météorologiques (température, précipitations, rayonnement...) et les flux de CO₂ sont bien identifiés et compris (Chapitres 4 et 5). Cette étape de validation sera effectuée en s'appuyant sur des mesures directes de flux de CO₂. Une fois le modèle validé, il sera possible d'étudier les interactions qui existent entre le climat et le CO₂ en ville (Chapitre 6).

Résumé

- Il y a principalement quatre sources/puits de CO₂ en ville : le trafic, les bâtiments, la végétation et la respiration humaine.
- Pour étudier le CO₂ émis/capté localement, la grandeur la plus appropriée est le flux de CO₂.
- Les flux de CO₂ ont un cycle journalier marqué, avec une variabilité inter-saisonnière importante aux latitudes moyennes et hautes. Le climat local explique, en partie, les différences de flux mesurés d'un site à l'autre.
- Plusieurs méthodes permettent d'évaluer les flux de CO₂ : les méthodes par inventaire, la modélisation inverse, la mesure directe par la méthode de la covariance des turbulences ainsi que la modélisation statistique ou numérique.
- La méthode de mesure des flux de CO₂ par la covariance des turbulences est complexe. Pour obtenir des mesures de qualité, il faut, choisir un environnement et des instruments adaptés. Lors de l'exploitation des mesures, des corrections doivent être appliquées aux données brutes (correction de l'éventuelle décalage temporel, correction de Webb, rotation des flux). Il faut également vérifier, pour chaque mesure de flux, la qualité (présence de précipitation, qualité de la turbulence) et la représentativité (zone d'influence, effet du stockage) de la mesure effectuée.

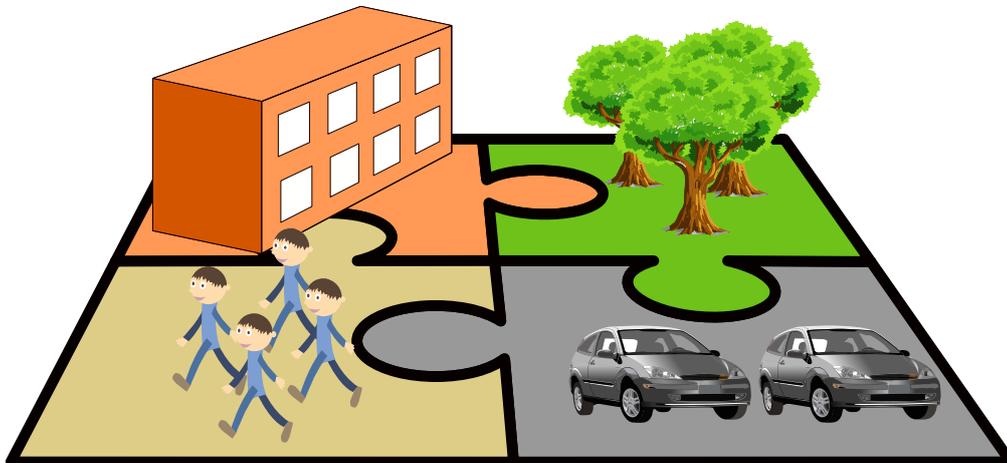
Que la stratégie soit belle est un fait, mais n'oubliez pas de regarder le résultat.

Winston Churchill

3

Modélisation des flux de CO₂ dans TEB (Town Energy Balance)

Ce chapitre présente la méthode de modélisation des flux de CO₂ introduite dans TEB. La stratégie générale est expliquée en Section 3.1 et la méthode de modélisation de chaque contributeur aux flux de CO₂ est détaillée en Section 3.2.



Sommaire

3.1	Stratégie de modélisation	46
3.2	Modélisation des flux de CO₂	46
3.2.1	Bâtiments	46
3.2.2	Végétation	49
3.2.2.1	Photosynthèse	50
3.2.2.2	Respiration	52
3.2.2.3	Évolution de la biomasse	52
3.2.3	Trafic	53
3.2.4	Respiration humaine	53
3.3	Discussion	54

Le modèle Town Energy Balance (TEB) est un modèle de canopée urbaine à une couche qui représente la ville sous la forme d'une rue canyon infinie [Masson, 2000] (Section 1.4.2). Il permet de modéliser les interactions entre la ville et l'atmosphère avec une résolution de l'ordre de la centaine de mètres à quelques kilomètres. TEB fait partie du modèle de surface SURFEX (SURFace EXTernalisée) [Masson *et al.*, 2013] qui modélise les interactions entre la surface et l'atmosphère pour différents types de surface (villes, couverts naturels, rivières, lacs et océans).

3.1 Stratégie de modélisation

Le travail présenté ici propose d'inclure la modélisation des flux de CO₂ en milieu urbain dans le modèle de climat urbain TEB. L'intérêt est de pouvoir représenter les interactions entre les flux de CO₂ et le micro-climat urbain. Chaque contributeur au flux de CO₂ en ville est modélisé de manière séparée, mais **les interactions d'ordre météorologiques entre les différents contributeurs** (effet d'ombrage, modification des caractéristiques de l'air dans le canyon) **sont prises en compte**. Parmi les quatre contributeurs aux flux de CO₂ en ville (Section 2.1), **les bâtiments et la végétation sont ceux qui dépendent le plus des conditions météorologiques**.

Aux moyennes et hautes latitudes, l'émission de CO₂ par les bâtiments est majoritairement liée au chauffage, et par conséquent à la température extérieure. L'activité de la végétation (respiration et photosynthèse), elle, est influencée par la combinaison de plusieurs paramètres météorologiques tels que l'ensoleillement, les précipitations et la température. La **modélisation** des flux de CO₂ associés aux bâtiments et à la végétation est assez poussée afin de prendre en compte le **lien entre les flux de CO₂ et le micro-climat urbain**. Elle repose sur le modèle **BEM** (Building Energy Model) **pour les bâtiments**, et le modèle **ISBA** (Interaction between Soil Biosphere and Atmosphere) **pour la végétation**.

Les flux liés au **trafic** et la **respiration humaine** sont peu sensibles à la météorologie. Il a été fait le choix de les modéliser avec des **paramétrisations simples**. En effet, l'introduction de modélisations détaillées de ces deux contributeurs dans le modèle TEB a peu d'intérêt car ils ne sont peu ou pas influencés par les autres éléments du modèle et en particulier par les conditions météorologiques.

3.2 Modélisation des flux de CO₂

3.2.1 Bâtiments

Les bâtiments émettent du CO₂ à cause de l'énergie consommée par les habitants. La quantité de CO₂ émise par cette consommation d'énergie dépend du type d'énergie utilisé. Par conséquent, la stratégie générale pour modéliser le CO₂ émis par les bâtiments consiste à estimer l'énergie consommée par les bâtiments pour chaque type d'énergie existant, puis à en déduire les émissions de CO₂ correspondantes. Quatre catégories de types d'énergie sont définies dans le modèle :

- l'énergie qui ne rejette ni CO₂ ni vapeur d'eau localement (électricité, réseau de chauffage urbain), ci-après désignée par ELEC ;

3.2. MODÉLISATION DES FLUX DE CO₂

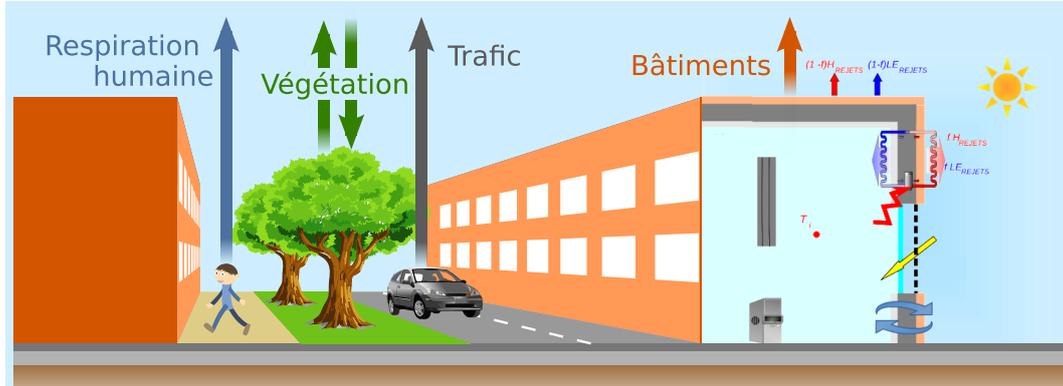


FIGURE 3.1 – Représentation schématique de la modélisation des flux de CO₂ dans TEB.

Tableau 3.1 – Caractéristiques des systèmes de chauffage en fonction du type d'énergie utilisé. Les valeurs des facteurs d'émissions proviennent de l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie). Le facteur d'émission correspond au CO₂ émis par unité d'énergie consommée. L'efficacité est définie comme le rapport entre l'énergie utile et l'énergie totale (sensible et latente). PCS/PCI désigne le rapport entre le Produit Calorifique Supérieur et le Produit Calorifique Inférieur, c'est à dire entre la quantité totale d'énergie disponible (sensible et latente), et la quantité d'énergie sensible disponible.

Type d'énergie (t)	Facteur d'émission (kgCO ₂ /J) (E)	Efficacité (η)	PCS/PCI
ELEC	0	1.0	1.00
FIOUL	5.7E-8	0.7	1.11
GAZ	7.5E-8	0.7	1.07
AUTRE	9.2E-8	0.7	1.11

- le gaz ;
- le fioul ;
- les autres types d'énergie (principalement le bois).

Le CO₂ émis et la consommation d'énergie sont reliés par un **facteur d'émission** qui représente la quantité de CO₂ émis localement par Joule d'énergie consommée. Le facteur d'émission dépend du type d'énergie utilisé. Les valeurs par défaut de ces facteurs d'émission sont données dans le Tableau 3.1.

Dans TEB, la consommation d'énergie par les bâtiments est estimée par BEM (Building Energy Model) [Bueno *et al.*, 2012]. BEM calcule l'énergie consommée pour le **chauffage et la climatisation** en fonction des conditions météorologiques, des caractéristiques des bâtiments (type d'isolation, matériaux de construction...) et de la température de consigne (température intérieure demandée par les habitants). L'énergie consommée pour la cuisine, les appareils électriques et l'éclairage est également estimée par BEM. Cette dernière ainsi que la température de consigne sont estimées en fonction de l'usage du bâtiment. Pour les bâtiments résidentiels, elles dépendent également du profil énergétique des habitants.

Pour chaque point de grille de TEB, plusieurs compartiments peuvent être définis dans les bâtiments, avec chacun un usage et un profil énergétique spécifique

[Schoetter *et al.*, 2017].

Dans le cadre de cette thèse, le modèle BEM a été amélioré par l'ajout de l'estimation de la consommation d'énergie due au **chauffage de l'eau chaude domestique**. Cette amélioration permettra de calculer les flux de CO₂ associés au chauffage de l'eau. La demande moyenne d'énergie par mètre carré de plancher pour la production de l'eau chaude ainsi que la fraction de cette eau chauffée au gaz sont de nouvelles variables d'entrée du modèle (à zéro par défaut). On suppose que l'eau chaude non chauffée au gaz est chauffée à l'électricité. La nuit, la demande d'énergie pour le chauffage de l'eau est réduite avec le même coefficient de modulation que celui déjà utilisé pour moduler la demande d'énergie due à la cuisine, aux appareils électriques et à l'éclairage.

Les émissions de CO₂ par les bâtiments (F_{BAT}) sont la somme des émissions dues au chauffage des bâtiments (F_{CH}) et à la production de l'eau chaude domestique (F_{ECD}). Ce qui peut s'écrire :

$$F_{BAT} = F_{CH} + F_{ECD} \quad (3.1)$$

Les autres sources de consommation d'énergie (climatisation, cuisine, éclairage, appareils électriques) ne sont pas considérées car on suppose que c'est l'énergie électrique, (non émettrice de CO₂ localement), qui est utilisée. Cela entraîne probablement une légère sous-estimation des émissions de CO₂ puisque certaines cuisines (dont la proportion exacte est en général inconnue) fonctionnent au gaz. L'approximation reste acceptable puisque la consommation d'énergie par la cuisine est souvent faible devant la consommation liée au chauffage (moins de 10% en France¹). Cependant, il faut garder à l'esprit que ce chiffre est valable uniquement pour la France, et qu'il pourrait varier pour des pays avec un climat ou un contexte socio-économique différent [Velasco *et al.*, 2013].

Pour pouvoir estimer les émissions de CO₂ dues au **chauffage des bâtiments**, on commence par calculer la consommation d'énergie par type d'énergie. Pour cela, on introduit comme nouvelles variables d'entrée de TEB, les fractions (f_t) de bâtiment chauffées par chacun des quatre types d'énergie définis dans le modèle. La somme des quatre fractions doit être égale à 1 (Figure 3.2). L'énergie demandée par type d'énergie ($Q_{CH_t}^{dem}$) s'écrit alors :

$$Q_{CH_t}^{dem} = Q_{CH_{Tot}}^{dem} * f_t \quad (3.2)$$

avec $Q_{CH_{Tot}}^{dem}$ la demande totale d'énergie par mètre carré de bâtiment. On divise par l'efficacité du système de chauffage (η_t) pour obtenir l'énergie consommée par type de chauffage ($Q_{CH_t}^{cons}$) par mètre carré de bâtiment :

$$Q_{CH_t}^{cons} = Q_{CH_{Tot}}^{dem} * \frac{f_t}{\eta_t}. \quad (3.3)$$

En multipliant par le facteur d'émission, et en sommant sur les quatre types d'énergie, on obtient le flux de CO₂ émis par le chauffage des bâtiments (F_{CH}) :

$$F_{CH} = \left(\sum_t Q_{CH_{Tot}}^{dem} * \frac{f_t}{\eta_t} * E_t \right) \quad (3.4)$$

1. Données statistiques du CEREN 2015

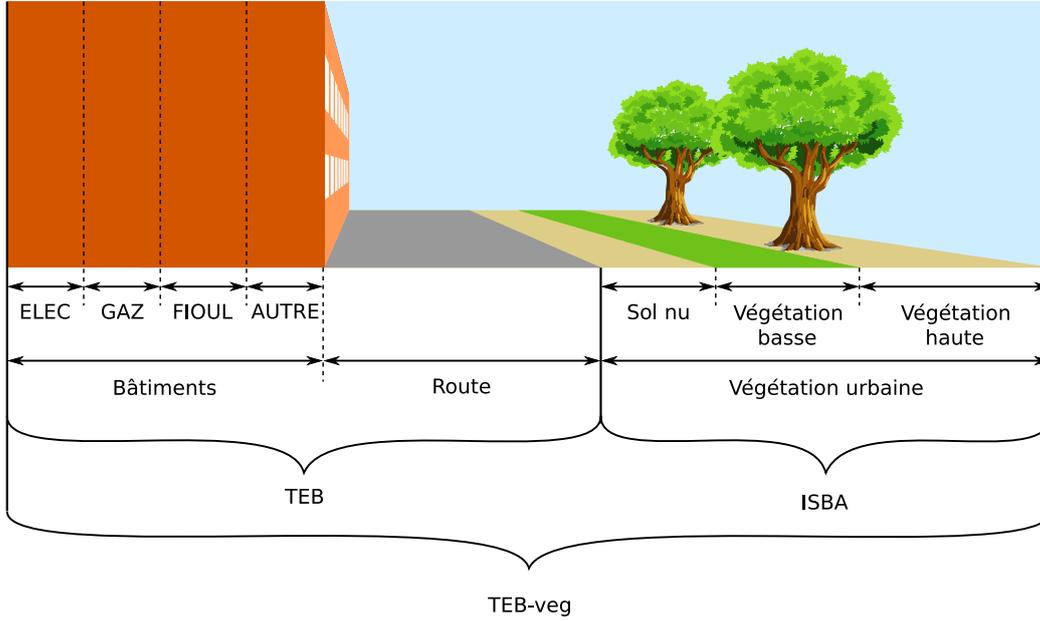


FIGURE 3.2 – Le modèle TEB-veg fait appel à TEB pour traiter les routes et les bâtiments, et à ISBA pour la végétation urbaine. On distingue quatre fractions dans les bâtiments, suivant la source énergétique utilisée pour le chauffage. La surface urbaine végétalisée est répartie en trois catégories en fonction de la hauteur de la végétation [Lemonsu *et al.*, 2012].

ce qui peut encore s'écrire :

$$F_{CH} = Q_{CH_{Tot}}^{dem} * \left(\sum_t \frac{f_t}{\eta_t} * E_t \right) \quad (3.5)$$

avec E_t les facteurs d'émission par type d'énergie.

Pour la production d'eau chaude domestique, on ne considère que deux types d'énergie : l'électricité et le gaz. En suivant le même raisonnement que pour le chauffage, les flux de CO₂ dus à la production d'eau chaude domestique (F_{ECD}) s'écrivent :

$$F_{ECD} = Q_{ECD} * N_{etage} * \left(\frac{f_{ECD_GAZ}}{\eta_{GAZ}} * E_{GAZ} + \frac{1 - f_{ECD_GAZ}}{\eta_{ELEC}} * E_{ELEC} \right) \quad (3.6)$$

avec Q_{ECD} la demande d'énergie pour la production d'eau chaude par mètre carré de plancher et N_{etage} le nombre d'étages dans le bâtiment. On suppose que l'efficacité des chauffe-eaux est la même que celle des systèmes de chauffage.

3.2.2 Végétation

Pour représenter la **végétation**, on utilise la version **TEB-veg** de TEB, introduite par Lemonsu *et al.* [2012], qui représente non seulement les surfaces bâties et les routes, mais également la végétation urbaine. Cette dernière est modélisée par le modèle de transfert sol-végétation-atmosphère **ISBA** (Interaction between Soil Biosphere and Atmosphere) développé par Noilhan et Planton [1989]. ISBA

Type	Numéro	Détails
Sol nu		
NO	1	Sol lisse sans végétation
ROCK	2	Sol rocheux sans végétation
SNOW	3	Sol en permanence gelé (neige/glace)
Végétation haute		
TEBD	4	Feuillus à feuilles caduques des régions tempérées
BONE	5	Conifères à feuilles persistantes des régions boréales
TRBE	6	Feuillus à feuilles persistantes des régions tropicales
TRBD	13	Feuillus à feuilles caduques des régions tropicales
TEBE	14	Feuillus à feuilles persistantes des régions tempérées
TENE	15	Conifères à feuilles persistantes des régions tempérées
BOBD	16	Feuillus à feuilles caduques des régions boréales
BOND	17	Conifères à feuilles caduques des régions boréales
SHRB	19	Arbustes
Végétation basse		
C3	7	Cultures (photosynthèse de type C3)
C4	8	Cultures (photosynthèse de type C4)
IRR	9	Cultures irriguées
GRAS	10	Prairies
BOGR	18	Herbe des régions boréales
TROG	11	Prairies tropicales
PARK	12	Tourbières, parcs et jardins (herbe irriguée)

Tableau 3.2 – Liste des différents espèces végétales disponibles dans TEB (types ECOCLIMAP)

est forcé par les conditions météorologiques que l'on trouve à l'intérieur du canyon urbain. La modélisation de la végétation urbaine par TEB permet de représenter les interactions directes (modification du rayonnement par effet d'ombrage) ou indirectes (modifications de l'état de l'air dans le canyon) entre les surfaces bâties, les routes et la végétation urbaine. Elle permet également de mieux prendre en compte les formes urbaines puisque l'ajout de la végétation urbaine à l'intérieur du canyon augmente la distance, considérée par le modèle, entre les bâtiments.

Le sol est décrit par le schéma de diffusion multicouches d'ISBA [Boone *et al.*, 2000; Decharme *et al.*, 2011]. Le modèle utilise une approche "big leaf" avec trois catégories : le sol nu, la végétation basse et la végétation haute (Figure 3.2). Pour chaque catégorie, il est possible de choisir entre plusieurs espèces végétales, correspondant aux types ECOCLIMAP (Tableau 3.2). Les caractéristiques de la végétation sont ajustées en fonction des espèces végétales retenues (Tableau A.2).

3.2.2.1 Photosynthèse

Les cycles journaliers de flux de carbone et de vapeur d'eau entre la végétation et l'air de la rue canyon sont simulés par la version de ISBA-A-gs sensible à la concentration de CO₂ dans l'air [Calvet *et al.*, 1998, 2004]. **Cette version d'ISBA-A-gs a déjà été validée en milieu rural [Albergel *et al.*, 2010], mais c'est**

la première fois qu'elle est utilisée en milieu urbain.

Le flux de CO₂ associé à la végétation est la différence entre la photosynthèse qui capte du CO₂ et la respiration qui en rejette. La photosynthèse consiste, pour la plante, à utiliser l'énergie lumineuse provenant du soleil pour produire du sucre, c'est-à-dire de l'énergie qu'elle peut facilement transporter et stocker. Les atomes nécessaires à la production de sucre (carbone, hydrogène et oxygène) sont puisés dans l'atmosphère (molécule de dioxyde de carbone, CO₂) et dans le sol (molécule d'eau, H₂O). En plus du sucre, la photosynthèse produit un déchet, le dioxygène, qui est rejeté dans l'atmosphère. La photosynthèse se déroule dans les feuilles des végétaux, plus particulièrement au niveau des chloroplastes : des organites intra-cellulaire contenant de la chlorophylle. Le CO₂ contenu dans l'air doit donc être transporté à travers la plante jusqu'aux chloroplastes pour pouvoir être utilisé pour la photosynthèse.

Le CO₂ passe de l'atmosphère au milieu inter-cellulaire des plantes en empruntant les stomates. Ces derniers sont des ouvertures naturelles de l'épiderme des plantes, surtout situés au niveau des feuilles. Ils permettent d'assurer les échanges gazeux entre la plante et le milieu extérieur. La plante peut fermer plus ou moins ses stomates afin de réguler ses échanges avec l'atmosphère. Le degré d'ouverture des stomates est un compromis entre les ouvrir pour laisser passer plus de CO₂ nécessaire à la photosynthèse, et les fermer pour limiter les pertes en eau par transpiration. Schématiquement, la facilité du CO₂ à passer de l'atmosphère au milieu intra-cellulaire de la plante est représenté par la **conductance stomatique (g_s)**. g_s dépend non seulement du degré d'ouverture des stomates mais aussi de leur taille et de leur densité. On note **D_{max} le déficit maximal de saturation en vapeur d'eau** de l'air accepté par la plante avant qu'elle ne commence à fermer ses stomates. **f_0 est le rapport entre la concentration en CO₂ dans l'atmosphère et la concentration dans le milieu intra-cellulaire.**

Le CO₂ est ensuite transporté du milieu intra-cellulaire vers les chloroplastes, à travers le mésophylle de la plante. Le coefficient de diffusion qui caractérise ce transport est appelé **conductance mésophyllienne (g_m)**. Les valeurs de g_m en l'absence de stress hydrique (g_m^*) sont données dans le Tableau A.2. Les valeurs de D_{max} et f_0 en l'absence de stress hydrique sont déduites de g_m^* selon des formules qui dépendent de la hauteur de la végétation [Calvet, 2000 ; Calvet *et al.*, 2004].

Dans ISBA, pour calculer le **flux de photosynthèse**, c'est-à-dire l'assimilation de carbone par la plante, on estime tout d'abord l'assimilation de carbone au niveau des feuilles, en l'absence de stress hydrique. Les valeurs de l'assimilation maximale de CO₂ par les feuilles à 25 °C (A_{max}) sont données dans le Tableau A.2. La valeur de A_{max} est modulée en fonction de la température de surface de la plante, de la concentration en CO₂ de l'air environnant et de l'énergie lumineuse disponible : le Rayonnement Photosynthétiquement Actif (PAR). Pour le calcul du PAR, on ne fait pas la distinction entre le rayonnement direct et diffus, et on suppose que le PAR en haut de la canopée végétale est proportionnel au rayonnement solaire descendant avec un coefficient de 0,48. La photosynthèse peut également être limitée par un manque d'eau. L'influence des sécheresses est prise en compte, avec des schémas différents en fonction du type de végétation (haute ou basse) et de sa réaction vis

à vis du stress hydrique (stratégie offensive ou défensive). Ces schémas modifient les valeurs de g_m , D_{max} et f_0 en fonction de l'eau disponible [Calvet, 2000 ; Calvet *et al.*, 2004].

L'assimilation nette de la végétation (photosynthèse) est ensuite calculée au niveau de l'ensemble de la canopée. Pour cela, l'assimilation nette de CO₂ au niveau des feuilles est intégrée à l'aide d'une quadrature de Gauss à trois points. Pour cette étape, on suppose que la distribution verticale des feuilles à travers la canopée est homogène et que les feuilles mouillées (à cause de la pluie) n'assimilent pas de CO₂.

3.2.2.2 Respiration

La respiration de la végétation se décompose en deux grands termes : la respiration autotrophe et la respiration hétérotrophe.

La **respiration autotrophe** désigne la **respiration cellulaire des plantes**. Lors de cette réaction, la plante récupère l'énergie contenue dans le sucre qu'elle a en réserve, en l'oxygénant. La respiration consomme du dioxygène et du sucre, et elle libère des molécules d'ATP (molécules énergétiques) et du CO₂. Le dioxygène et le CO₂ sont respectivement capté et libéré dans l'atmosphère.

La **respiration hétérotrophe** est due à la **décomposition de la matière organique** du sol par des micro-organismes. Comme la respiration cellulaire, cette réaction consomme du dioxygène et libère du CO₂ dans l'atmosphère.

Dans ISBA-A-gs, la respiration de l'ensemble de l'écosystème, Re , (respiration hétérotrophe et autotrophe) est modélisée par un modèle dit Q_{10} basé sur l'équation de Van't Hoff :

$$Re = Re_{25} * f(w_g) * Q_{10}^{(T_{sol}-25)/10}, \quad (3.7)$$

avec Re_{25} le taux de référence de respiration de l'écosystème à 25 °C, T_{sol} la température de la couche racinaire du sol en degrés Celsius. Q_{10} est fixé à 2. $f(w_g)$ est un facteur d'échelle qui permet de prendre en compte l'effet de l'humidité du sol sur la respiration [Albergel *et al.*, 2010]. Il est défini par :

$$f(w_g) = \min(1, w_g/w_{fc}), \quad (3.8)$$

où w_g est l'humidité du sol et w_{fc} l'humidité du sol à sa capacité au champ (ie. lorsqu'il a atteint sa capacité maximale de rétention en eau).

3.2.2.3 Évolution de la biomasse

La quantité de biomasse est un paramètre crucial pour estimer les flux de CO₂ associés à la végétation puisque l'importance des phénomènes de respiration et de photosynthèse végétales dépend directement de la quantité de biomasse. Dans le modèle, la quantité de biomasse évolue au cours de la simulation : elle croît d'autant plus vite que l'activité photosynthétique est importante [Calvet et Soussana, 2001]. La biomasse est répartie entre trois réservoirs : les feuilles, la biomasse structurelle active et la biomasse structurelle souterraine. Régulièrement, des transferts de biomasse entre ces différents réservoirs sont effectués.

3.2. MODÉLISATION DES FLUX DE CO₂

L'index de surface foliaire (LAI) est calculé de manière interactive en fonction de la quantité de biomasse et de la teneur en azote de la végétation [Calvet et Soussana, 2001]. L'effet de la concentration en CO₂ est également pris en compte [Calvet *et al.*, 2008].

3.2.3 Trafic

Les flux de CO₂ liés au trafic sont modélisés de manière plus simple que ceux associés aux bâtiments et à la végétation puisqu'ils sont moins sensibles aux conditions météorologiques.

Pour chaque maille du modèle, le flux de CO₂ annuel moyen dû au trafic est introduit comme nouvelle variable d'entrée du modèle. Le flux moyen est ensuite modulé en fonction de l'heure de la journée, du jour de la semaine et du mois (Équation (3.9)).

$$F_{TR}(m, j, h) = \overline{F_{TR}} * M_{TR}^a(m) * M_{TR}^s(j) * M_{TR}^j(h) \quad (3.9)$$

F_{TR} est le flux de CO₂ associé au trafic, $\overline{F_{TR}}$ est le flux annuel moyen dû au trafic, et, $M_{TR}^a(m)$, $M_{TR}^s(j)$ et $M_{TR}^j(h)$ sont les facteurs de modulation en fonction respectivement du mois de l'année, du jour de la semaine et l'heure de la journée. Par défaut, les facteurs de modulation sont exprimés en fonction de l'heure solaire, mais ils peuvent être exprimés en fonction de l'heure légale si cette dernière est connue du modèle. Des valeurs par défaut des facteurs de modulation (correspondant au cas CAPITOUL cf. Figure 4.10) sont présentes dans le modèle, mais il est conseillé de les remplacer par des valeurs spécifiques au site étudié pour obtenir une représentation de la variabilité spatio-temporelle des flux de CO₂ aussi précise que possible.

3.2.4 Respiration humaine

La quantité de CO₂ expirée par un individu dépend de son activité et de ses caractéristiques physiques. Ici, on utilise le taux moyen d'émission de CO₂ par individu donné par Moriwaki et Kanda [2004] : $E_{RH} = 8.87E-6$ CO₂ kg/s/personne. Ce taux est multiplié par la densité de population pour obtenir le flux total de CO₂ dû à la respiration humaine. La densité de population peut être modulée, de la même manière que le trafic, avec des facteurs de modulation qui dépendent de l'heure de la journée, du jour de la semaine et du mois. Le flux de CO₂ lié à la respiration humaine s'écrit donc :

$$F_{RH}(m, d, h) = \overline{P_{dens}} * M_{RH}^a(m) * M_{RH}^s(j) * M_{RH}^j(h) * E_{RH} \quad (3.10)$$

avec $\overline{P_{dens}}$ la densité de population moyenne, E_{RH} le taux moyen d'émission de CO₂ par individu, et $M_{RH}^a(m)$, $M_{RH}^s(j)$ et $M_{RH}^j(h)$ les facteurs de modulation en fonction respectivement du mois de l'année, du jour de la semaine et l'heure de la journée.

3.3 Discussion

Le modèle de canopée urbaine TEB a été adapté, au cours de cette thèse, de manière à être capable de modéliser les flux de CO₂ en milieu urbain. L'ensemble des contributeurs est modélisé dans un seul modèle, ce qui permet de représenter les interactions entre les différents contributeurs, comme par exemple, les effets d'ombrage des bâtiments sur la végétation.

L'évaluation de la capacité de TEB à modéliser les flux de CO₂ est faite dans les deux Chapitres suivants en utilisant des données de flux de CO₂ mesurées par la méthode de la covariance des turbulences. Parmi les quatre contributeurs aux flux de CO₂ identifiés, deux nous intéressent particulièrement car ils sont très fortement liés aux conditions météorologiques : les bâtiments et la végétation. Ainsi, dans le Chapitre 4 on s'intéresse plus particulièrement à l'évaluation des flux associés aux bâtiments, et dans le Chapitre 5 à celle des flux associés à la végétation. Une évaluation de la capacité du modèle à reproduire les flux totaux sur chaque site d'étude est également réalisée.

Résumé

- On s'intéresse aux interactions entre le micro-climat et les flux de CO₂. Les flux associés aux bâtiments et à la végétation sont fortement météo-dépendant, ils sont modélisés de manière détaillée. Les flux associés au trafic et la respiration humaine sont peu sensibles à la météo, ils sont paramétrisés.
- La modélisation des flux associés aux bâtiments s'appuie sur le modèle d'énergétique des bâtiments BEM inclus dans TEB. BEM calcule la consommation d'énergie par type d'énergie, les consommations sont ensuite converties en flux de CO₂ à l'aide de facteurs d'émissions.
- Les flux de CO₂ associés à la végétation urbaine sont modélisés à l'aide de la configuration TEB-veg : le modèle de végétation ISBA est forcé avec les conditions atmosphériques présentes dans le canyon calculées par TEB.
- La paramétrisation des flux de CO₂ associés au trafic et à la respiration humaine consiste à moduler une valeur moyenne en fonction de l'heure de la journée, du jour de la semaine et du mois.

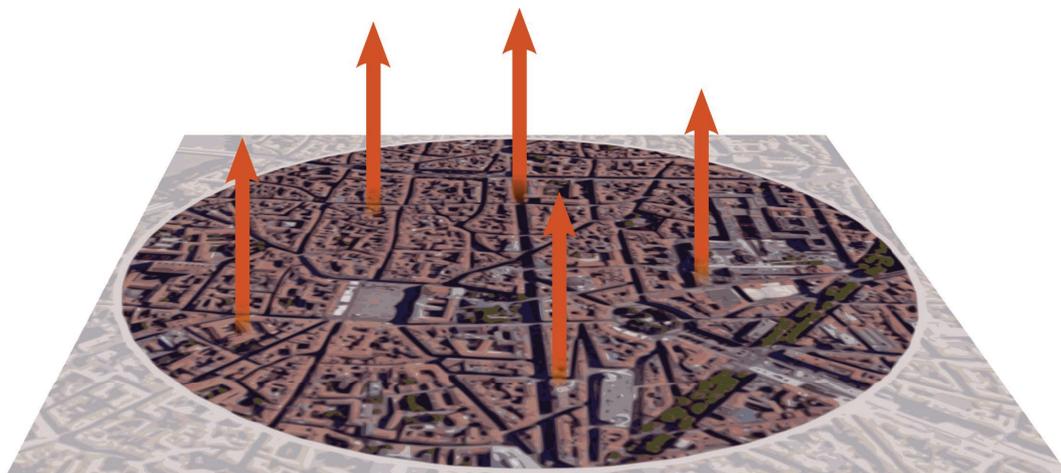
Les idées audacieuses sont comme les pièces que l'on déplace sur un échiquier : on risque de les perdre mais elles peuvent être aussi l'amorce d'une stratégie gagnante.

Johann Wolfgang von Goethe

4

CAPITOUL : évaluation des flux de CO₂ au-dessus d'une zone urbaine bâtie

Ce chapitre propose une première évaluation de la modélisation des flux de CO₂ intégrée dans TEB (Chapitre 3). Le site d'étude est fortement bâti et peu végétalisé, ce qui va permettre d'évaluer, en particulier, les flux de CO₂ associés aux bâtiments. La campagne de mesure ainsi que les données utilisées pour l'évaluation du modèle sont présentées en Section 4.1. Le modèle est évalué en Section 4.2. La Section 4.3 propose une estimation des flux de CO₂ émis par les bâtiments en s'appuyant uniquement sur les observations.



Sommaire

4.1	Description du site et des données	58
4.1.1	Mesure des flux de CO ₂	59
4.1.1.1	Dispositif instrumental	59
4.1.1.2	Traitement des données	60
4.1.1.3	Influence de la position du mât	61
4.1.1.4	Disponibilité des données	63
4.1.1.5	Représentativité des données	63
4.1.1.6	Stockage de CO ₂ en-dessous des instruments	64
4.1.2	Préparation des données d'entrée pour la simulation TEB	66
4.1.2.1	Forçages météorologiques	66
4.1.2.2	Données d'occupation du sol	68
4.2	Évaluation de TEB	72
4.2.1	Sensibilité des flux de CO ₂ associés aux bâtiments	72
4.2.1.1	Ajustement des paramètres et sensibilité du modèle	72
4.2.1.2	Scores statistiques	75
4.2.2	Évaluation du modèle avec la configuration de référence	75
4.2.2.1	Sensibilité aux variations de la zone d'influence	77
4.2.2.2	Évaluation des flux turbulents de chaleur	78
4.2.2.3	Évaluation des flux de CO ₂	80
4.2.3	Conclusion	82
4.3	Estimation du CO₂ émis par les bâtiments	83
4.3.1	Flux provenant des perches	83
4.3.2	Méthode de décomposition des flux de CO ₂	85
4.3.3	Qualité de la reconstruction du cycle sans chauffage	90
4.3.4	Décomposition des flux de CO ₂ : isolement du chauffage	90
4.3.5	Conclusion	92
4.3.6	Discussion	92
4.4	Discussion	93

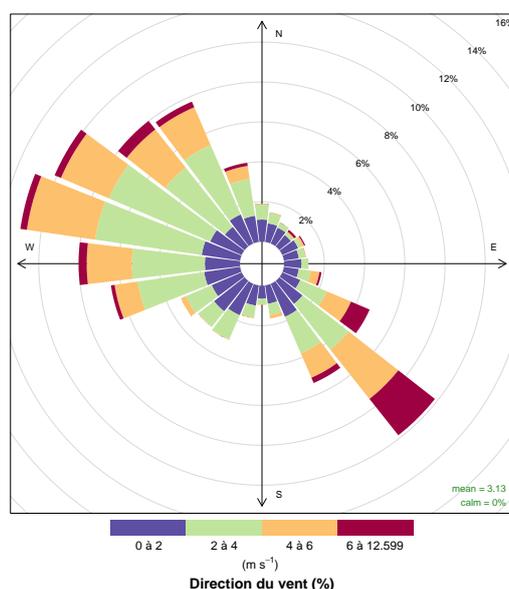


FIGURE 4.1 – Rose des vents mesurés à une vingtaine de mètres au-dessus des toits des bâtiments, sur le site du Monoprix lors de la campagne CAPITOU. Cette rose des vents est typique de la région toulousaine.

4.1 Description du site et des données

La campagne CAPITOU (Canopy and Aerosol Particle Interactions in the Toulouse Urban Layer) a eu lieu à Toulouse, ville du sud-ouest de la France, entre février 2004 et février 2005. Elle avait pour but d'étudier les interactions entre l'atmosphère urbaine et la formation d'aérosols urbains. Lors de cette campagne, les données brutes (mesures de concentration en CO₂ et de vitesse du vent à haute fréquence) permettant la mesure de flux de CO₂ par la méthode de la covariance des turbulences ont été recueillies. Ces données n'avaient encore jamais été exploitées, et le calcul des flux de CO₂ a été effectué spécialement pour cette thèse. La méthodologie utilisée pour traiter les données, ainsi que l'analyse de leur qualité et de leur représentativité fait l'objet de la Section 4.1.1.

Plusieurs sites de mesures ont été exploités lors de la campagne CAPITOU [Masson *et al.*, 2008]. Ici, on s'intéresse principalement aux mesures prises dans l'hyper-centre toulousain, sur le site dit du Monoprix. Le site ainsi que les données utilisées sont décrits en détail en Section 4.1.2.

Le climat toulousain est influencé par l'océan Atlantique (à 230 km à l'ouest), la mer Méditerranée (à 150 km au sud-est) et la chaîne montagneuse des Pyrénées (à 80 km au sud). Les hivers sont doux, les printemps marqués par les précipitations, les étés chauds et secs et les automnes ensoleillés. Les vents prédominants sont canalisés dans la direction sud-est/nord-ouest par la topographie régionale. La région est régulièrement balayée par le vent d'Autan, un vent turbulent venant du sud-est (Figure 4.1).

4.1. DESCRIPTION DU SITE ET DES DONNÉES



FIGURE 4.2 – (a) Mât de mesure utilisé pendant la campagne CAPITOUL pour recueillir des données à une vingtaine de mètres au-dessus des toits. Le mât est fixé sur le toit d'un bâtiment de 20,5 m de hauteur. Crédits : CNRM. (b) Vue aérienne du site de mesure. L'étoile indique l'emplacement du mât de mesure.

4.1.1 Mesure des flux de CO_2

4.1.1.1 Dispositif instrumental

Les données de mesure de flux sont prises à l'aide d'un mât de mesure (Figure 4.2) situé sur le toit plat le plus haut du quartier (toit du Monoprix). La concentration en CO_2 est mesurée par un LICOR-7500 en circuit ouvert, et le vent par un anémomètre sonore GILL. Les fréquences d'acquisition des données de concentration et de vent sont respectivement de 50 et 30 Hz.

L'analyseur de gaz et l'anémomètre utilisés pour les mesures de flux de CO_2 sont placés en haut du mât, au niveau principal de mesure. Un deuxième anémomètre est fixé sur le mât, quelques mètres en-dessous du niveau principal de mesure (Figure 4.3 et Tableau 4.1). Lorsque le mât est totalement déployé, le niveau de mesure principal se situe à 48,05 m au dessus du niveau du sol. Pour des raisons de sécurité, en cas de vent fort, le mât est rétracté, ce qui entraîne une diminution des hauteurs de mesure.

Des perches de mesure ont également été installées au niveau du toit du Monoprix, au-dessus des deux rues adjacentes au magasin (Rue d'Alsace-Lorraine et Rue de la Pomme). La longueur des perches est d'un tiers de la largeur des rues. Au bout de chaque perche, un analyseur de gaz LICOR-7500 et un anémomètre sonore YOUNG sont installés.

Dans les paragraphes suivants, le traitement des données de flux de CO_2 est expliqué en détail, puis on étudie l'impact de la position du mât sur les données, ainsi que la disponibilité et la représentativité des données. Enfin, on estime l'incertitude liée au phénomène de stockage.

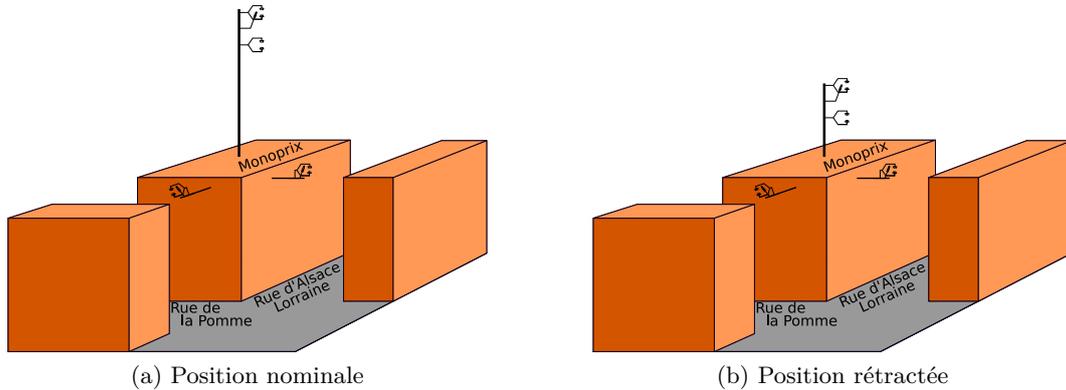


FIGURE 4.3 – Dispositif de mesure utilisé pour mesurer les flux de CO₂ lors de la campagne CAPITOUL, avec le mât de mesure en position nominale (a) ou rétractée (b).

4.1.1.2 Traitement des données

Les flux de CO₂ sont calculés par période de trente minutes, par la méthode de la covariance des turbulences, en exploitant les données de l'analyseur de gaz et de l'anémomètre placés en haut du mât, au niveau principal de mesure. Plusieurs traitements sont appliqués aux données brutes de concentration de CO₂ et de vitesse du vent pour obtenir les flux (cf. Section 2.4 pour plus de détails sur les méthodes de corrections). L'ensemble de ces traitements a été effectués par William Maurel (CNRM/GMEI).

Les **pics isolés** dans les observations de vitesse du vent et de concentration de CO₂ sont **supprimés**. Une observation est considérée comme un pic isolé si la différence entre sa valeur et la moyenne de la valeur la précédant et de celle la suivant est supérieure à 30 m s⁻¹ (à 50 Hz) pour la vitesse du vent et supérieure à 28 ppm (à 20 Hz) pour la concentration de CO₂. On applique également un algorithme **pour retirer les pics non isolés**. La moyenne et l'écart type mobiles sont calculés sur une période de 200 s pour le vent et de 60 s pour la concentration de CO₂. Les mesures sont supprimées si l'écart à la moyenne mobile est supérieur à sept fois l'écart type pour le vent et quatre fois l'écart type pour le CO₂. Les mesures effectuées pendant les **épisodes pluvieux** sont supprimées en se basant sur l'atténuation du signal.

Après élimination des pics et des valeurs aberrantes, on applique un **filtre passe-haut** avec une fréquence de coupure de 0.0008 Hz (environ 1/(20 min)) pour retirer la tendance dans les mesures de concentration de CO₂. La **correction de Webb** est également prise en compte. Le **décalage temporel** entre l'anémomètre et le LICOR est corrigé. Puis, une **rotation 2D** est appliquée. Les impacts de cette rotation sont surtout visibles en hiver : le flux moyen de CO₂ est augmenté de 1.8 μmol m⁻² s⁻¹ ce qui correspond à une augmentation de 4% par rapport au flux sans rotation.

Enfin, on vérifie la stationnarité et l'intensité de la turbulence pendant les mesures. On n'exploite que les données pour lesquelles la **vitesse de friction est supérieure à 0.15 m s⁻¹** et l'**indicateur de qualité de la stationnarité de la turbulence** proposé par Foken *et al.* [2004] est **inférieur ou égal à cinq** (observations de qualité moyenne à très bonne dont la qualité est suffisante pour faire des analyses statistiques).

4.1. DESCRIPTION DU SITE ET DES DONNÉES

Tableau 4.1 – Hauteur des instruments de mesure pour les différentes positions du mât.

Position du mât	Hauteur du niveau principal de mesure (m agl*)	Hauteur du second anémomètre (m agl*)
1	48,05	40,01
2	38,98	
3	38,23	34,03
4	26,93	

* agl : au-dessus du niveau du sol (above ground level)

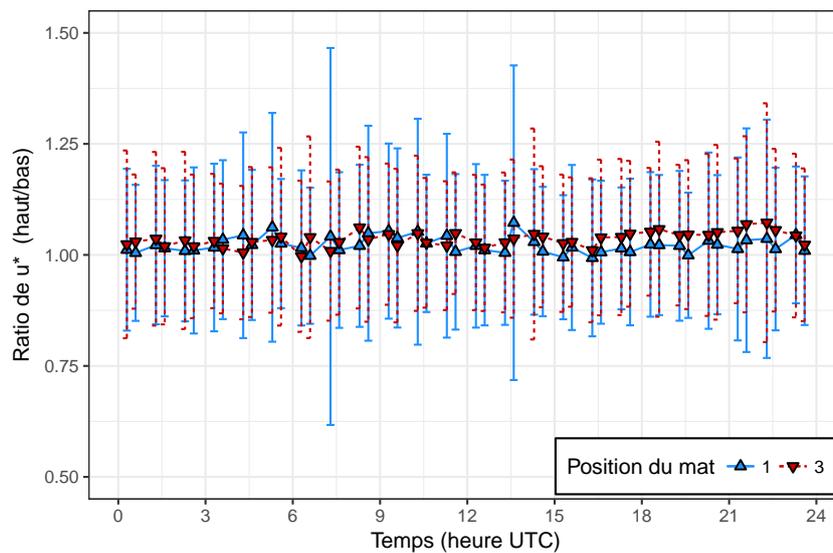


FIGURE 4.4 – Cycle journalier moyen du rapport entre les vitesses de friction mesurées par l’anémomètre situé au niveau principal de mesure, et celui placé quelques mètres en-dessous. Le cycle journalier est calculé séparément pour les positions 1 et 3 du mât. Les barres d’erreur représentent l’écart-type.

4.1.1.3 Influence de la position du mât

L’impact de la position du mât sur la qualité des données de flux de CO_2 est étudié dans cette section. Au total, le mât peut prendre quatre positions différentes (Tableau 4.1). **Les mesures prises en position 4 ne sont pas analysées** car dans cette position la hauteur des instruments au-dessus du niveau du sol est bien inférieure à deux fois la hauteur moyenne des bâtiments (2×15 m). Par conséquent, les flux mesurés ne sont **pas représentatifs du quartier** (Section 2.4.2).

La position 2 est rarement utilisée, et la différence de hauteur des instruments entre la position 2 et la position 3 est inférieure à un mètre. Pour simplifier, **on assimile la position 2 à la position 3**.

Parmi les quatre positions que peut prendre le mât, il reste donc à analyser **les positions 1 et 3**. Lorsque le mât est dans ces positions, la condition d’effectuer les mesures à environ deux fois la hauteur moyenne des bâtiments est bien respectée, et on se situe donc bien, à priori, dans la sous-couche inertielle. L’étude des vitesses

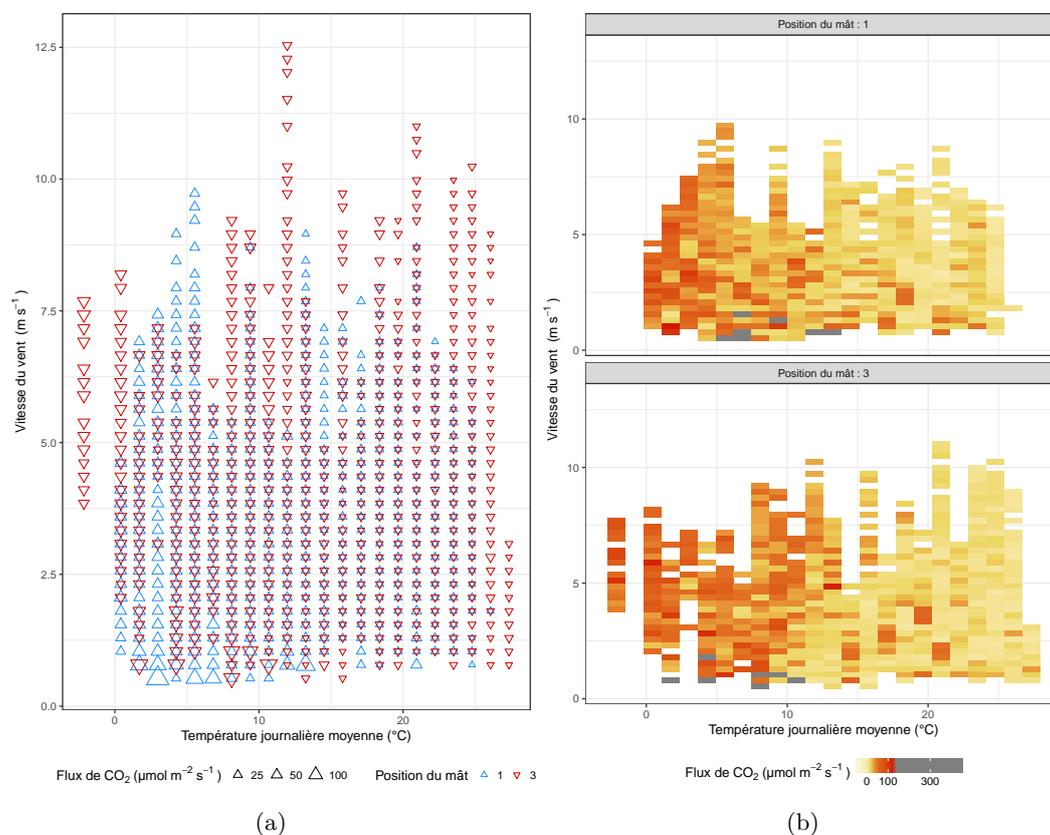


FIGURE 4.5 – Flux moyen de CO₂ mesuré en fonction de la vitesse du vent et de la température journalière pour les positions 1 et 3 du mât. Les données des deux échantillons sont superposées à gauche et séparées à droite

de friction mesurées par les deux anémomètres confirme que **les mesures ont bien été prises dans la sous-couche inertielle** : le rapport entre les vitesses de friction mesurées par chacun des anémomètres est proche de l'unité (Figure 4.4). Ce résultat, qui traduit une vitesse de friction constante avec l'altitude, est caractéristique de la sous-couche inertielle.

On vérifie également si les mesures effectuées en position 1 et 3 appartiennent à la même population statistique. Une comparaison directe des moyennes, médianes ou encore des cycles journaliers des deux groupes de données n'aurait pas de sens puisque les conditions météorologiques pendant les mesures ne sont pas équivalentes entre les deux groupes. Par exemple, la vitesse du vent est plus importante pour les mesures effectuées en position 3 puisque le critère pour abaisser le mât était la prévision de vent fort. Pour tenir compte des différences de conditions météorologiques, on regarde les flux de CO₂ en fonction de la température moyenne de la journée et de la vitesse moyenne du vent pendant la période de mesure, et ce, pour chaque position du mât (Figure 4.5).

Pour une température et une vitesse du vent données, les flux de CO₂ mesurés pour les deux positions du mât sont très proches (Figure 4.5a). La Figure 4.5b montre que l'on retrouve la même dépendance des flux aux conditions météorolo-

4.1. DESCRIPTION DU SITE ET DES DONNÉES

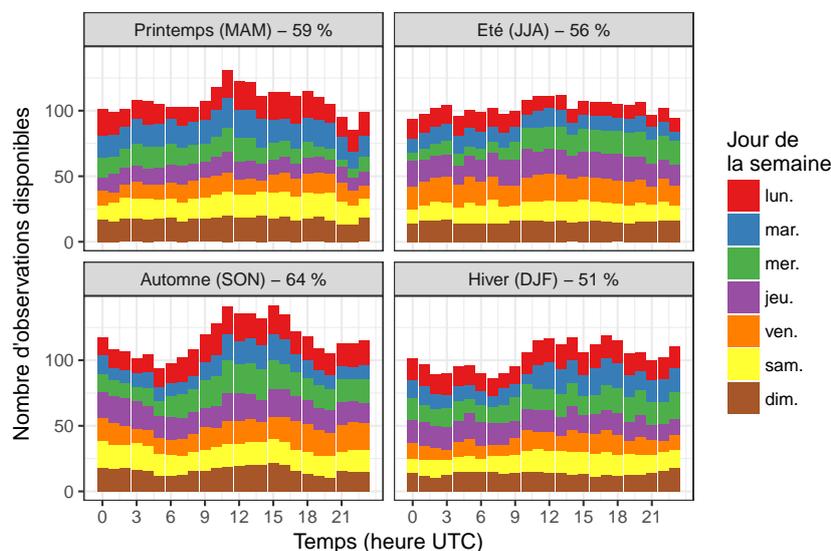


FIGURE 4.6 – Disponibilité des mesures de flux de CO_2 de qualité au moins moyenne, par saison, par jour de la semaine et par heure.

giques pour les deux positions du mât : les flux sont d'autant plus forts que la température est basse (pour des températures inférieures à $15\text{ }^\circ\text{C}$) et que le vent est faible (Figure 4.5b). Dans la suite, **les flux mesurés en position 1 et 3 seront donc analysés comme provenant d'un seul et unique groupe de données.**

4.1.1.4 Disponibilité des données

Au final, en ne conservant que les données de flux mesurées lorsque le mât est en position 1 ou 3, et après application de toutes les vérifications de la qualité des données décrites précédemment, **les mesures de flux sont disponibles plus de 50% du temps**, quelle que soit la saison (Figure 4.6). C'est en hiver que la disponibilité des données est la plus faible, notamment à cause d'une fréquence d'épisodes précipitants plus importante qu'aux autres saisons. Aucun jour de la semaine n'est particulièrement sur- ou sous-représenté quelles que soient la saison et l'heure de la journée. **Les périodes d'indisponibilité des données ne biaiseront donc pas les cycles journaliers** moyens par saison des flux de CO_2 mesurés.

4.1.1.5 Représentativité des données

Une analyse de la **surface d'influence** est réalisée afin de connaître de quelle zone sont représentatifs les flux de CO_2 mesurés au niveau du mât. En utilisant la méthodologie décrite en Section 2.4.5.1, on a pu calculer la surface d'influence pour plus de 99% des mesures de flux de CO_2 . Pour le calcul de la surface, on a utilisé une hauteur moyenne des bâtiments (z_H) de 15 m. Cette valeur a été calculée par Pigeon *et al.* [2008] en s'appuyant sur des données administratives de hauteurs et d'emprises des bâtiments.

La distance d'influence moyenne à long terme est approximativement de 500 m

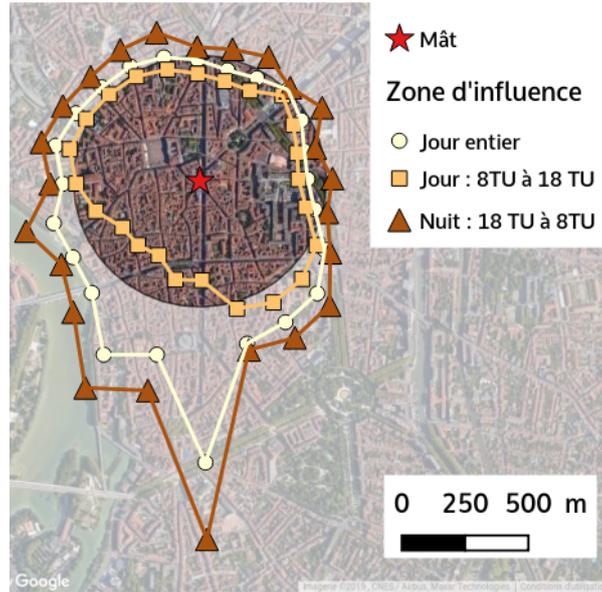


FIGURE 4.7 – Distance d'influence moyenne à 80% par direction (classes de 15°) des flux mesurés au niveau du mât.

dans toutes les directions (Figure 4.7). Elle est un peu plus importante lorsque le vent vient du sud et du sud-ouest, mais ce résultat est à nuancer car les mesures dans ces secteurs de vent sont rares. Au vu de ces résultats et compte tenu du fait que la morphologie de la ville est homogène autour du site de mesure, on fait l'hypothèse que **les flux de CO₂ mesurés au niveau du mât sont représentatifs des flux dans un rayon de 500 mètres autour du mât.**

4.1.1.6 Stockage de CO₂ en-dessous des instruments

Le stockage de CO₂ en-dessous du niveau de mesure est évalué afin d'estimer l'incertitude qu'il entraîne sur les données de flux de CO₂ (Section 2.4.5.2). Pour obtenir une borne supérieure de l'incertitude liée au stockage, on calcule le stockage avec deux hypothèses différentes, et on retient la plus grande valeur (en valeur absolue) du flux de stockage (Section 2.4.5.2). Les deux hypothèses sont : soit les variations de la concentration en CO₂ au niveau du mât dues à des mouvements horizontaux et donc on est en présence d'un phénomène d'advection ($Stock_{adv}$, Équation (2.4)) soit elles sont dues à des mouvements verticaux, et donc il n'y a pas d'advection ($Stock_{no_adv}$, Équation (2.2)). Le maximum (en valeur absolue) entre les deux flux de stockage est noté $Stock_{max}$.

La distribution des valeurs absolues du flux de stockage $Stock_{max}$ est très proche de celle du stockage $Stock_{no_adv}$ car ce n'est que les quantiles de $Stock_{max}$ sont légèrement supérieurs à ceux de $Stock_{no_adv}$ (Figure 4.8). Ceci indique qu'en général les valeurs absolues du flux de stockage sont plus faibles pour $Stock_{adv}$ que pour $Stock_{no_adv}$, mais que l'inverse peut aussi se produire, ce qui justifie à posteriori le calcul des flux de stockage selon les deux méthodes ($Stock_{adv}$ et $Stock_{no_adv}$).

Ces deux méthodes nécessitent d'avoir une mesure de la concentration en CO₂

4.1. DESCRIPTION DU SITE ET DES DONNÉES

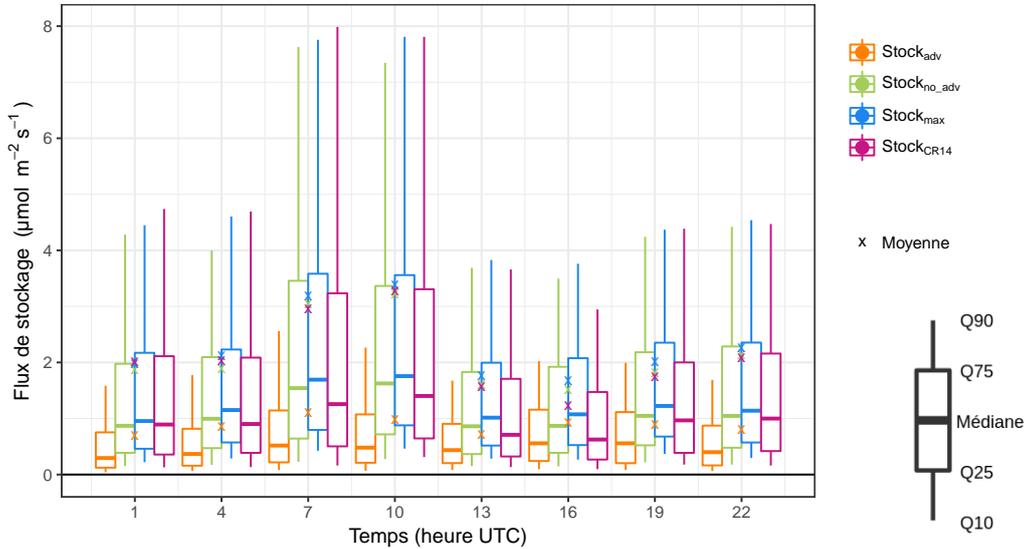


FIGURE 4.8 – Boîtes à moustaches de la valeur absolue du flux de stockage suivant l’heure de la journée, pour différentes méthodes de calcul.

au niveau des toits. Cette dernière est évaluée en moyennant les mesures des deux analyseurs placés au bout des perches. Ces deux analyseurs n’étaient pas opérationnel au printemps (MAM). A cette saison, le flux de CO_2 est donc calculé suivant une autre méthode, ne nécessitant d’observation de la concentration au niveau des toits : la méthode proposée par Crawford et Christen [2014] ($Stock_{CR14}$, Équation (2.6)).

Le flux de stockage selon la méthode de Crawford et Christen [2014] est calculé à toutes les saisons afin de pouvoir être comparé à flux $Stock_{max}$. La Figure 4.8 montre que la méthode de Crawford et Christen [2014] donne des flux assez similaires à $Stock_{max}$ bien qu’ils soient un peu plus faibles, particulièrement vers midi. **L’erreur d’estimation du flux de stockage causée par l’absence d’information sur la concentration en CO_2 au niveau des toits est donc faible, et $Stock_{CR14}$ est valide pour estimer le stockage dans cette situation.**

Le stockage de CO_2 est minimal l’après-midi, lorsque la couche limite est bien développée, et il augmente au cours de la nuit, au fur et à mesure que la hauteur de la couche limite diminue. Le flux absolu de stockage est **maximal vers 7 UTC**. Le flux est alors de l’ordre de **$3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$** et le neuvième décile est d’environ $8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Le rapport entre la valeur absolue du flux de stockage et la valeur absolue du flux du CO_2 suit le même cycle journalier à toutes les saisons (Figure 4.9) : le rapport est élevé la nuit, lorsque la couche limite est peu épaisse, et il diminue en journée pour atteindre sa valeur minimale vers 15 UTC, lorsque la couche limite est épaisse. Les méthodes de calcul du stockage $Stock_{CR14}$ et $Stock_{max}$ donnent des résultats très proches. Les valeurs les plus élevées du rapport sont observées la nuit en été, lorsque les flux de CO_2 sont faibles. Le flux de stockage atteint alors 30% du flux de CO_2 . En journée, en moyenne, le flux de stockage reste inférieur à 10% du flux de CO_2 quelque soit la saison. Ces pourcentages sont faibles comparés à ce qui peut

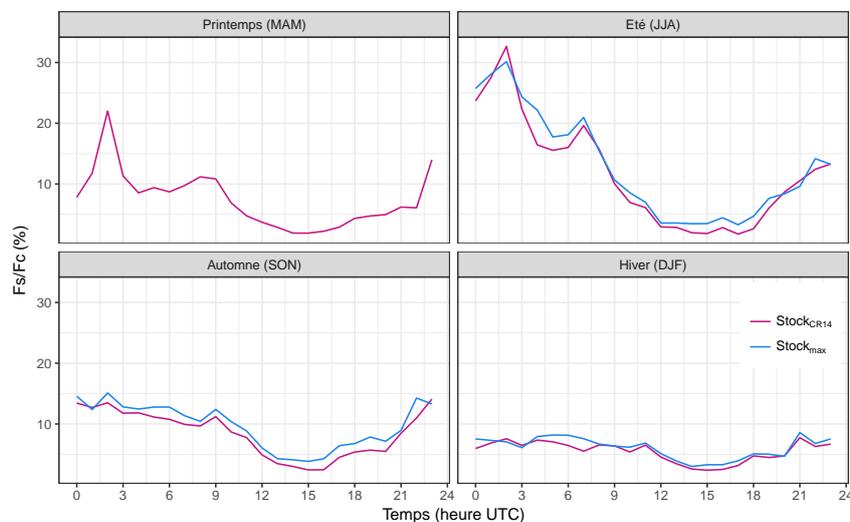


FIGURE 4.9 – Cycles journaliers saisonniers moyens du rapport entre la valeur absolue du flux de stockage (Fs) et la valeur absolue du flux de CO₂ (Fc).

être observé en milieu rural [Yang *et al.*, 2007]. Ceci s’explique par une couche limite nocturne généralement stable en milieu rural alors qu’elle est neutre voire légèrement instable en ville.

La valeur absolue moyenne du flux de stockage sera tracée sur les graphiques présentant les observations de flux de CO₂, afin de pouvoir évaluer visuellement l’incertitude sur les observations liée au phénomène de stockage.

4.1.2 Préparation des données d’entrée pour la simulation TEB

Afin de pouvoir évaluer la modélisation des flux de CO₂ par TEB à l’aide des observations recueillies pendant la campagne CAPITOU, le modèle doit simuler des flux qui puissent être comparés aux flux mesurés. C’est pourquoi on modélise avec TEB la zone correspondant à la surface d’influence des flux mesurés : un cercle de 500 m de rayon centré sur le mât de mesure (Section 4.1.1.5). Cette zone étant relativement homogène en terme de morphologie urbaine [Pigeon *et al.*, 2008], elle sera représentée par un seul point dans le modèle.

4.1.2.1 Forçages météorologiques

Les paramètres météorologiques nécessaires pour la simulation TEB (température, humidité, rayonnement descendant courte longueur d’onde direct et diffus, rayonnement descendant grande longueur d’onde, concentration en CO₂, précipitations pluvieuses et neigeuses ainsi que vitesse et direction du vent) sont détaillés dans le Tableau 4.2. Presque tous ces paramètres ont été mesurés toutes les minutes au niveau du mât. Pour obtenir les forçages météorologiques de TEB, on calcule, pour chacun d’eux les moyennes horaires.

4.1. DESCRIPTION DU SITE ET DES DONNÉES

Tableau 4.2 – Données météorologiques de forçage du modèle TEB. L'aéroport de Blagnac est situé 7 km au nord-ouest du mât et la station météorologique de la Météopole à 6,5 km à l'ouest-sud-ouest du mât.

Paramètre de forçage	Paramètre observé	Source principale	Source secondaire/ méthode de complétion	Traitement des données
Pression (Pa)	Pression	Mât	Météopole et Blagnac	-
Température de l'air (°C)	Température de l'air	Mât	Météopole avec correction	-
Humidité spécifique (kg kg ⁻¹)	Humidité relative	Mât	Météopole avec correction	-
Rayonnement direct descendant courte longueur d'onde (W m ⁻²)	Rayonnement courte longueur d'onde descendant	Mât	Météopole	Séparation direct/diffus en fonction de la nébulosité
Rayonnement diffus descendant courte longueur d'onde (W m ⁻²)	Nébulosité	Blagnac	Interpolation linéaire	
Rayonnement descendant grande longueur d'onde (W m ⁻²)	Rayonnement courte longueur d'onde descendant	Mât	Météopole	Séparation direct/diffus en fonction de la nébulosité
Rayonnement descendant grande longueur d'onde (W m ⁻²)	Nébulosité	Blagnac	Interpolation linéaire	
Concentration en CO ₂ (kg m ⁻³)	Rayonnement descendant grande longueur d'onde	Mât	Météopole	-
Taux de pluie (kg m ⁻² s ⁻¹)	Concentration en CO ₂	Mât	Interpolation linéaire	-
Taux de neige (kg m ⁻² s ⁻¹)	Taux de pluie	Mât	Météopole	-
Vitesse du vent (m s ⁻¹)	-	-	-	On suppose que toutes les précipitations sont liquides
Direction du vent (degrés depuis le nord, sens horaire)	Vitesse du vent	Mât	Météopole	Correction de la hauteur de mesure en faisant l'hypothèse d'un profil logarithmique
	Direction du vent	Mât	Météopole	-

Le **rayonnement solaire descendant** est réparti entre rayonnement **direct** et **diffus** en fonction de la **nébulosité** mesurée à l'aéroport de Blagnac (7 km au nord-ouest du mât).

Mis à part pour la nébulosité et la concentration en CO₂, les données manquantes sont complétées par les observations d'une station de Météo-France située sur le site de la Météopole, à 6,5 km à l'ouest-sud-ouest du mât. Faute d'autres sources de données, la nébulosité et concentration en CO₂ sont complétées par interpolation linéaire.

La **température** et l'**humidité relative** mesurées par la station de la Météopole sont corrigées pour retirer leur biais systématique par rapport au site du Monoprix : les différences moyennes entre les deux sites sont calculées puis retranchées pour chaque heure de la journée.

Sur la période de la campagne, on suppose que toutes les **précipitations** sont liquides (la neige est rare à Toulouse, et aucun épisode neigeux marquant n'a été relevé pendant la période).

La **vitesse du vent** au niveau du mât a été mesurée à différentes hauteurs (le mât était rétracté en cas de vents forts). Les vitesses de vent mesurées aux positions les plus basses du mât sont ramenées au niveau de référence (position 1 : la position la plus haute) en faisant l'hypothèse que le vent suit un profil logarithmique :

$$u(z_{ins}) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z_{ins} - z_d}{z_0} \right), \quad (4.1)$$

avec u la vitesse du vent, z_{ins} l'altitude des instruments de mesure, u_* la vitesse de friction, κ la constante de Von Kármán, z_d la hauteur de déplacement et z_0 la longueur de rugosité. Se reporter à la Section 2.4.5.1 pour plus de détails concernant z_d et z_0 .

Par division, on obtient :

$$u(z_{ref}) = u(z_{ins}) * \frac{\ln \left(\frac{z_{ref} - z_d}{z_0} \right)}{\ln \left(\frac{z_{ins} - z_d}{z_0} \right)}, \quad (4.2)$$

avec z_{ref} le niveau de référence (lorsque le mât est en position 1, $z_{ref} = z_{ins}$).

4.1.2.2 Données d'occupation du sol

Les principales caractéristiques de la morphologie urbaine du site sont listées dans le Tableau 4.3. Les caractéristiques principales des quatre contributeurs aux flux de CO₂ (bâtiments, végétation, trafic et respiration humaine) sont donnés dans le Tableau 4.4.

Dans la zone d'étude autour du mât de mesure, la plupart des **bâtiments** sont des bâtiments historiques de hauteur moyenne (4 ou 5 étages), antérieurs à la seconde guerre mondiale. Leur architecture est typique du centre ville toulousain : les murs sont en briques rouges et les toits en tuiles (cf. Tableau B.2). À l'époque de leur construction, ces bâtiments étaient dédiés exclusivement à l'habitat. Aujourd'hui, la plupart des bâtiments ont été reconvertis, au moins partiellement, en bureaux, commerces ou restaurants. Pour représenter cette variété d'usage des bâtiments, on

4.1. DESCRIPTION DU SITE ET DES DONNÉES

Tableau 4.3 – Principales caractéristiques de la morphologie urbaine du site du Monoprix.

Paramètre	Valeur
Fraction de bâtiment (λ_p) ^a	0,62
Fraction de route (λ_r) ^a	0,28
Fraction de végétation (λ_v) ^a	0,10
Densité de surface de façade ^{a,b}	1
Hauteur des bâtiments (z_H) ^c	15 m
Longueur de rugosité (z_0)	1,5 m

^a Bocher *et al.* [2018] : mapuce.orbigis.org

^b Rapport entre la surface de façade et la surface horizontale de ville.

^c Pigeon *et al.* [2008]

réutilise la méthode développée par Schoetter *et al.* [2017] qui considère une fraction de bâtiments non chauffés, une fraction de commerces, une fraction de bureaux et trois fractions de bâtiments résidentiels avec des températures de consigne différentes pour le chauffage. **Les fractions non résidentielles** d’usage des bâtiments sont données dans le Tableau 4.4. **Les fractions d’usage résidentiel** sont dérivées de l’indicateur de Comportement de Régulation Énergétique (CRE, cf. Schoetter *et al.* [2017] pour plus de détails ; le CRE est noté ET (Efficiency Tendency) dans cette précédente étude). Le CRE, défini par Bourgeois *et al.* [2017], synthétise l’information sur le type de système de chauffage (individuel ou collectif), le type d’énergie utilisé pour le chauffage, et l’âge des habitants.

Pour chaque fraction d’usage des bâtiments (résidentiel ou non), le modèle requiert plusieurs paramètres comme par exemple : **le planning journalier d’occupation** des bâtiments, **la température de consigne** à l’intérieur des bâtiments, **les rejets internes de chaleur** non liés à la régulation thermique, l’usage de la **ventilation** et de **stores**. Pour l’ensemble de ces paramètres, on reprend les valeurs proposées par Schoetter *et al.* [2017]. Cette publication donne une valeur des rejets internes de chaleur non liés à la régulation thermique dans les bâtiments résidentiels qui dépend de l’indicateur d’intensité d’utilisation des équipements (défini par Bourgeois *et al.* [2017] sous le nom Equipment-Intensity-of-Use). Cet indicateur est fonction du nombre d’habitants par mètre carré habitable, du type de système de chauffage (individuel ou collectif) et du type d’énergie utilisé pour le chauffage. Les valeurs de cet indicateur pour la zone d’intérêt sont données dans le Tableau 4.4. Pour les fractions d’usage résidentiel, on fixe l’énergie consommée par la production d’eau chaude domestique à 25% de la consommation d’énergie liée aux rejets internes de chaleur hors régulation thermique. On considère que les bâtiments avec un usage non résidentiel ne produisent pas d’eau chaude.

La végétation présente autour du mât est constituée majoritairement d’arbres feuillus caducs des régions tempérées (cf. Tableau B.3). Le taux de respiration à 25 °C (paramètre nécessaire pour le modèle) est généralement déterminé à partir des flux de CO₂ mesurés la nuit, quand la photosynthèse est inactive. Cette méthode ne peut être utilisée en milieu urbain car d’autres sources de CO₂ que la respiration des végétaux sont présentes la nuit. À la place, on exploite la relative constance d’une

Tableau 4.4 – Caractéristiques principales des contributeurs aux flux de CO₂.

Bâtiments	
Fraction de chauffage électrique ^a (f_{ELEC})	0,6
Fraction de chauffage au gaz ^a (f_{GAS})	0,39
Fraction de chauffage au fioul ^a (f_{FUEL})	0,01
Fraction de ménage utilisant le gaz pour produire l'eau chaude domestique ^a (f_{HW_GAS})	0,5
Fraction d'habitations collectives ^b	0,25
Fraction de commerce ^b	0,10
Fraction de bureau et de bâtiments d'enseignement ^b	0,55
Fraction de bâtiments non chauffés ^b	0,10
Fraction d'habitations avec un fort Comportement de Régulation Énergétique (CRE) ^c	0,60
Fraction d'habitations avec un faible CRE ^c	0,40
Fraction d'habitations avec une forte intensité d'utilisation des équipements ^c	0,24
Fraction d'habitations avec une intensité moyenne d'utilisation des équipements ^c	0,70
Fraction d'habitations avec une faible intensité d'utilisation des équipements ^c	0,06
Végétation	
Indice de surface foliaire (végétation haute)	3,5
Taux de respiration de l'écosystème à 25 °C (Re_{25})	$2,2 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Trafic	
Flux de CO ₂ annuel moyen	$5,6 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Facteur moyen d'émission de CO ₂ ^d	0,47 kg km ⁻¹
Respiration humaine	
Densité de population ^e	13 000 hab km ⁻²

^a Recensement de la population 2011 par l'Institut Nationale de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2028584>.

^b Estimé en combinant les informations sur le type de bâtiment, la morphologie urbaine et la densité de population [Bocher *et al.*, 2018]. La méthodologie est décrite par Schoetter *et al.* [2017].

^c Ces indicateurs ont été définis par Bourgeois *et al.* [2017] : l'étude ENERGIHAB sur les comportements humains dans la région Île-de-France est utilisée pour calibrer des modèles statistiques qui permettent de prédire ces indicateurs au niveau national en s'appuyant sur les données du recensement.

^d Déduit de Hugrel et Joumard [2006].

^e Bocher *et al.* [2018] : mapuce.orbis.org. A noter qu'il y a eu peu d'évolution de la densité de population entre 2004 et 2018 dans l'hyper-centre toulousain.

4.1. DESCRIPTION DU SITE ET DES DONNÉES

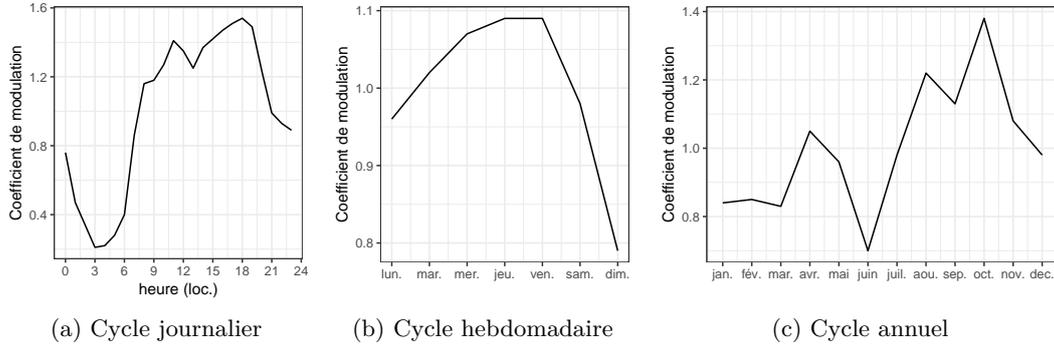


FIGURE 4.10 – Coefficients journaliers (a), hebdomadaires (b) et annuels (c) de modulation des émissions du trafic. Les coefficients sont estimés à partir des données de comptage du trafic recueillies pendant la campagne CAPITOUL à proximité du mât de mesure.

année sur l'autre, du rapport entre la respiration de l'écosystème et la Production Primaire Brute (*PPB*, Gross Primary Production en anglais). Ce rapport est égal à 0,71 pour les sites agricoles en France (J.-C. Calvet, communication personnelle). En utilisant l'Équation (3.7), on obtient une valeur de Re_{25} de $2,2 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ avec la relation suivante :

$$Re_{25} = \frac{0,71 * \int_{1 \text{ an}} PPB(t) dt}{\int_{1 \text{ an}} f(w_g(t)) * Q_{10}^{(T_{sol}(t)-25)/10} dt}. \quad (4.3)$$

Les valeurs de *PPB* sont calculées par le modèle ISBA avec un pas de temps de cinq minutes.

Concernant les routes, **les cycles journalier, hebdomadaire et annuel de trafic** (Figure 4.10) ont été calculés à partir des données de comptage du trafic récoltées lors de la campagne CAPITOUL, pour deux rues situées à proximité du mât : la rue d'Alsace-Lorraine et la rue Lafayette. Comme les cycles journalier, hebdomadaire et annuel sont similaires entre les deux routes, on les moyenne pour obtenir les cycles pour le site du Monoprix.

Dans la zone d'influence des flux de CO_2 , les véhicules adoptent un style de conduite urbain, avec une vitesse limite de 50 km h^{-1} . Le flot de véhicules est composé de voitures particulières (78%), d'utilitaires (13%), de véhicules lourds (6%) et de deux-roues motorisés (3%). Les facteurs moyens d'émission de CO_2 et de chaleur latente et sensible par le trafic sont calculés en combinant cette répartition du flot de véhicules avec les facteurs d'émission par type de véhicules donnés par Hugrel et Joumard [2006] pour un trafic urbain français typique.

Le nombre de kilomètres parcourus par des véhicules à moteur dans le voisinage du mât pendant la campagne est estimé en divisant la valeur annuelle moyenne du flux de chaleur sensible émis par le trafic dans cette zone, donnée par Pigeon [2007] (8 W m^{-2}), par le facteur moyen d'émission de chaleur sensible calculé précédemment. Les émissions de CO_2 et de chaleur latente sont ensuite estimées en multipliant le nombre de kilomètres parcourus par les facteurs d'émission correspondants (Tableau B.1).

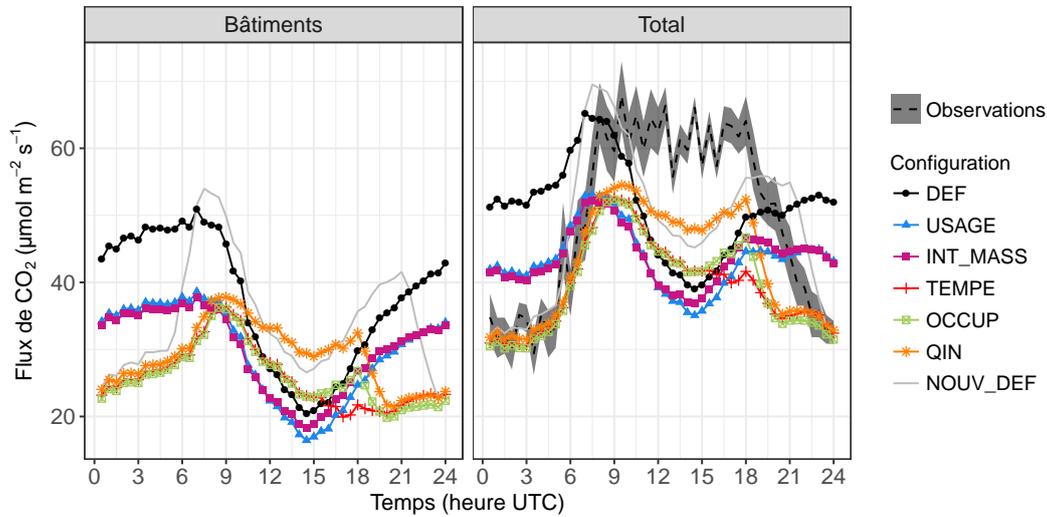


FIGURE 4.11 – Cycles journaliers moyens de flux de CO₂ modélisés pour DJF, pour différentes configurations du modèle : DEF (configuration par défaut), USAGE (description détaillée de l’usage des bâtiments et du comportement des habitants), MASS_INT (augmentation de la capacité de stockage calorifique par l’augmentation de l’épaisseur des planchers intermédiaires), TEMPE (modification des températures de consigne du chauffage), OCCUP (modification des plannings d’occupation des bureaux) et QIN (diminution des rejets de chaleur à l’intérieur des bâtiments, hors régulation thermique). Les configurations sont décrites en détail dans le Tableau 4.5. Le panneau de gauche montre les flux de CO₂ émis par les bâtiments. Sur le panneau de droite, les flux de CO₂ totaux modélisés sont comparés aux observations. La surface grisée représente l’incertitude sur les observations entraînée par le phénomène de stockage de CO₂ dans la colonne d’air en-dessous du niveau de mesure.

En ce qui concerne la population, on fait l’hypothèse que la densité de **population** est constante. Les variations spatio-temporelle dues par exemple aux déplacements pendulaires domicile/travail sont négligées car il est difficile d’en obtenir une estimation fiable pour notre cas d’étude.

Les **conditions initiales** de la simulation sont obtenues en faisant une simulation de spin-up d’un an. Cette dernière est forcée avec les données de forçages décrites plus haut pour la période du 20 février 2004 au 19 février 2005. Le spin-up permet d’initialiser les réservoirs de biomasse, la température à l’intérieur des bâtiments ainsi que la température et l’humidité des sols.

4.2 Évaluation de TEB

4.2.1 Sensibilité des flux de CO₂ associés aux bâtiments

4.2.1.1 Ajustement des paramètres et sensibilité du modèle

Pour modéliser finement les flux de CO₂ au-dessus des bâtiments, on utilise plusieurs paramètres qui permettent de décrire l’usage des bâtiments ainsi que le comportement des habitants. La sensibilité du modèle à ces paramètres est étudiée ci-après. Plusieurs configurations du modèle BEM sont examinées : une configuration par défaut (DEF), qui est la configuration historique de BEM (sans les fractions

d’usage et de comportement) et cinq configurations qui prennent en compte les fractions d’usage et de comportement. L’utilisation de ces fractions nécessite d’ajuster les valeurs de nombreux paramètres. Nous avons utilisé notre connaissance de la zone modélisée pour ajuster les valeurs par défaut proposées par Schoetter *et al.* [2017]. L’ajustement est réalisé en utilisant une méthode cumulative : à chaque fois que la valeur d’un paramètre est modifiée pour une configuration donnée, son effet est évalué, puis la valeur modifiée est conservée pour la configuration suivante où un nouveau paramètre sera modifié à son tour. Les différentes configurations du modèle définies pour la présente étude de sensibilité sont décrites en détail dans Tableau 4.5. La comparaison entre les différentes configurations est faite sur DJF car c’est la saison à laquelle, à cause de l’importante demande d’énergie pour le chauffage, les flux de CO₂ sont les plus élevés.

La configuration par défaut (DEF) est très simple, mais elle n’est pas capable de reproduire correctement le cycle journalier de flux de CO₂. Les flux de CO₂ sont trop élevés la nuit, et trop faibles la journée (Figure 4.11, partie droite). L’utilisation des **fractions d’usage et de comportement** avec les valeurs par défaut des paramètres (**configuration USAGE**) améliore les résultats la nuit, mais les flux de CO₂ sont toujours sous-estimés. De plus, il y a un minimum de flux de CO₂ vers midi qu’on ne retrouve pas dans les observations. Lorsque l’on augmente l’épaisseur des planchers intermédiaires en ajoutant une **couche de béton de 20 cm d’épaisseur (configuration MASS_INT)**, la capacité de stockage calorifique des bâtiments augmente. L’impact de cette modification de la structure des bâtiments sur les flux de CO₂ est faible : les flux de CO₂ diminuent légèrement pendant la nuit et augmentent légèrement pendant la journée. Dans la **configuration TEMPE la température de consigne du chauffage** est augmentée le jour et diminuée la nuit. Cela entraîne une légère augmentation des flux de CO₂ autour de midi, et une diminution marquée des flux la nuit ce qui améliore le cycle journalier de flux de CO₂ modélisés. Une **occupation plus importante des bureaux** entre 16 UTC et 19 UTC (**configuration OCCUP**) augmente les flux de CO₂ pendant cette même période à cause d’une température de consigne du chauffage plus élevée. Enfin la diminution des **rejets internes de chaleur** non liés à la régulation thermique des bâtiments (**configuration QIN**) contribue à augmenter les flux de CO₂ car il en découle une augmentation de la demande d’énergie pour le chauffage.

Cette étude de sensibilité sur la valeur des paramètres montre que **la modélisation des flux de CO₂ est très fortement sensible aux paramètres décrivant le comportement des habitants** : le cycle journalier des flux de CO₂ dus aux bâtiments, modélisés par la dernière configuration, avec les valeurs ajustées des paramètres (QIN), est en opposition de phase par rapport à celui modélisé par la configuration avec les valeurs par défaut des paramètres (USAGE). Mis à part la modification de la masse interne des bâtiments, toutes les modifications proposées (température de consigne, probabilité d’occupation et demande d’énergie interne) ont clairement un impact sur les flux de CO₂. Les impacts sont immédiats : la modification d’un paramètre donné pour une certaine période influence les flux de CO₂ pendant la période en question. Par exemple, la diminution de la température de consigne du chauffage la nuit impacte les flux de CO₂ nocturnes.

L’analyse de sensibilité a mis en valeur **la grande sensibilité des flux de CO₂**

Tableau 4.5 – Description des différentes configurations du modèles BEM utilisées pour l’étude de sensibilité.

Configuration	Description/Modifications	Motivations
DEF	Température interne des bâtiments constante (19 °C).	Paramétrisation simple
USAGE	Utilisation des fractions d’usage et de comportement avec les valeurs par défaut [Schoetter <i>et al.</i> , 2017].	-
MASS_INT	USAGE + Ajout d’une couche de béton de 20 cm d’épaisseur en plus de la couche de bois de 3 cm pour représenter les planchers intermédiaires.	L’ajout de la couche de béton augmente la capacité thermique des bâtiments et correspond mieux à la réalité.
TEMPE	MASS_INT + Dans les bâtiments résidentiels, la nuit ou lorsque les bâtiments sont inoccupés, la température de consigne du chauffage est diminuée de 2 °C. Dans les bureaux, les commerces et les bâtiments d’éducation, la température de consigne du chauffage est fixée à 22 °C (précédemment 21 °C) le jour quand les bâtiments sont occupés et 17,5 °C (précédemment 20 °C) sinon.	La différence de température de consigne du chauffage entre la nuit et le jour et les bâtiments occupés ou non est seulement de 1 °C dans la configuration proposée par Schoetter <i>et al.</i> [2017]. Cette différence relativement faible avait été retenue car aucune information sur la modulation de la température de consigne entre le jour et la nuit n’était disponible.
OCCUP	TEMPE + Augmentation de la probabilité d’occupation des bureaux entre 16 UTC et 19 UTC, de 0,25 à 0,7. Augmentation de la probabilité d’occupation des commerces entre 16 UTC et 19 UTC, de 0,8 à 0,9 les jours de semaines, et de 0,75 à 0,95 le samedi.	Les plannings d’occupation modifiés représentent mieux l’occupation des bâtiments dans la zone d’étude.
QIN/REF	OCCUP + Le rejet de chaleur à l’intérieur des bâtiments, non liés à la régulation thermique, dans les commerces, les bureaux et les bâtiments d’enseignements sont réduits de 10–15 W m ⁻² à 7 W m ⁻² .	Les valeurs originelles auraient pu être réalistes pour un bureau avec de nombreux équipements électriques, mais elles sont probablement trop élevées si l’on considère le bâtiment dans son ensemble (bureaux, couloirs, salles de réunions...).

à la température de consigne du chauffage. Par conséquent, nous proposons une **nouvelle configuration par défaut** (NOUV_DEF) qui inclue la modulation jour/nuit de la température de consigne, mais reste relativement simple puisque les fractions d'usage et de comportement ne sont pas utilisées. Cette configuration est applicable aux villes pour lesquelles les paramètres liés aux fractions d'usage et de comportement ne sont pas connus. La configuration NOUV_DEF est similaire à la configuration DEF si ce n'est que la température de consigne la nuit est diminuée de 2 °C. Le cycle journalier des flux de CO₂ simulé avec NOUV_DEF est clairement amélioré comparé à la configuration DEF. Les flux nocturnes sont proches de ceux observés. Vers midi, les flux simulés sont plus proches des valeurs observées qu'avec la configuration DEF, et sont comparables à ceux simulés avec la configuration QIN.

4.2.1.2 Scores statistiques des différentes configurations du modèle

Après une première analyse descriptive, les différentes configurations du modèle sont comparées plus objectivement à l'aide de scores statistiques : biais moyen et erreur quadratique moyenne (EQM). La comparaison est faite sur toute la durée de la campagne (un an), et ce, afin de vérifier si les conclusions quant aux performances des différentes configurations sur DJF peuvent être généralisées sur l'ensemble de l'année (Figure 4.12).

Le biais journalier moyen pour la configuration DEF est très faible. Ce résultat s'explique par la compensation du biais négatif l'après-midi par un biais positif la nuit. Mis à part en MAM la configuration NOUV_DEF a un biais plus faible que la configuration DEF. Elle reproduit le cycle journalier de CO₂ bien mieux que la configuration DEF : les biais par tranche de trois heures sont la plupart du temps plus faibles, et l'EQM est meilleure. La configuration USAGE donne des résultats meilleurs (EQM plus faible) que la configuration par défaut (DEF), mais moins bons que la nouvelle configuration par défaut (NOUV_DEF). Ce résultat souligne que l'ajustement des valeurs des paramètres du modèle est essentiel pour pleinement bénéficier de l'ajout des fractions d'usage et de comportement. La configuration QIN est celle qui a les meilleures performances en terme d'EQM. **Dans la suite, elle sera appelée configuration de référence (REF)**. La configuration NOUV_DEF ne donne pas des résultats aussi bons que ceux de la configuration QIN/REF, mais elle est plus robuste car elle nécessite moins de paramètres d'entrée.

Du point de vue de la saisonnalité, les écarts entre les différentes configurations du modèle sont plus faibles en JJA car les flux de CO₂ associés aux bâtiments sont plus faibles à cette saison. C'est pendant la saison de chauffe qu'une description détaillée de l'usage des bâtiments et du comportement des habitants apporte le plus de bénéfices.

4.2.2 Évaluation du modèle avec la configuration de référence

L'analyse de sensibilité dans la section précédente a montré l'importance des paramètres du modèles relatifs à l'usage des bâtiments et aux comportements pour la qualité de la modélisation des flux de CO₂. Dans cette section, on évalue en détail les résultats de la configuration REF en les comparant aux observations de la campagne CAPITOU. Pour la comparaison, seules sont exploitées les sorties modèles

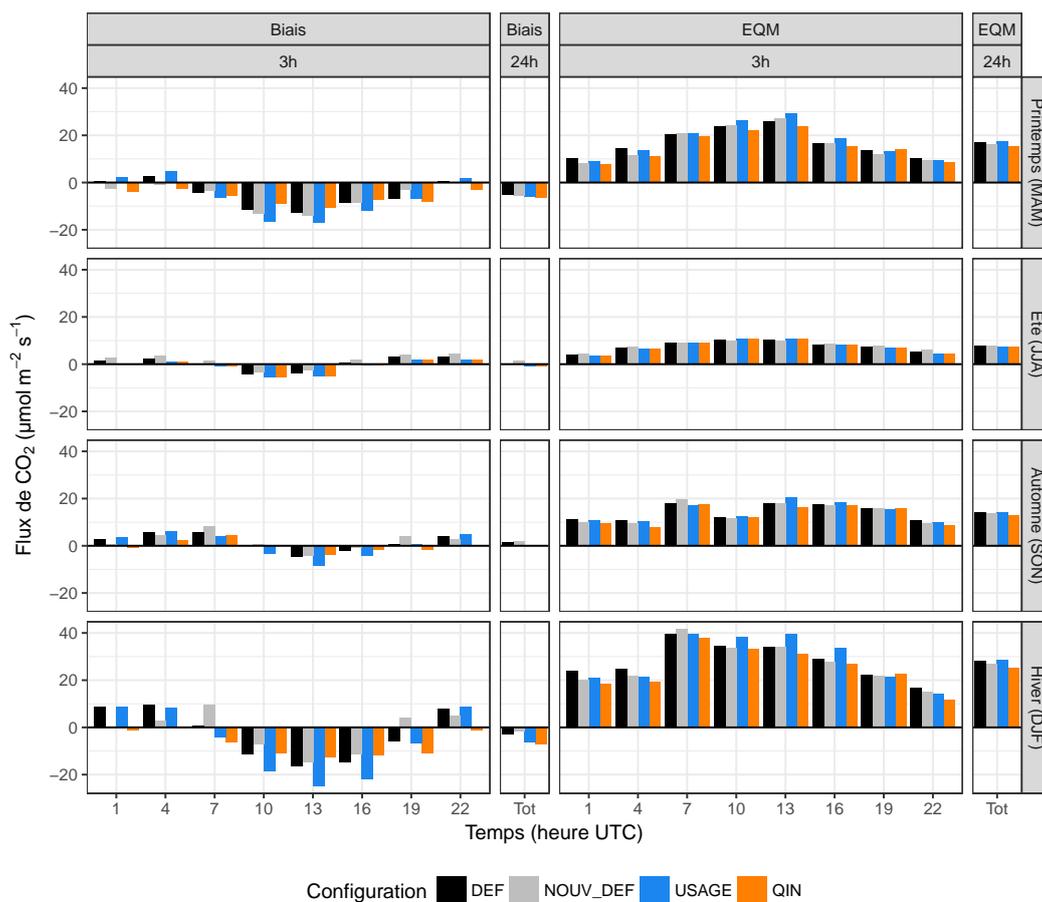


FIGURE 4.12 – Biais moyens et erreurs quadratiques moyennes (EQM) par saison sur une période de simulation d'un an, des flux modélisés par rapport aux flux observés. Quatre configurations du modèle sont présentées : la configuration historique (DEF), la configuration historique avec une diminution de la température la nuit (NOUV_DEF), une configuration avec les fractions d'usage et de comportement avec les valeurs par défaut des paramètres proposées par Schoetter *et al.* [2017] (USAGE) et une configuration avec les valeurs ajustées des paramètres (QIN). Les scores sont calculés par périodes de trois heures ainsi que pour un jour entier.

4.2. ÉVALUATION DE TEB

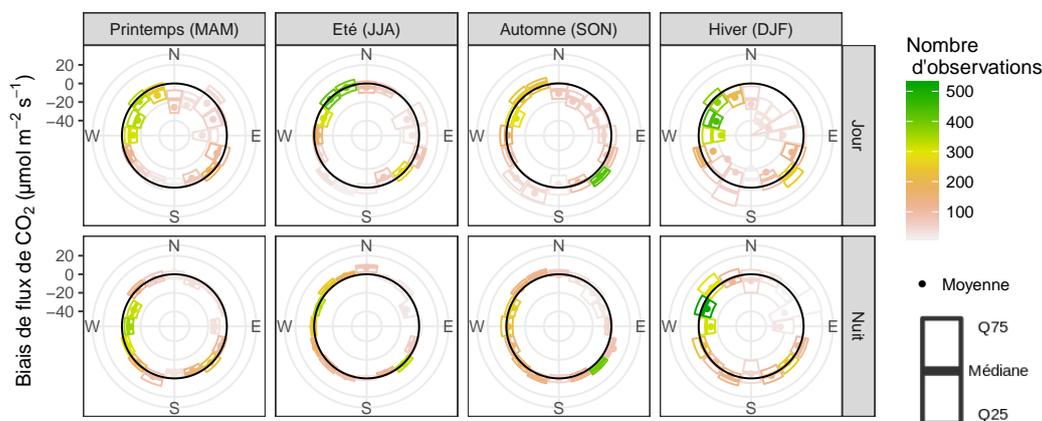


FIGURE 4.13 – Boîtes à moustaches saisonnières du biais modèle par direction de vent pour les flux de CO₂. Les données sont séparées entre le jour (de 7 UTC à 19 UTC), sur la première ligne et la nuit (de 19 UTC à 7 UTC), sur la deuxième ligne. Le cercle noir correspond à un biais nul.

pour lesquelles l’observation temporellement correspondante est disponible. Dans la configuration REF, les valeurs des paramètres qui décrivent l’usage des bâtiments et les comportements ont été spécifiquement ajustées pour la zone d’étude. Par conséquent, les résultats de cette section quantifient la capacité du modèle à estimer les flux de CO₂ lorsque l’usage des bâtiments et le comportement des habitants sont connus avec précision.

4.2.2.1 Sensibilité des flux de CO₂ aux variations de la zone d’influence

Les différences entre la zone d’influence des observations et la zone modélisée pourrait entraîner des biais systématiques dans les résultats du modèle. Nous avons donc examiné la dépendance du biais du modèle à la direction du vent et à la distance d’influence.

La Figure 4.13 montre que le biais du flux de CO₂ dépend très peu de la direction du vent. En SON et DJF, le **biais nocturne** pour des vents de nord-est est légèrement plus faible que pour les autres directions du vent. Cependant, la significativité de ce résultat est discutable car peu d’observations sont disponibles pour un vent de secteur nord-est. Une anisotropie du **biais** est également présente **le jour** en DJF et dans une moindre mesure en MAM et SON ; cependant, comme pour le biais nocturne, il s’agit de directions du vent pour lesquelles il y a peu d’observations.

Le biais du modèle n’est pas très sensible à la distance d’influence mis à part quand la zone d’influence est très petite (Figure 4.14). C’est particulièrement vrai en DJF : le modèle présente un plus fort biais (positif la nuit et négatif le jour) lorsque la distance d’influence est courte. Les biais négatifs plus forts le jour sont probablement dus aux cheminées qui se trouvent à proximité du mât de mesure. Lorsque la distance d’influence est faible, leur contribution au flux total est importante. Cela se traduit par la mesure de flux élevés qui ne sont pas représentatifs de l’aire d’étude définie

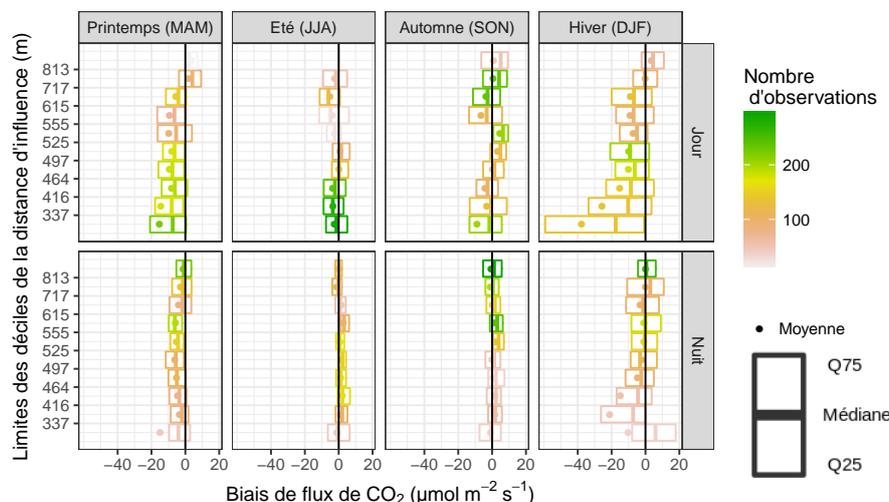


FIGURE 4.14 – Boîtes à moustaches saisonnières du biais modèle pour les flux de CO₂ en fonction des déciles de la distance d'influence. Les données sont séparées entre le jour (de 7 UTC à 19 UTC), sur la première ligne et la nuit (de 19 UTC à 7 UTC), sur la deuxième ligne.

par un cercle de 500 m de rayon autour du mât. Considérant ces résultats, les données pour lesquelles la distance d'influence est dans le premier décile (distance d'influence inférieure à 339 m) ne seront pas prise en compte pour l'évaluation du modèle.

4.2.2.2 Évaluation des flux turbulents de chaleur

La consommation d'énergie par la végétation, le trafic routier et les bâtiments influencent à la fois les flux de CO₂ et les flux de chaleur latente et sensible. **L'évaluation des flux de chaleur turbulents permet donc de vérifier si les ajustements réalisés pour améliorer la modélisation des flux de CO₂ (en particulier l'ajustement des paramètres de BEM) n'ont pas été fait au détriment de la qualité de la modélisation des flux de chaleur.**

Les flux de **chaleur sensible** simulés avec la configuration REF sont en **bon accord** avec les observations quelle que soit la saison (Figure 4.15). Il y a des **divergences plus marquées** pour les flux de **chaleur latente**. Une étude plus poussée a été menée pour comprendre ces divergences. Dans les résultats présentés ici, la surface maximale des flaques d'eau a été réduite comme proposé par Demuzere *et al.* [2017]. Cette modification a permis d'améliorer les résultats bien que TEB continue de surestimer les flux de chaleur latente de 5 à 10 W m⁻². Nous n'avons trouvé aucune relation notable entre le biais de chaleur latente et la vitesse du vent ou le temps écoulé depuis le dernier épisode pluvieux. L'irrigation de la végétation urbaine et des routes pourrait expliquer en partie les biais négatifs diurnes, mais pas les biais nocturnes. Des **biais similaires ont été trouvés avec TEB par Karsisto *et al.* [2016]** sur les sites de Kumpula et de Tornio en Finlande. La cause de ces biais pourrait être la non représentation de sources anthropiques d'humidité (arrosage) par le modèle ou bien des erreurs dans les mesures de flux par la méthode de la covariance

4.2. ÉVALUATION DE TEB

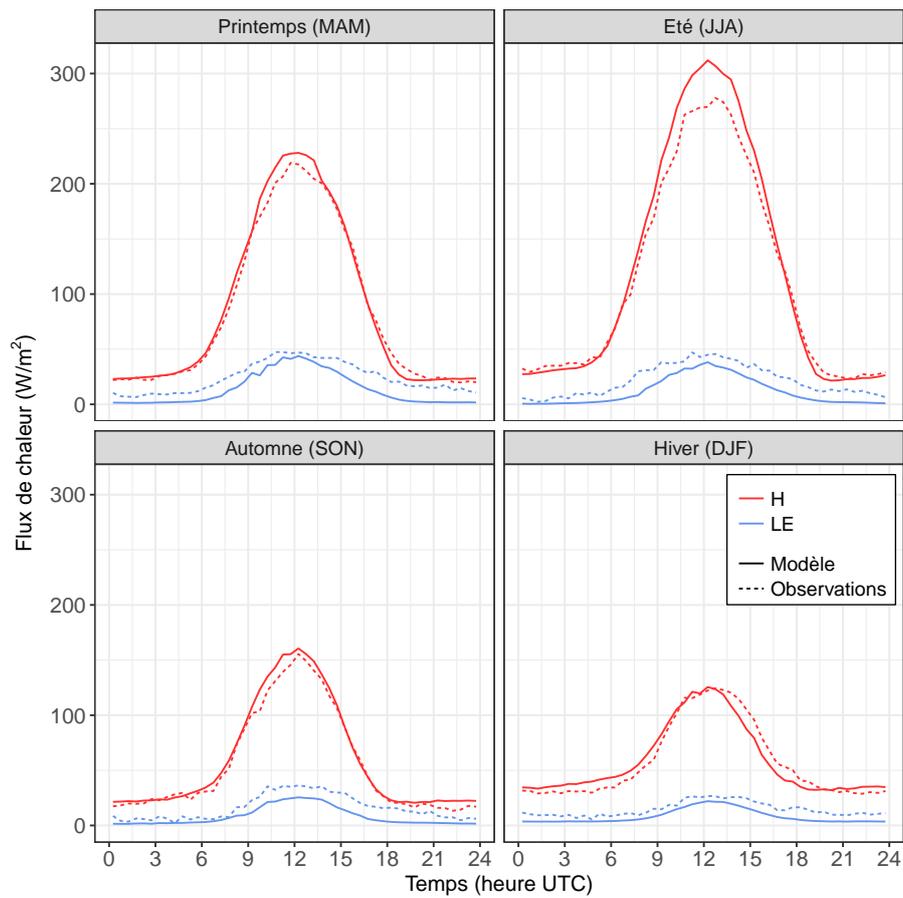


FIGURE 4.15 – Cycles journaliers moyens par saison des flux turbulents de chaleur sensible (H) et latente (LE) observés (pointillés) et modélisés avec la configuration REF (traits pleins).

des turbulences.

4.2.2.3 Évaluation des flux de CO₂

Quelle que soit la saison, **les flux de CO₂** modélisés et observés s'accordent assez bien **les jours ouvrés** (Figure 4.16). Le cycle journalier est également **bien représenté le dimanche**. Par contre, TEB sous-estime le flux de CO₂ en journée le samedi pendant la période de chauffe. Une explication à cette sous-estimation pourrait être **l'affluence élevée** dans les magasins et les commerces : à chaque fois qu'une porte est ouverte, de l'air chaud sort du bâtiment et est remplacé par de l'air froid provenant de l'extérieur. Ce phénomène, qui n'est pas représenté dans le modèle, augmente la consommation énergétique du bâtiment pour le chauffage et donc ses émissions de CO₂. En MAM et DJF, les observations sont systématiquement plus élevées que le modèle. Cela vient probablement de la présence de **ponts thermiques** dans les bâtiments, (non représentés par le modèle), qui entraînent une surconsommation de chauffage.

La **série temporelle des flux de CO₂ journaliers** est plutôt bien représentée par TEB (Figure 4.17) même si le modèle a tendance à sous-estimer la variabilité des flux d'un jour à l'autre. Il est probable que les **variations de la surface d'influence** avec le temps soient responsables d'une partie de la variabilité des flux de CO₂ observés, ce qui expliquerait que le modèle TEB ne la capture pas puisque la zone modélisée est fixe.

L'approche de modélisation des flux de CO₂ par processus permet de calculer la contribution de chaque source et puits de CO₂ au flux total modélisé. Sur notre site d'étude, les principales sources sont le trafic (48%) et les bâtiments (42%). La respiration humaine représente presque 10% du flux total, et la végétation urbaine seulement -0,5%. La contribution des différentes sources au flux total de CO₂ varie grandement avec la saison. En JJA, le trafic représente plus des quatre-cinquième (82%) du flux total, la respiration humaine 17%, les bâtiments 3% et la végétation -2,5%. Cela souligne **l'importance de données de trafic de qualité pour une bonne modélisation des flux de CO₂ en milieu urbain**. En DJF, la principale source de flux de CO₂ est les bâtiments (65,7%); le trafic représente 27,5%, la respiration humaine 6,5% et la végétation moins de 0,3% du flux total. Ces chiffres sont cohérents avec les contributions évalués sur d'autres sites d'études (Section 2.1).

L'EQM du flux semi-horaire de CO₂ modélisé est de 15,3 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Cette valeur **est comparable à celle du modèle de Crawford et Christen [2015]**, qui utilisent l'hétérogénéité de leur site d'étude (Sunset, Vancouver, Canada) pour calibrer un modèle statistique pour chaque source et puits du flux de CO₂ en milieu urbain. Leur modèle est capable de prévoir le flux semi-horaire de CO₂ avec une EQM moyenne sur un an de 12,41 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, un biais diurne (entre 05 LST et 15 LST) de 4 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ et un biais nocturne (entre 22 LST et 04 LST) de -2,5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Pour Toulouse, TEB simule les flux de CO₂ avec des biais comparables : -7,1 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ le jour (entre 10 UTC et 16 UTC) et -1,4 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ la nuit (entre 19 UTC et 07 UTC).

Järvi *et al.* [2012] ont réalisé une régression entre les flux de CO₂ observés pendant l'hiver et les données de comptage du trafic routier sur le site de Kumpula à Helsinki

4.2. ÉVALUATION DE TEB

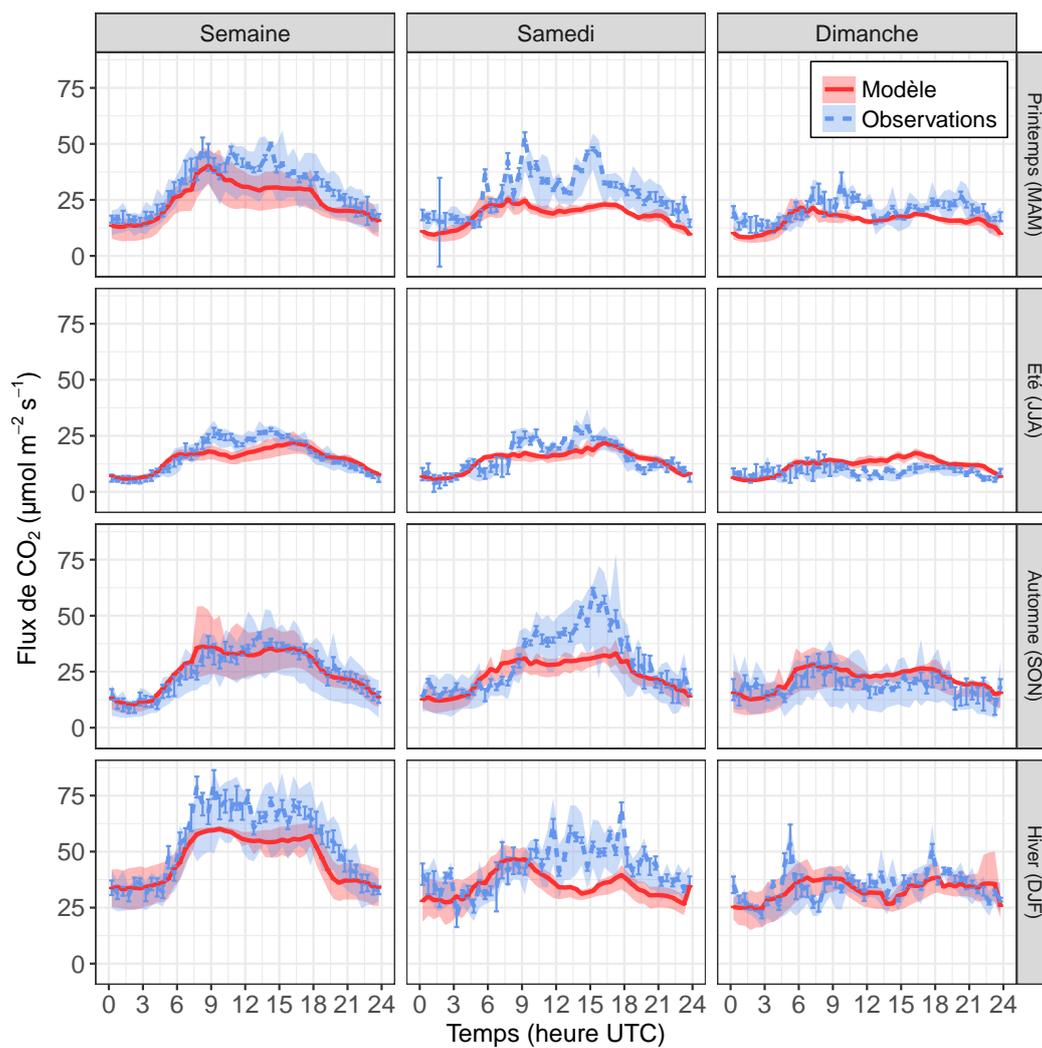


FIGURE 4.16 – Cycles journaliers moyens par saison des flux de CO₂. Les barres d'erreur représentent l'incertitude associée au stockage de CO₂ en-dessous du niveau de mesure (cf. Section 2.4.5.2). Les plages colorées indiquent l'écart interquartile.

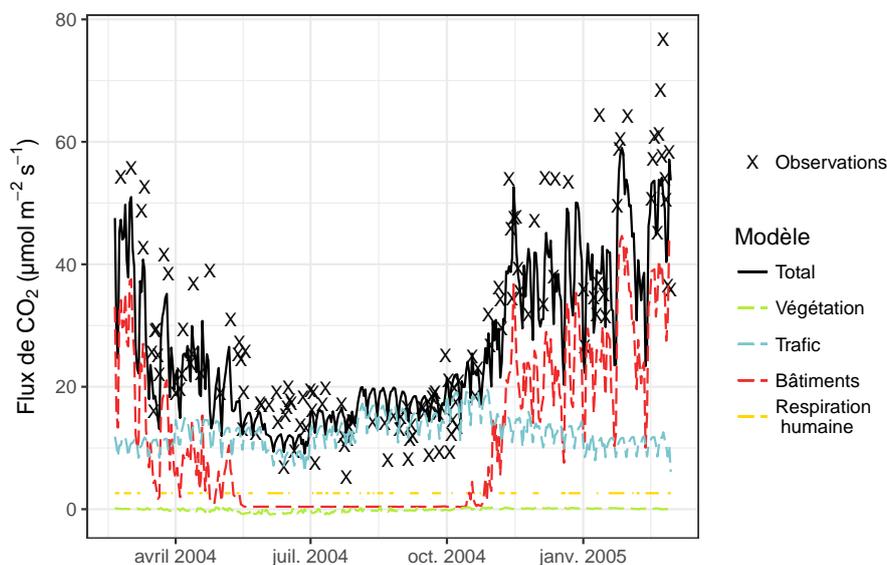


FIGURE 4.17 – Série temporelle des flux de CO₂ journaliers moyens. L’observation d’un jour donné est affichée lorsque plus de 70% des observations semi-horaires sont disponibles.

en Finlande. Pendant l’hiver, le trafic est quasiment la seule source de CO₂ à Helsinki car le sol est recouvert par la neige et les bâtiments sont chauffés par un réseau de chaleur qui n’émet pas de CO₂ à l’intérieur de la zone d’influence des mesures. L’EQM entre les flux de CO₂ estimés à partir de la régression et les flux observés est de $5,24 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. C’est une valeur comparable à l’EQM de notre modèle en été, lorsque le trafic est le principal contributeur au flux de CO₂ total. **L’EQM de $7,5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour Toulouse est du même ordre de grandeur que l’EQM trouvée par Järvi *et al.* [2012].**

4.2.3 Conclusion

L’étude sur la sensibilité de la modélisation des flux de CO₂ émis par les bâtiments a montré une **forte dépendance du modèle aux paramètres relatifs à l’usage des bâtiments et au comportement des habitants**. En particulier, les flux nocturnes peuvent passer du simple au double suivant les températures de consignes de chauffage choisies. La prise en compte de **l’abaissement des températures de consigne la nuit** permet d’obtenir un bon accord le modèle et les observations sur le flux total de CO₂.

Jusqu’ici, seul le flux total de CO₂ a été évalué à l’aide d’observations. Aussi, le bon comportement apparent du modèle pourrait masquer des **compensations d’erreurs** entre les contributions des différents puits et sources de CO₂. C’est pourquoi on propose, dans la section suivante, d’évaluer séparément la principale contribution, très fortement météo-sensible, aux flux de CO₂ : le chauffage.



FIGURE 4.18 – Photographies des perches de mesures des flux de CO₂ et de chaleur utilisés pendant la campagne CAPITOUL. Crédits : CNRM.

4.3 Estimation à partir des observations des flux de CO₂ émis par les bâtiments

Pour **désagréger entre les différents contributeurs les flux de CO₂** mesurés par la méthode de la covariance des turbulences, on utilise généralement des modèles statistiques qui combinent observations et données exogènes (Section 2.3.4.1). L'étude des rapports isotopiques (Section 2.3.4.2) peut également être utilisée si l'on souhaite faire une décomposition à basse fréquence temporelle (une semaine). Ici, on propose une **méthode basée uniquement sur les observations** afin d'avoir une estimation totalement indépendante des données utilisées en entrée du modèle TEB. Les rapports isotopiques ne sont pas utilisés car on ne dispose pas de mesure de ces derniers, et, de toutes façons, leur fréquence temporelle aurait probablement été trop faible pour évaluer le cycle journalier. L'estimation, à partir des observations, des flux de CO₂ émis par le chauffage pourra ensuite être utilisée pour **évaluer les émissions de CO₂ modélisées par TEB et dues au chauffage**.

4.3.1 Flux provenant des perches

En plus des mesures en haut du mât, exploitées dans les sections précédentes, les flux de CO₂ sont mesurés au-dessus des rues, au niveau des toits, à l'aide de deux perches (Figures 4.3 et 4.18). Pour obtenir les flux de CO₂, les données de concentration en CO₂ et de vitesse du vent sont **traitées de manière similaire à celles du mât** : suppression des pics isolés et non isolés et des épisodes pluvieux, correction de Webb et du décalage temporel, application d'un filtre passe-haut, suppression des données avec un indicateur de la stationnarité de la turbulence strictement supérieur à cinq. Après traitement, la disponibilité des données est très bonne : en JJA, elle est de 55% pour la rue d'Alsace-Lorraine et 78% pour la rue de la Pomme, pour les autres saisons (MAM et DJF), la disponibilité est supérieure à 70% pour chacune des deux rues.

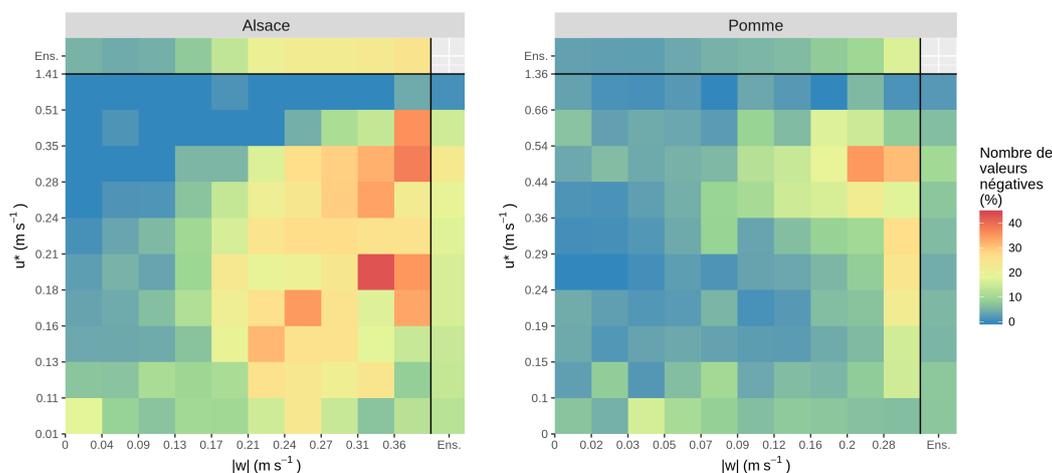


FIGURE 4.19 – Pourcentages de valeurs négatives de flux de CO₂ en fonction de la vitesse de friction (u^*) et de la valeur absolue de la vitesse verticale ($|w|$). Les limites de classes correspondent aux déciles des deux échantillons. Les résultats sont affichés séparément pour la Rue d’Alsace-Lorraine (à gauche) et la Rue de la Pomme (à droite). La marge à droite des figures montre les pourcentages de valeurs négatives en fonction uniquement de la vitesse de friction et la marge en haut en fonction uniquement de la valeur absolue de la vitesse verticale, pour l’ensemble des valeurs.

En mesurant les flux au niveau des toits, on se situe à la limite des hypothèses théoriques de la mesure des flux par la méthode de la covariance des turbulences. En particulier, **la rotation 2D ne peut être appliquée** car, du fait de la présence proche des bâtiments, le flux d’air moyen n’est pas parallèle au sol. L’application d’une rotation 2D entraînerait des rotations des flux de plus de 30°, ce qui détériorerait très probablement les données.

À ce stade, une analyse préliminaire des données révèle que **des flux négatifs sont fréquemment mesurés**. De telles valeurs de flux sont invraisemblables, particulièrement en hiver, car la végétation est quasiment inexistante dans le voisinage proche des perches. Ces flux négatifs sont très probablement le **reflet de conditions de mesure incorrectes**.

Pour chaque point de mesure, (Rue de la Pomme et Rue d’Alsace-Lorraine), on détermine les déciles des vitesses de friction et de la valeur absolue de la vitesse verticale. Ces déciles sont utilisés pour constituer des classes. Pour chaque classe, on calcule le pourcentage de valeurs négatives de flux de CO₂ (Figure 4.19). Aucune relation claire n’est mise en évidence entre la vitesse de friction et les valeurs négatives de flux. En revanche, **le pourcentage de flux négatif augmente avec la valeur absolue de la vitesse verticale**. Lorsque la vitesse verticale moyenne est trop importante, l’hypothèse d’une vitesse verticale nulle, sur laquelle repose la méthode de la covariance des turbulences, n’est plus vérifiée, ce qui entraîne des erreurs de mesures.

On définit un **seuil maximal de vitesse verticale absolue ($|w|$) acceptable**. Le choix du seuil s’effectue en faisant un compromis entre le nombre de valeurs supprimées (on souhaite conserver le maximum de données), et le nombre de valeurs négatives (on cherche à ce qu’il en reste le moins possible). En s’appuyant sur la Figure 4.20, **on retient le seuil de 0,2 m s⁻¹** car on observe, autour de cette valeur,

4.3. ESTIMATION DU CO₂ ÉMIS PAR LES BÂTIMENTS

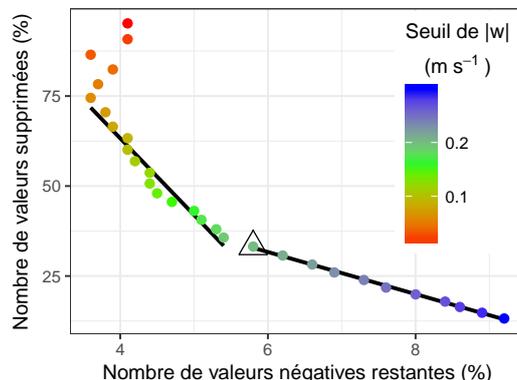


FIGURE 4.20 – Nombre de valeurs de flux de CO₂ supprimées et nombre de valeurs de flux négatives restantes pour différentes valeurs du seuil maximal de valeur absolue de vitesse verticale ($|w|$). Le point correspondant à un seuil de $0,2 \text{ m s}^{-1}$ est repéré par un triangle noir. Plus la pente est forte, plus on supprime de valeurs pour supprimer une quantité donnée de valeurs négatives. On observe un raidissement de la pente lorsque le seuil est inférieur à $0,2 \text{ m s}^{-1}$.

un changement du rapport entre le nombre de valeurs supprimées et le nombre de valeurs négatives. En supprimant toutes les valeurs dont la vitesse verticale absolue est supérieure ou égale à $0,2 \text{ m s}^{-1}$, on supprime 33% des données, et on réduit le pourcentage de flux négatifs de moitié (il passe de 12 à 6%).

L'impact de ce filtrage est visible sur les cycles journaliers de flux de CO₂ : le cycle moyen est plus élevé après filtrage qu'avant, et les valeurs des différents quantiles augmentent (Figure 4.21). Son effet est particulièrement visible sur les données de DJF : à cette saison, les valeurs du premier quartile après filtrage sont jusqu'à $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ au-dessus des valeurs des données originales. **Le filtrage tend à faire converger le cycle journalier de DJF vers celui des autres saisons** (aussi bien en moyenne que pour les différents quartiles). Cette convergence est raisonnable car les perches mesurent les flux au-dessus du canyon urbain et ceux-ci ne présentent pas une grosse saisonnalité (il y a peu de végétation dans le canyon, et les émissions de CO₂ par le chauffage sont rejetées au-dessus du niveau de mesure). **L'allure des cycles journaliers** aux différentes saisons **est également raisonnable** : les flux suivent le rythme de l'activité anthropique : peu d'émissions la nuit, et des émissions plus fortes en journée, avec un premier pic vers 9 UTC, et un deuxième plus important vers 16 UTC.

4.3.2 Méthode de décomposition des flux de CO₂

L'estimation des flux de CO₂ liés au chauffage des bâtiments est basée sur **la combinaison des observations de flux de CO₂ prises au niveau du mât, et au niveau des toits des bâtiments par les perches.**

On fait les hypothèses suivantes :

- les émissions de CO₂ dues au chauffage sont toutes rejetées au-dessus des toits des bâtiments ;
- la quantité de CO₂ rejetée au-dessus des toits des bâtiments et associée à

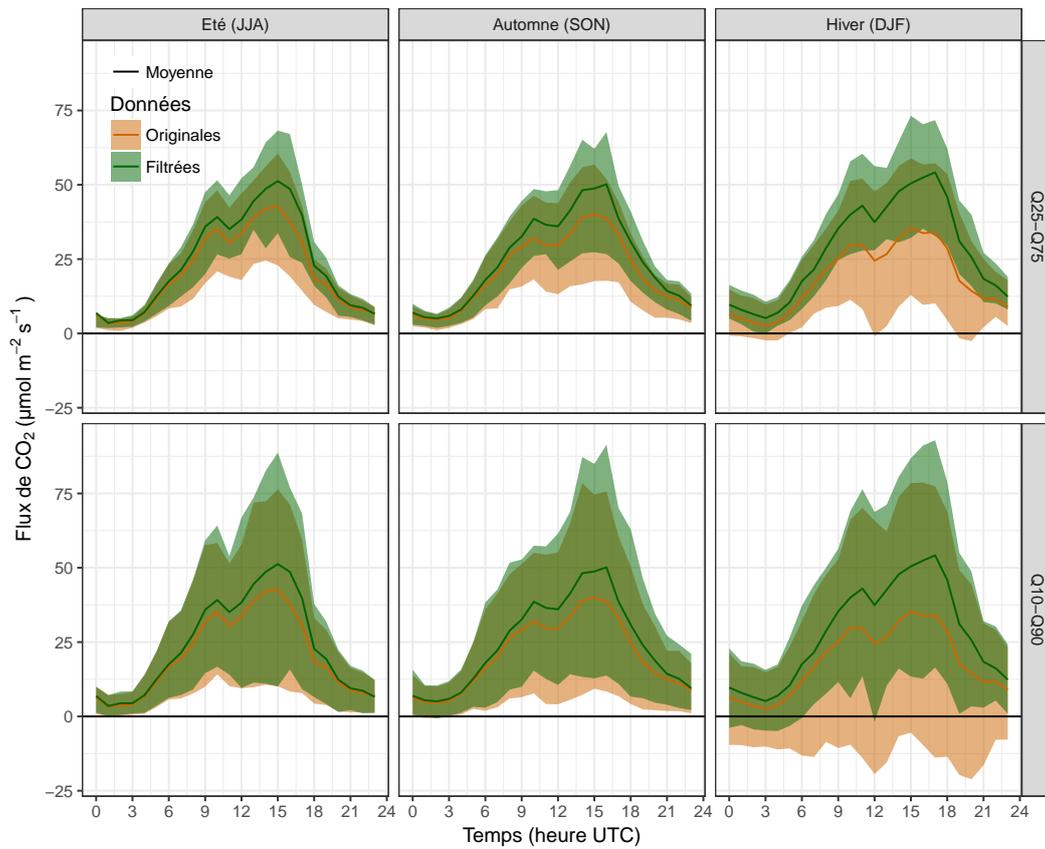


FIGURE 4.21 – Cycles journaliers de flux de CO₂ par saison, mesurés au-dessus des rues, au niveau des toits des bâtiments, avant et après filtrage. Les plages colorées indiquent l'écart interquartile (en haut), et l'écart entre le premier et le neuvième décile (en bas).

4.3. ESTIMATION DU CO₂ ÉMIS PAR LES BÂTIMENTS

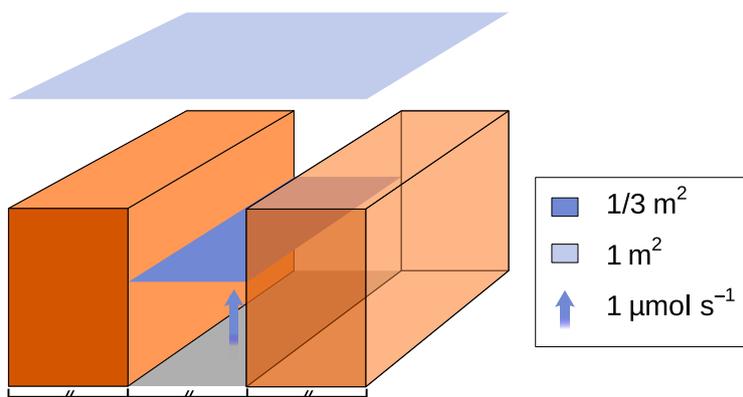


FIGURE 4.22 – Représentation schématique de l'effet de dilution. Le flux de CO₂ est de $3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ à mi-hauteur du canyon (surface bleue foncée) mais il n'est plus que de $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ au-dessus des toits des bâtiments (surface bleue claire) car la quantité de CO₂ qui traverse chaque surface est identique, mais la surface bleue claire est trois fois plus grande que la surface bleue foncée.

- d'autres sources que le chauffage (production d'eau chaude, cuisine...) est négligeable ou constante (quelles que soient l'heure et la saison) ;
- les flux mesurés au niveau du mât intègrent tous les puits et sources de CO₂ présents à l'échelle locale ;
- les flux mesurés au niveau des perches intègrent tous les puits et sources de CO₂ présents dans le canyon urbain (tous les contributeurs sauf le chauffage) ;
- les variations de flux de CO₂ au niveau de la rue de la Pomme et de la rue d'Alsace Lorraine sont représentatives des routes du quartier.

Cette dernière hypothèse, peut, de prime abord, sembler discutable. Cependant, la rue d'Alsace-Lorraine et la rue de la Pomme sont deux rues typiques du quartier : la rue d'Alsace-Lorraine était, au moment de la campagne de mesure, un axe routier important bordé de nombreux commerces et bureaux ; la rue de la Pomme est plus calme (semi-piétonne) avec également quelques commerces. Considérer que les variations de flux de CO₂ mesurées dans ces deux rues sont représentatives du quartier n'est donc pas une grosse hypothèse.

En considérant toutes les hypothèses énoncées ci-dessus, on peut écrire la relation suivante :

$$F_{\text{mât}} = \alpha * F_{\text{toits}} + F_{CH} + \beta \quad (4.4)$$

avec $F_{\text{mât}}$ le flux de CO₂ mesuré au niveau du mât, F_{toits} le flux de CO₂ mesuré au-dessus des routes, au niveau des toits (à l'aide des perches) et F_{CH} le flux de CO₂ dû au chauffage des bâtiments (et rejeté au-dessus du niveau des toits). α et β sont des coefficients à déterminer. Le coefficient α dépend de la fraction de route via le phénomène de dilution à la sortie du canyon (cf. Figure 4.22) et de l'importance des flux mesurés au niveau des toits. Plus les flux mesurés au niveau des toits de la rue Alsace-Lorraine et de la rue de la Pomme seront élevés par rapport à la moyenne des flux au niveau des toits du quartier, plus α sera faible. **Les coefficients α et**

Jeu de données	Autres sources				Nombre d'observations
		α_{Alsa}	α_{Pom}	β	
Alsace	Négligeables	0,42	-	0	364
Pomme	Négligeables	-	0,59	0	728
AlsaPom	Négligeables	0,24	0,27	0	268
Alsace	Constantes	0,26	-	9,0	364
Pomme	Constantes	-	0,36	7,9	728
AlsaPom	Constantes	0,15	0,17	8.6	268

Tableau 4.6 – Valeurs des coefficients des régressions linéaires permettant d'estimer les flux de CO₂ hors chauffage, au niveau du mât. β est donné en $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$

β sont déterminés de manière expérimentale. Afin de s'affranchir du terme de chauffage, on utilise les mesures faites en été (JJA), à cette période de l'année, dû fait de l'absence de chauffage, l'Équation (4.4) devient :

$$F_{mât} = \alpha * F_{toits} + \beta, \quad (4.5)$$

et les coefficients α et β peuvent être estimés par régression linéaire selon la méthode des moindres carrés.

Concernant le CO₂ rejeté au-dessus des toits et émis par d'autres sources que le chauffage, on a fait l'hypothèse qu'il était **négligeable ou constant**. Ces deux hypothèses sont testées séparément : β est fixé à 0 lorsqu'on considère que les autres sources sont négligeables, et il est non nul lorsqu'on suppose qu'elles sont constantes.

Afin de tester la robustesse de la méthode, **trois jeux de données de flux au niveau des toits sont utilisés** : un premier regroupant uniquement les données mesurées rue de la Pomme (jeu Pomme), un second uniquement celles de la rue d'Alsace-Lorraine (jeu Alsace) et un troisième qui regroupe les mesures prises dans les deux rues (jeu AlsaPom). Pour le troisième jeu de données où l'on considère les flux mesurés au niveau des deux rues, la multiplication $\alpha * F_{toits}$ doit être vue comme un produit vecteur/matrice. L'Équation (4.5) se réécrit de manière développée :

$$F_{mât} = \alpha_{Alsa} * F_{toits_{Alsa}} + \alpha_{Pom} * F_{toits_{Pom}} + \beta \quad (4.6)$$

Une fois les coefficients α et β estimés sur JJA, les flux de CO₂ peuvent être décomposés, pour toutes les saisons, entre les flux liés au chauffage, et les flux liés à tous les autres contributeurs, à l'aide des équations suivantes :

$$F_{AUT} = \alpha * F_{toits} + \beta; \quad (4.7)$$

$$F_{CH} = F_{mât} - F_{AUT}; \quad (4.8)$$

avec F_{AUT} les flux de CO₂ liés à tous les autres contributeurs que le chauffage.

4.3. ESTIMATION DU CO₂ ÉMIS PAR LES BÂTIMENTS

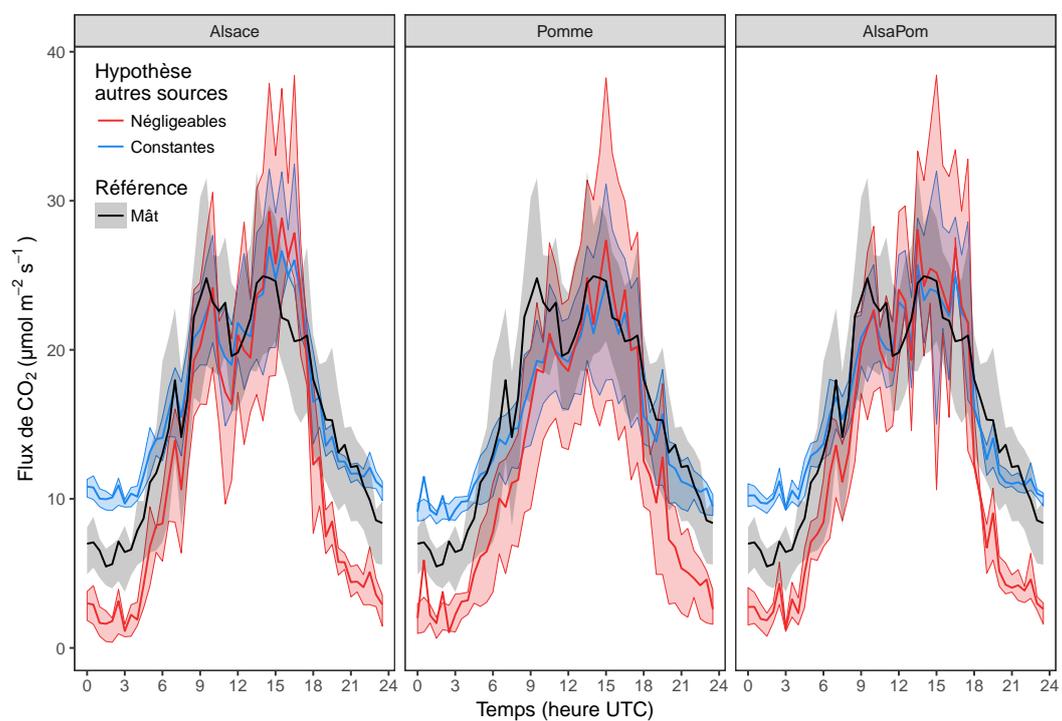


FIGURE 4.23 – Cycles journaliers des flux de CO₂ en JJA, au centre-ville de Toulouse. En noir, le cycle observé au niveau du mât. En couleur, la reconstruction du cycle au niveau du mât, à partir des observations des perches situées au niveau des toits. Les différents panneaux correspondent aux différents jeux de données. Les zones colorées représentent l'écart interquartile.

4.3.3 Qualité de la reconstruction du cycle sans chauffage

Au total, six régressions linéaires (3 jeux * 2 hypothèses) sont calculées. Le détail des coefficients évalués pour chacune d'elle est résumé dans le Tableau 4.6. **Pour tester la performance des régressions, on reconstruit le cycle journalier moyen de flux de CO₂ en JJA au niveau du mât à partir des données de flux au niveau des toits** (Figure 4.23). En journée, toutes les régressions donnent des résultats similaires, en bon accord avec les observations. En soirée et la nuit, les régressions peuvent être classées en deux groupes : celles qui supposent que le CO₂ rejeté au niveau des toits par d'autres sources que le chauffage est négligeable (groupe Négligeables) et celles qui supposent qu'il est constant (groupe Constantes). En soirée (18 UTC à 23 UTC), les observations suivent les reconstructions du groupe de régressions Constantes. La nuit (23 UTC à 6 UTC), les observations se situent entre les reconstructions de chacun des deux groupes de régressions. Aucune hypothèse (Négligeables ou Constantes) ne permet de reconstruire correctement le cycle journalier de flux de CO₂, ce qui démontre que ni l'une ni l'autre des deux hypothèses n'est correcte, et qu'en réalité, les émissions de CO₂ par les toits, provenant d'autres sources que le chauffage suivent un cycle journalier. Néanmoins, **la combinaison des reconstructions obtenues avec chacun des groupes permet d'estimer correctement le cycle.**

Le choix du jeu de données a peu d'impacts sur les valeurs de la reconstruction. Comme les flux de CO₂ sont mesurés de manière indépendante entre la rue de la Pomme et la rue d'Alsace-Lorraine, le bon accord entre les reconstructions obtenues avec les jeux de données Alsace et Pomme montre que, **malgré un environnement de mesure à la limite des hypothèses théoriques, un signal est bien présent dans les flux de CO₂ mesurés au niveau des toits.**

4.3.4 Décomposition des flux de CO₂ : isolement du chauffage

Les six régressions calculées dans la section précédente sont appliquées pour les trois saisons où les données sont disponibles (DJF, JJA et SON). On obtient ainsi la décomposition du flux total de CO₂ entre la partie liée au chauffage, et celle liés aux autres contributeurs. Pour chaque régression et chaque partie du flux (F_{CH} et F_{AUT}), on calcule la moyenne ainsi que les premier et troisième quartiles, avec une résolution de 30 minutes. Les résultats de ces statistiques sont ensuite agrégés par groupe de régressions (Négligeables et Constantes) en conservant la moyenne des statistiques sur les trois jeux de données. La Figure 4.24 compare les cycles journaliers ainsi obtenus avec les résultats de la modélisation TEB dans sa configuration de référence (REF).

Les cycles journaliers estimés pour F_{AUT} sont très proches aux trois saisons. Ceci est cohérent puisque, si l'on retire le chauffage, les flux de CO₂ dans le voisinage du mât de mesure ont une faible variabilité inter-saisonnière : il y a très peu de végétation et le trafic routier est relativement stable d'une saison à l'autre. **Les différences entre les deux groupes de régression sont similaires en DJF et SON à celles que l'on avait en JJA :** peu de différences pendant la journée et une estimation plus forte la nuit pour le groupe Constantes que pour le groupe Négligeables. En journée, le groupe Négligeables donne un écart interquartile

4.3. ESTIMATION DU CO₂ ÉMIS PAR LES BÂTIMENTS

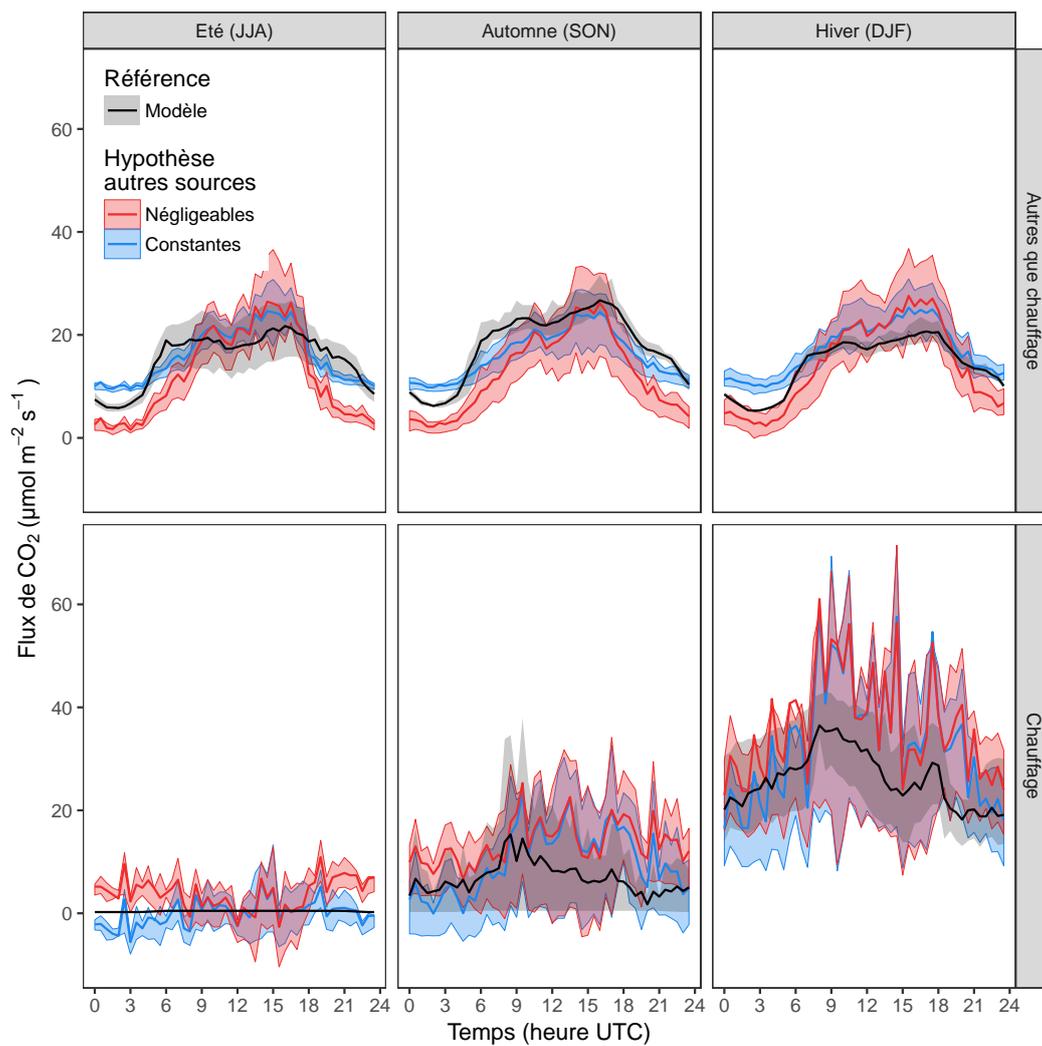


FIGURE 4.24 – Cycles journaliers moyens des flux de CO₂ en centre-ville de Toulouse. On sépare la contribution provenant du chauffage (en bas) des autres contributions (en haut). Les surfaces colorées représentent l'écart interquartile. Les données modèles sont celles modélisées par TEB avec la configuration REF (cf. Section 4.2.1).

qui englobe l'écart interquartile du groupe Constantes. **L'accord entre le modèle TEB et les estimations par régression est similaire à l'accord modèle/reconstructions** que l'on avait en Section 4.3.3 : le modèle se situe entre l'estimation de chaque groupe la nuit (23 UTC–6 UTC), les valeurs du modèle et des estimations sont très proches le jour et le modèle suit l'estimation du groupe Constantes en soirée (18 UTC–23 UTC).

L'estimation des cycles journaliers des flux liés au chauffage en utilisant les régressions reproduit une variabilité inter-saisonnière plausible : les flux sont plus élevés en DJF qu'en SON et ils sont quasiment nuls en JJA. **On retrouve le même accord modèle/estimations par régression que précédemment** : le modèle se situe bien entre les deux estimations la nuit, et suit l'estimation du groupe Constantes en soirée. En journée les valeurs modèles se trouvent dans les valeurs basses des estimations par régressions, mais elles restent tout de même à l'intérieur de l'écart inter-quartile. **Modèle et observations donnent un cycle journalier des émissions de CO₂ par le chauffage avec la même forme générale** : les flux sont plus faibles la nuit que le jour.

4.3.5 Conclusion

La mesure de flux de CO₂ en haut des canyons, au niveau des toits des bâtiments ne permet pas de respecter l'ensemble des hypothèses théoriques de la mesure de flux par la méthode de la covariance de la turbulence. En particulier, le flux d'air n'est pas parallèle à la surface, et les valeurs de vitesses verticales peuvent être plus élevées que celles que l'on rencontre plus haut, dans la sous-couche inertielle.

L'utilisation de méthodes spécifiques (non rotation des données, suppression des données avec une vitesse verticale en valeur absolue trop élevée) **permet d'obtenir des données exploitables.** En particulier, ici, on montre qu'il est possible de reconstruire, à partir des données des perches, le cycle journalier de flux de CO₂ sans le chauffage, mesurés au niveau du mât, dans la sous-couche inertielle. On parvient ainsi à isoler la contribution du chauffage dans le flux total.

L'estimation des émissions de CO₂ par le chauffage à partir des observations, et leur modélisation par TEB donnent des résultats compatibles. **En particulier, les observations et modèle donnent des flux de CO₂ plus forts le jour que la nuit.**

4.3.6 Discussion

Pour reconstruire le flux de CO₂ sans le chauffage, on suppose que les émissions de CO₂ au niveau du toit ayant une autre source que le chauffage sont constantes ou négligeables. Ni l'une ni l'autre des hypothèses n'est satisfaisante puisqu'on ne parvient pas à reconstruire le cycle complètement. **L'utilisation de régressions linéaires différentes pour chaque période/heure de la journée permettrait probablement d'améliorer la reconstruction,** mais elle nécessiterait d'avoir plus de données.

L'incertitude dans le flux de CO₂ lié au chauffage est importante. **Une quantité de mesures plus importante permettrait d'améliorer la qualité des**

régressions et de réduire l'incertitude.

4.4 Discussion

Les résultats de cette première évaluation de la modélisation des flux de CO₂ par TEB sont encourageants : bien que le modèle TEB soit totalement indépendant des flux de CO₂ observés, ses performances sont similaires à celles de modèles statistiques de la littérature, qui eux, s'appuient sur les observations.

Les résultats du modèle montrent que sur le site étudié, les principaux contributeurs aux flux de CO₂ sont le trafic et les bâtiments, avec une grande saisonnalité de la contribution des bâtiments due au chauffage. La respiration humaine joue également un rôle non négligeable. Ces résultats sont cohérents avec les répartitions par contributeurs documentés dans la littérature.

Parmi les quatre contributeurs aux flux de CO₂, les bâtiments et la végétation nous intéressent particulièrement du fait de leur forte météo-sensibilité. L'importante contribution des bâtiments au flux total sur le site de Toulouse a permis de réaliser une évaluation poussée de la modélisation des flux de CO₂ qui leur sont associés. L'étude de sensibilité menée en Section 4.2.1 a montré la forte sensibilité du modèle aux paramètres liés à l'usage des bâtiments et aux comportements des habitants ; et en particulier la sensibilité à l'abaissement de la température de consigne du chauffage la nuit. La prise en compte de cette abaissement est nécessaire pour obtenir de bons accords, non seulement entre le flux total de CO₂ modélisé par TEB et les flux mesurés dans la sous-couche inertielle, en haut du mat de mesure (Section 4.2), mais également entre la modélisation par TEB des émissions de CO₂ par les systèmes de chauffage et l'estimation de ces dernières à partir des observations (Section 4.3).

La qualité de la modélisation des flux de CO₂ liés à la végétation n'a pu être évaluée du fait du faible taux de végétalisation de la zone d'étude. Cette évaluation sera menée dans le Chapitre 5 en exploitant des mesures de flux prises sur un site péri-urbain fortement végétalisé.

Résumé

- Les données de flux de CO₂ mesurées lors de la campagne CAPITOUL sont représentatives d'une zone de 500 m de rayon centrée sur le mât de mesure. Cette zone comprend trop peu de végétation pour pouvoir évaluer la modélisation des flux de CO₂ liés à la photosynthèse et à la respiration de la végétation urbaine.
- La présence d'une couche limite neutre voire légèrement instable la nuit limite le phénomène de stockage de CO₂ en-dessous du niveau de mesure ainsi que les erreurs associées à ce phénomène.
- Dans TEB, la modélisation des flux de CO₂ émis par les bâtiments est sensible aux paramètres décrivant l'usage des bâtiments et les comportements. En particulier, la prise en compte de l'abaissement de la température de consigne du chauffage la nuit est essentielle pour bien représenter

le cycle journalier de flux de CO₂. Une nouvelle configuration par défaut (NOUV_DEF), avec un abaissement de la température de consigne de 2 °C la nuit est proposée.

- La modélisation des flux de chaleur sensible est satisfaisante. En revanche, il y a un biais négatif non expliqué sur les flux de chaleur latente.
- La variabilité inter-saisonnière des flux de CO₂ est bien modélisée. Le cycle journalier est correctement représenté même si le modèle sous-estime les flux en journée, en particulier le samedi en période de chauffe.
- La mesure de flux de CO₂ au niveau des toits des bâtiments est limitée par rapport aux hypothèses théoriques de la mesure de flux par la méthode de la covariance des turbulences. Des traitements spécifiques sont appliqués : pas de rotation 2D des données, et les données avec une valeur absolue de vitesse verticale supérieure à 0,2 m s⁻¹ sont retirées.
- La combinaison de mesure de flux de CO₂ dans la sous-couche inertielle et au niveau des toits permet d'estimer, à partir des observations, le CO₂ émis par les bâtiments (chauffage). Cette estimation des bâtiments s'accorde bien avec les émissions de CO₂ modélisées avec TEB.

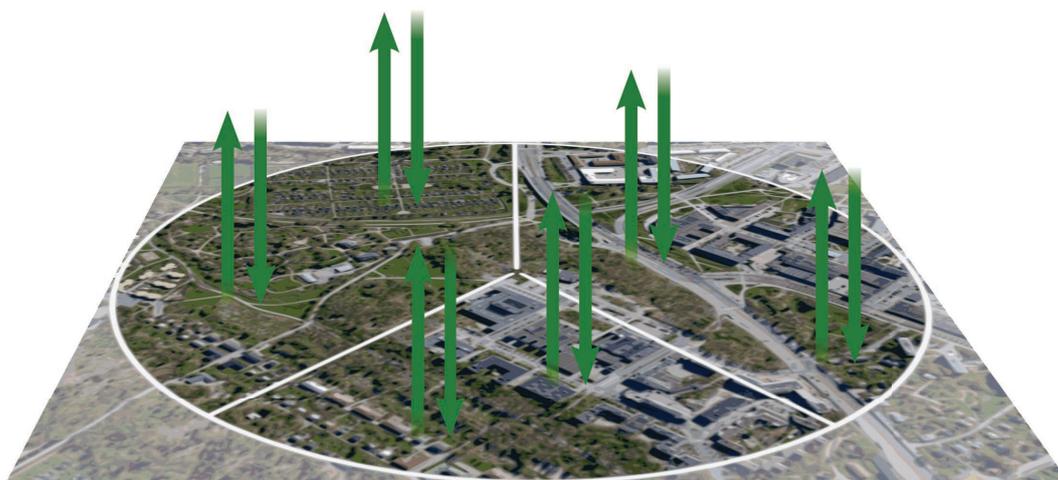
Les détails font la perfection mais la perfection n'est pas un détail.

Léonard de Vinci

5

Kumpula : évaluation des flux de CO₂ associés à la végétation urbaine

La modélisation des flux de CO₂ par TEB (Chapitre 3) a été évaluée sur un premier site d'étude : le centre ville de Toulouse (Chapitre 4). Cette première évaluation a montré le bon comportement général du modèle. Elle s'est principalement focalisée sur les flux de CO₂ associés aux bâtiments. Ici, on propose une deuxième évaluation du modèle, sur un site péri-urbain situé près d'Helsinki (Finlande). Ce deuxième site, fortement végétalisé, a été choisi pour évaluer les flux de CO₂ associés à la végétation. Ces derniers n'avaient pu être évalués sur le site de Toulouse faute de végétation suffisante. Les données utilisées et le site d'étude sont décrits en Section 5.1. Les différentes méthodes de modélisation de la végétation urbaine sont comparées en Section 5.2. Dans la dernière section Section 5.3, le modèle est évalué par comparaison aux observations.



Sommaire

5.1	Description du site et des données	98
5.1.1	Mesure des flux de CO ₂	98
5.1.2	Préparation des données pour TEB	99
5.1.2.1	Forçages météorologiques	99
5.1.2.2	Séparation pluie/neige	101
5.1.2.3	Données d'occupation du sol	102
5.1.3	Stratégie de modélisation	106
5.2	Méthodes de modélisation de la végétation urbaine	106
5.2.1	Influence des patches de végétation	108
5.2.1.1	Patches complets	108
5.2.1.2	Patches partiels	113
5.2.2	Influence de la version d'ISBA	115
5.2.3	Influence de la nature du lien TEB/ISBA	117
5.2.4	Conclusion	120
5.3	Évaluation du modèle sur le site de Kumpula	121
5.3.1	Flux de chaleur	121
5.3.2	Flux de CO ₂	122
5.4	Discussion	126

5.1 Description du site et des données

Le site de Kumpula se situe à 5 km au nord-est du centre-ville de Helsinki, en Finlande. Les flux de CO₂ y sont mesurés depuis 2006 en haut d'une tour en treillis de 31 m de hauteur. Une étude détaillée de la variabilité inter-saisonnière et inter-annuelle des flux de CO₂ a été menée par Järvi *et al.* [2012].

Le site de Kumpula possède deux atouts pour évaluer la modélisation des flux de CO₂ liés à la végétation urbaine :

- la fraction de végétation y est importante (Figure 5.1) ;
- le quartier est presque entièrement alimenté par un réseau de chaleur, par conséquent, les bâtiments n'émettent pas ou très peu de CO₂ [Järvi *et al.*, 2012].

5.1.1 Mesure des flux de CO₂

Les flux de CO₂ sont **mesurés par la méthode de la covariance des turbulences à une hauteur de 31 m au-dessus du sol**. Le vent est mesuré à l'aide d'un anémomètre ultrasonique USA-1, Metek GmbH. Les mesures de concentrations de CO₂ sont réalisées par deux analyseurs de gaz par infrarouge : un LICOR en circuit ouvert (LI-7500) en un LICOR en circuit fermé (LI-7000). La fréquence d'acquisition des mesures de vent et de concentration de CO₂ est de 10 Hz. Les instruments de mesures sont décrits plus en détail par Järvi *et al.* [2012].

Les données brutes ont été **écrêtées et filtrées**. La **tendance linéaire** a été retirée, et une rotation 2D est appliquée aux données. Le **décalage temporel** entre les mesures de concentration de CO₂ et de vent a été corrigé. La **correction de Webb** a été appliquée sur les données du LICOR en circuit ouvert. Les flux sont calculés par périodes de 30 minutes. Les pertes à hautes et basses fréquences ont été **corrigées par l'analyse du co-spectre**. Le **test de stationnarité** proposé par Foken et Wichura [1996] est utilisé : on supprime les périodes de 30 minutes pour lesquelles la moyenne des flux calculés sur des sous-périodes de 5 minutes diffère de plus de 60% par rapport au flux calculé sur 30 minutes. Plus d'informations sur le post-traitement des données sont disponibles dans [Nordbo *et al.*, 2012].

Une comparaison détaillée entre les flux de CO₂ mesurés avec le LICOR en circuit ouvert et le LICOR en circuit fermé est faite par Järvi *et al.* [2009a] sur les données de juillet 2007 à juin 2008. Cette étude montre que les flux mesurés avec le LICOR en circuit ouvert présentent un biais non négligeable (17%) par rapport à ceux mesurés en circuit fermé. Ce biais est attribué au chauffage de la surface du capteur sous l'effet du rayonnement solaire, qui influence la densité de l'air mesuré par le LICOR en circuit ouvert. **Par la suite on utilisera donc uniquement les flux mesurés avec le LICOR en circuit fermé**. Les données étudiées couvrent la période allant de juillet 2007 à décembre 2013.

En suivant la même méthode qu'en Section 4.1.1.5, on obtient **une longueur d'influence moyenne de l'ordre de 500 mètres** quels que soient le secteur et la période de la journée (Figure 5.1). Par conséquent, pour évaluer les flux de CO₂ modélisés par TEB à l'aide des observations on simulera une zone de rayon 500 mètres centrée sur la tour de mesure.

5.1. DESCRIPTION DU SITE ET DES DONNÉES

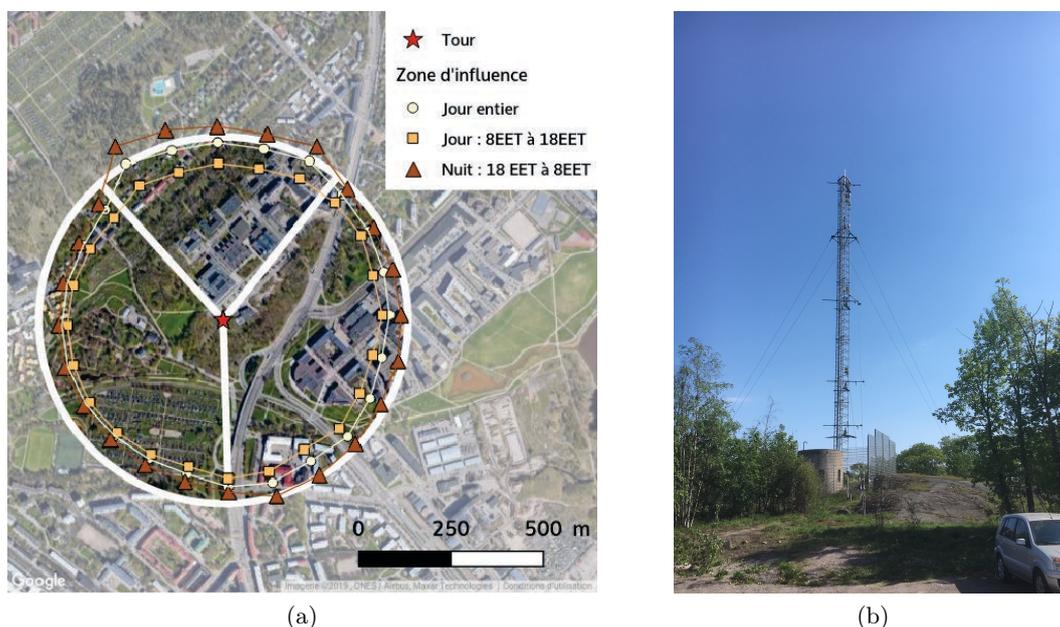


FIGURE 5.1 – (a) Distances d’influences moyennes à 80% des flux de CO_2 par direction de vent, superposées à une vue aérienne du site de mesure de Kumpula. Les trois secteurs, dans un rayon de 500 m autour de la tour sont délimités par les traits blancs. (b) Photo de la tour de mesure des flux. Crédits : Valéry Masson.

5.1.2 Préparation des données pour TEB

5.1.2.1 Forçages météorologiques

Le Tableau 5.1 répertorie l’ensemble des **paramètres météorologiques nécessaires pour le forçage des simulations TEB**. Les observations de ces paramètres sont faites soit directement sur la tour qui sert à la mesure des flux, soit sur le toit d’un bâtiment de 24 mètres de hauteur, situé à proximité de la tour. La séparation entre le rayonnement descendant courte longueur d’onde direct et diffus est faite en utilisant les formules de Spitters *et al.* [1986] qui reposent sur la comparaison du rayonnement observé avec le rayonnement théorique. Les données manquantes de précipitations sont complétées par des zéros. Pour la direction du vent, on suppose que la direction reste inchangée tant qu’on a pas de nouvelle mesure valide. Les autres paramètres sont complétés par interpolation linéaire. La méthode de séparation pluie/neige est détaillée ci-après. Les données de concentration en CO_2 sont nettoyées : on retire les pics isolés (moyenne des différences avec la valeur précédente et la valeur suivante supérieure à 10 ppm dans les données 30 minutes), et les pics non isolés (valeurs situées à plus de cinq fois l’écart-type glissant de la moyenne glissante dans les données 30 minutes). L’écart-type et la moyenne glissants sont calculés sur 1000 valeurs (environ 20 jours). Ces traitements sont appliqués de manière récursive jusqu’à ce qu’il n’y ait plus de valeurs à supprimer.

Tableau 5.1 – Données météorologiques de forçage du modèle TEB. Une partie des paramètres sont mesurés sur le toit d'un bâtiment proche de la tour de mesure.

Paramètre de forçage	Paramètre observé	Lieu de mesure	Méthode de complétion	Traitement des données
Pression (Pa)	Pression	Toit (24 m)	Interpolation linéaire	-
Température de l'air (°C)	Température de l'air	Tour (32 m)	Interpolation linéaire	-
Humidité spécifique (kg kg ⁻¹)	Humidité relative	Toit (24 m)	Interpolation linéaire	-
Rayonnement direct descendant courte longueur d'onde (W m ⁻²)	Rayonnement courte longueur d'onde descendant			Séparation direct/diffus : Spitters <i>et al.</i> [1986]
Rayonnement diffus descendant courte longueur d'onde (W m ⁻²)	Rayonnement courte longueur d'onde descendant	Tour (31 m)	Interpolation linéaire	Séparation direct/diffus : Spitters <i>et al.</i> [1986]
Rayonnement descendant grande longueur d'onde (W m ⁻²)	Rayonnement descendant grande longueur d'onde	Tour (31 m)	Interpolation linéaire	-
Concentration en CO ₂ (kg m ⁻³)	Concentration en CO ₂	Tour (31 m)	Interpolation linéaire	-
Taux de pluie (kg m ⁻² s ⁻¹)	Taux de précipitation	Toit (24 m)	Absence de précipitations	Séparation pluie/neige selon la température
Taux de neige (kg m ⁻² s ⁻¹)	Taux de précipitation	Toit (24 m)	Absence de précipitations	Séparation pluie/neige selon la température
Vitesse du vent (m s ⁻¹)	Vitesse du vent	Tour (31 m)	Interpolation linéaire	-
Direction du vent (degrés depuis le nord, sens horaire)	Direction du vent	Tour (31 m)	Dernière valeur observée	-

5.1. DESCRIPTION DU SITE ET DES DONNÉES

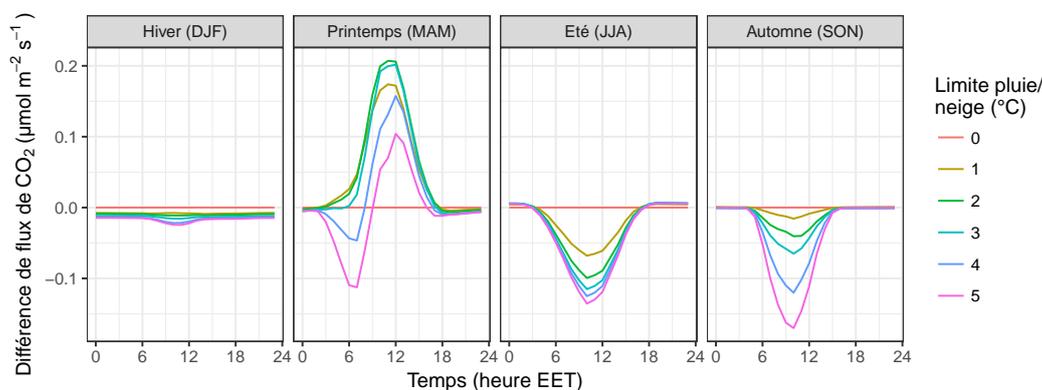


FIGURE 5.2 – Cycles journaliers saisonniers moyens des différences de flux de CO_2 liés à la végétation simulés par le modèle TEB avec différentes limites pluie/neige par rapport à la simulation avec une limite pluie/neige de $0\text{ }^\circ\text{C}$.

5.1.2.2 Séparation pluie/neige

Le pluviomètre mesure la quantité totale de précipitations, il ne permet pas de distinguer la pluie de la neige. Or, en entrée du modèle TEB, il faut spécifier la répartition pluie/neige des précipitations, et, le site de Kumpula étant situé aux hautes latitudes (60°N), les épisodes neigeux y sont très fréquents. De plus, **la présence de neige impacte les flux de CO_2** car elle inhibe la respiration et la photosynthèse des végétaux.

On décide d'utiliser la **température de l'air** pour déterminer la nature des précipitations (pluie ou neige). Kienzle [2008] a montré que la température pour laquelle 50% des précipitations tombent sous forme de neige peut varier entre $1,2$ et $4,5\text{ }^\circ\text{C}$ selon les sites. Par conséquent, on réalise six simulations TEB en faisant varier le seuil de nature des précipitations entre 0 et $5\text{ }^\circ\text{C}$, par pas de $1\text{ }^\circ\text{C}$. La zone simulée est un cercle de rayon 250 mètres centré sur la tour de mesure.

Les six simulations sont comparées pour déterminer l'impact du seuil pluie/neige sur les flux de CO_2 simulés liés à la végétation. **L'impact sur le cycle journalier moyen saisonnier est très faible** : il est inférieur à $0,2\text{ }\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ (Figure 5.2).

Pour choisir le seuil de température de la limite pluie/neige, on dispose d'observations journalières de la hauteur de neige, mesurées par l'Institut Météorologique Finlandais à côté de la tour de mesure, à 6 UTC . **La question est de savoir s'il faut chercher la simulation qui reproduit le mieux la hauteur de neige relevée ou bien celle qui simule le plus fidèlement la présence/absence de neige.** Pour cela, pour l'ensemble des couples possibles, on compare les simulations deux à deux, en séparant les situations où les deux simulations prévoient de la neige des situations où seulement une des deux simulations prévoit de la neige (Figure 5.3). Lorsque les deux simulations prévoient de la neige, les différences sont à chaque fois très faibles, tant pour la respiration que pour la photosynthèse. En revanche, lorsqu'une seule des deux simulations prévoit de la neige, les différences en matière de respiration et de photosynthèse sont plus prononcées. Ces différences ne se compensent pas : on les retrouve sur le flux total de CO_2 associé à la végétation. La simulation des flux de CO_2 associés à **la végétation est donc plus sensible**

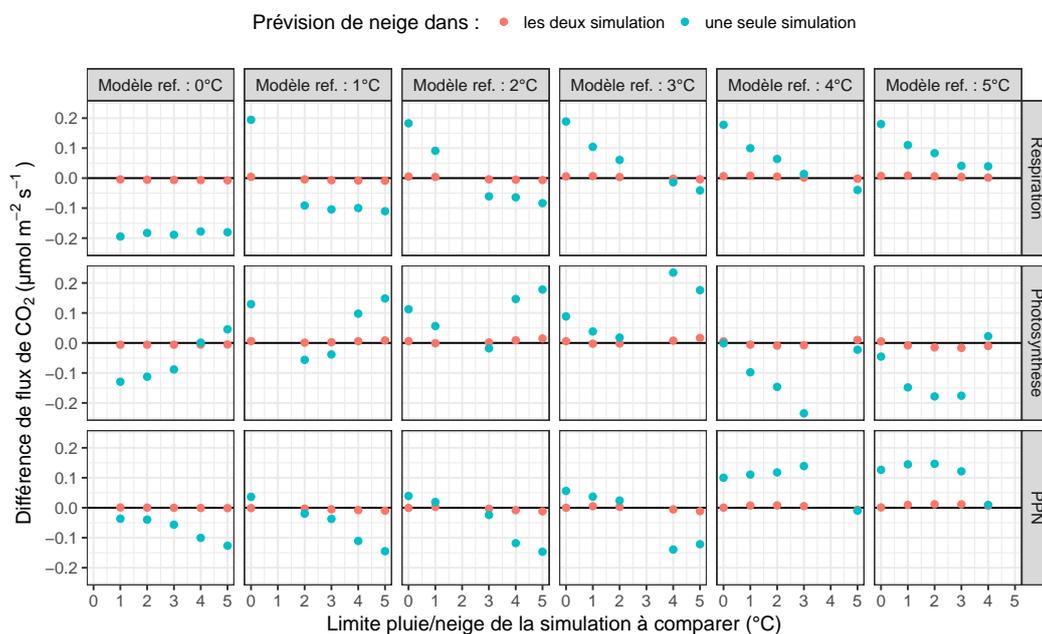


FIGURE 5.3 – Différences de flux de CO_2 entre la simulation de référence et la simulation à comparer. Les six simulations, avec un seuil de température pour la limite pluie/neige différent sont prises successivement comme simulation de référence, et comparées avec les cinq autres simulations. On regarde la différence en matière de respiration, photosynthèse et production primaire nette (PPN). Les points rouges correspondent aux différences moyennes des jours où les deux simulations prévoient de la neige, et les points bleus les différences moyennes des jours où seulement une des deux simulations prévoit de la neige.

à la présence ou non de neige (les différences sont fortes lorsque seulement une des deux simulations prévoit de la neige) **qu'à la hauteur de neige simulée** (les différences sont faibles lorsque les deux simulations prévoient de la neige). On cherche donc le seuil qui permet de reproduire le plus fidèlement possible la présence ou non de neige au sol. La courbe ROC de l'événement présence de neige au sol (Figure 5.4) montre que les meilleurs résultats sont obtenus avec une **température de 1 °C**.

5.1.2.3 Données d'occupation du sol

La région autour de la tour de mesure des flux est **très hétérogène** (Figure 5.1). Järvi *et al.* [2012] ont identifié **trois secteurs**. Au nord, un secteur urbain avec les bâtiments du campus universitaire et de l'Institut de Météorologie Finlandais (URB); au sud-est, un secteur caractérisé par la présence d'une route importante avec 44 000 véhicules par jour pendant la semaine (RTE); et au sud-ouest, un secteur fortement végétalisé (VEG). Les caractéristiques de ces trois secteurs sont détaillées dans le Tableau 5.2.

Les **caractéristiques thermiques et optiques des bâtiments** sont identiques à celles utilisées par Karsisto *et al.* [2016]. Comme le quartier est alimenté par un réseau de chaleur, l'usage des bâtiments et le comportement des habitants n'auront pas d'impact sur les flux de CO_2 simulés. On utilise la configuration **NOUV_DEF**

5.1. DESCRIPTION DU SITE ET DES DONNÉES

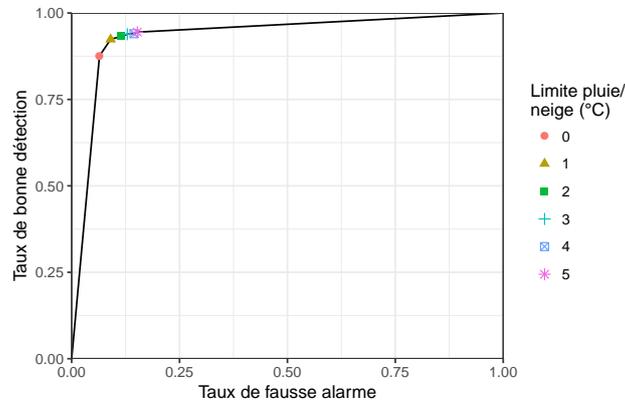


FIGURE 5.4 – Courbe ROC de l'événement présence de neige au sol simulé par le modèle TEB-veg avec le schéma de neige 3-L à douze couches pour différents seuils de température pour la limite pluie/neige. La meilleure configuration est celle qui s'approche le plus du point de coordonnées (0,1) : elle prédit 100% des épisodes de neige et ne simule jamais de la neige lorsqu'il n'y en a pas dans les observations.

	URB	RTE	VEG
Occupation du sol			
Fraction de route	0,23	0,42	0,16
Fraction de végétation	0,42	0,42	0,76
Fraction de bâtiments	0,35	0,16	0,08
Bâtiment			
Fraction de bâtiments reliés au réseau de chaleur	1	1	1
Végétation			
Fraction de sol nu	0	0	0
Fraction de végétation basse	0,35	0,57	0,44
Fraction de végétation haute	0,65	0,43	0,56
Respiration de l'écosystème à 25 °C pour la végétation haute ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	7,8	5,8	6,7
Respiration de l'écosystème à 25 °C pour la végétation basse ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	8,5	7,5	8,1
Trafic			
Flux de CO ₂ annuel moyen ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	3,0	6,1	1,9
Respiration humaine			
Densité de population le jour (hab km^{-2})	890	4090	2880
Densité de population la nuit (hab km^{-2})	3070	3750	4360

Tableau 5.2 – Paramètres pertinents pour le calcul des flux de CO₂.

(cf. Section 4.2.1) **pour décrire les comportements** : la température de consigne du chauffage à l'intérieur des bâtiments est de 20 °C le jour lorsque les bâtiments sont occupés, et de 18 °C la nuit ou lorsque les bâtiments sont vacants.

Les **caractéristiques de la végétation** sont également identiques à celles proposées par Karsisto *et al.* [2016]. La végétation haute est constituée majoritairement d'arbres feuillus caducs des régions boréales et la végétation basse d'herbe des régions boréales. Les fractions de végétation haute et basse sont données dans le Tableau 5.2. La méthode d'estimation du taux de respiration de l'écosystème à 25 °C (Re_{25}) repose sur la modélisation. Elle est décrite ci-dessous.

Dans le modèle TEB, la **végétation urbaine** est modélisée en faisant appel au schéma de végétation ISBA forcé avec les conditions atmosphériques au niveau du canyon urbain. **La version d'ISBA interfacée avec TEB est ISBA-A-gs**. Depuis la mise en place de l'interface TEB/ISBA-A-gs, Gibelin *et al.* [2008] a développé une version plus récente du modèle ISBA : **ISBA-CC**. Cette dernière s'appuie sur ISBA-A-gs et en reprend les grands principes. En particulier, elle a le même schéma de photosynthèse avec une modélisation de la sécheresse identique. ISBA-CC propose deux grandes nouveautés :

- **une représentation plus détaillée des compartiments de biomasse** : leur nombre passe de trois pour ISBA-A-gs à quatre ou six pour ISBA-CC suivant le type de végétation (haute ou basse) ;
- **une meilleure représentation de la respiration** : la paramétrisation présente dans ISBA-A-gs (Équation (3.7)) est remplacée par un calcul détaillé de la respiration autotrophe et hétérotrophe.

La respiration autotrophe est produite par le métabolisme de la plante, par oxydation de molécules organiques. Un terme de respiration autotrophe est associé à quatre des six réservoirs de biomasse qui représentent les plantes dans ISBA-CC : les feuilles, la biomasse structurale active et passive ainsi que la biomasse structurale souterraine. Les deux autres réservoirs (végétation ligneuse aérienne et souterraine) correspondent à la production de bois par les arbres, et aucun terme de respiration ne leur est associé.

La respiration hétérotrophe est liée à la décomposition de la matière organique du sol. Contrairement à ISBA-A-gs, ISBA-CC inclut un modèle de matière organique du sol [Gibelin *et al.*, 2008]. La matière est répartie en sept compartiments ou réservoirs de carbone, avec des temps de décomposition plus ou moins longs. La matière circule entre ces différents compartiments, et les compartiments correspondants à la litière sont alimentés par la végétation morte provenant des différents réservoirs de biomasse. La respiration hétérotrophe correspond aux flux de CO₂ produits par la décomposition qui a lieu dans chacun des sept réservoirs de carbone.

ISBA-CC est ainsi capable de simuler la respiration de l'écosystème, sans qu'il ne soit nécessaire de déterminer le taux de respiration de l'écosystème à 25 °C. **On l'utilise donc pour fixer la valeur de Re_{25} qui sera ensuite utilisée pour réaliser les simulations TEB avec ISBA-A-gs** (on ne peut utiliser directement ISBA-CC avec TEB car ils ne sont pas interfacés). On fait une simulation ISBA-CC pour chacun des trois secteurs du site, en prenant pour les caractéristiques de la

5.1. DESCRIPTION DU SITE ET DES DONNÉES

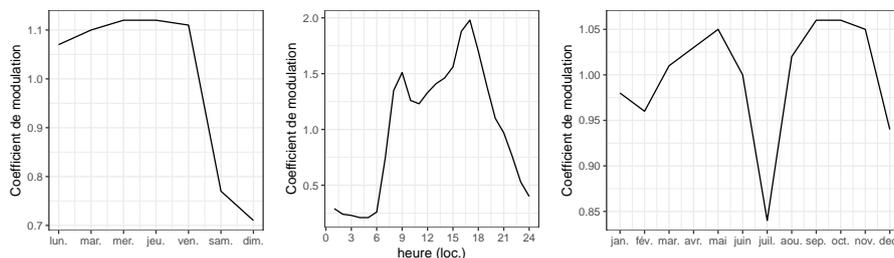


FIGURE 5.5 – Coefficients journaliers, hebdomadaires et annuel de modulation des émissions du trafic. Les coefficients sont estimés à partir des données de comptage du trafic relevées sur la route Itäväylä à proximité de la tour de mesure.

végétation, celles correspondant à la végétation présente dans le secteur. Il est nécessaire de faire un spin-up afin d’initialiser les différents réservoirs de carbone du modèle. Étant donné qu’on se situe en milieu urbain, et que l’occupation du sol est régulièrement modifiée, on estime l’âge de la végétation à une trentaine d’années. On utilise les huit ans de données météorologiques disponibles (janvier 2008 à décembre 2013) pour forcer le modèle. Les huit ans de données sont répétés quatre fois pour faire un spin-up de trente deux ans (correspond environ à l’âge estimé de la végétation), puis ils sont répétés une dernière fois, pour évaluer le paramètre Re_{25} . Une valeur de Re_{25} est déterminée pour chaque type de végétation en recherchant la valeur du paramètre telle que les respirations de l’écosystème simulées par ISBA-CC et ISBA-A-gs, et intégrées sur les huit ans de forçages soient identiques. Ce qui donne, en utilisant l’Équation (3.7) :

$$Re_{25}(V_i) = \frac{\int_{8 \text{ ans}} Re_{\text{ISBA-CC}}(t, V_i) dt}{\int_{8 \text{ ans}} f(w_g(t, V_i)) * Q_{10}^{(T_{\text{sol}}(t, V_i) - 25)/10} dt}, \quad (5.1)$$

où $Re_{\text{ISBA-CC}}$ est la respiration de l’écosystème (autotrophe et hétérotrophe) simulée par ISBA-CC. V_i représente un type de végétation : haute ou basse. **Les valeurs de Re_{25} ainsi déterminées sont données dans le Tableau 5.2.**

En appliquant une moyenne pondérée en fonction des fractions de végétation haute et basse, on obtient un Re_{25} de $7,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour le secteur VEG. Cette valeur est identique à la valeur mesurées par [Järvi *et al.*, 2012] par la technique de la covariance des turbulences.

Les **cycles de trafic** sont déterminés à partir de données de comptage relevées par le Helsinki City Planning Department sur la route Itäväylä à 2,5 km au sud-est de la station de mesure (Figure 5.5). Ces cycles sont similaires à ceux de la route qui passe à proximité de la station de mesure [Järvi *et al.*, 2009b].

Le **niveau moyen des émissions de CO_2 par le trafic** pour chaque secteur, est estimé à partir des observations de flux de CO_2 en hiver. À cette saison, le trafic représente la principale source de CO_2 sur le site de Kumpula car l’activité de la végétation est faible (présence de neige au sol) et les bâtiments n’émettent pas de CO_2 localement. Pour estimer le niveau moyen des émissions par le trafic, on calcule tout d’abord les cycles journaliers moyens de flux de CO_2 observés et modélisés pour chaque secteur. Les données modèles ne sont utilisées pour ce calcul que si l’observation correspondante (même heure et même secteur) existe. On détermine

Version d'ISBA	ISBA-A-gs	ISBA-CC
Interfacée avec TEB	Oui	Non
Nb. de compartiments de biomasse	3	4 ou 6
Modèle de matière organique du sol	Non	Oui
Respiration de l'écosystème	Paramétrisée	Schéma complet

Tableau 5.3 – Principales caractéristiques des deux versions du modèle ISBA : ISBA-A-gs et ISBA-CC.

ensuite le coefficient multiplicateur à appliquer aux flux de CO₂ modélisés pour que les moyennes des cycles journaliers de flux de CO₂ modélisés et observés soient égales. Les flux de CO₂ ainsi estimés sont donnés dans le Tableau 5.2. Après recalage, le trafic représente en hiver, plus de 60% du flux de CO₂ dans le secteur VEG, et plus de 80% du flux pour les secteurs URB et RTE. Les **flux de chaleur rejetés par le trafic** sont estimés à partir des flux de CO₂, en utilisant le même rapport flux de CO₂/flux de chaleur que pour le cas CAPITOUL.

Sur le site de Kumpula, la **densité de population** fluctue fortement entre le jour et la nuit. Sa valeur le jour et la nuit a été estimée pour chaque secteur (Tableau 5.2). On utilise la densité diurne de 9 LT à 16 LT, et la densité nocturne de 18 LT à 7 LT. Entre ces deux périodes, la densité de population passe linéairement de sa valeur nocturne à diurne (et inversement).

5.1.3 Stratégie de modélisation

Comme décrit précédemment, l'occupation du sol à proximité de la tour de mesure est très différente d'un secteur à l'autre. Ces différences se retrouvent dans les flux de CO₂ mesurés : les flux varient fortement en fonction du secteur survolé par la masse d'air avant d'arriver à la tour de mesure [Järvi *et al.*, 2012]. Pour tenir compte de cette hétérogénéité, **trois simulations, correspondant aux trois secteurs du site, sont réalisées**. Les résultats des trois simulations sont ensuite combinés en fonction de la direction du vent pour simuler les flux mesurés au niveau de la tour.

Les simulations sont effectuées sur les huit ans de forçages météorologiques disponibles (janvier 2006 à décembre 2013). L'évaluation de la modélisation des flux de CO₂ est faite uniquement sur la période pour laquelle les flux de CO₂ ont été mesurés avec le LICOR en circuit fermé (juillet 2007 à décembre 2013). Avant de démarrer les simulations, un spin-up d'un an, correspondant à la première année de forçage, est effectué. Ce spin-up permet d'initialiser la température à l'intérieur des bâtiments, les différents réservoirs de biomasse ainsi que la température du sol et l'humidité du sol.

5.2 Méthodes de modélisation de la végétation urbaine

Le modèle TEB fait partie du modèle d'interactions surface/atmosphère SURFEX. Ce dernier offre plusieurs possibilités pour représenter la végétation urbaine. Lorsque l'on s'intéresse aux flux de chaleur, **l'option TEB-veg** [Lemonsu *et al.*, 2012] est particulièrement intéressante. Avec cette option, la végétation est placée

5.2. MÉTHODES DE MODÉLISATION DE LA VÉGÉTATION URBAINE

Configuration	Version d'ISBA	Plusieurs patches de végétation	Lien TEB/ISBA	Utilisée en Section			
				5.2.1.1	5.2.1.2	5.2.2	5.2.3
TEB-veg	ISBA-A-gs	Non	Couplés	x			
TEB-veg-comb	ISBA-A-gs	Simulés ^a	Couplés	x			x
TEB-veg-patches (non implémentée)	ISBA-A-gs	Oui	Couplés	x			
ISBA-sol-sep	ISBA-A-gs	Oui	TEB absent		x		
ISBA-meme-sol	ISBA-A-gs	Partiels ^b	TEB absent		x		
Histo-Ags	ISBA-A-gs	Oui	Indépendants			x	x
Histo-CC	ISBA-CC	Oui	Indépendants			x	
Histo-Ags-TEB-forc (forçages canyon)	ISBA-A-gs	Oui	Indépendants				x

Tableau 5.4 – Tableau récapitulatif des différentes configurations de SURFEX utilisées pour représenter la végétation urbaine. Lorsque TEB et ISBA sont couplés, la végétation urbaine est modélisée comme étant au milieu du canyon urbain et les forçages reçus par ISBA sont calculés par TEB et correspondent aux conditions atmosphériques (température, humidité...) à l'intérieur du canyon. Lorsque les deux modèles sont indépendant, il n'y a pas d'interactions entre la végétation et le bâti et les données de forçage pour TEB et ISBA proviennent des observations (cf. Section 5.1.2.1). ^a L'utilisation de plusieurs patches de végétation est simulée en combinant les résultats de deux simulations TEB-veg (cf. Figure 5.6). ^b Plusieurs patches de végétation sont utilisés, mais le sol est commun entre les différents patches (Figure 5.11).

dans le canyon urbain : ISBA est forcé par les conditions atmosphériques présentes dans le canyon, et ces dernières sont influencées par la ville (route, bâtiments, forme du canyon) et la végétation. L'option TEB-veg permet ainsi de prendre en compte les interactions entre la végétation et la ville, comme par exemple l'augmentation de la température à laquelle est exposée la végétation urbaine du fait de l'îlot de chaleur urbain. Cependant, l'option TEB-veg pose **plusieurs limitations du point de vue des flux de CO₂** :

- la végétation est représentée par un seul patch ;
- seule la version A-gs d'ISBA est disponible.

La pertinence de l'option TEB-veg pour la modélisation des flux de CO₂ est testée ci-après. On évalue tout d'abord l'impact des limitations de l'option TEB-veg : un seul patch de végétation possible (Section 5.2.1) et uniquement l'option A-gs d'ISBA disponible (Section 5.2.2). Puis, on étudie l'influence de l'activation de l'option TEB-veg sur les flux de CO₂ modélisés (Section 5.2.3).

Les principales différences entre les versions A-gs et CC d'ISBA sont résumées dans le Tableau 5.3. Les **différentes configurations du modèle SURFEX** utilisées dans cette section ainsi que leurs principales caractéristiques sont listées dans le Tableau 5.4.

5.2.1 Influence des patchs de végétation

5.2.1.1 Patchs complets

On cherche tout d'abord à évaluer **l'impact de l'utilisation de patchs de végétation sur les flux de CO₂ modélisés**. Avec la configuration TEB-veg classique, un seul patch de végétation est utilisé : ISBA est appelé une seule fois par pas de temps, avec des caractéristiques de végétation qui correspondent à la moyenne des caractéristiques des végétations haute et basse. Cette moyenne est pondérée en fonction des fractions de chaque type de végétation. L'utilisation de plusieurs patchs de végétation consisterait à appeler ISBA plusieurs fois, avec des caractéristiques de végétation différentes. Par exemple, un premier appel (ou patch) pour la végétation haute et un second pour la végétation basse (configuration TEB-veg-patch, cf. Figure 5.6). Techniquement, l'utilisation de plusieurs patchs avec l'option TEB-veg n'est pour l'instant pas implémentée. Par conséquent, on utilise la configuration TEB-veg-comb, pour simuler l'utilisation de plusieurs patchs. Pour chaque simulation TEB-veg-comb, deux simulations TEB-veg sont réalisées : l'une avec les caractéristiques de la végétation basse et la seconde avec les caractéristiques de la végétation haute. Les flux de CO₂ simulés par chaque simulation sont ensuite moyennés en fonction des fractions de végétation haute et basse (Figure 5.6).

On réalise onze expériences, avec les **configurations TEB-veg et TEB-veg-comb**, en faisant varier la fraction de végétation basse de 0 à 1. Le reste de la végétation est de la végétation haute (il n'y a pas de sol nu). Les caractéristiques de chaque type de végétation correspondent aux caractéristiques de la végétation de Kumpula. Pour simplifier les expériences et l'interprétation des résultats, on ne modélise pas le site de Kumpula mais un site végétalisé idéalisé, sans bâtiments (les interactions végétation/bâtiments ne nous intéressent pas ici). Techniquement, il n'est pas possible de supprimer complètement les bâtiments dans une simulation TEB. On se contente donc de réduire un maximum leur emprise : la fraction de bâtiment est de 0,01 et la hauteur des bâtiments de 1 cm. Il n'y a pas de route, la fraction de végétation est de 0,99.

Les flux de respiration de la végétation (Re) modélisés par les configurations TEB-veg et TEB-veg-comb sont proches (Figure 5.7). Les plus grandes différences s'observent en JJA dans les simulations où la fraction de végétation basse est proche de 0,5. En matière de **photosynthèse** (Figure 5.7), les écarts les plus importants entre les deux configurations s'observent en MAM et JJA pour les simulations où il y a environ moitié de végétation haute et moitié de végétation basse. De manière générale, **la configuration TEB-veg simule une photosynthèse plus forte et une respiration plus faible que TEB-veg-comb**. Ces différences se cumulent sur les flux totaux de CO₂ ($Re - PPB$). En moyenne sur les huit ans de simulation, TEB-veg simule un flux total jusqu'à 60% plus faible en JJA ($-4,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour TEB-veg contre $-2,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour TEB-veg-comb) et 170% plus faible en MAM ($-3,7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour TEB-veg contre $-1,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour TEB-veg-comb).

Dans les simulations TEB-veg, on observe un écart important entre les situations avec 50 et 51% de végétation basse, tant en terme de photosynthèse que de respiration. Cet effet de seuil s'explique par la **modification du schéma de des-**

5.2. MÉTHODES DE MODÉLISATION DE LA VÉGÉTATION URBAINE

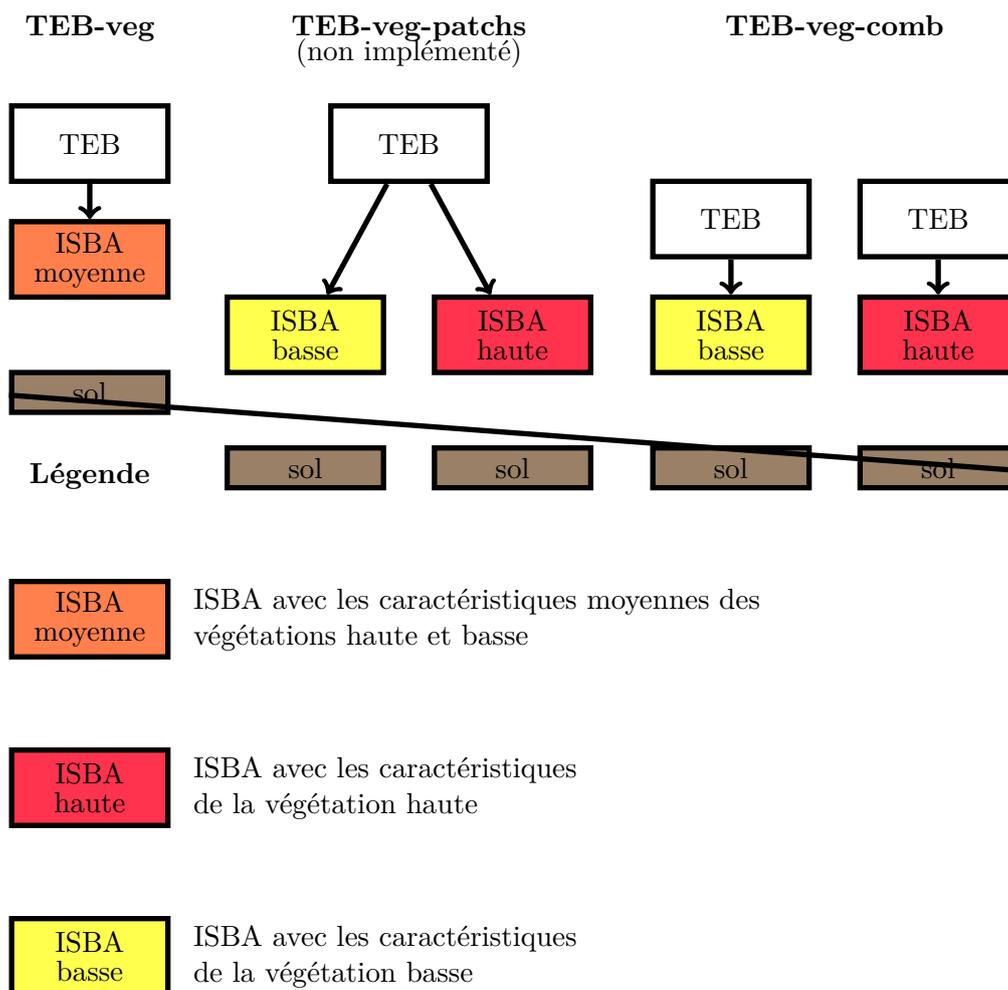


FIGURE 5.6 – Représentation schématique de différentes configurations de TEB-veg. Les moyennes sont des moyennes pondérées en fonction des fractions de végétation haute et basse. La configuration TEB-veg-patches n'est pas implémentée, la simulation TEB-veg-comb permet de l'approcher.

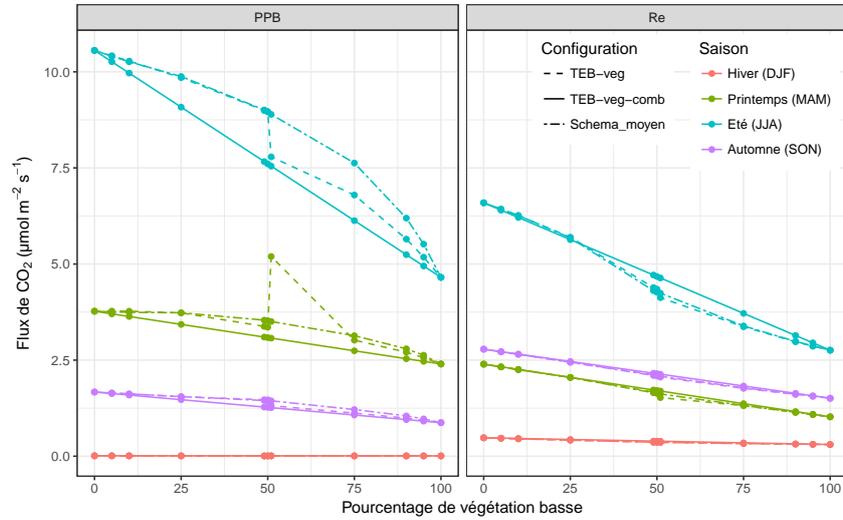


FIGURE 5.7 – Production Primaire Brute (*PPB*) et respiration de l'écosystème (*Re*) modélisées par TEB en fonction du pourcentage de végétation basse. Le reliquat de la fraction de maille non couverte par la végétation basse est complété par de la végétation haute.

cription du comportement des plantes en cas de stress hydrique entre les deux situations : tant que la fraction de végétation basse est inférieure ou égale à 0,5, on utilise le schéma qui correspond au comportement de la végétation haute ; lorsque la fraction de végétation basse dépasse 0,5, on bascule sur le schéma de la végétation basse. Or, **le schéma de comportement des plantes en cas de sécheresse influe grandement la Production Primaire Brute (*PPB*) simulée puisqu'il modifie les valeurs de caractéristiques clés de la végétation** telles que la conductance mésophyllienne (g_m), le déficit maximal de saturation en vapeur d'eau de l'air accepté par la plante (D_{max}) et le rapport entre la concentration en CO₂ dans l'atmosphère et la concentration dans le milieu intra-cellulaire (f_0) (Section 3.2.2.1). La respiration est également impactée car elle dépend de la quantité de biomasse qui dépend elle-même de la *PPB*.

Afin de mettre en évidence **les caractéristiques de la végétation qui expliquent les différences entre les configurations TEB-veg et TEB-veg-comb**, on réalise une dizaine d'expériences supplémentaires. On fixe les fractions de végétation à 50% de végétation haute et 50% de végétation basse car c'est pour ces valeurs que les différences entre TEB-veg et TEB-veg-comb sont les plus marquées. Pour chaque caractéristique de la végétation que l'on souhaite tester, on fait une simulation TEB-veg-comb, en prenant comme valeur pour la caractéristique en question, la moyenne entre sa valeur pour la végétation haute et la végétation basse. Pour les schémas décrivant la réponse de la végétation en cas de stress hydrique, on fait une simulation avec le schéma de la végétation haute appliqué aux deux patches de végétation (haute et basse) et une deuxième simulation avec le schéma de la végétation basse appliqué aux deux patches. Les résultats de ces expériences de sensibilités sont exploités pour les saisons où l'on a des écarts visibles : JJA et MAM pour la *PPB* et JJA pour *Re*.

Pour la *PPB*, deux caractéristiques ont un impact important : la **conductance**

5.2. MÉTHODES DE MODÉLISATION DE LA VÉGÉTATION URBAINE

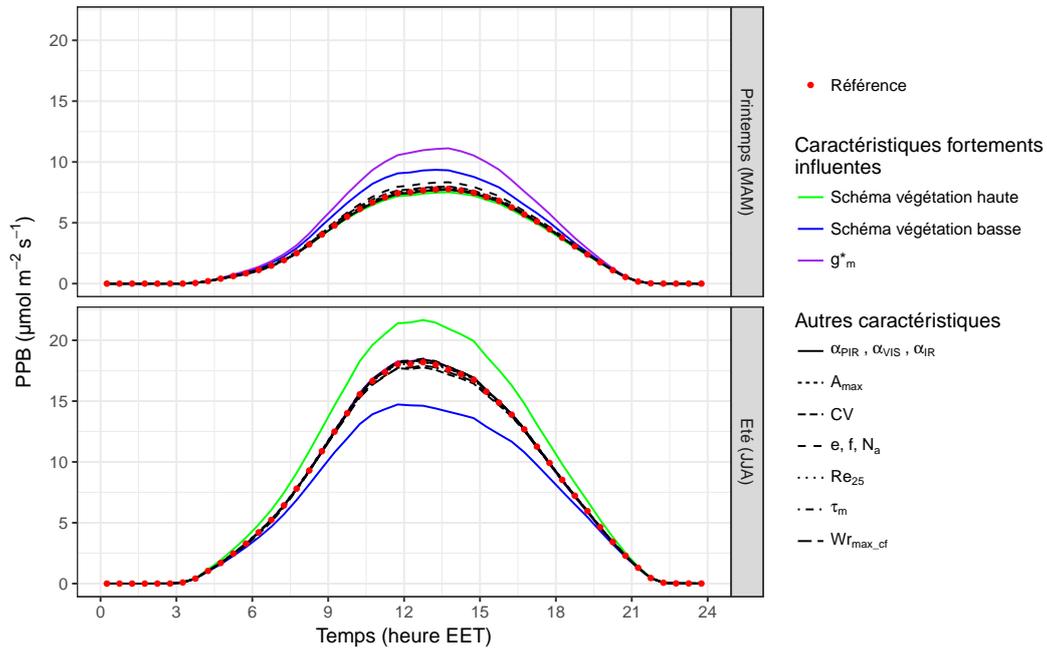


FIGURE 5.8 – Sensibilité du cycle journalier moyen de production primaire brute (PPB) en JJA, simulé par TEB-veg-comb, à l'utilisation des valeurs moyennes des caractéristiques de végétation. Le site simulé comprend 50% de végétation haute et 50% de végétation basse. La référence correspond à une simulation TEB-veg-comb standard, avec les valeurs des caractéristiques de végétation spécifiques à chaque type de végétation (haute ou basse), pour chacun des patches de végétation. Pour les expériences de sensibilité, on modifie les valeurs d'une seule caractéristique à la fois : on prend alors, pour les deux patches de végétation, la moyenne des valeurs pour la végétation haute et basse de la caractéristique en question. Les caractéristiques les plus influentes sont en couleurs. La nomenclature des caractéristiques est détaillée dans le Tableau A.1.

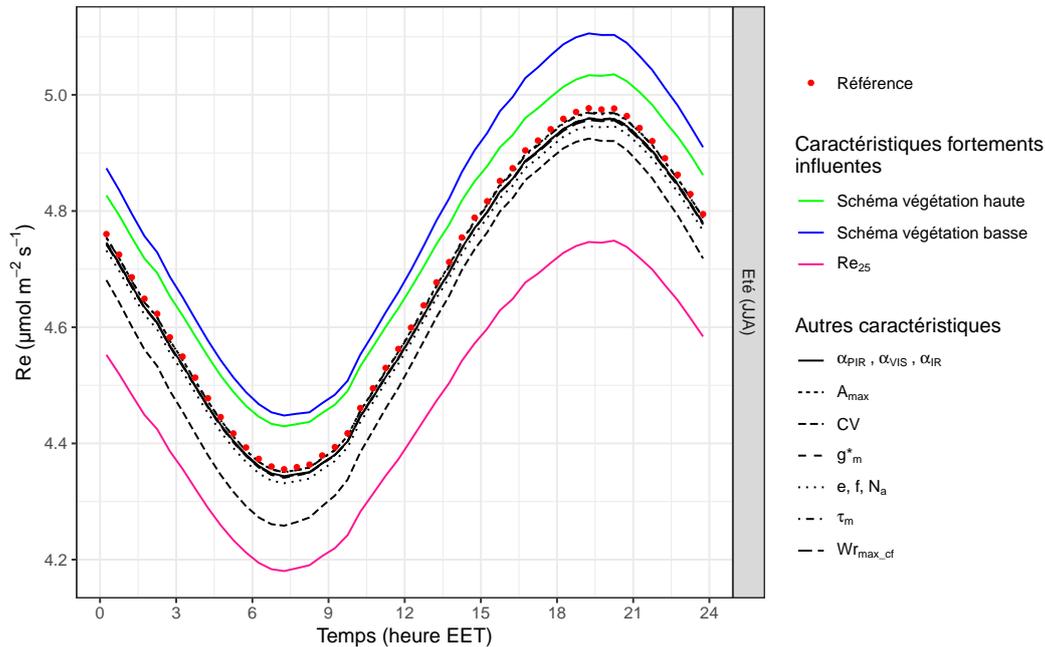


FIGURE 5.9 – Idem Figure 5.8, mais pour le cycle journalier moyen de la respiration de l'écosystème en JJA.

mésophyllienne en l'absence de stress hydrique (g_m^*) et le choix du schéma de description du comportement des plantes en cas de stress hydrique (Figure 5.8). En MAM, lorsque le stress hydrique est limité, c'est g_m^* qui a le plus d'impact. Par contre, en JJA, lorsque le stress hydrique est plus important, l'impact de g_m^* est presque nul, et c'est le schéma de description du comportement des plantes qui est la caractéristique la plus influente.

Pour la **respiration**, c'est l'utilisation d'une valeur moyenne pour le **taux de respiration de référence à 25 °C** qui a le plus d'impact (Figure 5.9). Le choix du **schéma de comportement en cas de sécheresse** joue également un rôle non négligeable.

Les végétations haute et basse ont des caractéristiques assez éloignées, et réagissent différemment en cas de stress hydrique. Dans ISBA, ces différences sont prises en compte par la présence de schémas de modélisation du comportement en cas de stress hydrique, différents entre la végétation haute et basse. L'utilisation d'un seul patch de végétation impose de ne choisir qu'un seul schéma pour l'ensemble de la végétation (haute et basse). Ce choix est fait en fonction du type de végétation majoritaire. Or, le schéma de réponse au stress hydrique est un élément clé, qui impacte fortement la *PPB* et dans une moindre mesure la *Re*. **L'utilisation d'un seul schéma pour toute la végétation ne donne pas des résultats satisfaisants.**

Pour remédier à ce problème, on propose de **combiner les deux schémas**. Les schémas de réponse au stress hydrique permettent de calculer la conductance mésophyllienne (g_m), le déficit maximal de saturation en vapeur d'eau de l'air accepté par la plante (D_{max}) et le rapport entre la concentration en CO_2 dans l'atmosphère

et la concentration dans le milieu intra-cellulaire (f_0). Ici, à chaque pas de temps, on calcule une première fois le triplet g_m, D_{max}, f_0 avec le schéma pour la végétation basse, et on le calcule une deuxième fois avec le schéma pour la végétation haute. Pour ces calculs, on prend la valeur de g_m^* qui correspond au schéma de végétation utilisé (par exemple la valeur de g_m^* de la végétation basse lorsqu'on utilise le schéma pour la végétation basse). Une fois les deux triplets calculés, on les moyenne, en pondérant en fonction des fractions de type de végétation.

Comme précédemment, on réalise onze expériences avec l'option TEB-veg et un seul patch de végétation, en faisant varier le pourcentage de végétation basse entre 0 et 100 d'une expérience à l'autre (Figure 5.7). Le comportement des plantes en cas de sécheresse, est modéliser en **combinant les deux schémas de réponse au stress hydrique (configuration Schema_moyen)**. Pour la respiration (Re), la configuration Schema_moyen donne des résultats similaires voire un peu meilleurs (plus proche de TEB-veg-comb) que TEB-veg, et ce, quelle que soit la saison. En terme de *PPB*, Schema_moyen améliore les résultats de TEB-veg en MAM : le pic de *PPB* que l'on avait avec TEB-veg lorsque la fraction de végétation basse était de 0,51 n'est plus présent avec Schema_moyen. Par contre, pour les simulations avec entre 49% et 95% de végétation basse, Schema_moyen modélise une *PPB* légèrement supérieure à celle de TEB-veg (dégradations des résultats). En été, Schema_moyen et TEB-veg modélisent une *PPB* similaire lorsque le schéma de végétation basse est utilisé (fraction de végétation basse inférieure ou égale à 0,50). En revanche, lorsque le schéma pour la végétation haute est utilisé, Schema_moyen dégrade fortement les résultats de TEB-veg. **La combinaison des deux schémas de réponse de la végétation au stress hydrique (Schema_moyen) ne permet donc pas de modéliser la *PPB* de manière plus satisfaisante que TEB-veg.**

En conclusion, **l'utilisation de plusieurs patches de végétation** (un pour la végétation basse et un pour la végétation haute) **est nécessaire pour obtenir une modélisation fiable de la *PPB*.**

La configuration TEB-veg-comb simule la présence de plusieurs patches. Cependant, elle impose de faire tourner deux fois l'ensemble du modèle TEB-veg, ce qui est coûteux en terme de temps de calcul. **L'implémentation de TEB-veg-patches permettrait d'utiliser plusieurs patches tout en minimisant les coûts de calculs** puisque seul le modèle ISBA serait appelé deux fois (Figure 5.6).

Dans la suite de l'étude, lorsque l'on voudra utiliser TEB avec l'option TEB-veg activée, on utilisera la configuration TEB-veg-comb.

5.2.1.2 Patches partiels

Lorsque l'on utilise des patches de végétation, les différents types de végétation (représentés par les différents patches) sont totalement indépendants. En particulier, un sol séparé est associé à chaque patch de végétation. La température et le contenu en eau du sol peut diverger rapidement d'un patch à l'autre (Figure 5.10). Or, ces deux grandeurs influencent le comportement de la végétation et donc les flux de CO_2 associés. L'hypothèse d'un sol séparé entre les différents patches de végétation n'est pas nécessairement la plus pertinente pour modéliser la végétation urbaine car les différents types de végétation sont souvent mélangés et interagissent entre eux via le

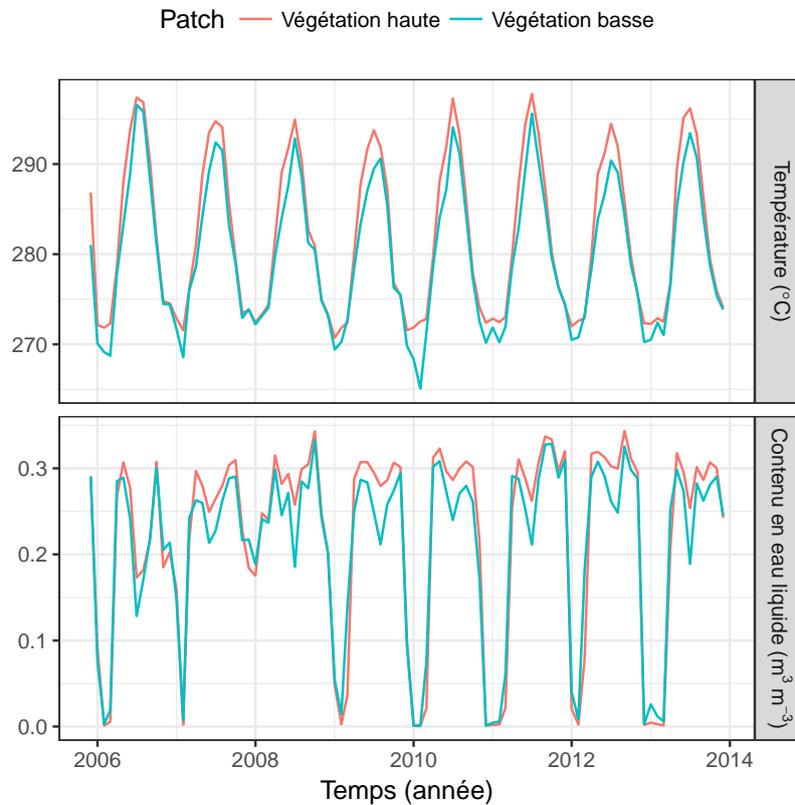


FIGURE 5.10 – Température et contenu en eau liquide du sol par patch de végétation pour une simulation TEB-veg-comb. La simulation est réalisée sur les huit années de forçage. Les caractéristiques des végétations hautes et basses sont celles de la végétation de Kumpula. Comme précédemment, l’emprise des bâtiments est réduite au maximum, et la végétation représente 99% de la surface modélisée.

sol. C’est pourquoi on propose de tester ici **l’influence sur les flux de CO₂ d’un sol partagé** entre le patch de végétation haute et le patch de végétation basse.

Pour des questions techniques (non implémentation des patches de végétation avec l’option TEB-veg), on utilise ISBA seul pour cette analyse de sensibilité. On conserve la version d’ISBA utilisée dans la section précédente : ISBA-A-gs. La configuration d’ISBA-A-gs avec **un sol séparé pour chaque patch** est notée **ISBA-sol-sep**, et celle avec **un sol partagé ISBA-meme-sol** (Figure 5.11). Lorsque le sol est partagé, la température et le contenu en eau du sol (liquide et solide) au temps $t + 1$ sont d’abord calculés séparément pour chaque patch, puis les valeurs sont moyennées en fonction des fractions de type de végétation (haute ou basse) pour obtenir l’état du sol à l’instant $t + 1$.

Comme dans la section précédente, on réalise onze expériences avec chaque configuration, en faisant varier la fraction de végétation basse entre 0 et 1 (Figure 5.12). Lorsque l’on modélise un sol partagé entre les deux types de végétation, **la PPB diminue** en JJA et SON, et ce, surtout lorsque la fraction de végétation de végétation basse est proche de 0,5. Il n’y a pas d’impacts notables en MAM et DJF. **La**

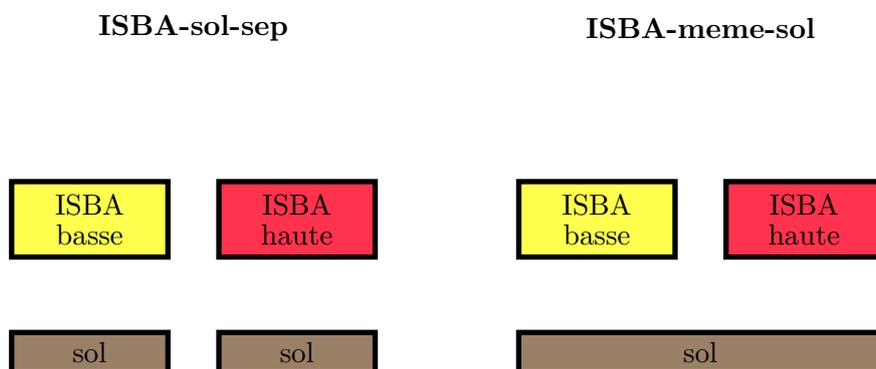


FIGURE 5.11 – Représentation schématique des deux configurations de ISBA-A-gs utilisés pour tester l’impact sur les flux de CO₂, de modéliser un sol partagé entre les deux patchs de végétation.

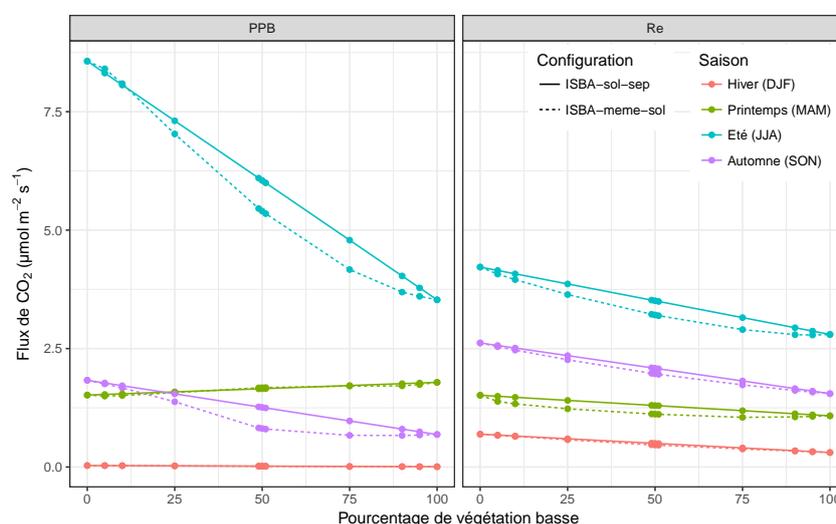


FIGURE 5.12 – Production Primaire Brute (*PPB*) et respiration de l’écosystème (*Re*) modélisées par TEB en fonction du pourcentage de végétation basse. La fraction de végétation basse est complétée par de la végétation haute.

respiration de l’écosystème diminue également avec la configuration ISBA-meme-sol par rapport à ISBA-sol-sep. Les différences sont moins importantes que pour la *PPB*, elles sont visibles à toutes les saisons sauf en hiver (DJF). Sur le flux total (non montré), les diminutions de *Re* compensent en partie les diminutions de *PPB*. Les différences maximales ont lieu en JJA. Lorsqu’elles sont maximales ISBA-meme-sol prévoit un flux de 14% plus élevé qu’ISBA-sol-sep ($-2,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour ISBA-meme-sol contre $-2,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour ISBA-sol-sep).

La configuration avec un sol commun entre les deux patchs de végétation simule des flux de CO₂ plus élevés que la configuration avec des sols séparés. Cependant, **les différences entre les deux configurations restent très faibles** comparées aux différences entre les configurations avec patchs de végétation (TEB-veg-comb) et sans patchs de végétation (TEB-veg). **L’hypothèse de sol totalement séparés entre les différents patchs est donc acceptable en ville.** Par conséquent, la

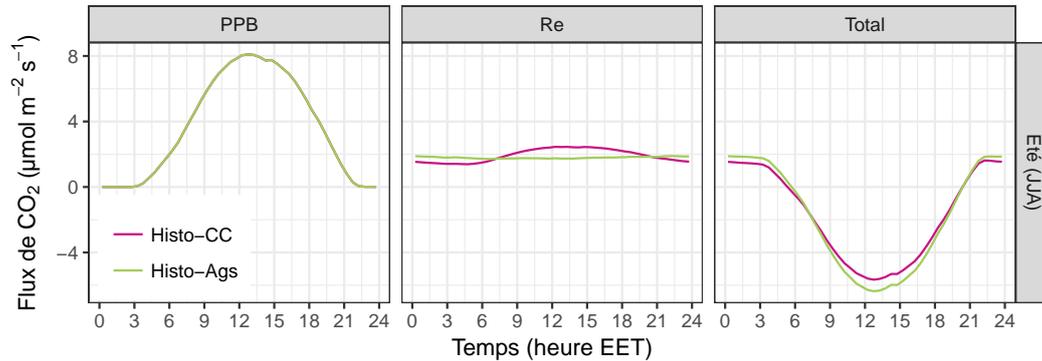


FIGURE 5.13 – Influence de la version d’ISBA sur les cycles journaliers moyens de *PPB* et *Re* simulés pour les mois de JJA avec la configuration historique de SURFEX. Histo-CC correspond à la simulation avec ISBA-CC et Histo-Ags celle avec ISBA-A-gs.

configuration TEB-veg-comb, qui fait l’hypothèse de sols séparés, est acceptable pour représenter la végétation urbaine avec l’option TEB-veg activée. Il reste à traiter la question de la version d’ISBA (seul A-gs est disponible avec l’option TEB-veg). C’est l’objet de la section suivante.

5.2.2 Influence de la version d’ISBA

Cette section a pour but de **comparer les deux versions d’ISBA présentes dans SURFEX : ISBA-A-gs et ISBA-CC**. La comparaison est effectuée sur le cas d’étude de Kumpula car l’on s’intéresse au comportement du modèle dans le cas précis de notre site d’étude. Comme mentionné en Section 5.1.3, on simule séparément chaque secteur avant d’agréger les résultats. Les simulations sont faites sur une période de huit ans. Pour les simulations avec ISBA-A-gs, un spin-up d’un an est effectué. Pour celles avec ISBA-CC, un spin-up plus long est nécessaire pour initialiser correctement les différents réservoirs de carbone. Afin que les simulations obtenues avec les deux versions d’ISBA soient comparables, on effectue, pour les simulations avec ISBA-CC, un spin-up identique à celui réalisé pour calculer le paramètre Re_{25} : les huit ans de forçages sont répétés quatre fois pour obtenir un spin-up de trente deux ans.

Comme ISBA-CC n’est pas interfacé avec TEB, on ne peut pas tester l’influence de la version d’ISBA avec l’option TEB-veg activée. À la place, on utilise la version historique du modèle SURFEX : la partie urbaine (routes et bâtiments) est simulée par TEB et la végétation est simulée par ISBA sans qu’il n’y ait d’interactions entre les deux. TEB et ISBA sont forcés avec les mêmes forçages : ceux décrit en Section 5.1.2.1.

Les résultats des simulations **pour JJA** sont présentés en Figure 5.13. À cette saison, le **cycle journalier moyen de *PPB* simulée** est identique pour les deux versions d’ISBA, ce qui est logique puisqu’elles partagent le même schéma de photosynthèse. Le **cycle journalier moyen de la respiration** simulée par ISBA-A-gs est relativement constant (variations de l’ordre de $0,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). ISBA-CC simule une variabilité plus importante, avec une respiration plus forte le jour et

plus faible la nuit. Si l'on fait le bilan sur l'ensemble de la journée, les deux versions d'ISBA simulent des flux moyens de respiration très proches puisque la différence est inférieure à $0,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Les différences entre les respirations simulées par les deux versions d'ISBA s'expliquent par la présence d'un schéma de respiration complet dans ISBA-CC alors que dans ISBA-A-gs la respiration est paramétrisée. Le cycle journalier de la respiration simulée par ISBA-A-gs ne reproduit pas la réalité, il suit simplement le cycle journalier de la température du sol. Bien que la variabilité journalière de la respiration simulée par ISBA-CC (environ $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) soit plus grande que celle de la respiration simulée par ISBA-A-gs, celle-ci reste faible comparée à la variabilité de la *PPB* simulée (environ $9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Par conséquent, les différences de respiration simulée entraînent des **différences visibles** entre les cycles journaliers moyens de flux de CO_2 dus à la végétation, **mais ces différences restent relativement faibles (moins de $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)**.

Aux autres saisons, les différences entre les deux versions d'ISBA sont similaires aux différences que l'on constate en JJA, si ce n'est que l'activité plus faible de la végétation entraîne des différences plus faibles : moins de $0,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sur le cycle journalier moyen par saison (non montré). En terme de bilan, les flux moyens par saison diffèrent de moins de $0,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$.

L'utilisation de ISBA-CC permet d'avoir une meilleure représentation du cycle journalier de respiration de la végétation. En terme de bilan carbone, les deux versions du modèle donnent des résultats assez proches. Cette similarité s'explique par le fait que le paramètre Re_{25} , nécessaire au calcul de la respiration avec la version ISBA-A-gs, a été déterminé à partir de simulations ISBA-CC.

Il est donc possible, d'obtenir avec ISBA-A-gs des résultats proches de ceux qu'on obtient avec ISBA-CC. Cependant, **dans ISBA-A-gs, le niveau de respiration de la végétation est fixé au début de la simulation** par le choix de la valeur de Re_{25} . Or, pour une végétation jeune, en pleine croissance, Re_{25} augmente avec les années. Cette augmentation de la respiration, que l'on ne peut modéliser avec ISBA-A-gs, peut être modélisée avec ISBA-CC grâce à la présence d'un schéma complet de respiration.

Le fait que seul ISBA-A-gs soit interfacé avec TEB ne constitue donc pas une grosse limitation pour l'utilisation de l'option TEB-veg dès lors que l'on souhaite effectuer des simulations relativement courtes (une dizaine d'années) au cours desquelles on peut supposer que la respiration reste à un niveau relativement constant. En revanche, ISBA-A-gs n'est pas adapté pour étudier les flux de CO_2 sur plusieurs décennies. **La restriction sur la version d'ISBA disponible avec l'option TEB-veg (uniquement ISBA-A-gs) ne constitue donc pas une limitation importante pour utiliser cette option dans le cadre de notre étude.**

5.2.3 Influence de la nature du lien TEB/ISBA

Les sections précédentes ont permis de tester l'impact sur les flux de CO_2 des limitations impliquées par l'activation de l'option TEB-veg. La restriction sur la version d'ISBA disponible a peu d'impacts. En revanche, l'utilisation d'un seul patch de végétation ne permet pas d'obtenir des résultats satisfaisants. **La configuration TEB-veg-comb**, qui simule l'utilisation de patches de végétation **permet d'utiliser**

l’option TEB-veg tout en modélisant des flux de CO₂ correctes.

Lorsque l’option **TEB-veg** est activée, les modèles TEB et ISBA interagissent : ISBA est forcé par les conditions atmosphériques présentes dans le canyon, qui sont calculées par TEB, et en retour, ISBA influence les conditions atmosphériques du canyon. Jusqu’à présent, la pertinence de cette option a été démontrée pour la modélisation des flux de chaleur [Lemonsu *et al.*, 2012]. Elle pourrait également avoir un intérêt pour modéliser les flux de CO₂ de la végétation urbaine car elle permet de simuler l’influence de la ville sur les conditions atmosphériques subies par la végétation en ville (température plus élevée avec l’ICU, humidité de l’air plus faible du fait de l’urbanisation des surfaces). Or, ces conditions atmosphériques impactent la croissance et le comportement de la végétation et donc les flux de CO₂ associés. **L’influence de ces forçages atmosphériques, modifiés par la ville sur la photosynthèse et la respiration de la végétation urbaine est évaluée ici.** Dit autrement, on cherche à évaluer l’impact sur les flux de CO₂ associés à la végétation urbaine, de l’activation de l’option TEB-veg.

Compte tenu des conclusions des sections précédentes, on utilise la configuration **TEB-veg-comb** pour la simulation avec l’option TEB-veg activée. Pour la simulation sans l’option TEB-veg, on choisit la configuration **Histo-Ags** qui est la configuration de SURFEX sans l’option TEB-veg la plus proche de TEB-veg-comb (même version d’ISBA et utilisation de patches de végétation). En théorie, les seules différences entre TEB-veg-comb et Histo-Ags sont les données de forçages utilisées pour ISBA. En pratique, il est difficile de garantir que ce soit le cas à cause de l’évolution du paramétrage d’ISBA qui a tendance à diverger entre son utilisation seule (Histo-Ags) et son utilisation avec TEB (TEB-veg-comb), au grès des évolutions du code. C’est pourquoi, on introduit une troisième configuration : **Histo-Ags-TEB-forc**. Cette configuration est identique à Histo-Ags si ce n’est qu’on utilise les forçages (température et humidité de l’air, force du vent, et rayonnement reçu) correspondant aux conditions dans le canyon qui sont issus d’une précédente simulation TEB, au lieu d’utiliser les forçages décrits en Section 5.1.2.1 qui correspondent aux conditions au-dessus du canyon urbain. Ce changement de forçage n’entraîne pas de modifications dans les flux de CO₂ simulés par TEB puisqu’on a fait l’hypothèse que les bâtiments n’émettent pas de CO₂ localement. Le modèle ISBA est utilisé dans sa version avec une seule couche atmosphérique afin que les forçages soient utilisés en l’état par ISBA, et non pas abaissés à une hauteur de 2 m en utilisant des profils typiques des surfaces végétalisées. Une représentation schématique des trois configurations utilisées dans cette section est proposée en Figure 5.14.

L’activation de l’option TEB-veg a peu d’influence sur les flux simulés en **DJF** et **SON** (Figure 5.15). Cela s’explique par la faible activité de la végétation à ces saisons. **En JJA, et MAM**, les différences entre les cycles journaliers moyens simulés par TEB-veg-comb et Histo-Ags sont plus marquées. La simulation **TEB-veg-comb simule une photosynthèse plus forte en journée que Histo-Ags**. Lorsque la photosynthèse est maximale, vers 13 EET, la différence entre les deux configurations atteint $3,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en JJA et $2,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en MAM, ce qui représente respectivement 41% et plus de 100% du flux de photosynthèse. La différence de forçage (configuration Histo-Ags-TEB-forc) explique un peu plus des deux tiers (70%) des différences entre les simulations TEB-veg-comb et Histo-Ags

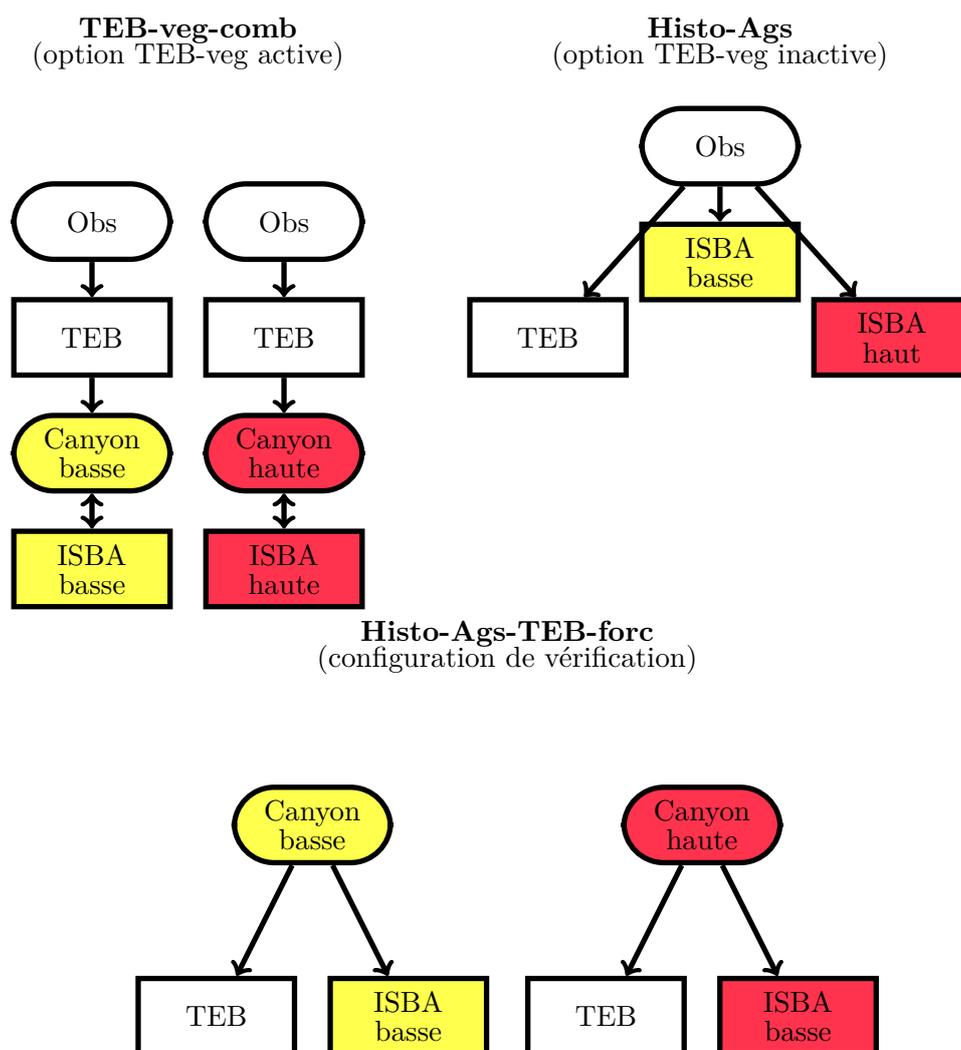


FIGURE 5.14 – Représentation schématique des configurations utilisées pour tester l'influence de l'activation de l'option TEB-veg sur les flux de CO₂. Les formes ovales indiquent les forçages météorologiques utilisés, et les rectangles symbolisent les modèles. Pour la configuration Histo-Ags-TEB-forc, on réutilise les forçages météorologiques correspondant aux conditions dans le canyon qui ont été calculées par TEB dans la configuration TEB-veg-comb.

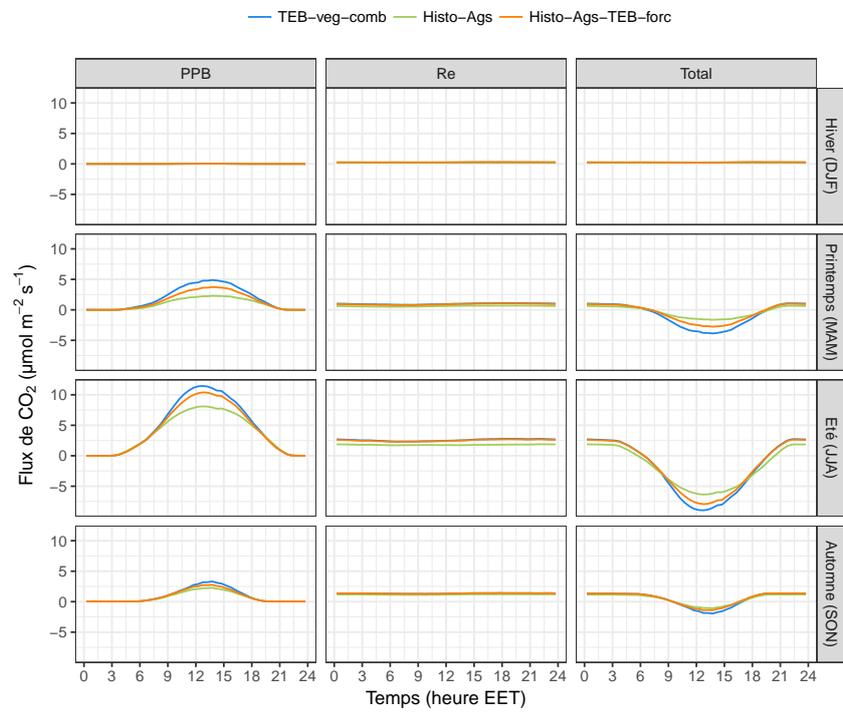


FIGURE 5.15 – Influence de l'activation de l'option TEB-veg sur les cycles moyens par saison de *PPB* et de *Re* simulés. TEB-veg-comb est la configuration avec l'option TEB-veg activée, et Histo-Ags celle sans l'option activée.

en JJA, et près de la moitié des différences (60%) en MAM.

On observe **peu de différence sur la respiration simulée mis à part en JJA** où TEB-veg-comb simule une respiration en moyenne de $0,8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ plus élevée que Histo-Ags (soit 40% plus élevée). Les forçages (configuration Histo-Ags-TEB-forc) expliquent la quasi-totalité des différences (92%).

Sur le **flux total**, les différences en terme de photosynthèse et de respiration se compensent en partie. La nuit, lorsque seule la respiration est active, l'activation de l'option TEB-veg n'a que très peu d'influence, sauf en JJA où elle entraîne un flux plus élevé d'environ $0,8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Vers 13 EET, lorsque la photosynthèse est maximale, TEB-veg-comb simule un flux plus faible de $2,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en MAM et $2,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ en JJA.

L'activation de l'option TEB-veg n'est donc pas neutre pour la modélisation des flux de CO_2 . Sur notre cas d'étude, elle entraîne une augmentation de la photosynthèse en MAM et JJA et une augmentation de la respiration en JJA. L'activation de l'option TEB-veg entraîne une modification des forçages atmosphériques reçus par ISBA : avec l'option TEB-veg, ces derniers sont influencés par la présence des bâtiments et correspondent aux conditions au sein du canyon. La modification de ces forçages explique la plupart des modifications induites par l'activation de l'option TEB-veg. Néanmoins, des différences subsistent entre Histo-Ags-TEB-forc et TEB-veg-comb, la source de ces dernières n'a pas été identifiée.

5.2.4 Conclusion

Dans cette section, on s'est attaché à évaluer la pertinence de l'option TEB-veg pour simuler les flux de CO_2 associés à la végétation urbaine. Dans un premier temps, on a mesuré l'impact, sur les flux de CO_2 , des contraintes induites par l'activation de l'option TEB-veg, à savoir l'utilisation d'un seul patch de végétation et de la version A-gs de ISBA. Les études de sensibilités ont montré que l'utilisation d'un seul patch ne permettait pas de simuler des flux de CO_2 réalistes. En revanche, l'utilisation de la version d'A-gs d'ISBA plutôt que la version CC a peu d'impacts sur les flux de CO_2 , dans le cadre de notre étude, car le paramètre Re_{25} a été fixé à partir de simulations ISBA-CC et le temps de simulation est relativement court (huit ans). Par conséquent, **la configuration TEB-veg-comb, proposée en Section 5.2.1.1, est une configuration qui permet d'utiliser l'option TEB-veg tout en simulant des flux de CO_2 réalistes.** Dans un deuxième temps, on a cherché à estimer l'impact de l'activation de l'option TEB-veg sur les flux de CO_2 par rapport à l'utilisation de la version historique de SURFEX. Il en est ressorti que l'activation de l'option TEB-veg n'est pas neutre : elle modifie les flux de CO_2 associés à la végétation simulés par le modèle.

5.3 Évaluation du modèle sur le site de Kumpula

Lemonsu *et al.* [2012] a montré que l'option TEB-veg permettait d'améliorer les flux de chaleur simulés par SURFEX au-dessus d'une surface urbaine végétalisée. Dans la section précédente, nous avons montré que cette option impactait également les flux de CO_2 associés à la végétation, simulés par le modèle. Dans cette section,

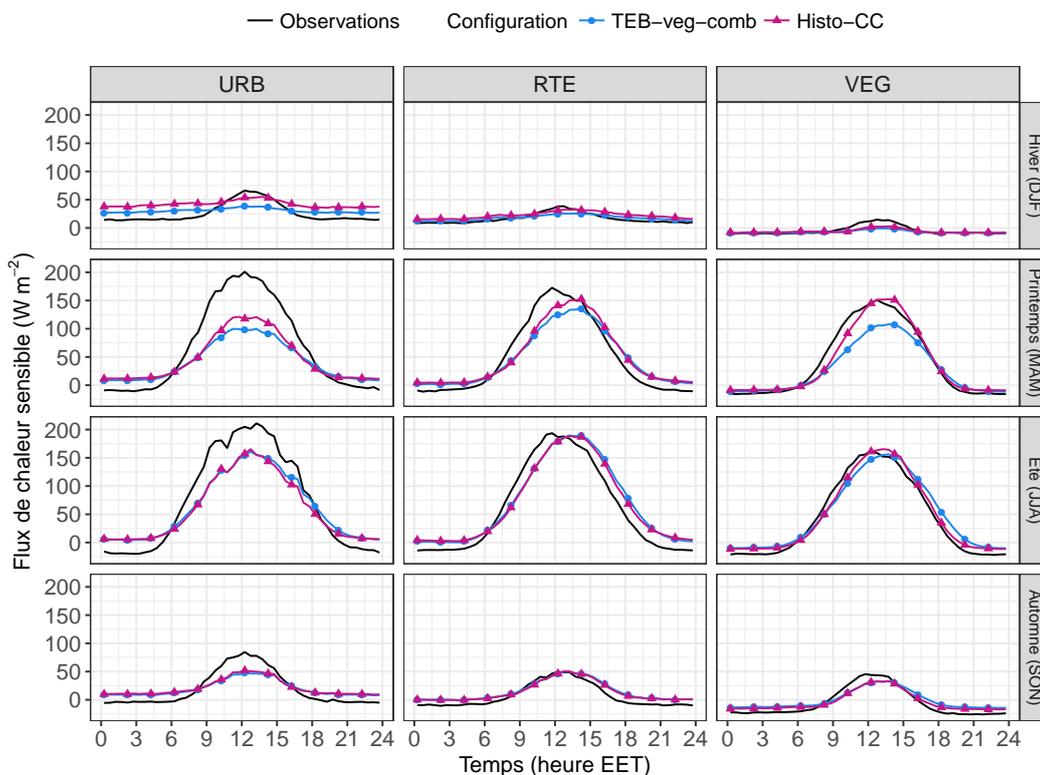


FIGURE 5.16 – Cycles journaliers moyens observés et modélisés des flux de chaleur sensible (H) par saison et par secteur.

on compare le modèle aux observations de flux de CO_2 et de flux de chaleur mesurés sur le site de Kumpula afin de **savoir si, sur notre cas d'étude, l'activation de l'option TEB-veg améliore :**

- la modélisation des flux de CO_2 associés à la végétation urbaine ;
- la modélisation des flux de chaleur.

La stratégie de modélisation est détaillée en Section 5.1.3. Pour chaque configuration (avec ou sans l'option TEB-veg activée), on prend la meilleure configuration disponible. À savoir TEB-veg-comb lorsque l'option TEB-veg est activée et Histo-CC lorsqu'elle ne l'est pas.

5.3.1 Flux de chaleur

Pour les deux configurations, on observe un décalage temporel dans la modélisation des **flux de chaleur sensible** (Figure 5.16) : le modèle est en retard par rapport aux observations. Karsisto *et al.* [2016] a comparé trois modèles de canopée urbaine (dont SURFEX) sur ce même site de Kumpula. Tous les modèles présentaient ce même décalage temporel sans qu'aucune raison spécifique n'est été identifiée. À toutes les saisons, les flux de chaleur sensible modélisés par le modèle sont proches des observations dans les secteurs RTE et VEG. On peut tout de même constater que la configuration TEB-veg-comb sous-estime les flux de chaleur en jour-

5.3. ÉVALUATION DU MODÈLE SUR LE SITE DE KUMPULA

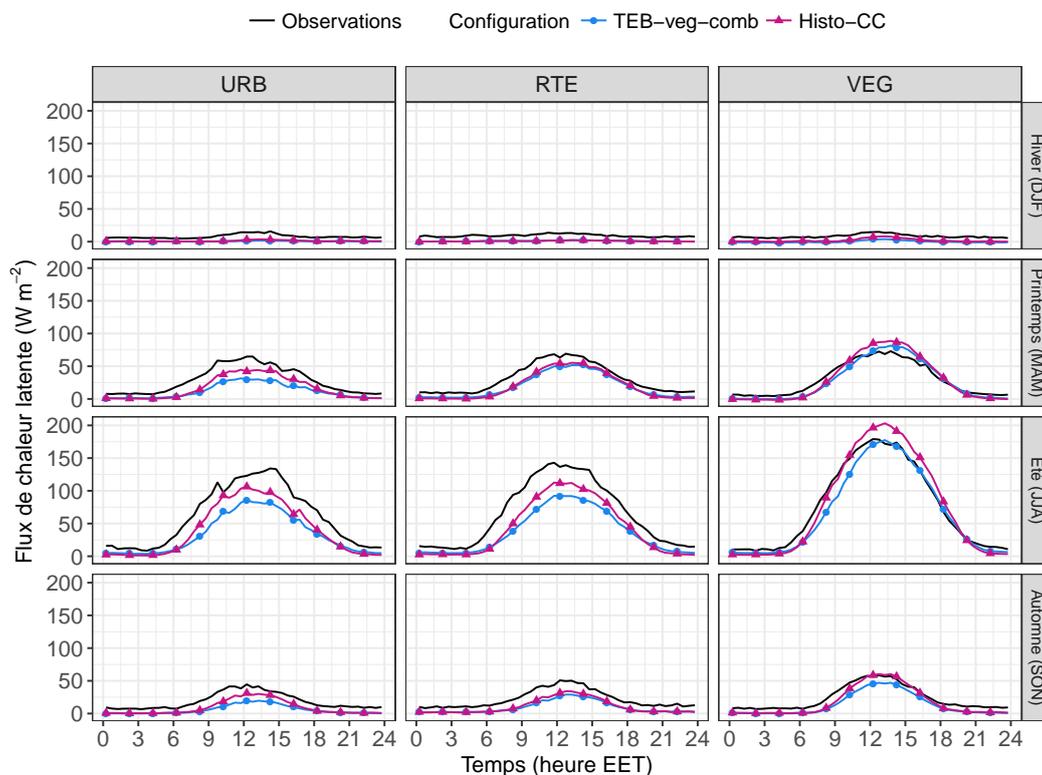


FIGURE 5.17 – Cycles journaliers moyens observés et modélisés des flux de chaleur latente (LE) par saison et par secteur.

née au printemps dans le secteur VEG. Dans le secteur RTE, les deux configurations donnent des résultats très similaires : les flux sont sous-estimés en milieu de journée, en particulier en MAM et SON, et ils sont surestimés la nuit.

Les cycles journaliers moyens de **flux de chaleur latente** modélisés sont presque toujours plus faibles que ceux observés (Figure 5.17). C'est en JJA que les biais modèle sont les plus forts. De manière générale, TEB-veg-comb simule des flux légèrement plus faibles que Histo-CC.

Les configurations TEB-veg-comb et Histo-CC donnent donc des résultats très proches en terme de flux de chaleur. Sur notre cas d'étude, **l'activation de l'option TEB-veg-comb a tendance à dégrader les résultats.**

5.3.2 Flux de CO₂

Le biais en **flux de CO₂** du modèle est nul en **DJF**. Ceci est logique puisque l'intensité moyenne des émissions de CO₂ par le trafic dans le modèle a été déterminée en s'appuyant sur les observations, de telle sorte que le modèle soit non biaisé (Section 5.1.2.3). En moyenne, le modèle est assez proche des observations (Figure 5.18), mais il ne permet pas de reproduire la variabilité des flux d'un jour à l'autre (l'écart interquartile est beaucoup plus faible dans le modèle que dans les observations). Le week-end, le modèle surestime les flux vers 8 EET. En semaine, il sous-estime les flux de 8 EET à 13 EET. L'utilisation de cycles journaliers de trafic

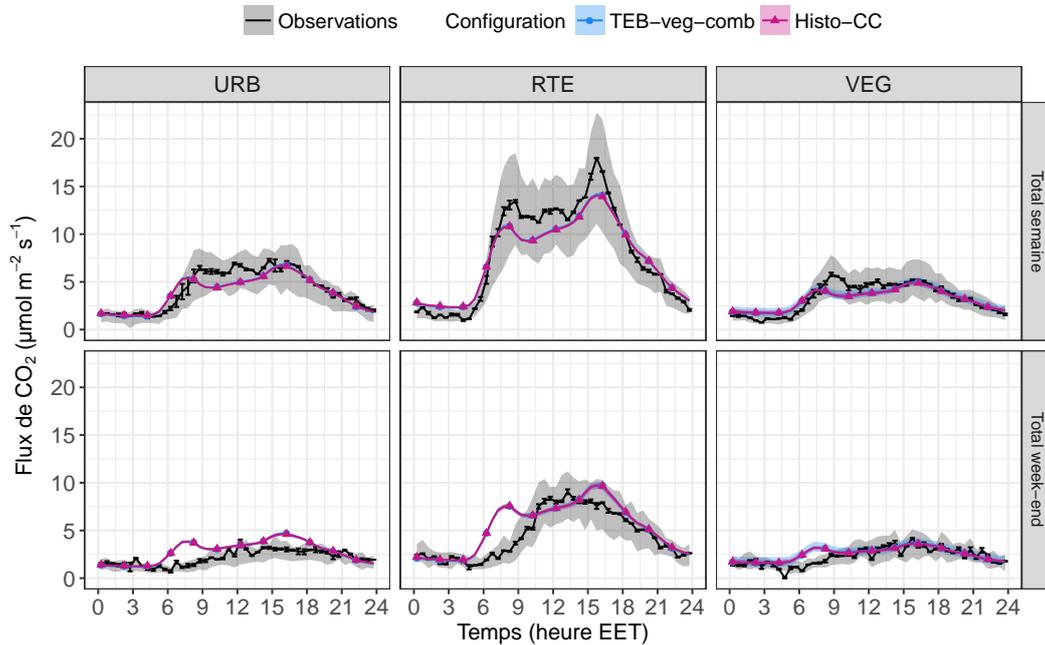


FIGURE 5.18 – Cycles journaliers moyens de flux de CO_2 modélisés par SURFEX en DJF pour la configuration TEB-veg qui simule l'utilisation de patches de végétation (TEB-veg-comb, cf. Section 5.2.1) et la configuration historique avec ISBA-CC (Histo-CC). Les barres d'erreur représentent l'incertitude sur les observations liée au phénomène de stockage/déstockage. Le flux de stockage a été calculé en utilisant l'Équation (2.6). Les surfaces colorées montrent l'écart interquartile.

différents entre la semaine et le week-end permettrait probablement de faire converger le modèle vers les observations. L'activation ou non de l'option **TEB-veg** n'a pas d'influence sur les flux modélisés en hiver du fait de la faible activité de la végétation à cette saison.

En **SON**, le modèle reproduit bien les observations (Figure 5.19). Dans le secteur VEG, il simule un écart interquartile comparable à celui des observations, avec un écart plus important en milieu de journée, lorsque la photosynthèse est maximale. La végétation est un peu plus active qu'en DJF, mais son activité reste faible, et on observe peu de différence entre les deux configurations.

La surestimation du modèle vers 8 EET le week-end, que l'on pouvait remarquer en DJF, est toujours visible dans les secteurs RTE et VEG en **JJA** (Figure 5.20). Mis à part cette surestimation, le modèle est très proche des observations dans le secteur VEG. Dans le secteur RTE, modèle et observations sont en bon accord sauf le week-end en journée où le modèle simule des flux plus forts que les observations. Cette surestimation vient probablement d'une surestimation du trafic car, sur le site de Kumpula, c'est le principal contributeur aux flux de CO_2 qui suit un cycle hebdomadaire. Dans le secteur URB, l'accord modèle/observations est moins bon. Le modèle a un biais négatif la nuit et positif le jour par rapport aux observations. Les biais sont un peu moins marqués le week-end. Ces biais pourraient s'expliquer par une sous-estimation de l'activité de la végétation. **L'impact de l'option TEB-veg en JJA est visible, en particulier dans le secteur VEG.** En moyenne, la

5.3. ÉVALUATION DU MODÈLE SUR LE SITE DE KUMPULA

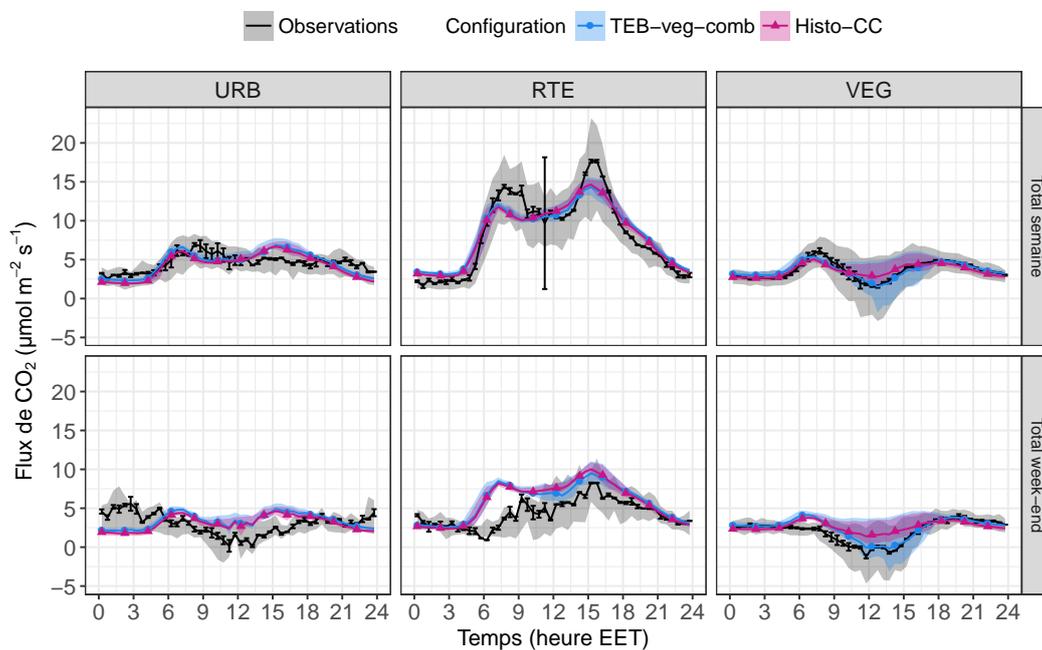


FIGURE 5.19 – Idem que la Figure 5.18 mais pour SON.

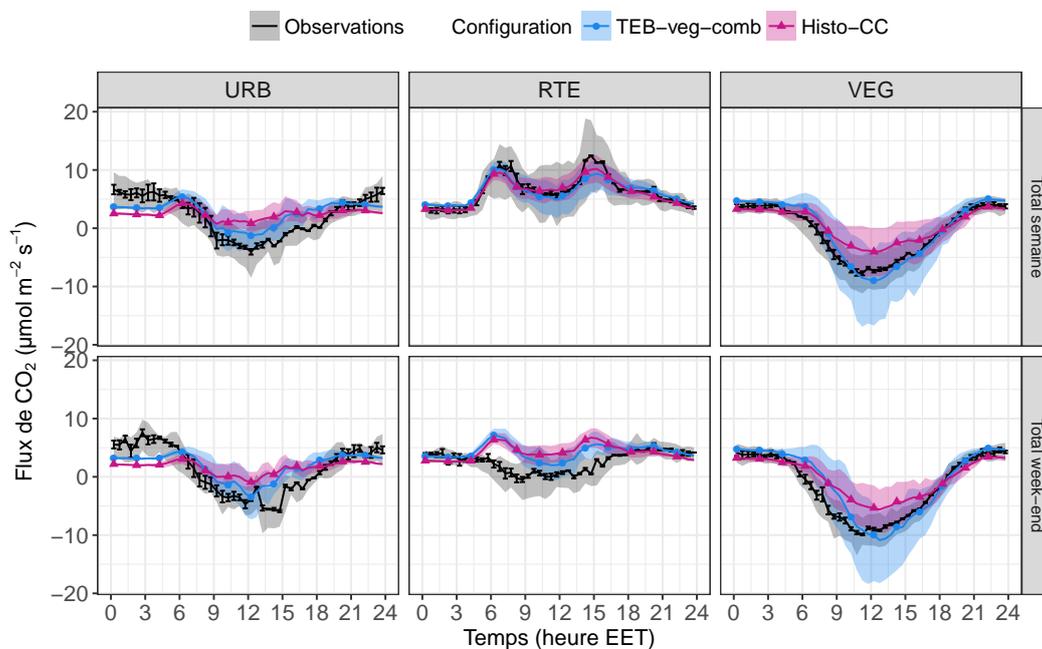


FIGURE 5.20 – Idem que la Figure 5.18 mais pour JJA.

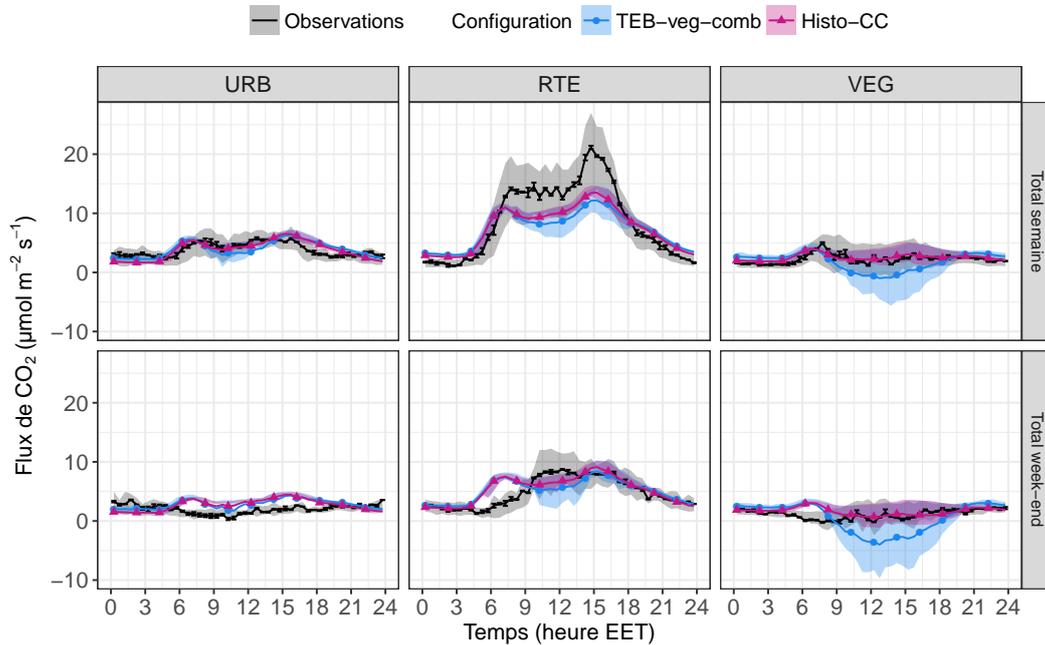


FIGURE 5.21 – Idem que la Figure 5.18 mais pour MAM.

configuration TEB-veg-comb est en accord avec les observations alors que Histo-Ags a un biais positif par rapport aux observations en milieu de journée.

En MAM (Figure 5.21), le modèle est proche des observations dans le secteur URB la semaine et RTE le week-end. Il a un léger biais positif par rapport aux observations la journée dans le secteur URB, et un biais négatif le jour dans le secteur RTE. L'activation de l'option TEB-veg entraîne des différences similaires à celles que l'on pouvait observer en JJA. Cependant, les écarts sont un peu moins marqués puisque l'activité de la végétation est plus faible. Contrairement à JJA, ici, c'est Histo-CC qui est en accord avec les observations ; TEB-veg-comb présente un biais négatif. Les éléments d'explication de ce biais négatif n'ont pas été identifiés. Dans les secteurs URB et RTE, il y a très peu de différences entre les deux configurations. Dans le secteur VEG, Histo-CC est en très bon accord avec les observations alors que TEB-veg-comb a un biais négatif par rapport aux observations.

Après cette première description qualitative, on étudie les performances du modèle de manière quantitative en calculant **les erreurs quadratiques moyennes** (Figure 5.22). Les performances des deux configurations sont très proches. En effet, la moyenne annuelle dans le secteur RTE de l'EQM est de $5,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour TEB-veg-comb et de $5,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour Histo-CC. Dans le secteur URB, l'EQM est de $3,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour les deux configurations. Les différences sont un peu plus marquées dans le secteur VEG, avec une EQM légèrement supérieure avec la configuration TEB-veg-comb : $3,8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, contre $3,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour Histo-CC. Les différences de scores sont plus marquées en MAM et JJA qu'aux autres saisons (la végétation est plus active).

Dans le secteur RTE, les scores du modèle sont **similaires à ceux obtenus par le modèle de régression linéaire de Järvi *et al.* [2012]** sur le site de Kumpula

5.4. DISCUSSION

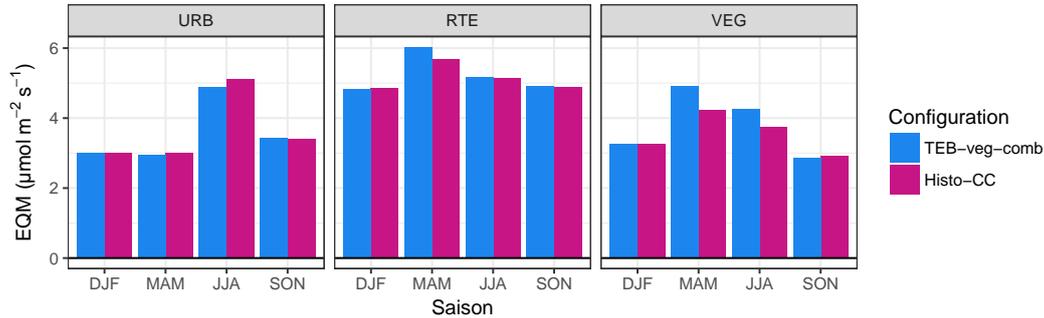


FIGURE 5.22 – Erreur quadratique moyenne (EQM) par saison pour la configuration TEB-veg qui simule l'utilisation de patches de végétation (TEB-veg-comb, cf. Section 5.2.1) et la configuration historique avec ISBA-Ags (Histo-Ags)

en hiver (EQM de $5,24 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour Järvi *et al.* [2012], $5,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour TEB-veg-comb et $5,1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pour Histo-CC).

Sur notre cas d'étude, la qualité de la modélisation des flux de CO_2 associés à la végétation urbaine n'est pas modifiée par l'activation de l'option TEB-veg lorsque la végétation n'est pas prédominante (secteur RTE et URB). En revanche, lorsque la végétation domine (secteur VEG), en moyenne sur l'ensemble de l'année, l'option TEB-veg a tendance à dégrader les résultats.

Au vu de ces résultats, **l'intérêt de la configuration TEB-veg-comb par rapport à la configuration Histo-CC pour représenter le site de Kumpula est discutable.** La configuration TEB-veg-comb ne permet pas d'améliorer la modélisation des flux de chaleur. De plus, dans le secteur le plus végétalisé (secteur VEG), elle tend à dégrader la qualité de la modélisation des flux de CO_2 . Les résultats dans ce secteur s'expliquent probablement par la faible importance des interactions entre la végétation et le bâti du fait de la grande fraction de végétation.

5.4 Discussion

Le site d'étude de Kumpula a permis de montrer la capacité du modèle de microclimat urbain TEB à simuler les flux de CO_2 associés à la végétation urbaine.

Les études de sensibilités sur l'option TEB-veg ont montré que **des développements supplémentaires sont nécessaires** pour pouvoir utiliser cette option pour modéliser les flux de CO_2 associés à la végétation urbaine. En particulier, l'ajout de la possibilité de pouvoir utiliser **plusieurs patches de végétation** est indispensable.

Pour contourner ce problème, on a simulé l'utilisation de patches de végétation avec l'option TEB-veg, en combinant les résultats de deux simulations TEB-veg classiques (configuration TEB-veg-comb). Cette stratégie de modélisation, nous a certes permis d'obtenir des résultats raisonnables, mais elle est particulièrement **coûteuse en terme de temps de calcul**, et ne remplace donc pas une véritable implémentation des patches de végétation dans le modèle.

Cependant, la nécessité de développer les patches de végétation avec l'option TEB-veg est à nuancer au regard de **l'intérêt discutable de l'option TEB-veg pour simuler les flux de CO_2 en milieu urbain.** En effet, sur notre cas d'étude,

en matière de flux de CO₂, l'activation de cette option a eu peu d'influence dans les secteurs les moins végétalisés, et a eu tendance à dégrader les résultats dans le secteur le plus végétalisé. De plus, elle n'a pas permis d'améliorer la modélisation des flux de chaleur.

Bien que l'activation de l'option TEB-veg n'améliore pas les résultats, le modèle SURFEX, dont TEB fait partie, **est capable de modéliser les flux de CO₂ associés à la végétation urbaine**. Le schéma de description des interactions sols, végétations atmosphère ISBA, traditionnellement utilisé pour décrire la végétation en milieu non urbain est donc également capable de décrire la végétation urbaine. Le Chapitre 4 ainsi que le présent chapitre ont permis de démontrer la capacité de SURFEX à modéliser les flux de CO₂ en milieu urbain. En particulier, la contribution des deux contributeurs fortement météo-sensibles a été évaluée en détail au Chapitre 4 pour les bâtiments et au Chapitre 5 pour la végétation urbaine.

Maintenant, que la qualité du modèle a été démontrée, on peut l'utiliser pour simuler les flux de CO₂ en milieu urbain à l'échelle d'une ville. Le Chapitre 6 propose une première étude de ce type.

Résumé

- Les flux mesurés sur le site de Kumpula sont représentatifs d'une zone de 500 m autour de la tour de mesure. Cette zone, très hétérogène peut être divisée en trois secteurs (URB, RTE, VEG). Chaque secteur est modélisé de manière séparée.
- La nature des précipitations (liquide ou solide) impact l'activité de la végétation. Dans les observations, on ne dispose que de la quantité de précipitations, leur nature est inconnue. Cette dernière est déterminée en s'appuyant sur la température de l'air : lorsque la température est inférieure à 1° C on suppose que les précipitations tombent sous forme de neige, au delà, on suppose qu'il s'agit de pluie.
- Deux versions du modèle d'interaction végétation/atmosphère ISBA existent dans SURFEX : ISBA-A-gs et ISBA-CC. Dans la première, la respiration est paramétrisée alors que dans la seconde, elle est modélisée par un schéma complet. Dans ISBA-A-gs, le niveau de la respiration est fixé en début de simulation par le choix du paramètre Re_{25} . Ce dernier est déterminé en s'appuyant sur des simulations ISBA-CC.
- L'option TEB-veg permet de simuler les interactions entre la végétation et la ville. Elle a montré son intérêt en terme de modélisation des flux de chaleur. Ici, on évalue sa pertinence en terme de modélisation des flux de CO₂.
- La configuration du modèle avec l'option TEB-veg activée, la version A-gs d'ISBA et un seul patch de végétation, telle que proposée par Lemonsu *et al.* [2012], n'est pas satisfaisante pour modéliser les flux de CO₂ associés à la végétation urbaine. L'utilisation de plusieurs patches de végétation est

nécessaire pour modéliser des flux réalistes. Ici, on propose la configuration TEB-veg-comb qui simule l'utilisation de patches de végétation avec l'option TEB-veg activée. À moyen terme, il serait souhaitable d'implémenter la possibilité d'utiliser les patches de végétation avec l'option TEB-veg.

- Sur notre cas d'étude, l'intérêt de l'option TEB-veg est discutable : elle n'a permis d'améliorer ni la modélisation des flux de chaleur, ni celle des flux de CO₂.

Le temps se rétrécit ou semble s'accélérer à mesure qu'approche la date du but à atteindre.

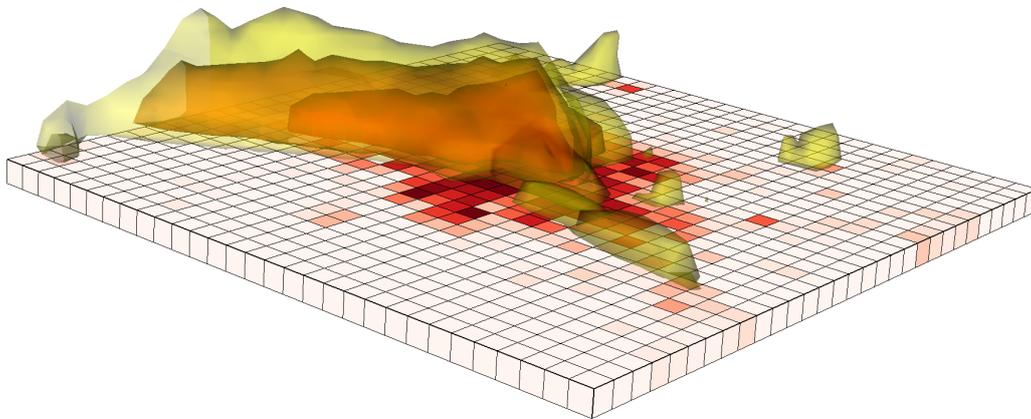
Éric Tabarly

6

Simulations de panaches de CO₂ produit par une ville

La modélisation des flux de CO₂ par TEB/SURFEX, proposée au Chapitre 3 a été évaluée sur deux cas d'études dans les Chapitres 4 et 5, en comparant les résultats de simulations 1D avec des observations. Dans ce chapitre, on propose d'explorer la sensibilité de la modélisation des flux de CO₂ en milieu urbain à l'échelle d'une ville entière (Toulouse). Pour cela, on effectuera des modélisations 2D qui prennent en compte les variabilités spatiales de la ville, d'un quartier à l'autre. On utilisera la plateforme de modélisation CLUE dont l'objectif est de fournir aux bureaux d'études un outil opérationnel de modélisation du climat urbain qui soit simple d'utilisation. Les flux de CO₂ en ville sont un nouveau diagnostic de la plateforme. On s'intéressera plus particulièrement au CO₂ émis par les bâtiments. SURFEX, qui modélise les flux de CO₂ en surface, sera couplé à un modèle de transport atmosphérique afin de suivre le déplacement du CO₂ produit par la ville à travers l'atmosphère.

La Section 6.1 présente la méthodologie suivie pour simuler le panache de CO₂. Le site d'étude et la situation météorologique sont exposés en Section 6.2 et les résultats des simulations sont analysés en Section 6.3.



Sommaire

6.1	Stratégie de modélisation	132
6.1.1	Présentation de l'étude	132
6.1.2	La plateforme CLimat Urbain Etude (CLUE)	132
6.1.3	Adaptation de la plateforme CLUE	135
6.2	Description du site d'étude et des données	136
6.2.1	Zone d'étude	136
6.2.2	Description de l'occupation des sols	137
6.2.3	Situation météorologique	141
6.3	Étude du panache de CO₂ associé aux bâtiments	147
6.3.1	Présentation de la situation météorologique	147
6.3.2	Évolution du panache de CO ₂ à l'échelle de la ville	150
6.3.2.1	Coupes verticales	150
6.3.2.2	Concentration en CO ₂ près du sol	155
6.3.2.3	Bilan carbone	155
6.3.3	Comparaison des configurations sur des points d'intérêt	159
6.4	Discussion	160

6.1 Stratégie de modélisation

6.1.1 Présentation de l'étude

Ce chapitre propose une première simulation des flux de CO₂ en milieu urbain avec le modèle TEB à l'échelle d'une ville entière. Le Chapitre 4 a mis en évidence l'intérêt d'avoir une représentation détaillée de l'usage des bâtiments et du comportement énergétique des habitants pour modéliser le cycle journalier de flux de CO₂ en milieu urbain. **On cherche ici à savoir si une représentation détaillée des usages et comportements est également nécessaires pour bien représentée le panache de CO₂ produit à l'échelle d'une ville.**

Pour cela, on réutilise trois configurations de TEB introduites lors de l'étude sur la sensibilité des flux de CO₂ associés aux bâtiments (Section 4.2.1), avec un degré croissant de raffinement de la modélisation des usages et comportements :

- la **configuration par défaut (DEF)** qui suppose que la température de consigne du chauffage dans les bâtiments est toujours égale à 19° C ;
- la **nouvelle configuration par défaut (NEW_DEF)**, pour laquelle la température de consigne est abaissée de 2° C la nuit ;
- et la **configuration de référence (REF)** où les usages des bâtiments et les comportements des habitants sont décrits de manière fine.

Dans la configuration REF, les bâtiments sont découpés en plusieurs compartiments, suivant la méthodologie proposée par Schoetter *et al.* [2017]. Pour les différents paramètres décrivant le comportement des habitants et l'usage des bâtiments, on utilise les valeurs ajustées présentées au Chapitre 4.

Comme l'on s'intéresse plus particulièrement aux bâtiments, et afin de simplifier l'étude et l'interprétation des résultats, **seuls les flux de CO₂ émis par les bâtiments seront considérés** dans la suite. On fait donc l'hypothèse que le trafic, la respiration humaine et la végétation n'émettent ni ne captent de CO₂.

Les surfaces urbaines sont représentées avec le modèle TEB. La modélisation des autres surfaces s'appuie sur les autres composantes de SURFEX. L'étude du panache de CO₂ et de son déplacement au-dessus de la ville nécessite d'utiliser SURFEX en mode couplé avec un modèle de transport atmosphérique. Afin d'avoir une discrétisation fine de la surface et un domaine assez grand pour englober une ville et la campagne environnante tout en conservant des coûts de calculs faibles, les simulations seront réalisées en **s'appuyant sur la plateforme CLUE**.

6.1.2 La plateforme CLimat Urbain Etude (CLUE)

La plateforme CLUE (anciennement appelée ACCLIMAT) est une plateforme multidisciplinaire qui modélise le micro-climat urbain en prenant en compte les caractéristiques morphologiques des villes, leur démographie ainsi que les aménagements urbains (trames vertes, rénovation des bâtiments...) et le comportement des habitants. Elle permet non seulement de modéliser l'impact des caractéristiques urbaines sur le micro-climat urbain à un instant t , mais également de modéliser l'évolution dans le temps de la ville en fonction de politiques d'aménagements. **La plateforme permet donc d'explorer différentes trajectoires socio-économiques**

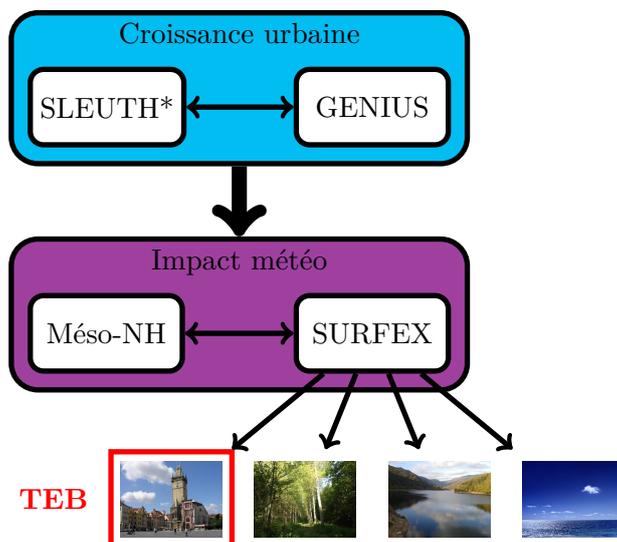


FIGURE 6.1 – Représentation schématique de la plateforme CLUE

en modélisant l’impact des évolutions des villes sur le climat urbain actuel et futur.

La plateforme CLUE a été développée par le CERFACS lors du projet ACCLI-MAT, projet, soutenu par le STAE/RTRA qui s’est achevé en 2013. Après la fin du projet, la plateforme a été optimisée [Goret *et al.*, 2016]. Par la suite, elle a été transférée à la Direction des Services Météorologiques de Météo-France afin d’être utilisée pour répondre à des demandes d’études.

Dans la version de la plateforme utilisée dans cette étude (Figure 6.1), deux modèles permettent de modéliser l’évolution de la ville : le modèle géographique d’expansion urbaine SLEUTH* [Clarke *et al.*, 1997 ; Doukari *et al.*, 2016] et le modèle d’architecture GENIUS [Bonhomme, 2013]. Ces modèles ne seront pas utilisés dans la suite de l’étude car **on s’intéresse à la ville actuelle.**

Le micro-climat urbain est modélisé par le **modèle atmosphérique** de méso-échelle **Méso-NH** [Lac *et al.*, 2018]. Méso-NH offre une résolution spatiale de quelques centimètres à quelques centaines de mètres. Dans la plateforme, **deux modèles** Méso-NH sont **imbriqués** : le père (Méso-NH-père) et le fils (Méso-NH-fils). L’imbrication des modèles permet d’**optimiser le compromis** qu’il faut faire **entre la résolution et la taille du domaine** pour conserver un **coût de calcul raisonnable**. Le modèle père impose les conditions aux bords du domaine fils, et le modèle fils rétroagit sur le père ; ces échanges se font à chaque pas de temps (grid-nesting). Le modèle fils permet d’avoir une résolution fine au-dessus de la ville (2,5 km), et le domaine père couvre, avec une résolution plus lâche (7,5 km), un domaine assez grand pour englober la campagne environnante et ainsi capturer les conditions météorologiques de méso-échelle qui impactent la ville.

Dans le modèle atmosphérique Méso-NH, la **modélisation des interactions entre la surface et l’atmosphère** repose sur le modèle SURFEX. Un SURFEX interne est embarqué dans chaque modèle Méso-NH (le père et le fils). Les SURFEX internes ont la même résolution spatio-temporelle que le modèle auquel ils sont

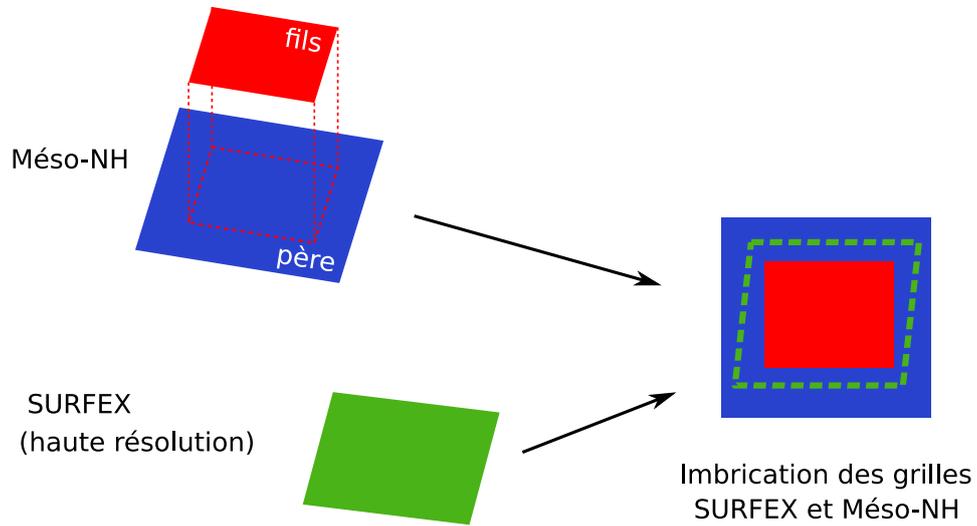


FIGURE 6.2 – Disposition des grilles des modèles Meso-NH et SURFEX dans la plateforme CLUE.

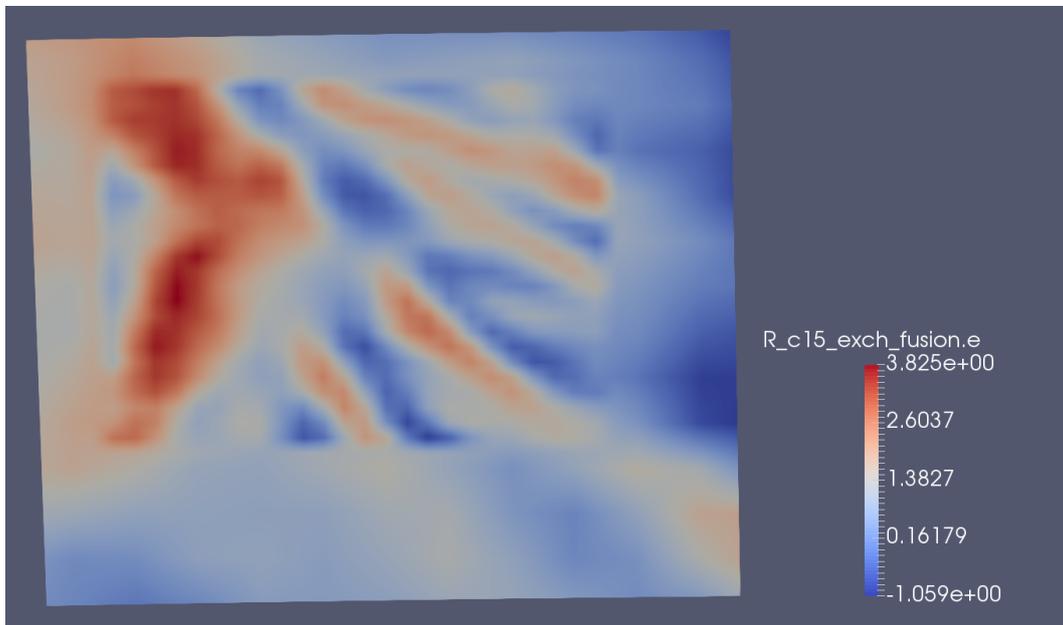


FIGURE 6.3 – Exemple de champ composite (vent zonal) utilisé pour forcer SURFEX. Les données au centre du domaine proviennent de Meso-NH-fils. En bord du domaine de SURFEX, on se situe hors du domaine de Meso-NH-fils, le champ est complété avec les données de Meso-NH-père.

associés. Afin de modéliser plus finement la surface tout en limitant le temps de calcul, **un troisième modèle SURFEX**, avec une résolution beaucoup plus fine (500 m), est utilisé dans la plateforme. Il couvre un domaine intermédiaire entre celui de Méso-NH-fils et celui de Méso-NH-père (Figure 6.2). Il est forcé par des champs composites provenant de Méso-NH-fils là où l'information est disponible et complétés par ceux de Méso-NH-père partout ailleurs (Figure 6.3). Par la suite, **toute mention au modèle SURFEX se rapportera au SURFEX haute résolution.**

La plateforme de modélisation repose sur le **coupleur OpenPALM** [Piacentini *et al.*, 2011] qui gère les interactions entre les différents modèles de la plateforme. Les échanges de données entre les grilles des différents modèles sont gérés par la **bibliothèque d'interpolation CWIPI**¹ qui est capable de traiter les échanges entre modèles parallélisés.

L'utilisation de la plateforme CLUE dans le cadre de notre étude permet **d'exploiter le couplage original** qu'elle propose entre le modèle de transport atmosphérique Méso-NH, et un modèle de surface à haute résolution (SURFEX). Ce couplage permet de décrire les interactions surface/atmosphère au-dessus de la ville avec une résolution fine sans pâtir d'un coût de calcul trop important. En utilisant une machine disposant de huit cœurs physiques avec 30GB de mémoire, on peut réaliser une simulation de cinq jours en un peu moins de 10h. Une simulation à 500 m de résolution avec Méso-NH aurait été possible, mais les coûts et les temps de calcul auraient été bien supérieurs à ceux obtenus avec la plateforme.

6.1.3 Adaptation de la plateforme CLUE

Afin de bénéficier des dernières avancées des modèles Méso-NH et SURFEX, une montée de niveau de ces modèles a été réalisée dans le cadre de cette thèse. La version 5.0.2 de **Méso-NH** a ainsi été remplacée par la **5.3.1**. Pour **SURFEX**, la version initialement présente, qui datait de 2012, a été remplacée par une version plus récente, similaire à celle utilisée dans les chapitres précédents : **la version 8.0 dont le schéma de description des interactions ville/atmosphère (TEB) a été modifié.** La version de TEB correspond à celle présentée en Chapitre 3, elle comprend, en plus de la version officielle :

- la possibilité de fractionner les bâtiments en plusieurs **compartiments pour modéliser des usages et des profils énergétiques différents** [Schoetter *et al.*, 2017] ;
- la modélisation des **flux de CO₂ en milieu urbain** [Goret *et al.*, 2019].

Pour pouvoir suivre le **transport du CO₂** émis par les bâtiments, on rajoute un échange entre le modèle SURFEX haute résolution et le modèle Méso-NH : **les flux de CO₂ associés aux bâtiments calculés par SURFEX sont moyennés et interpolés sur les grilles de Méso-NH père et fils, et transmis à ces derniers** (Figure 6.4).

Côté Méso-NH, le **trajet du CO₂** émis par les bâtiments est suivi en activant le **transport de scalaires passifs** (le CO₂ est chimiquement stable). En début de

1. <https://w3.onera.fr/cwipi/>

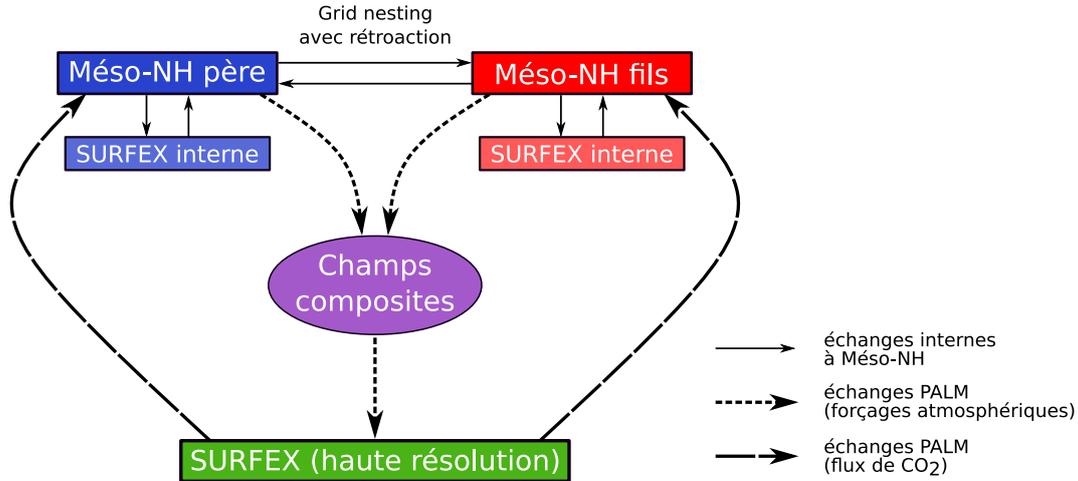


FIGURE 6.4 – Principaux échanges entre Mésos-NH (père et fils) et SURFEX. Les traits pleins matérialisent les échanges nativement présent dans Mésos-NH, les traits pointillés correspondent aux échanges supplémentaires rajoutés dans le cadre de la plateforme CLUE et gérés par le coupleur PALM.

simulation, on impose une concentration de fond en CO₂ de 400 ppm. Cette condition est également imposée aux bords du domaine père, et au sommet de l’atmosphère. Les conditions à la limite surface/atmosphère (flux de CO₂ émis par les bâtiments) sont données par SURFEX dans son domaine. En dehors du domaine de SURFEX, on considère que la surface n’échange pas de CO₂ avec l’atmosphère. Cette hypothèse est cohérente avec notre étude puisqu’en dehors du domaine de SURFEX, on se situe principalement à la campagne. Les bâtiments y sont donc rares, et les flux de CO₂ associés faibles.

6.2 Description du site d’étude et des données

6.2.1 Zone d’étude

La zone d’étude est centrée sur la **ville de Toulouse**. Avec plus de 1,3 million d’habitants au 1^{er} janvier 2016, l’aire urbaine de Toulouse est la cinquième de France par sa population. Sa croissance démographique est très soutenue : l’augmentation moyenne entre 2011 et 2016 est de 1,5% (+ 19 000 habitants par an). Toulouse est ainsi la commune française qui gagne le plus grand nombre d’habitants sur la période 2011-2016 [Doguet, 2018].

Les domaines des trois modèles sont centrés sur le centre ville de Toulouse (Figure 6.5). Le domaine de **Mésos-NH père** s’étend sur **200 km** du nord au sud et de l’est à l’ouest, ce qui permet de capturer les conditions météorologiques dans la campagne environnant l’aire urbaine toulousaine. Les domaines de **Mésos-NH fils** et **SURFEX** s’étendent respectivement sur **75 km** et **90 km** (domaines carrés).

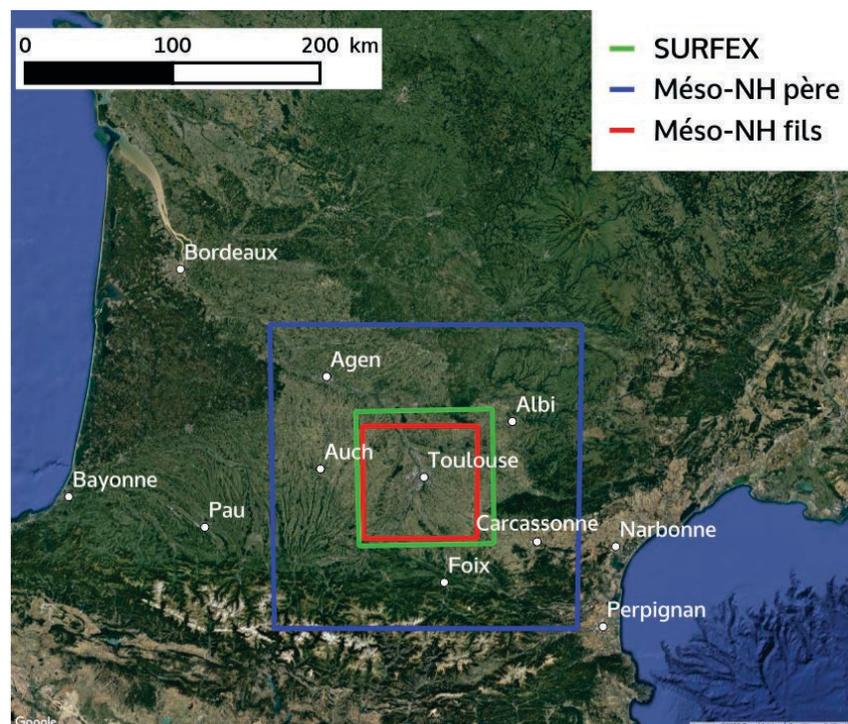


FIGURE 6.5 – Emplacements des domaines des différents modèles, superposés sur une vue satellite du sud-ouest de la France.

6.2.2 Description de l'occupation des sols

Les **données d'occupation du sol** utilisées par SURFEX sont issues du projet **MaPUCE**. La méthodologie et les différentes sources de données utilisées sont présentées en détail dans Schoetter *et al.* [2019b]. Les informations principales sont rappelées ci-après.

Les **caractéristiques morphologiques** à l'échelle du quartier proviennent de la chaîne de traitement proposée par Bocher *et al.* [2018]. Elles sont affichées en Figure 6.6 pour les fractions de types de surfaces, en Figure 6.7 pour le détail des différentes surfaces urbaines et en Figure 6.8 pour les caractéristiques morphologiques des bâtiments.

La ville de Toulouse est traversée par le fleuve de la Garonne qui s'écoule depuis le sud vers le nord. L'hyper-centre de la ville se situe sur la rive droite du fleuve. Il est caractérisé par une très forte densité de bâti comparé au reste de l'agglomération. En hyper-centre, on trouve principalement des immeubles collectifs alors que la périphérie est partagée entre des zones pavillonnaires discontinues et des bâtiments d'activités avec ici ou là quelques immeubles collectifs. La hauteur moyenne du bâti est plutôt faible : elle est d'une vingtaine de mètres dans l'hyper-centre. L'aéroport de Toulouse-Blagnac se situe au nord-ouest de la ville, sur la rive gauche de la Garonne. Il est repérable par sa forte fraction de densité de route ainsi que des hauteurs de bâtiments de plus de vingt mètres correspondant aux bâtiments de la zone aéroportuaire et aux hangars des avions. En s'éloignant de la ville de Toulouse, les zones urbaines se situent préférentiellement le long des principaux

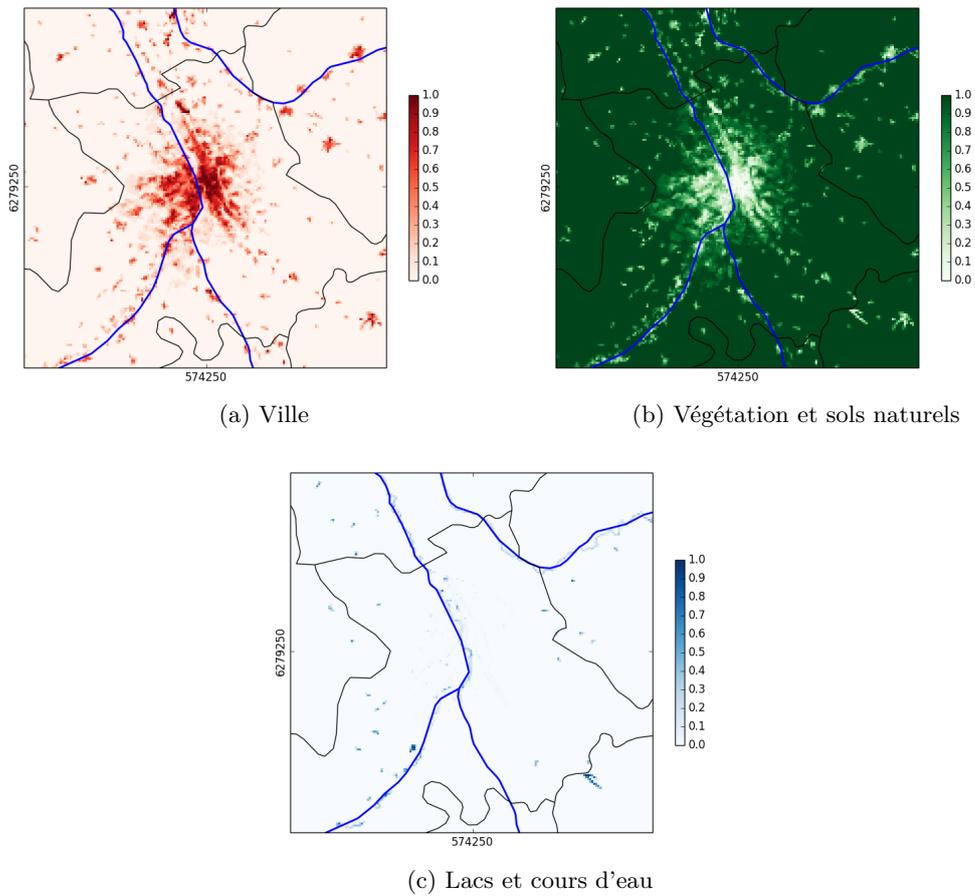


FIGURE 6.6 – Fractions des différents types de surface définis dans le modèle SURFEX (ville, végétation/sols naturels et lacs/cours d'eau), interpolées sur la grille de SURFEX [Bocher *et al.*, 2018]. Les traits continus noirs matérialisent la limite des départements, les lignes bleues indiquent l'emplacement des principaux cours d'eau (l'Ariège, la Garonne et le Tarn).

6.2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE ET DES DONNÉES

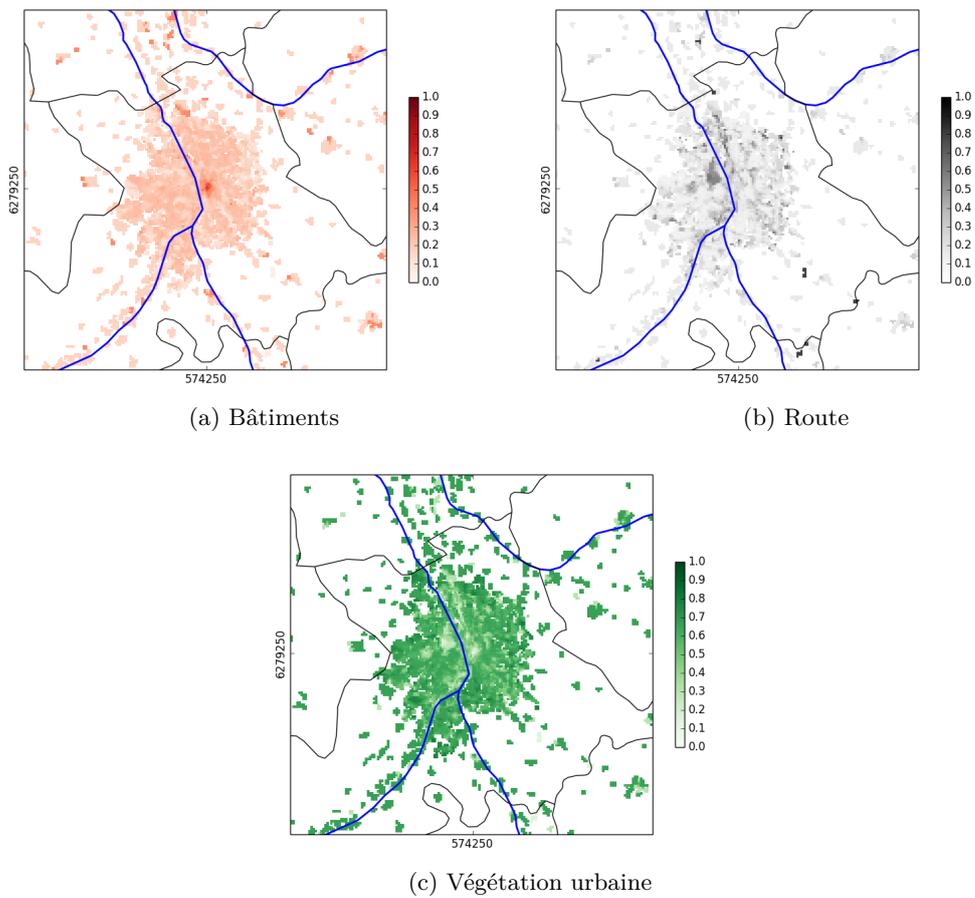
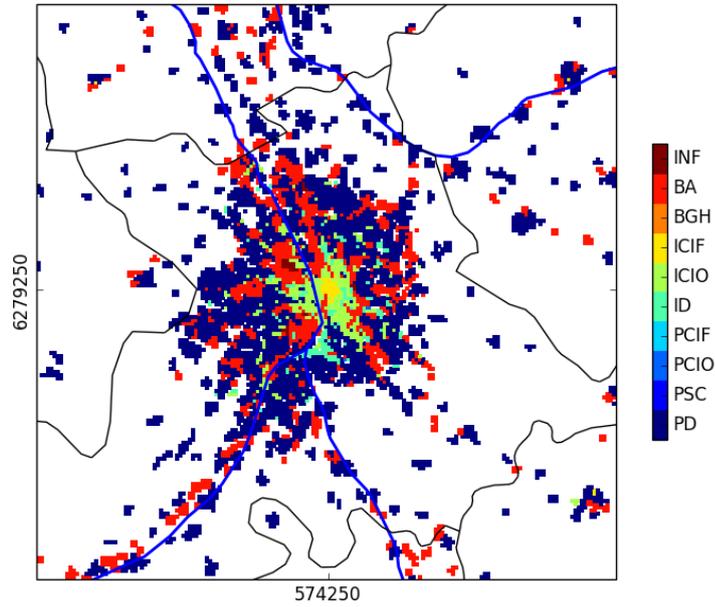
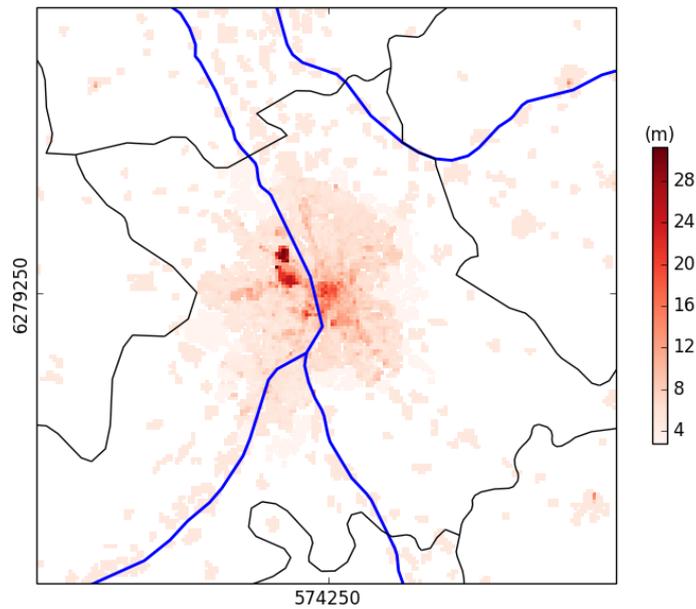


FIGURE 6.7 – Détails des fractions des différentes surfaces urbaines interpolées sur la grille de SURFEX [Bocher *et al.*, 2018]. Idem Figure 6.6 pour le fond de carte.



(a) Types d'îlot



(b) Hauteur moyenne des bâtiments

FIGURE 6.8 – Données morphologiques pour les bâtiments (types d'îlot et hauteur des bâtiments) interpolées sur la grille de SURFEX [Bocher *et al.*, 2018]. On distingue les types d'îlots suivant : Pavillon Discontinu (PD), Pavillon Semi-Continu (PSC), Pavillon Continu sur Îlot Ouvert (PCIO), Pavillon Continu sur Îlot Fermé (PCIF), Immeuble Discontinu (ID), Immeuble Continu sur Îlot Ouvert (ICIO), Immeuble Continu sur Îlot Fermé (ICIF), Bâtiment de Grande Hauteur (BGH), Bâtiment d'Activité (BA), Informel, locaux (INF).

cours d'eau de la région : l'Ariège, la Garonne et le Tarn.

Dans SURFEX, chacun des types de surface (Figure 6.7) est traité par une composante différente : TEB pour la ville, ISBA pour la végétation et les sols naturels et la formule de Charnock pour les lacs et les cours d'eau. La végétation urbaine (Figure 6.7) est modélisée par TEB avec l'option TEB-veg. Les fractions de végétation et de sols naturels (Figure 6.6), sont elles modélisées directement par ISBA.

Les **caractéristiques architecturales des bâtiments** sont déterminées en s'appuyant sur la base de données des archétypes de bâtiments français proposée par Tornay *et al.* [2017]. Dans cette base de données, les archétypes de bâtiments sont définis par le type d'îlots (Figure 6.8), l'usage principal des bâtiments, la période de construction et la région de construction (Figure 6.9). La période de construction est déterminée en choisissant l'âge des bâtiments collectifs ou individuels en fonction du type d'îlot. Avant 1948, on observe une grande variété des matériaux de construction en fonction de la région de construction alors qu'après cette date, les méthodes de construction et les matériaux s'uniformisent. En conséquence, deux cartes de régions de construction sont établies : une première pour la période historique, avant 1948, et une deuxième pour la période récente, après 1948 (Figure 6.9). Dans la région toulousaine, on trouve principalement des bâtiments en briques qui ont valu à Toulouse d'être surnommée la ville rose.

Pour simuler les flux de CO₂ émis par les bâtiments, l'information sur le **type d'énergie utilisé pour le chauffage** est nécessaire. Cette information est fournie par l'INSEE² (Figure 6.10). Dans l'agglomération toulousaine, les systèmes de chauffages fonctionnent majoritairement à l'électricité ou au gaz. L'importance de la source électrique s'explique par la douceur des hivers toulousains qui entraînent des besoins en chauffage faibles comparés aux régions françaises situées plus au nord.

Pour la configuration de référence (REF) de SURFEX, on modélise **plusieurs compartiments d'usage des bâtiments et de comportement énergétique** dans chaque maille du modèle, tel que proposé par Schoetter *et al.* [2017]. Ces compartiments sont déterminés en fonction des fractions d'usage des bâtiments (Figure 6.11), des fractions d'intensité d'utilisation des équipements (Figure 6.12) et des fractions d'intensité du comportement de régulation thermique (Figure 6.13).

6.2.3 Situation météorologique

On choisit de faire des simulations en **hiver** car c'est la saison à laquelle les bâtiments émettent le plus de CO₂ à cause de la forte demande en chauffage. De plus, on choisit un **épisode de pollution** car ces derniers sont dus à une stagnation des polluants en basses couches. Or, le CO₂, en tant qu'espèce chimiquement stable, va également stagner en basses couches, ce qui présente deux intérêts pour notre études :

- on va pouvoir suivre et étudier le panache de CO₂ au-dessus de la ville pendant une période de temps plus longue, avant qu'il ne se dissipe ;
- l'impact des différentes configurations de SURFEX sur le panache de CO₂ va être exacerbé.

2. Recensement de la population 2011 par l'Institut Nationale de la Statistique et des Études Économiques (INSEE) <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2028584>.

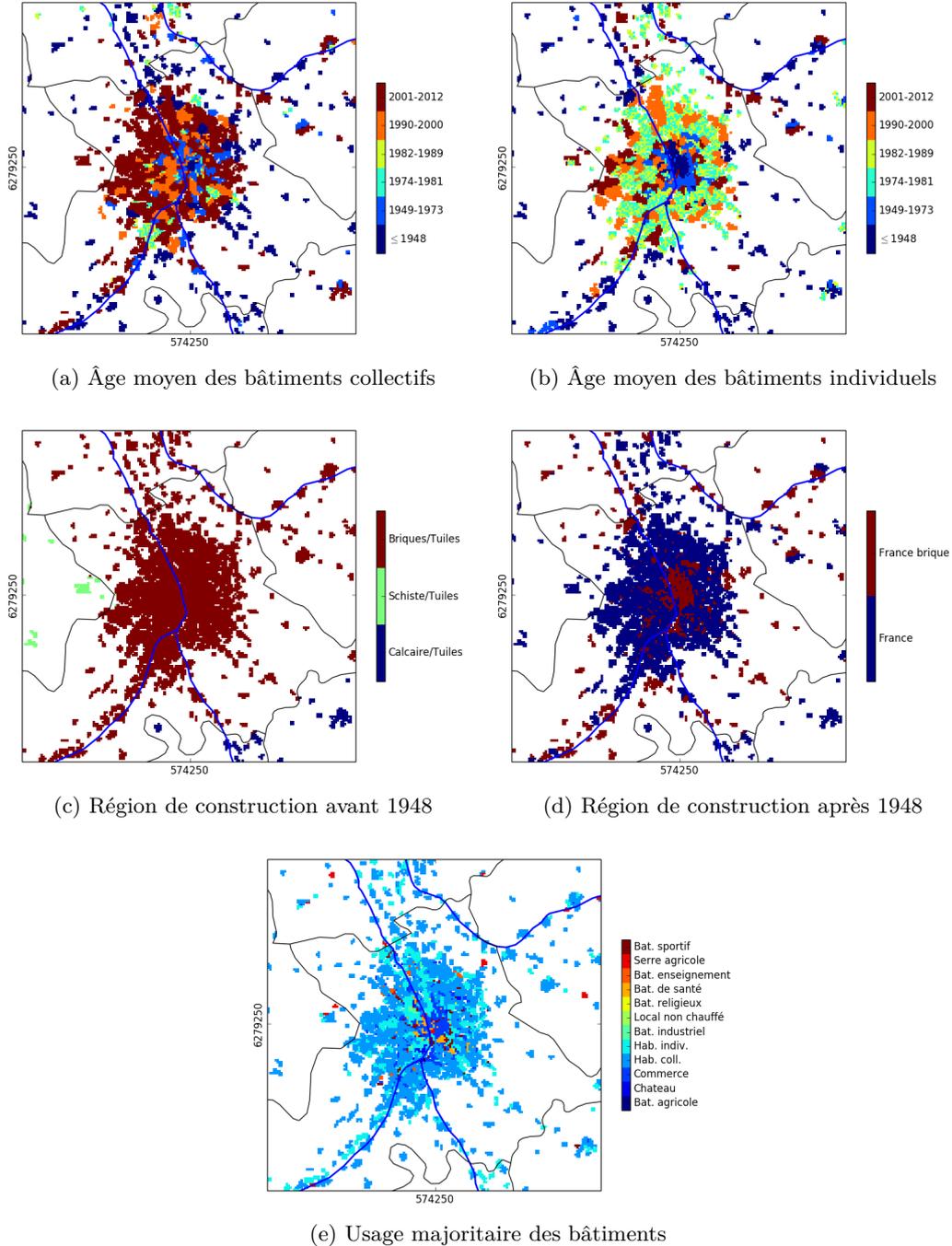


FIGURE 6.9 – Données permettant de déterminer l’archétype de bâtiment pour chaque maille du domaine de SURFEX. Une fois l’archétype identifié, on peut en déduire les caractéristiques architecturales des bâtiments [Tornay *et al.*, 2017] : matériaux de constructions des bâtiments, type d’isolation... Les catégories d’usage correspondent à l’usage auquel était destiné le bâtiment lors de sa construction, celui-ci peut différer de l’usage actuel des bâtiments.

6.2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE ET DES DONNÉES

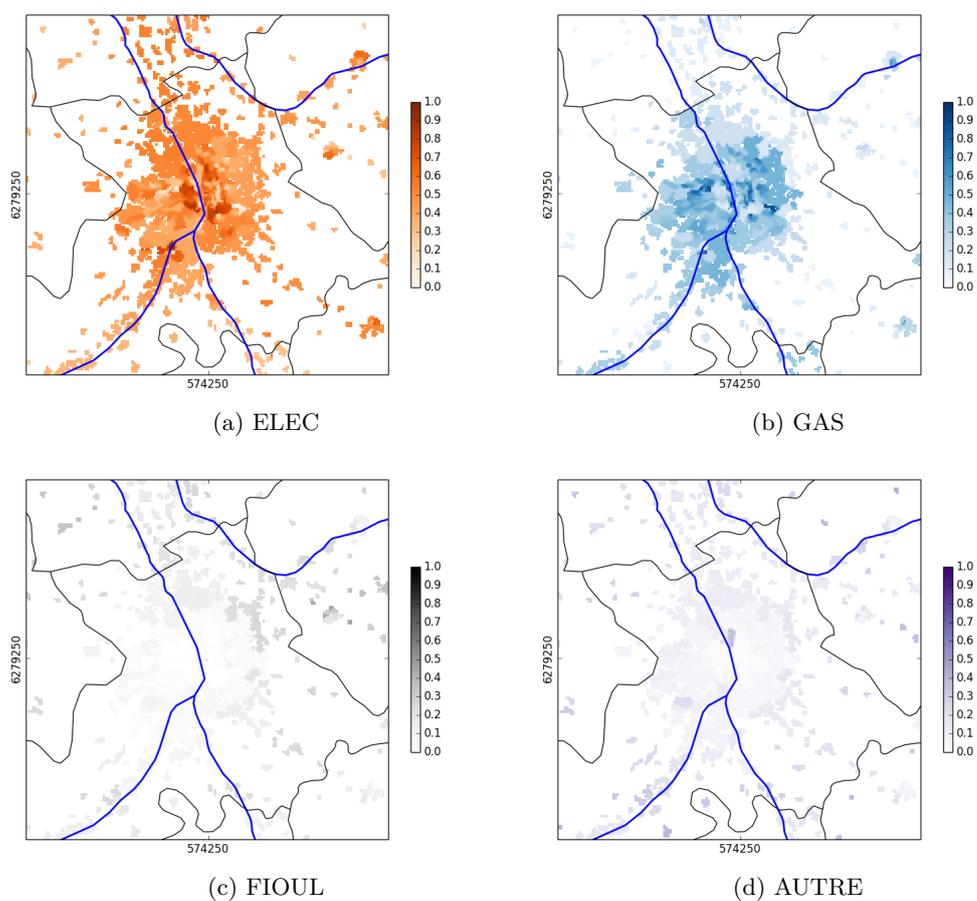


FIGURE 6.10 – Fractions de bâtiments chauffés à l'électricité (a), au gas (b), au fioul (c) ou avec une autre source d'énergie (d) (Section 3.2.1).

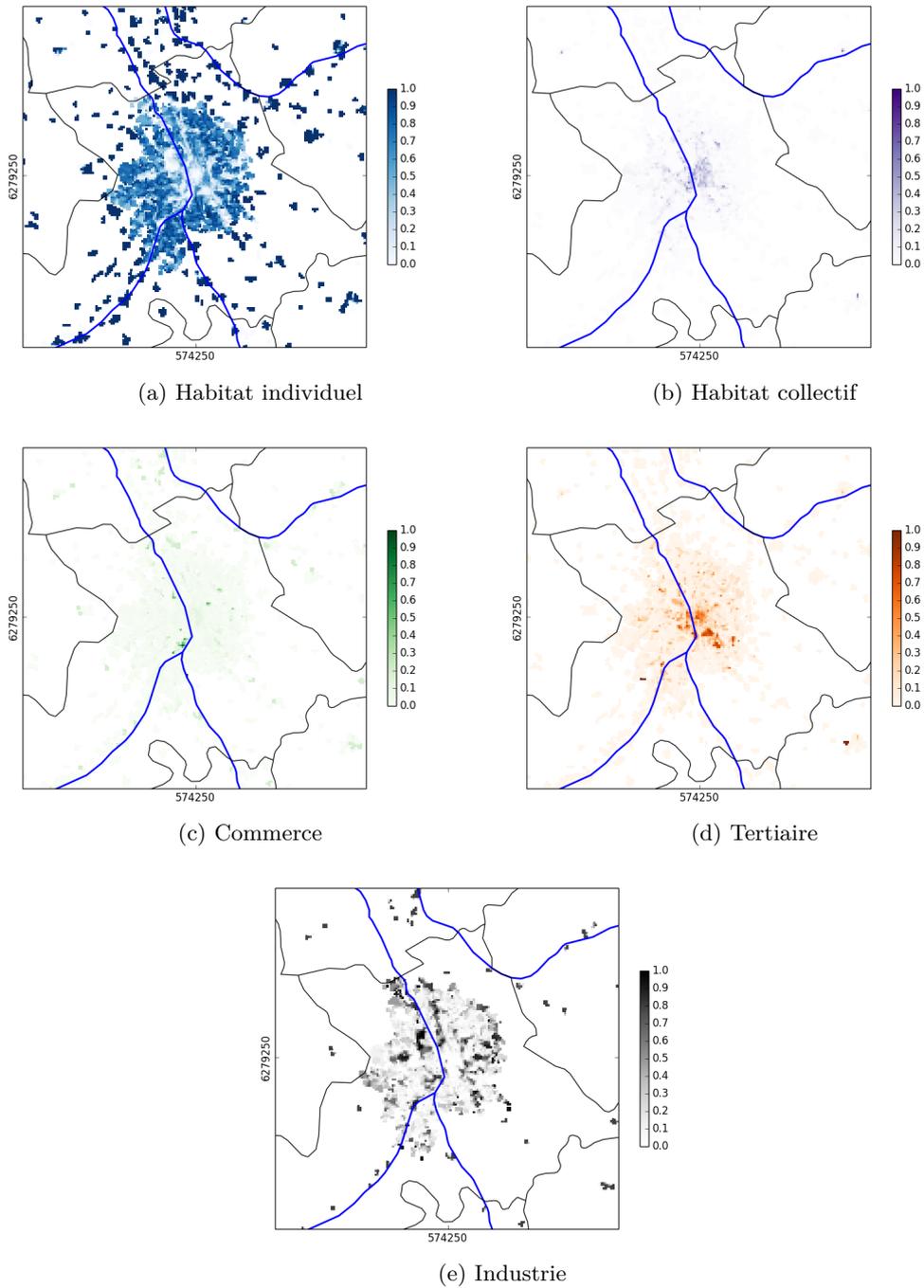


FIGURE 6.11 – Fractions d’usages des bâtiments. Ces fractions sont utilisées pour générer plusieurs compartiments d’usage et de comportement dans les bâtiments, suivant la méthodologie présentée par Schoetter *et al.* [2017].

6.2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE ET DES DONNÉES

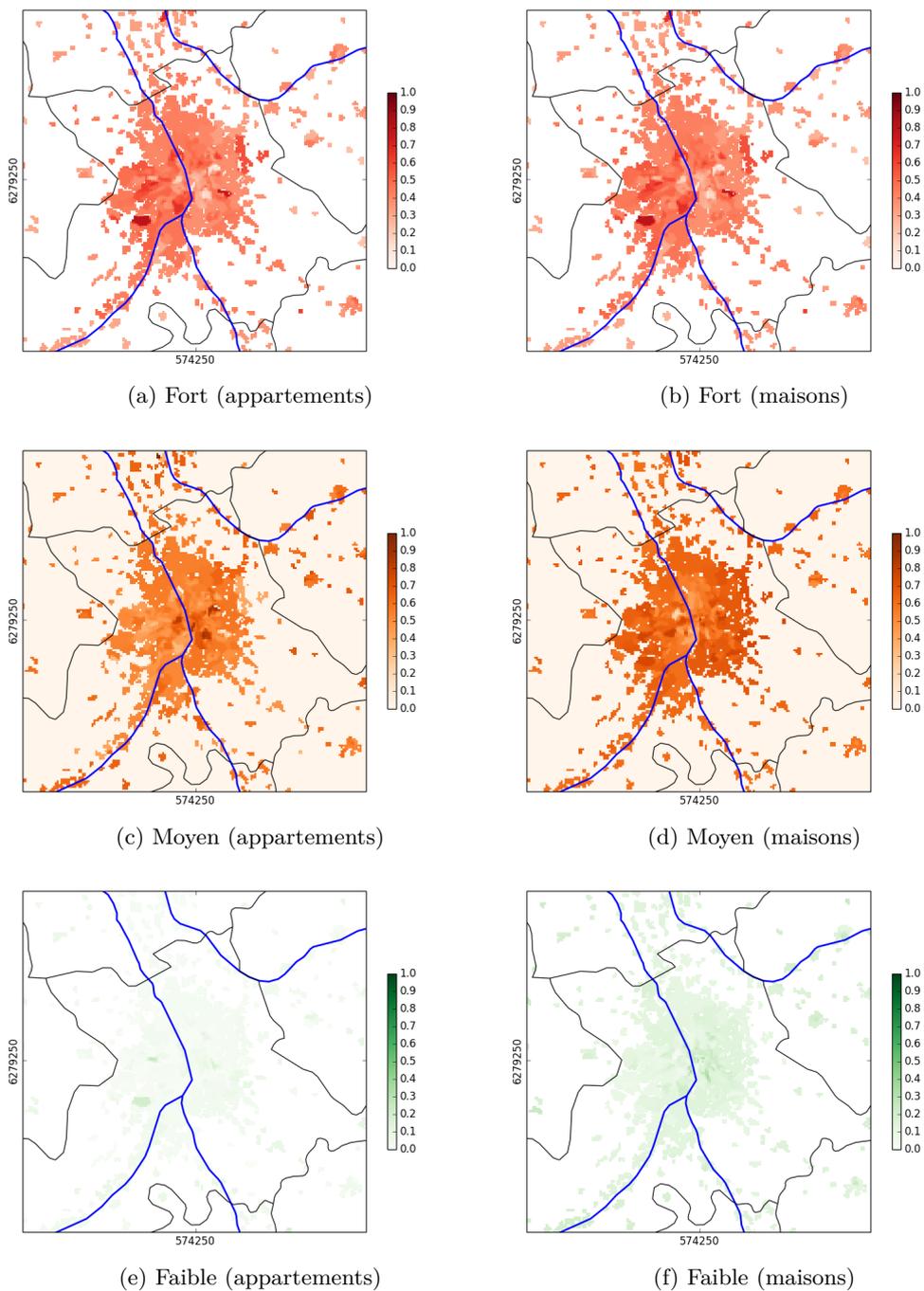


FIGURE 6.12 – Fractions d'intensité (fort, moyen ou faible) d'utilisation des équipements dans les bâtiments résidentiels suivant le type de logement : appartements (a, c et e) ou maisons (b, d et f). Ces fractions sont utilisées pour générer plusieurs compartiments d'usage et de comportement dans les bâtiments, suivant la méthodologie présentée par Schoetter *et al.* [2017].

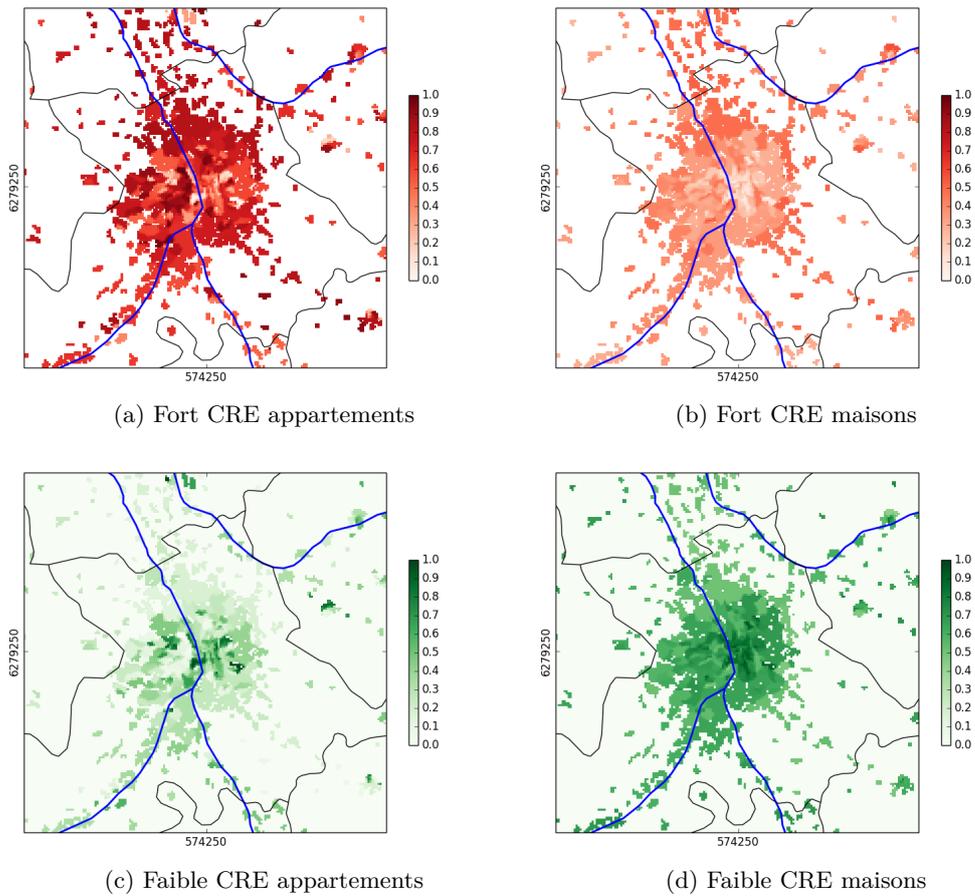


FIGURE 6.13 – Fractions d’intensité (fort ou faible) du comportement de régulation thermique (CRE) dans les bâtiments résidentiels, appartements (a et c) ou maisons (b et d). Ces fractions sont utilisées pour générer plusieurs compartiments d’usage et de comportement dans les bâtiments, suivant la méthodologie présentée par Schoetter *et al.* [2017].

Aucun épisode de pollution hivernal n'a eu lieu pendant la période temporelle de la campagne CAPITOUL (2004/2005, cf. Section 4.1). On sélectionne donc un épisode en dehors de cette campagne. Par conséquent, on ne disposera pas de mesure de concentration de CO₂ à comparer aux résultats des simulations. **L'étude consistera donc en une expérience de sensibilité.**

L'épisode de pollution hivernal retenu est celui du **vendredi 22 et du samedi 23 février 2019**. On réalise des simulations de cinq jours : un jour de spin-up, un jour avant et un jour après l'épisode de pollution et les deux jours de l'épisode. Les résultats du premier jour (spin-up) ne seront pas exploités.

Les fichiers de forçages météorologiques, correspondant aux conditions météorologiques de la période retenue (du mercredi 20 février 2019 au dimanche 24 février 2019), et nécessaire pour fixer les conditions aux limites du domaine père de Mésos-NH, proviennent du modèle du centre européen.

6.3 Étude du panache de CO₂ associé aux bâtiments pour différentes configurations du modèle SURFEX

6.3.1 Présentation de la situation météorologique

Les épisodes de pollution ont généralement lieu lors **d'épisodes de vent calme associés à un atmosphère particulièrement stable**. En effet, dans ces conditions, la couche limite stable limite l'extension verticale du panache de polluant, et les vents faibles ne permettent pas une évacuation rapide des polluants émis par la ville vers la campagne environnante. Les polluants restent bloqués au-dessus de la ville, et un épisode de pollution a lieu.

On vérifie que les conditions météorologiques de la période sélectionnée correspondent bien à celles d'un épisode de pollution classique. Les Figures 6.14 et 6.15 montrent qu'effectivement, pendant les quatre jours de la simulation, **le vent reste faible** et suit un axe nord-est/sud-ouest. Cette axe, atypique pour la région toulousaine ne se rencontre que lors des épisodes de vent calme. Lorsque le vent forçit, il est canalisé par le relief (Pyrénées et Montagne Noire) et prend une direction nord-ouest/sud-est.

Pour étudier la **stabilité de l'atmosphère**, on réalise des coupes verticales de température potentielle. Les coupes sont réalisées sur le domaine de Mésos-NH fils. Leur emplacement est indiqué sur la Figure 6.16. Sur l'ensemble de l'épisode, on observe une **très forte stratification de la masse d'air** matérialisée par un fort gradient vertical de la température potentielle (Figures 6.17 et 6.18). La stratification est un peu moins forte le dernier jour (24 février). La variabilité journalière de la stratification suit le cycle classique, avec une stratification plus forte la nuit et plus faible en journée. On peut également observer que la couche limite est moins stable sur la ville (située sur la moitié centrale des coupes), elle est même mélangée les nuits du 21 et surtout du 24 février. Ce phénomène est typique du climat urbain (Section 1.1).

En conclusion, **la situation météorologique correspond bien à celles en général rencontrées lors d'épisodes de pollution** : une couche limite stable associée à un vent calme

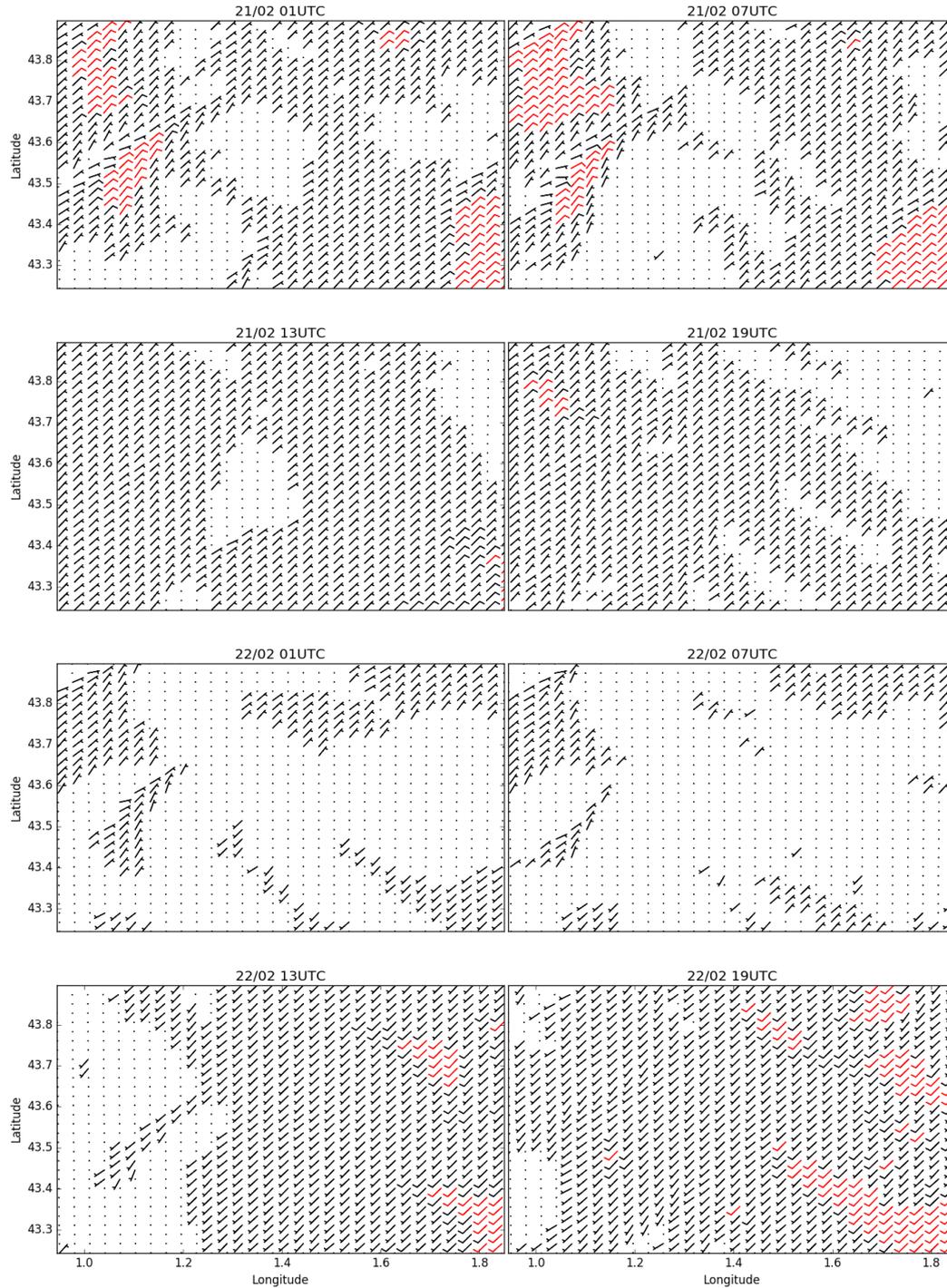


FIGURE 6.14 – Champ instantané de vent modélisé par Més0-NH sur le domaine fils, au premier niveau du modèle (10 m), par pas de 6h, pour les 21 et 22 février. Les barbules sont affichées en rouge lorsque le vent est supérieur à 15 km h⁻¹.

6.3. ÉTUDE DU PANACHE DE CO₂ ASSOCIÉ AUX BÂTIMENTS

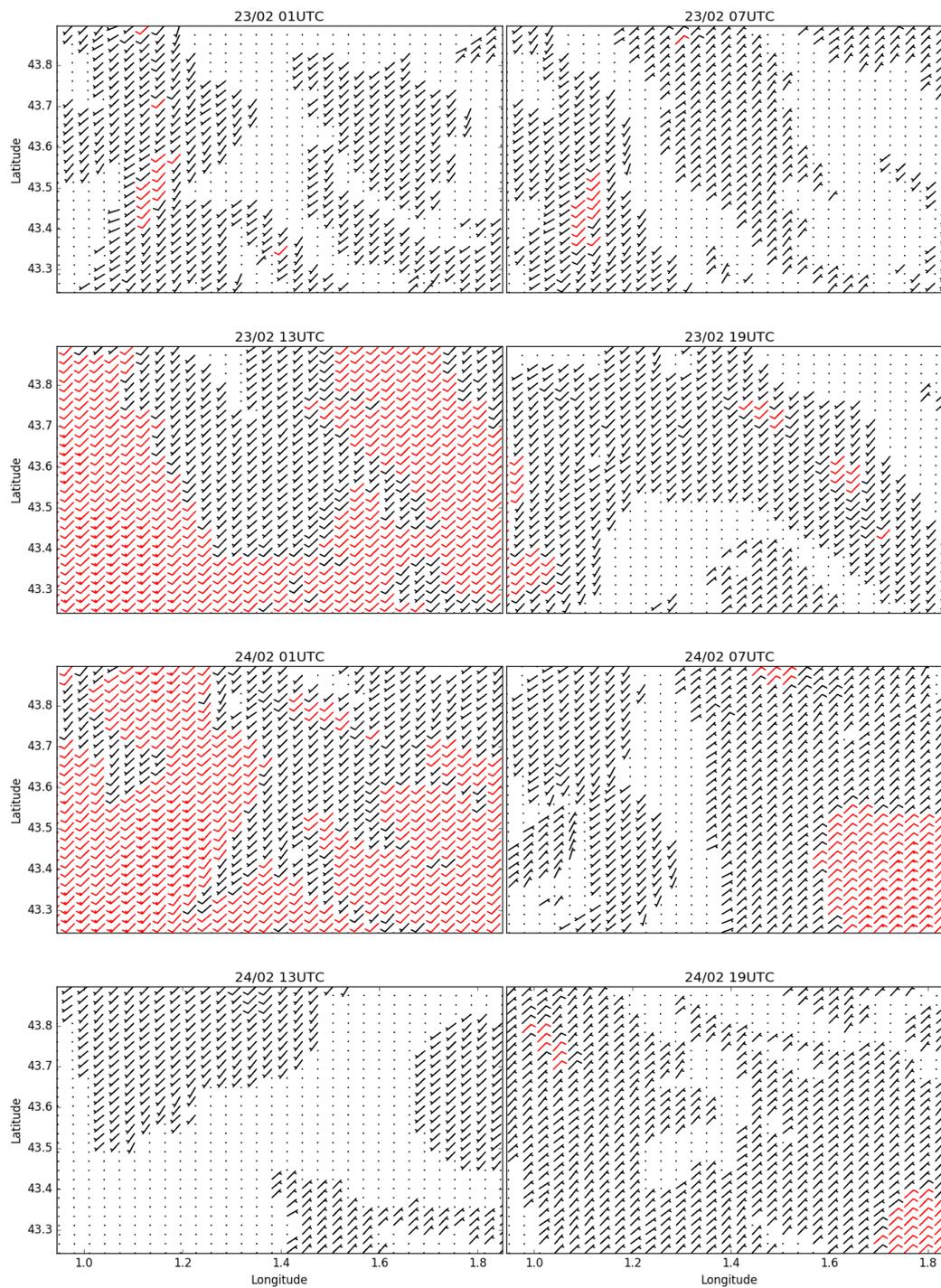


FIGURE 6.15 – Idem Figure 6.14 pour les 23 et 24 février.

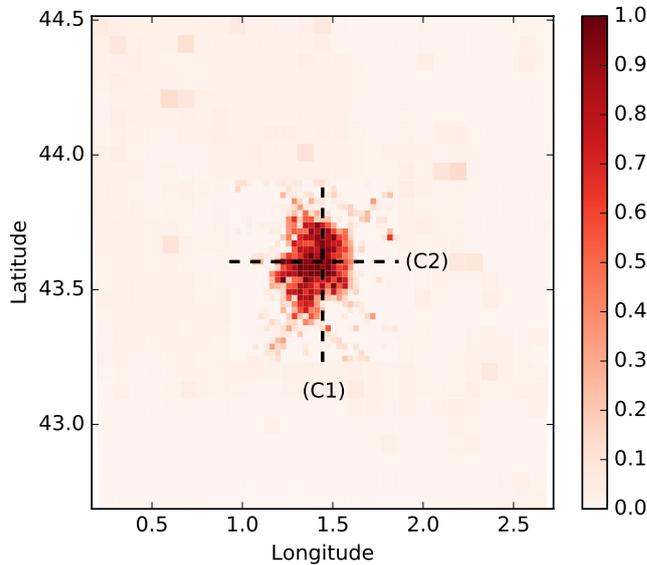


FIGURE 6.16 – Emplacement des axes des coupes verticales (Figures 6.17 à 6.20) superposés sur la fraction de ville dans Més0-NH. L’extension des axes de coupe est restreinte au domaine de Més0-NH fils.

6.3.2 Évolution du panache de CO₂ à l’échelle de la ville

6.3.2.1 Coupes verticales

On suit le déplacement et l’évolution de l’extension du panache de CO₂ au-dessus de la ville en réalisant des coupes verticales de concentration en CO₂, selon les deux mêmes axes que précédemment (nord-sud et est-ouest). **La trajectoire du panache est identique pour les trois configurations de SURFEX.** Ici, on montre les résultats pour la simulation de référence (Figures 6.19 et 6.20).

En début de simulation, la matinée du 21 février, la concentration en CO₂ est maximale à 7 UTC, puis le panache de CO₂ est évacué vers le sud-ouest à partir de 10 UTC. Le lendemain (22 février), la concentration est de nouveau maximale près du sol vers 7 UTC. À 9 UTC, le panache de CO₂ est toujours centré sur la ville, et il s’épaissit. Il part ensuite vers le sud-ouest (12 UTC) avant d’être finalement évacué vers le sud-est (14 UTC). À 16 UTC, le panache de CO₂ formé par la ville est totalement évacué. Le samedi 23 février, le panache de CO₂, qui atteint ses concentrations maximales vers 7 UTC est évacué par le nord-est. L’épaisseur et la concentration du panache sont plus importantes que le 21 à la même heure. Le dimanche 24, la concentration reste faible toute la journée, le pic de concentration des autres jours vers 7 UTC n’a pas lieu.

Le scénario du panache de CO₂ au-dessus de la ville simulé par la plateforme CLUE est **cohérent avec l’alerte pollution** : c’est lors de l’alerte pollution (22 et 23 février) que le panache de CO₂ reste le plus longtemps bloqué au-dessus de la ville.

Chaque jour, la concentration en CO₂ suit **le même cycle journalier** : la

6.3. ÉTUDE DU PANACHE DE CO₂ ASSOCIÉ AUX BÂTIMENTS

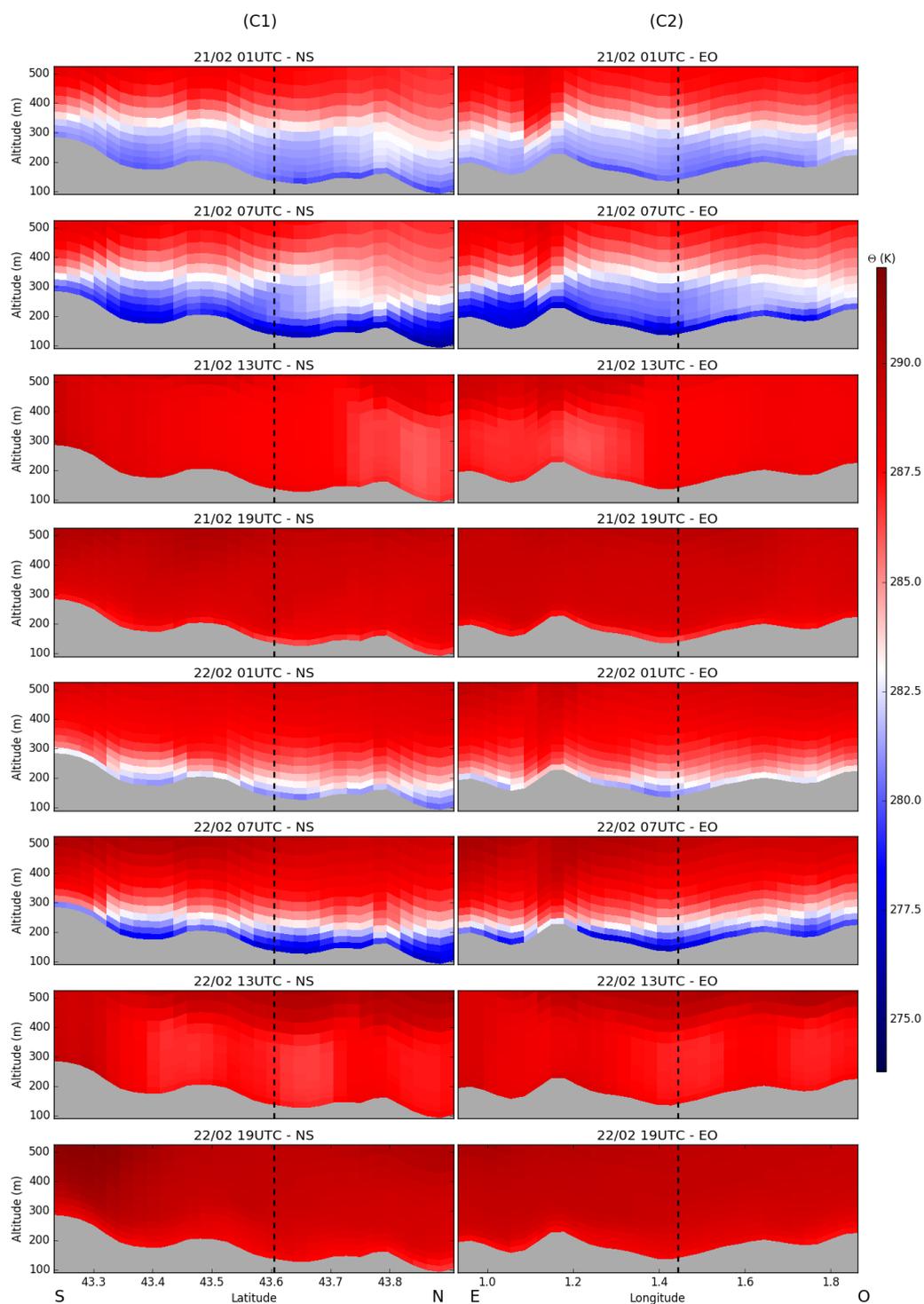


FIGURE 6.17 – Coupes verticales de la température potentielle (θ) modélisée par Mésos-NH fils. Les coupes sont réalisées toutes les six heures, pour les 21 et 22 février, selon un axe nord-sud (à gauche) et est-ouest (à droite). Les lignes pointillées matérialisent l'emplacement du deuxième axe de coupe.

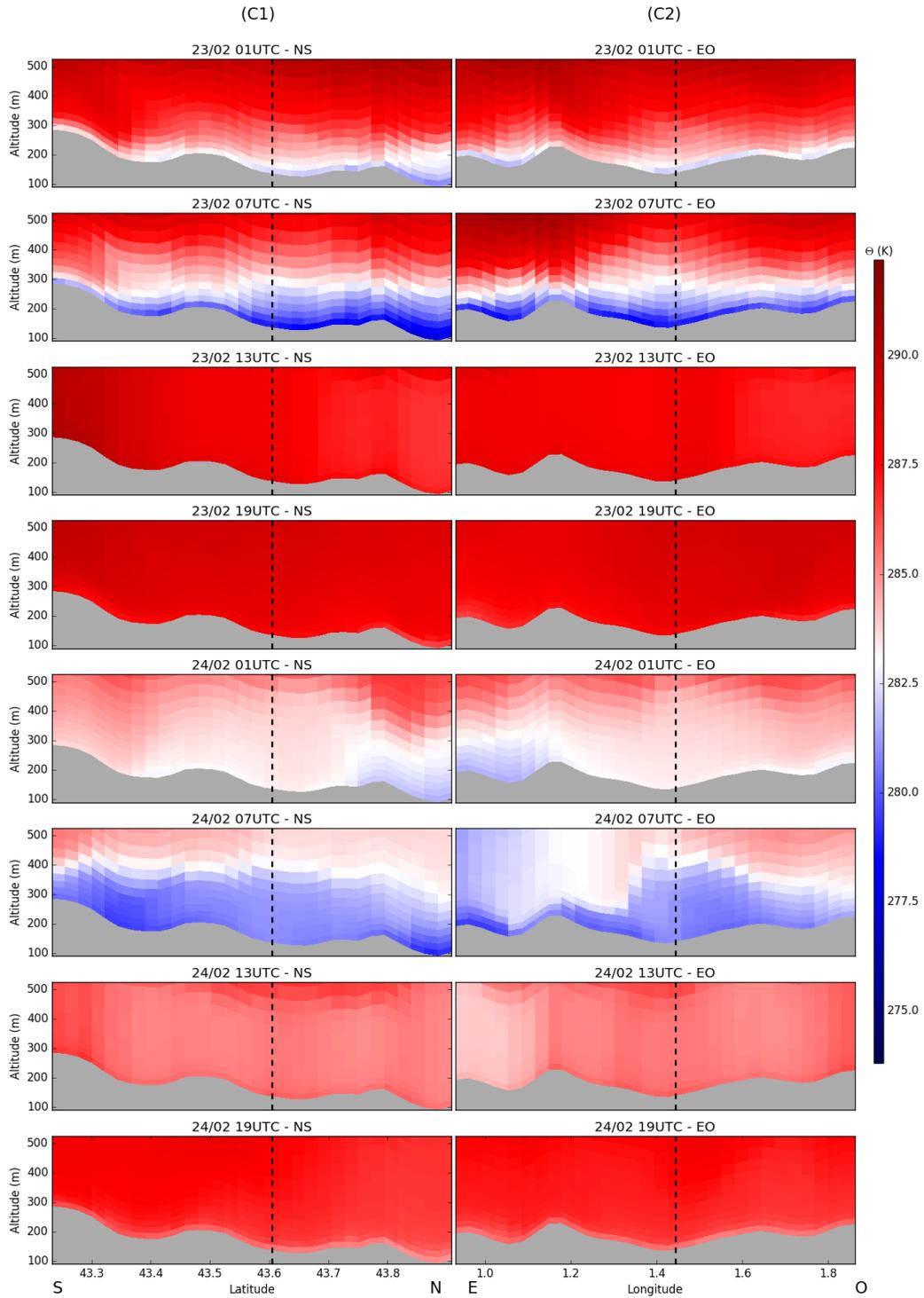


FIGURE 6.18 – Idem Figure 6.17 pour les 23 et 24 février.

6.3. ÉTUDE DU PANACHE DE CO₂ ASSOCIÉ AUX BÂTIMENTS

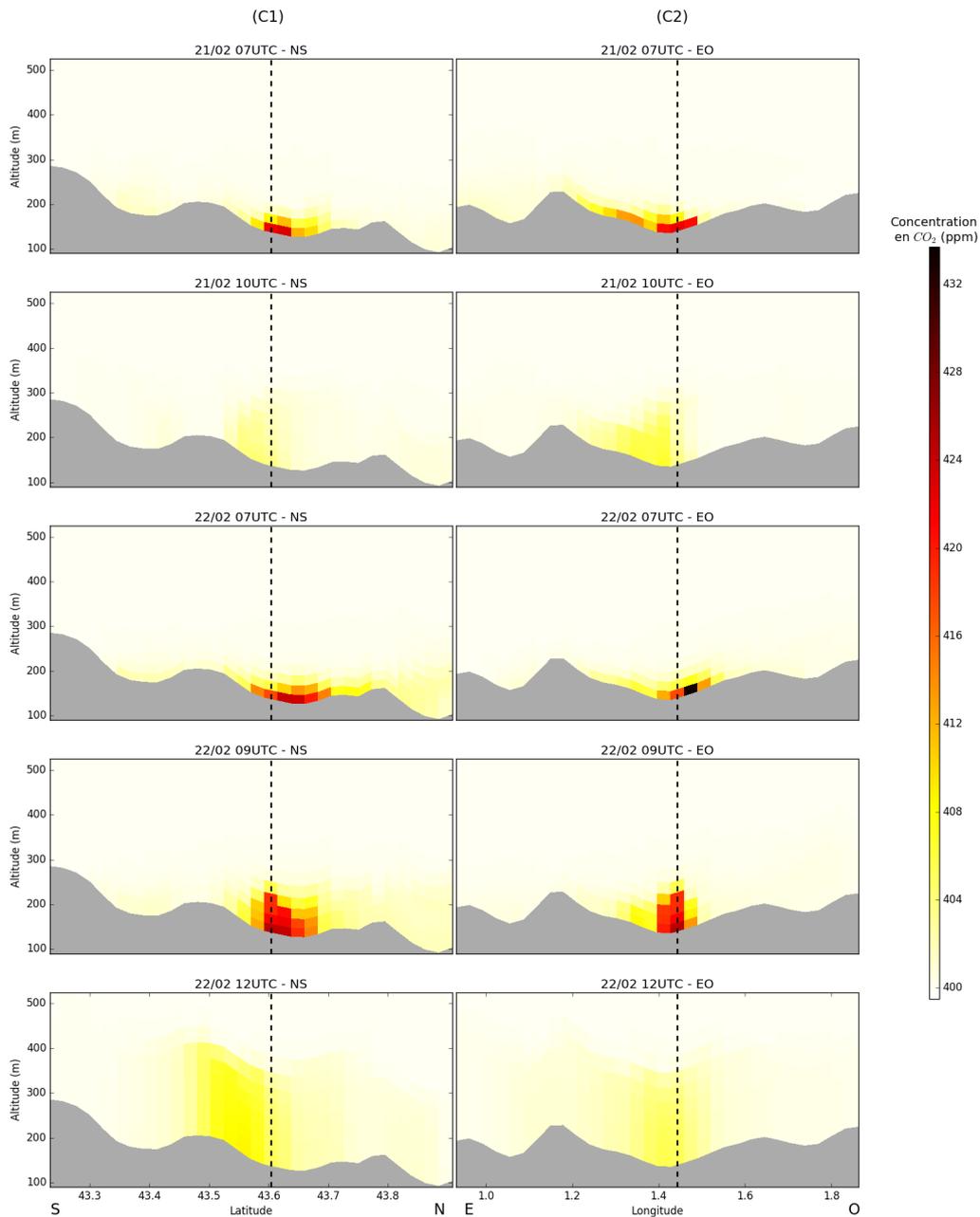


FIGURE 6.19 – Coupes verticales de la concentration en CO₂ modélisée par Meso-NH fils, pour différentes échéances temporelles, pour la configuration REF de SURFEX. Les coupes sont réalisées selon un axe nord-sud (à gauche) et est-ouest (à droite). Les lignes pointillées matérialisent l'emplacement du deuxième axe de coupe.

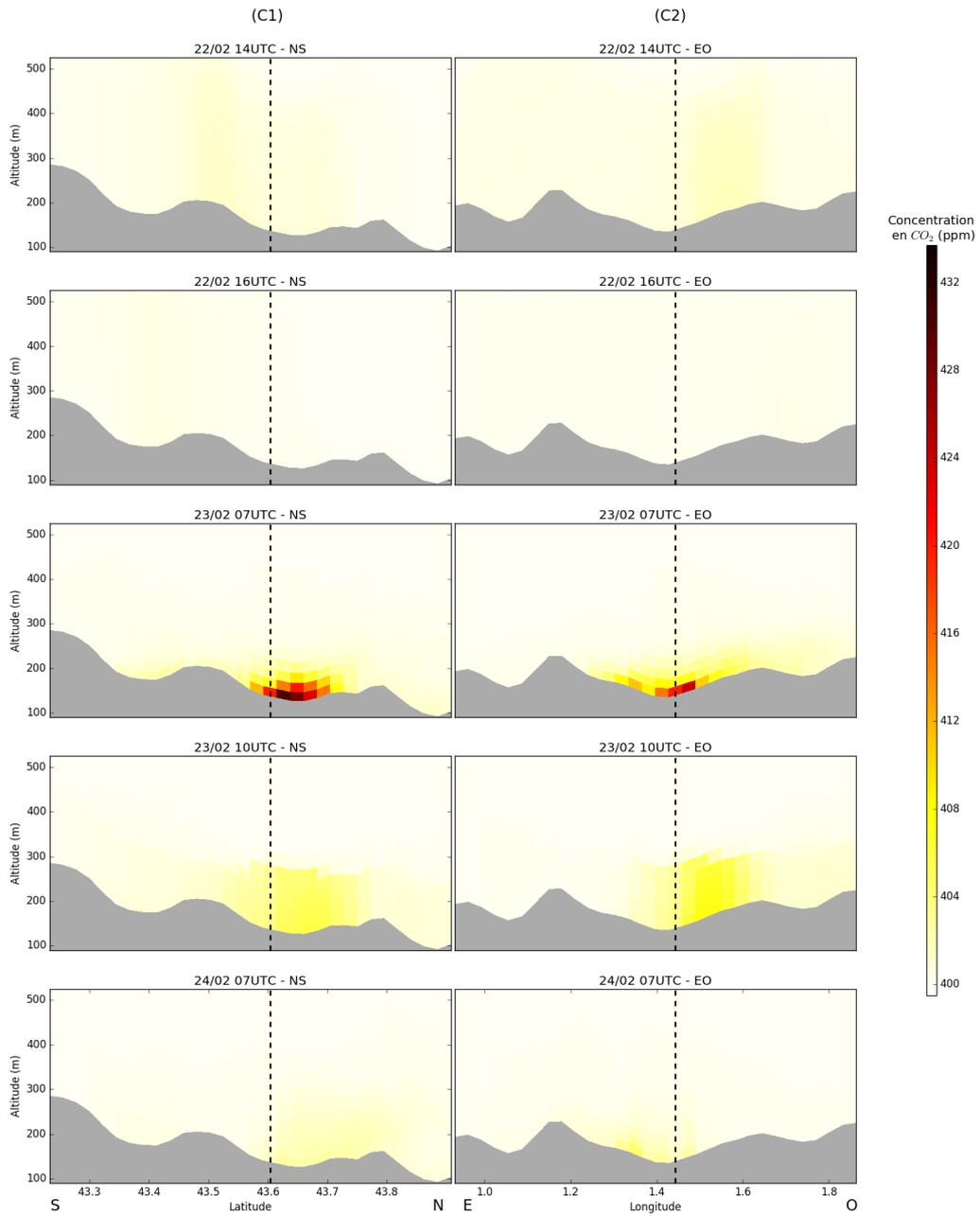


FIGURE 6.20 – Idem Figure 6.19 pour d'autres échéances temporelles.

concentration est maximale vers 7 UTC, puis elle décroît rapidement jusqu'à atteindre un minimum vers 16 UTC, avant d'augmenter progressivement en soirée et dans la nuit, jusqu'en début de matinée. Ce cycle correspond au cycle typique de concentration en CO₂, il est cohérent avec les mesures prises au centre-ville de Toulouse lors de la campagne CAPITOU et au nord de Paris pendant le projet CO₂-MEGAPARIS (Section 2.2.1).

6.3.2.2 Concentration en CO₂ près du sol

L'évolution de l'intensité du panache et les différences d'intensité suivant les configurations de SURFEX sont étudiées en regardant la concentration en CO₂ au premier niveau du modèle (10 m).

L'étude de la **concentration moyenne** montre que la forme générale du panache de CO₂ est similaire pour les trois configurations, mais qu'il existe des différences en matière d'intensité : la configuration DEF simule des concentrations plus élevées que les configurations NOUV_DEF et REF. L'évolution du panache au cours des quatre jours de simulation est la suivante : le jeudi 21 février 2019, la concentration moyenne en CO₂ près du sol reste faible (Figure 6.21). L'emplacement de l'aire urbaine est repérable par une concentration plus élevée de quelques ppm que la concentration de fond (400 ppm). Les 22 et 23 février, l'épisode de pollution est en place. Les concentrations en CO₂ au centre-ville de Toulouse augmentent fortement (une dizaine de ppm). Pendant ces deux jours, le panache de CO₂ reste centré sur la ville. Le dimanche 24, les concentrations simulées sont plus faibles que la veille. On observe un étalement et une dissipation du panache vers le nord-ouest (au nord-ouest de la ville, la concentration en CO₂ est supérieure à la concentration de fond).

En terme de **concentration maximale**, on retrouve les mêmes résultats que pour la concentration moyenne (Figure 6.22).

Quels que soient la configuration et le jour, les valeurs de **concentration minimale** ne dépassent pas 401 ppm, soit seulement 1 ppm de plus que la concentration de fond (Figure 6.23). Le CO₂ est donc évacué d'un jour à l'autre. Ce résultat est cohérent avec les coupes verticales qui montrent que vers 16 UTC la concentration en CO₂ retombe à sa valeur de fond, et ce y compris pendant l'épisode de pollution (Figure 6.20, le 22/02 à 16 UTC).

6.3.2.3 Bilan carbone

Sur l'ensemble de l'épisode, c'est la configuration NOUV_DEF qui simule les plus faibles **émissions de CO₂ par les bâtiments** (9,4 kt de CO₂ sur les quatre jours, cf. Figure 6.24). Elle simule des émissions 7% plus faible que la configuration REF. Les émissions simulées avec DEF sont supérieure de 23% à celles de REF. La hiérarchie des émissions entre les différentes configurations est conservée lorsqu'on décompose les émissions par jour, mis à part pour le premier jour (jeudi 21 février) où les émissions avec la configuration REF sont plus faibles qu'avec la configuration NOUV_DEF.

La seule différence entre les configurations DEF et NOUV_DEF est l'abaissement de 2° C de la température de consigne du chauffage dans les bâtiments la nuit. En faisant la différence entre les résultats des simulations obtenus avec ces deux

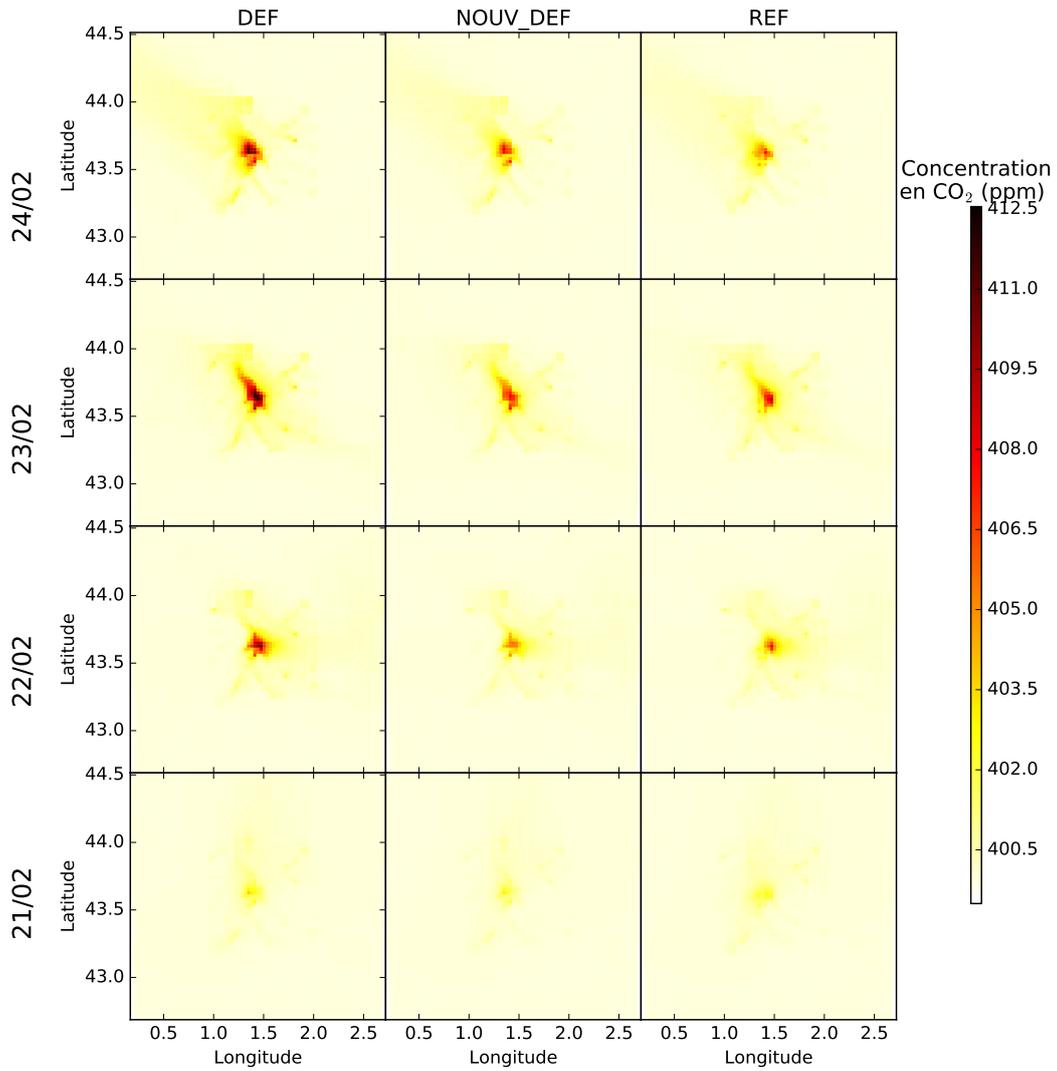


FIGURE 6.21 – Concentration moyenne en CO₂ par jour simulée par Mésos-NH au premier niveau atmosphérique du modèle (10 m au-dessus du sol) pour trois configurations du modèle SURFEX : la configuration historique (DEF), la configuration historique avec une diminution de la température la nuit (NOUV_DEF) et la configuration avec les fractions d'usage et de comportement avec les valeurs ajustées des paramètres (REF).

6.3. ÉTUDE DU PANACHE DE CO₂ ASSOCIÉ AUX BÂTIMENTS

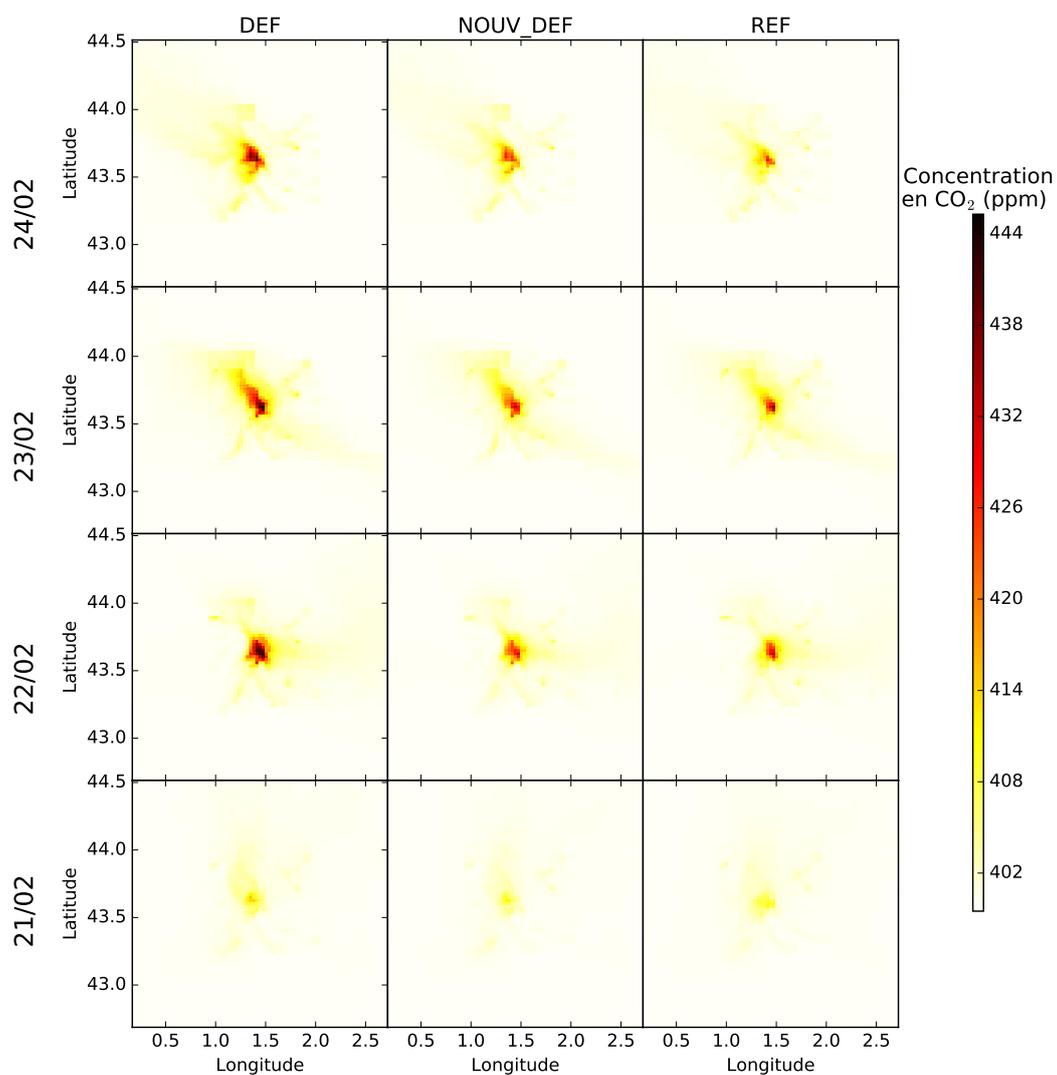


FIGURE 6.22 – Idem Figure 6.21 mais pour la concentration maximale en CO₂. La recherche du maximum est effectuée de manière indépendante pour chaque point. Les valeurs affichées pour deux points différents peuvent donc correspondre à des valeurs rencontrées à des instants différents de la journée.

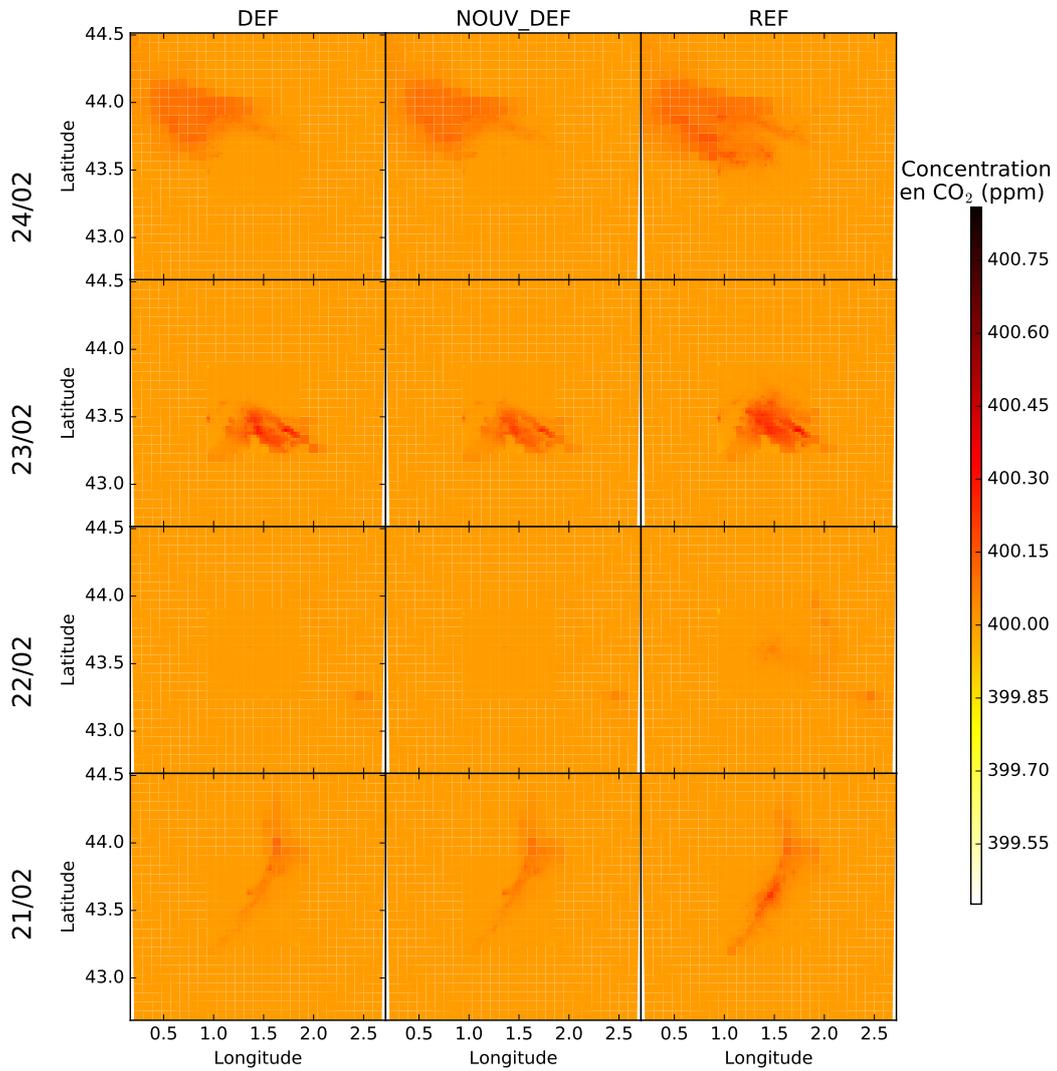


FIGURE 6.23 – Idem Figure 6.21 mais pour la concentration minimale en CO₂.

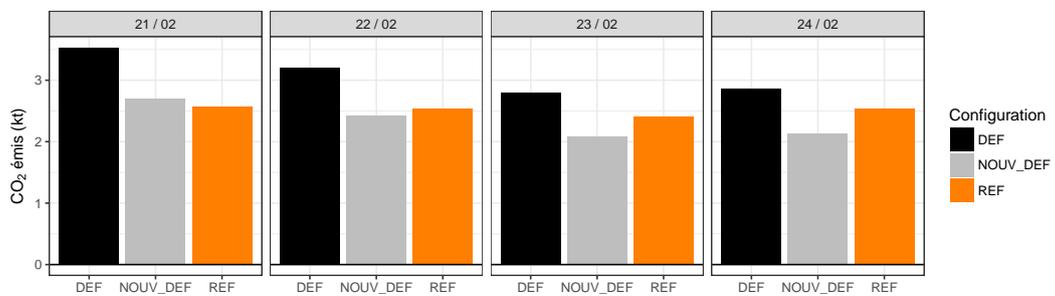


FIGURE 6.24 – Total du CO₂ émis par les bâtiments sur l'ensemble du domaine de simulation (modélisation SURFEX).

6.3. ÉTUDE DU PANACHE DE CO₂ ASSOCIÉ AUX BÂTIMENTS

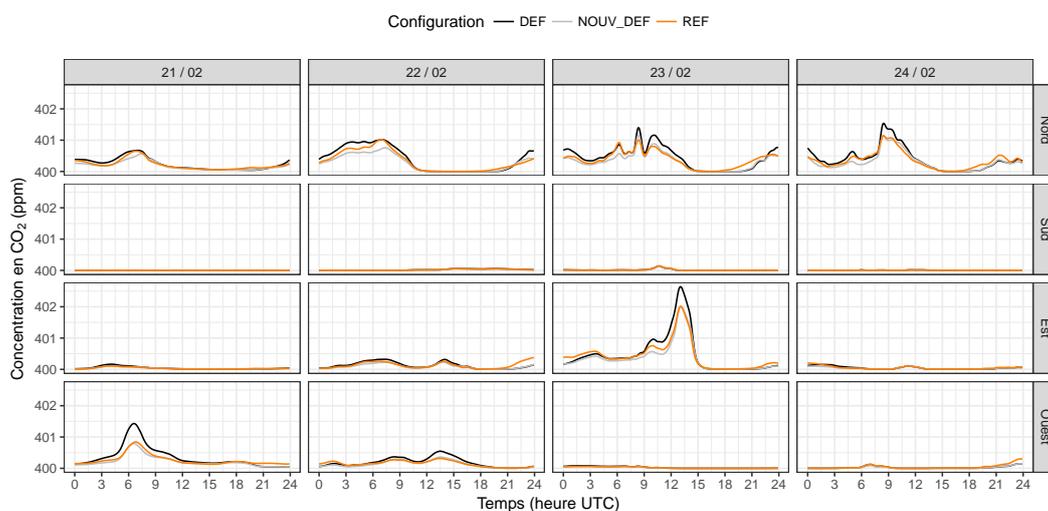


FIGURE 6.25 – Série de concentration de CO₂ modélisée par Méso-NH père sur les bords du domaine de SURFEX.

configurations, on estime que **l'abaissement de la température de consigne entraîne une diminution des émissions de CO₂ associées aux bâtiments de un tiers (33%)** sur l'ensemble de l'épisode, soit l'émission de 3 kt de CO₂ de moins sur les quatre jours.

6.3.3 Comparaison des configurations sur des points d'intérêt

On souhaite étudier plus précisément la diffusion du panache de CO₂ créé par l'agglomération toulousaine vers la campagne environnante. Pour cela, on place **quatre points d'intérêt**, dans les quatre directions cardinales, à 45 km du centre de l'agglomération. Comme ces points sont situés sur des zones non urbanisées aucune émission de CO₂ associée aux bâtiments n'a lieu à proximité. Les points se trouvent aux bords du domaine de SURFEX, en dehors du domaine de Méso-NH fils. On regardera donc la concentration en CO₂ simulée par Méso-NH père.

La **diffusion du panache de CO₂** en basse couche vers la campagne environnante est faible, elle n'est jamais plus de 3 ppm au-dessus de la concentration de fond. Dans l'axe est/ouest, la diffusion du panache est contrôlée par la direction des vents, qui poussent alternativement le panache vers l'est ou l'ouest. En revanche, dans la direction nord/sud, on observe systématiquement une diffusion du panache vers le nord, et très peu, voire pas de diffusion vers le sud. Cette situation s'explique par le relief local : le piémont pyrénéen, situé au sud de Toulouse limite la diffusion du panache de CO₂ vers le sud. En revanche, la diffusion du panache vers le nord est facilitée par une altimétrie de la campagne au nord de Toulouse, plus faible que celle de la ville.

6.4 Discussion

Ce chapitre présente une première étude à l'échelle d'une ville entière, avec l'activation de la modélisation des flux de CO₂ en ville par TEB, et montre ainsi la faisabilité d'une telle étude. La modélisation s'appuie sur la plateforme de modélisation du climat urbain CLUE.

Une étude de sensibilité a été réalisée, pour **tester l'impact du raffinement de la modélisation des bâtiments sur les flux de CO₂ et la concentration en CO₂**. L'étude a montré la forte sensibilité des flux aux comportements des habitants et à l'usage des bâtiments : sur notre cas d'étude, la diminution de 2° C de la température de consigne du chauffage la nuit entraîne une diminution de 33% des émissions de CO₂. En revanche, les différentes configurations de TEB (et donc le raffinement de la modélisation des bâtiments) a peu d'influence sur les concentrations en CO₂. En effet, la trajectoire et l'épaisseur du panache de CO₂ formé par les émissions de la ville sont contrôlés par la circulation atmosphérique (direction et force du vent, stabilité atmosphérique) et le cycle journalier de la concentration en CO₂ près du sol est contrôlée en grande partie par celui de la hauteur de la couche limite (les concentrations sont maximales en fin de nuit/début de matinée, vers 7 UTC).

Dans notre cas d'étude, favorable à la stagnation du CO₂ au-dessus de la ville (vent calme et forte stabilité atmosphérique), le panache de CO₂ créé par la ville est **évacué tous les jours**, vers 16 UTC. Cette évacuation journalière limite l'augmentation de la concentration au-dessus de la ville. De plus, dans le cadre de notre expérience de sensibilité, elle limite également les différences de concentration entre les différentes configurations puisque les différences ne peuvent s'accumuler que sur une journée tout au plus.

Nous ne disposons pas d'observations auxquelles confronter nos résultats de simulation. Néanmoins, on peut affirmer que **les résultats sont cohérents avec les observations de la littérature**. Le rôle prépondérant de la hauteur de la couche limite dans la variation journalière de la concentration en CO₂, ainsi que le minimum de concentration en CO₂ relevé vers 16 UTC, sont des phénomènes qui avaient, par exemple, été identifiés à partir des observations de concentrations en CO₂ dans le cadre du projet CO₂-MEGAPARIS [Xueref-Remy *et al.*, 2018]. De plus, la trajectoire du panache de CO₂ est **cohérente avec l'alerte pollution** puisque c'est lors des deux jours de l'alerte que le panache de CO₂ reste le plus longtemps bloqué au-dessus de la ville.

L'étude de la propagation du panache de CO₂ vers la campagne environnante, à l'aide de points d'intérêts a mis en évidence **l'incidence du relief** dans ce processus : sur notre zone d'étude, la propagation du panache de CO₂ est facilitée vers le nord par un relief moins élevé tandis qu'au sud elle est limitée par le relief du piémont pyrénéen.

Par la suite, afin de vérifier le bon comportement du modèle, il serait souhaitable de mener d'autres études à l'échelle d'une ville entière, qui incluent l'ensemble des contributeurs aux flux de CO₂ en ville : c'est-à-dire non seulement les bâtiments mais aussi la végétation et les sols naturels, le trafic routier et la respiration humaine.

De plus, afin d'évaluer la capacité du système Méso-NH/SURFEX à simuler la concentration en CO₂ au-dessus des villes, il serait souhaitable de confronter les résultats des simulations à des observations. Cette confrontation pourrait être faite, par exemple, en exploitant les données recueillies lors de la campagne CAPITOU sur Toulouse, ou bien pendant le projet CO₂-MEGAPARIS.

Résumé

- Les émissions de CO₂ associées aux bâtiments et simulées par TEB sont comparées pour trois configurations différentes du modèle : DEF (température constante de 19 °C à l'intérieur des bâtiments), NOUV_DEF (température à l'intérieur des bâtiments de 19 °C le jour et 17 °C la nuit) et REF (variation des températures de consigne du chauffage au cours de la journée en fonction de l'usage des bâtiments et du comportement des habitants).
- Les simulations sont effectuées à l'aide de la plateforme CLUE qui, grâce à un couplage original entre les modèles SURFEX et Méso-NH permet d'avoir une description à haute résolution de la surface (500 m) tout en conservant des temps de calcul relativement faibles et une grande extension spatiale des modèles.
- Les résultats des simulations sont exploités sur quatre jours : du 21 au 24 février. Un épisode de pollution hivernal, associé à des conditions de vent calme et une forte stabilité atmosphérique, a eu lieu les 22 et 23 février.
- La configuration de TEB utilisée (DEF, NOUV_DEF ou REF) influence les valeurs de concentrations moyennes et maximales. En revanche, la forme et la trajectoire du panache de CO₂ sont identiques quelle que soit la configuration.
- La forme et la trajectoire du panache de CO₂ sont pilotées par la circulation atmosphérique : les variations de hauteur de la couche limite contrôlent son extension verticale et les vents contrôlent son advection horizontale.

Pour ce qui est de l'avenir, il ne s'agit pas de le prévoir mais de le rendre possible.

Antoine de Saint-Exupéry

Conclusion et perspectives

Conclusion

L'objectif de cette thèse était d'étudier les interactions entre le micro-climat urbain et les échanges de CO₂ entre les surfaces urbaines et l'atmosphère au niveau local (échelle de la ville). Pour cela, **une modélisation des flux de CO₂ en ville a été rajoutée dans le modèle de micro-climat urbain TEB**. Lors du travail de modélisation, une attention particulière a été portée à la modélisation des contributeurs aux flux de CO₂ qui sont météo-sensibles : la végétation et les bâtiments. En effet, les processus qui relient le climat et les flux de CO₂ ont été modélisés explicitement. Les émissions de CO₂ associées aux bâtiments sont calculées à partir de la source d'énergie utilisée et de la consommation énergétique des bâtiments. Cette dernière est calculée en fonction des conditions météorologiques (température, vent) et des températures de consigne du chauffage ou de la climatisation. Les flux de CO₂ associés à la végétation sont calculés en s'appuyant sur le modèle de transfert sol-végétation-atmosphère ISBA, en fonction, entre autre, de la température extérieure, de l'ensoleillement et de l'humidité du sol.

L'évaluation du modèle a montré son **bon comportement général** : on a pu simuler, de manière satisfaisante, les flux de CO₂ mesurés en centre-ville de Toulouse, lors de la campagne CAPITOU, et ceux mesurés dans la zone péri-urbaine de Kumpula, située à Helsinki, en Finlande. Pour les deux sites, les scores du modèle sont très bons : ils sont meilleurs ou comparables à ceux de modèles statistiques de la littérature. Cette performance est à souligner puisque les modèles statistiques sont construits à partir d'observations de flux de CO₂ alors que la modélisation des flux par TEB est indépendante de telles observations.

L'évaluation plus spécifique des flux de CO₂ associés à la végétation a révélé que le modèle ISBA, à l'origine conçu pour modéliser la végétation en zones non urbaines, est capable de modéliser également les flux de CO₂ associés à la végétation urbaine. Cependant, la présente étude a démontré que **des développements supplémentaires seraient nécessaires pour pouvoir représenter correctement la végétation urbaine, en prenant en compte les interactions entre la ville (routes et bâtiments) et la végétation** (option TEB-veg). En effet, pour l'instant, lorsque les interactions ville/végétation sont prises en compte par le modèle la végétation ne peut être représentée que par un seul patch. C'est à dire que l'ensemble de la végétation est modélisé par un seul type de végétation. Or, ce dernier est insuffisant pour représenter à la fois la végétation haute et la végétation basse car celles-ci ont des comportements différents, particulièrement quant à leur stratégie de réponse au stress hydrique. Aussi, au moins deux patches de végétation, et donc la possibilité de modéliser explicitement deux types de végétation différents,

sont nécessaires. Au cours de cette thèse, le comportement du modèle TEB-veg avec plusieurs patches de végétation a été approché en combinant les résultats de deux simulations. Une telle stratégie de modélisation est possible pour réaliser des études de sensibilité, sur un seul point ; en revanche, à terme, elle ne remplace pas l'implémentation du mode multi-patches dans le modèle du fait des sur-coûts de calcul qu'elle entraîne (les coûts de calculs sont, sans ce mode, multipliés par deux puisque l'on doit à chaque fois réaliser deux simulations TEB).

L'évaluation des émissions de CO₂ par les bâtiments a montré **l'importance d'avoir une bonne connaissance de l'usage des bâtiments et des comportements associés de leurs occupants**. En particulier, la prise en compte de l'abaissement de 2 °C de la température de consigne du chauffage la nuit est nécessaire pour pouvoir reproduire les flux de CO₂ mesurés. De plus, les études à l'échelle de la ville, réalisées dans le dernier chapitre, ont montré que cette abaissement de la température avait un impact non négligeable sur la quantité de CO₂ émis par la ville : sur notre cas d'étude, sur l'agglomération toulousaine, la réduction de la température entraîne une diminution de 33% des émissions de CO₂ associées aux bâtiments.

L'évaluation de la modélisation des flux de CO₂ par TEB repose sur la confrontation aux observations. Afin de mieux comprendre les biais et limites des observations de flux de CO₂, la méthodologie d'obtention de ces données a été étudiée en détails. De plus, **une analyse poussée de la qualité et de la représentativité des données a été effectuée pour le site de Toulouse car s'était la première fois que ces mesures de flux étaient exploitées**. L'analyse des flux mesurés au-dessus du niveau des toits, dans la sous-couche inertielle, a permis notamment d'identifier la surface d'influence des données, de mesurer l'impact du phénomène de stockage de CO₂ dans le canyon sur les flux mesurés et de relever que lorsque la surface d'influence est faible, les données sont fortement influencées par la présence de cheminées, et ne peuvent donc être utilisées pour l'évaluation du modèle.

Pour évaluer plus spécifiquement les émissions de CO₂ associées aux bâtiments, une méthode d'estimation de ces émissions, basée uniquement sur les observations a été proposée. Cette méthode consiste à combiner des mesures de flux de CO₂ prises au-dessus des rues, au niveau des toits des bâtiments, avec des mesures classiques de flux, prises dans la sous-couche inertielle. Les mesures prises au niveau des toits des bâtiments sont à la limite des hypothèses théoriques de mesure de flux. Leur exploitation a montré que des traitements spécifiques, non-usuels pour les mesures de flux, devaient leur être appliqués ; à savoir : pas de rotation 2D des données, et suppression des données prises en condition de vitesse verticale moyennée sur 30 minutes trop élevée. Une fois ces traitements effectués, le signal mesuré s'est avéré tout à fait réaliste, et les données ont permis de **confirmer que l'on devait modéliser un abaissement de 2 °C de la température de consigne du chauffage la nuit** pour avoir un bon accord entre les émissions de CO₂ associées aux bâtiments, mesurées et modélisées.

Perspectives

Lors de l'étude sur l'agglomération de Toulouse, les émissions de CO₂ par les bâtiments ont été modélisées en tenant compte des conditions météorologiques. Par la suite, une étude du même type, qui inclut l'ensemble des contributeurs aux flux de CO₂, et en particulier la végétation, qui est le deuxième contributeur météorologique serait souhaitable. Une telle étude permettrait de **modéliser l'ensemble des interactions climat/CO₂ qui existent à l'échelle locale** c'est-à-dire :

- la dépendance, au climat et plus spécifiquement à la température extérieure, des émissions de CO₂ des bâtiments ;
- les dépendances, au climat (température, précipitations, ensoleillement) et à la concentration en CO₂ de l'atmosphère, des flux de CO₂ associés à la végétation ;
- et l'impact de la situation synoptique et du micro-climat urbain sur le transport, à travers l'atmosphère, du CO₂ émis par la ville.

Cette étude a également mis en valeur **l'importance du cycle journalier de la hauteur de la couche limite sur la dissipation du panache de CO₂ créé par la ville**. En effet, dans notre cas d'étude, sous l'effet de l'augmentation de la hauteur de la couche limite, le panache de CO₂ est systématiquement dissipé vers 16 UTC. Il serait intéressant de faire des études sur d'autres villes, avec des circulations synoptiques différentes (ville encaissée, présence d'une brise de mer...) pour voir comment cette dissipation peut être modulée d'une ville à l'autre.

Des simulations, à l'échelle d'une ville entière, en climat futur permettraient d'étudier l'évolution du bilan carbone de la ville avec le changement climatique. En effet, il est presque certain que le bilan carbone des villes va être modifié par cet événement qui entraîne, un réchauffement global des températures, et localement, des modifications des climats locaux, et l'intensification des phénomènes extrêmes. Pour étudier cette problématique, les simulations doivent couvrir une année entière pour tenir compte de la variabilité saisonnière des évolutions. Par exemple, dans le cas d'une ville des moyennes latitudes qui connaît un réchauffement de son climat, le changement climatique va entraîner une diminution des émissions associées aux bâtiments en hiver (chauffage) et une augmentation de ces émissions en été (climatisation). À cela va s'ajouter la modification du bilan carbone de la végétation urbaine qui va évoluer sous l'effet du réchauffement climatique et des variations de la concentration en CO₂ de l'atmosphère.

Effectuer de telles simulations sur une année entière est coûteux en temps de calcul. Les durées des simulations et donc les temps de calculs associés peuvent être réduits par l'utilisation d'une **méthodologie en type de temps** similaire à celle suivie par Schoetter *et al.* [2019a]. Cette méthodologie consiste à classer l'ensemble des situations météorologiques que peut rencontrer une ville en plusieurs types de temps. Les impacts de ces derniers (ICU dans l'article, et flux de CO₂ et transport du panache de concentration en CO₂ dans notre cas) sont ensuite calculés pour chacun des types de temps, en sélectionnant, pour chaque type, un ou plusieurs jours typiques du type de temps en question. Les résultats des simulations sont ensuite agrégés, en pondérant les impacts pour chaque type de temps en fonction

de la fréquence d'occurrence (présente ou future suivant si l'on s'intéresse au climat actuel ou futur) de ces derniers.

Comme l'étude présentée dans le dernier chapitre, de telles simulations pourraient être réalisées avec **la plateforme de modélisation du climat urbain CLUE**. Cela permettrait encore de réduire les coûts de calcul en exploitant le couplage original entre le modèle d'interactions entre la surface et l'atmosphère SURFEX et le modèle de transport atmosphérique Méso-NH qu'offre cette plateforme. Ce couplage permet en effet de proposer une description à haute résolution de la surface, tout en couvrant une grande étendue spatiale qui englobe la campagne environnante (~ 200 km de large) et en conservant des coûts de calcul faibles. La capacité de la plateforme CLUE à simuler l'évolution des villes pourrait également être exploitée : **on pourrait simuler l'évolution du bilan carbone des villes en prenant en compte, non seulement le changement climatique, mais également la croissance des villes**. Dans la plateforme, la croissance des villes s'accompagne de mesures d'évolution telles que la rénovation du bâti ou la création d'espaces verts. Diverses stratégies d'adaptation des villes au changement climatique pourraient ainsi être évaluées en matière d'émissions de CO_2 .

Une partie des perspectives énoncées ci-dessus (modélisation Méso-NH/SURFEX avec l'ensemble des contributeurs aux flux de CO_2 , utilisation des types des temps, évaluation du bilan carbone associé à des stratégies de végétalisation des villes, étude de l'évolution du panache de CO_2 sur une ville avec présence d'une brise de mer) seront mise en œuvre, sur la métropole d'Aix-Marseille, dans le **projet ANR COoL-AMmetropolis** qui débutera en 2020.

À terme, on peut imaginer que la modélisation des échanges de CO_2 entre la ville et l'atmosphère, proposée ici, soit **intégrée dans des modèles de climat**. Ceux-ci prennent déjà en compte, grâce à l'utilisation de systèmes couplés, les rétroactions entre le CO_2 , les océans et la végétation. L'inclusion de la modélisation des échanges de CO_2 entre les villes et l'atmosphère dans les modèles de climat permettrait de modéliser de façon explicite l'ensemble de la boucle de rétroaction entre le CO_2 et le climat : les émissions et captations de CO_2 en ville dépendent des conditions climatiques locales. En retour, elles participent à la modification du climat à l'échelle globale qui modifie également le climat local.

A

Caractéristiques des types de végétation dans TEB-veg

Symbole	Unité	Description
g_m^*	mm s^{-1}	Conductance mésophyllienne
g_c	mm s^{-1}	Conductance cuticulaire
τ_M	jours	Espérance de vie maximale
e	$\text{m}^2 \text{kg}^{-1} \%^{-1}$	Sensibilité du LAR* à la concentration en azote
f	$\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$	Valeur minimale létale du LAR*
N_a	%	Concentration en azote de la biomasse active
α_{PIR}	-	Albédo dans le proche infra-rouge
α_{VIS}	-	Albédo dans le visible
α_{UV}	-	Albédo dans l'ultra-violet
A_{max}	$\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$	Assimilation maximale de CO_2 par les feuilles à 25 °C
Wr_{max_cf}	kg m^{-2}	Quantité maximale d'eau de pluie que peut intercepter la végétation
CV	$\text{K m}^2 \text{MJ}^{-1}$	Inverse de la capacité thermique de la végétation

* Leaf Area Ratio, surface de feuille par unité de biomasse aérienne

Tableau A.1 – Liste des caractéristiques de la végétation utilisées dans ISBA-A-gs

ANNEXE A. CARACTÉRISTIQUES DES TYPES DE VÉGÉTATION DANS
TEB-VEG

Type	g_m^*	g_c	τ_M	e	f	N_a
Végétation haute						
TEBD	1,8	0,15	230	4,83	2,53	2,0
BONE	1,9	0,00	365	4,85	-0,24	2,8
TRBE	1,2	0,15	365	4,83	0,12	1,7
TRBD	1,2	0,15	230	4,83	2,53	2,0
TEBE	1,9	0,15	230	4,83	2,53	2,0
TENE	1,9	0,00	365	4,85	-0,24	2,8
BOBD	1,8	0,15	230	4,83	2,53	2,0
BOND	1,2	0,00	365	4,85	-0,24	2,0
SHRB	1,6	0,15	230	4,83	2,53	2,0
Végétation basse						
C3	1,75	0,25	150	3,79	9,84	1,3
C4	9,8	0,15	150	7,68	-4,33	1,9
IRR	9,8	0,15	150	7,68	-4,33	1,9
GRAS	1,0	0,25	150	5,56	6,73	1,3
BOGR	1,0	0,25	150	5,56	6,73	1,3
TROG	6,0	0,15	150	7,68	-4,33	1,3
PARK	1,0	1,00	150	5,56	6,73	1,3
Type	α_{PIR}	α_{VIS}	α_{UV}	A_{max}	Wr_{max_cf}	CV
Végétation haute						
TEBD	0,25	0,05	0,0525	1,3	0,1	10
BONE	0,25	0,05	0,0425	1,4	0,1	10
TRBE	0,25	0,05	0,0380	0,484	0,1	10
TRBD	0,25	0,05	0,0525	0,9	0,1	10
TEBE	0,25	0,05	0,0525	1,3	0,1	10
TENE	0,25	0,05	0,0425	1,4	0,1	10
BOBD	0,25	0,05	0,0525	1,3	0,1	10
BOND	0,25	0,05	0,0525	0,9	0,1	10
SHRB	0,25	0,05	0,0525	1,2	0,1	10
Végétation basse						
C3	0,3	0,1	0,06	2,2	0,2	20
C4	0,3	0,1	0,06	1,7	0,2	20
IRR	0,3	0,1	0,0450	1,7	0,2	20
GRAS	0,3	0,1	0,08	1,7	0,2	20
BOGR	0,3	0,1	0,08	1,7	0,2	20
TROG	0,3	0,1	0,125	1,7	0,2	20
PARK	0,3	0,1	0,045	1,7	0,2	20

Tableau A.2 – Valeurs des paramètres de ISBA-A-gs pour les différents types de végétation ECO-CLIMAP disponibles dans TEB-veg.

B

Paramètres pour la simulation du cas CAPITOU

Cette annexe spécifie les valeurs des paramètres utilisés pour la simulation du cas CAPITOU. Le Tableau B.1 regroupe les paramètres relatifs aux caractéristiques du trafic routier, le Tableau B.3 ceux relatifs aux caractéristiques de la végétation et le Tableau B.2 ceux relatifs aux matériaux de construction et à leurs caractéristiques physiques.

Tableau B.1 – Caractéristiques du trafic. Les coefficients moyens d'émission sont calculés à partir des coefficients d'émission donnés par Hugrel et Joumard [2006].

Flux annuels moyens	
Flux latent LE	$0,8 \text{ W m}^{-2}$
Flux sensible H	8 W m^{-2}
Flux de CO_2	$5,6 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Coefficients moyens d'émission	
Chaleur latente	471 kJ km^{-1}
Chaleur sensible	4709 kJ km^{-1}
CO_2	$0,33 \text{ kg km}^{-1}$

Tableau B.2 – Caractéristiques architecturales des bâtiments. Les données proviennent de la base de données sur les archétypes de bâtiments français produite par Tornay *et al.* [2017].

Matériau	Épaisseur (m)	Conductivité thermique ($W m^{-1}K^{-1}$)	Capacité thermique ($J kg^{-1}K^{-1}$)	Densité ($kg m^{-3}$)	Albédo	Émissivité
Mur	0,6	0,71	840	1500	0,35	0,9
Revêtement du toit	0,02	1,00	837	1700	0,25	0,8
Couche interne du toit	0,02	0,21	850	900	-	0,9
Plancher intermédiaire	0,03	0,23	1600	810	-	0,85

Type de vitrage	Fraction de vitrage	U-Value ($W m^{-2}K^{-1}$)	Coefficient d'apports solaires
Simple vitrage	0,1	4,95	0,6

Tableau B.3 – Caractéristiques de la végétation.

Paramètre	Valeur
Fraction de végétation haute	0,98
Fraction de végétation basse	0,01
Fraction de sol nu	0,01
Indice de surface foliaire pour la végétation haute	3,5
Indice de surface foliaire pour la végétation basse	1,0
Hauteur des arbres	15 m
Taux de respiration de l'écosystème à 25 °C	$2.2 \times 10^{-7} kg m^{-2} s^{-1}$
Conductance cuticulaire	0.15 mm s ⁻¹
Conductance mésophylle (en l'absence de stress hydrique)	1 mm s ⁻¹
Valeur maximale du déficit de saturation toléré par la végétation (en l'absence de stress hydrique)	0.1 kg kg ⁻¹
Espérance de vie effective maximale	365 jours



Inclusion of CO₂ flux modelling in an urban canopy layer model and an evaluation over an old European city centre



Marine Goret^{a,*}, Valéry Masson^a, Robert Schoetter^a, Marie-Pierre Moine^b

^aCNRM, Université de Toulouse, Météo-France, CNRS, 42 avenue Gaspard Coriolis, 31057, Cedex 1, Toulouse, France

^bCERCI, Université de Toulouse, CERFACS/CNRS, 42 avenue Gaspard Coriolis, 31057, Cedex 1, Toulouse, France

ARTICLE INFO

Keywords:
CO₂ fluxes
Eddy covariance
Cities
Urban canopy layer model
Model evaluation

ABSTRACT

In the context of climate change, the reduction of greenhouse gas emissions is a global concern. Recent publications estimate that 30–40% of total anthropogenic greenhouse gases are directly emitted by urban areas. This paper focuses on CO₂, which is the main anthropogenic greenhouse gas, and presents an implementation of CO₂ flux modelling in urban areas within the urban canopy model Town Energy Balance (TEB). Highly weather-dependent contributors to CO₂ fluxes (buildings and vegetation) are explicitly modelled by TEB using the Building Energy Model (BEM) for buildings and Interactions between Soil, Biosphere and Atmosphere (ISBA) for urban vegetation. This approach allows the impacts of the urban microclimate on CO₂ fluxes to be simulated. Non-weather-dependent contributors (traffic and human respiration) are simulated using simpler approaches. A sensitivity study applied to the centre of Toulouse, France, highlights the relevance of detailed input data related to traffic, building use and human behaviour to simulate accurate CO₂ fluxes. The results show that traffic (48.5%) and buildings (42%) are the main contributors to the annual mean CO₂ flux. A comparison of the model results with independent eddy-covariance flux data shows good agreement with a root mean square error of 15.3 μmol m⁻² s⁻¹ and demonstrates that the model is able to reproduce seasonally averaged daily cycles of CO₂ fluxes. In future studies, this model can be used to quantify the impacts on CO₂ fluxes of different urban development scenarios such as urban expansion, changes in urban form, changes in practices related to the heating of buildings or urban greening strategies.

1. Introduction

The quantity of anthropogenic greenhouse gases (GHGs) released into the atmosphere has greatly increased during the past decades. It increased by 2.2% per year between 2000 and 2010 to reach approximately 50 GtCO₂ equivalent per year in 2010 (Edenhofer et al., 2014). The contribution of cities is important because the GHGs they locally emit represent 30–40% of the total anthropogenic GHGs (Satterthwaite, 2008). The contribution of cities is even larger if we also consider remote emissions (for example, GHGs released in rural areas for the production of electricity used in cities). Hereafter, we aim to quantify only local emissions because the present study uses in-situ data from a field campaign. This paper focuses on the main anthropogenic GHG, CO₂.

Building inventories are a reference method used to estimate CO₂ emissions/uptake (Moriwaki and Kanda, 2004). Such inventories are based on bottom-up approaches, in which emission factors are applied to activity data or fuel consumption in different sectors. Inventories are

widely used, and there exist guidelines to construct official inventories (Eggleston et al., 2006; U.S. Environmental Protection Agency, 2016). Inventory methods perform well when estimating CO₂ emissions related to fuel combustion but are less relevant when evaluating the vegetative contribution to CO₂ fluxes. Even with a precise characterisation of the vegetation (e.g. biomass density, evergreen/deciduous and high/low vegetation), only a coarse estimation of CO₂ emissions and uptake can be made. Because vegetation growth and behaviour are strongly weather dependent, a more precise estimate would require knowing the weather conditions, which are not considered in inventory methods. Another drawback of inventory methods is that they are sensitive to the quality of the baseline data and to their spatial and temporal resolutions. Inventories are usually retrieved at an annual scale and for a neighbourhood or an entire city.

CO₂ fluxes can also be estimated via direct measurements using eddy-covariance flux measurements. Historically, the eddy-covariance method was first used in rural environments. It is a well-established method in such environments for which there exist worldwide networks

* Corresponding author.
E-mail address: marine.goret@meteo.fr (M. Goret).

<https://doi.org/10.1016/j.aeoa.2019.100042>

Received 12 September 2018; Received in revised form 11 June 2019; Accepted 16 June 2019

Available online 28 June 2019

2590-1621/© 2019 The Authors. Published by Elsevier Ltd. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

using standard procedures (Baldocchi et al., 2001). In urban areas, it is a newer method; however, the number of eddy-covariance flux measurements has grown rapidly during the last 20 years (Vogt et al., 2006; Björkegren and Grimmond, 2018; Stagakis et al., 2019). CO₂ fluxes measured via eddy covariance are representative of the neighbourhood scale. Eddy-covariance and inventory methods usually show good agreement in their estimated CO₂ fluxes (Björkegren and Grimmond, 2018).

The eddy-covariance method allows investigations of the daily cycle of CO₂ fluxes, which is not possible with inventory methods. Such investigations highlight the predominance of human activities when explaining the daily cycle of CO₂ fluxes in urban areas, for example, there are large differences between weekdays and weekends (Järvi et al., 2012; Velasco et al., 2014; Björkegren and Grimmond, 2018). Further, the daily cycle in an urban area is substantially different from that in a rural area. In rural areas, CO₂ assimilation by vegetation leads to negative fluxes around midday, whereas in urban areas, the flux remains positive most of the time because the vegetative uptake is outweighed by anthropogenic CO₂ emissions (Kordowski and Kuttler, 2010; Crawford et al., 2015).

Using the eddy-covariance method, it is possible to measure CO₂ fluxes with a high spatiotemporal resolution; however, unlike inventory methods, the decomposition of the total flux per source and sink remains unknown. Eddy-covariance measurements can be combined with inverse modelling to estimate the decomposition and identify the importance of the different contributors to the total flux and their temporal variability. Nemitz et al. (2002) and Liu et al. (2012) highlighted the importance of traffic. In mid-latitude cities, the contribution from buildings can also be very large due to space heating (Moriwaki and Kanda, 2004; Vesala et al., 2008a; Kordowski and Kuttler, 2010), inducing a large seasonal variability in the CO₂ fluxes. The significance of buildings is highly dependant on the climatology; in tropical and subtropical cities (Weissert et al., 2016; Roth et al., 2017) as well as in some Mediterranean cities (Stagakis et al., 2019), the contribution from buildings is low and the seasonal variability is very low. The importance of urban vegetation for CO₂ fluxes strongly depends on the vegetation plan area density and characteristics. Human respiration also contributes to urban CO₂ fluxes. This is usually calculated from the night-time population density and the mean respiration rate per person (Moriwaki and Kanda, 2004). This approach does not consider the spatiotemporal fluctuation of people between night and day.

To summarise, inventory methods are reputed to estimate the CO₂ fluxes; however, the quality and the spatiotemporal resolution of the evaluation depends on those of the baseline data. Direct measurements of CO₂ fluxes with a high temporal resolution are possible with eddy-covariance methods. Inverse modelling combined with eddy-covariance measurements allows a better understanding of the CO₂ fluxes over urban areas and the ability to identify the main sources and sinks. However, the installation of eddy-covariance systems and their long-term maintenance are expensive and the results are only representative of the neighbourhood scale. In this context, modelling is a promising opportunity to estimate CO₂ fluxes at different time scales (e.g. hourly, daily, monthly and annually) and spatial scales (e.g. neighbourhood and city) at a lower cost.

The present study proposes to include the modelling of sources and sinks of CO₂ (i.e. buildings, traffic, urban vegetation and human respiration) in the urban canopy model Town Energy Balance (TEB) (Masson, 2000). Two factors are identified to explain CO₂ flux variability in urban areas: the variability of human activities and the meteorological conditions. The former is taken into account via schedules of the traffic, human respiration and building contributions. The link between the urban microclimate and the CO₂ fluxes is explicitly modelled using actual meteorological conditions. Building emissions are calculated using the Building Energy Model (BEM) included in TEB, and urban vegetation emissions and uptakes are modelled via the Interactions between Soil, Biosphere and Atmosphere (ISBA) model. Both ISBA

and BEM consider the prevailing meteorological conditions in the urban canyon, as modelled by the TEB meteorological observations above the rooftop level.

Very few studies have investigated CO₂ fluxes using a modelling approach. Soegaard and Møller-Jensen (2003) proposed a model for vegetation; however, other contributors to CO₂ fluxes are estimated via inverse modelling. Christen et al. (2011) gathered four independent sub-models to obtain a complete modelling of the CO₂ fluxes. Climatic conditions were considered by the building sub-model but only at a monthly resolution; conversely, we use meteorological data with a 5-min time step. Respiration modelling requires soil temperatures and soil volumetric content observations that, in our approach, are modelled via ISBA. At an annual and monthly scale, the Christen et al. (2011) model is in good agreement with CO₂ fluxes measured using the eddy-covariance method. To our knowledge, our study is the first to propose a modelling of the CO₂ fluxes that fully captures the link between the urban microclimate and the CO₂ fluxes.

In the following, Section 2 presents the CO₂ flux modelling strategy we adopted and developed. Section 3 introduces the measurements used for the model evaluation and the way that they have been processed and exploited. The model results are discussed in Section 4, and conclusions are drawn in Section 5.

2. Implementation of CO₂ fluxes in Town Energy Balance (TEB)

TEB is a surface energy balance model that is able to describe surface-atmosphere interactions in urban areas at a horizontal resolution of 100 m to a few kilometres. The urban surface is described by a representative street canyon, and the energy budget is solved on the different urban facets (i.e. walls, roof, road and urban vegetation). TEB is forced using meteorological data representative of the air above the roof level. It is part of SURFEX (SURFace EXternalisée in French) (Masson et al., 2013), a surface model that simulates surface-atmosphere interactions for different types of surfaces (i.e. urban areas, natural land covers, rivers and lakes, and oceans).

The reference version of TEB used here is described by Schoetter et al. (2017) and is an improved version of the model implemented in SURFEX-v7.3. It includes a modelling of the building energy demand by BEM (Bueno et al., 2012; Pigeon et al., 2014) with a parameterisation of a variety of human behaviours introduced by Schoetter et al. (2017). The urban vegetation is described by the ISBA model (Noilhan and Planton, 1989). The ISBA model is forced by the meteorological conditions inside the street canyons simulated by TEB following the approach of Lemonsu et al. (2012).

In the following subsections, we detail our strategy to model the CO₂ fluxes in TEB for the main sources and sinks of CO₂, which are buildings, urban vegetation, traffic and human respiration. The contributions from buildings and urban vegetation are modelled in detail because they depend on the prevailing meteorological conditions. Our modelling approach allows the impacts of the urban climate on the CO₂ fluxes due to buildings and urban vegetation to be considered. The models of traffic and human respiration are simpler because these contributions only slightly depend on the meteorological conditions.

2.1. Buildings

CO₂ fluxes due to buildings are a consequence of the energy consumption in the buildings. The relationship between the energy consumption and the CO₂ fluxes depends on the energy source. We adopt the following general modelling strategy: first, we calculate the energy consumption for each source of energy (SOE), and then we convert this energy into a CO₂ flux.

Four sources of energy are defined in the model:

- sources that do not eject any CO₂ or water vapour locally (electricity and urban heating networks), hereafter referred to as ELEC;

- gas, hereafter referred to as GAS;
- fuel oil, hereafter referred to as FUEL; and
- other sources (mainly wood), hereafter referred to as OTHER.

Energy consumption and CO₂ fluxes are linked by emission factors that represent the mass of the CO₂ emitted locally per Joule of consumed energy. Default values of the emission factors depending on the SOE are given in Table 1.

The energy consumption is estimated by BEM, which is included in TEB. It calculates the energy consumed for space heating and air conditioning as a function of the prevailing meteorological conditions, the characteristics of the building envelope (e.g. the presence of insulation materials) and the building use and human behaviour (e.g. the temperature setpoint for heating). The BEM also takes into account heat release due to cooking, electrical appliances and lighting.

We improved the BEM by adding a representation of the energy use for domestic warm water in order to calculate the related CO₂ emissions. For the sake of simplicity, we assumed that there is no heat exchange between buildings and domestic warm water. The energy demand for domestic warm water per square meter needs to be specified by the user, the default BEM value is zero. The need for energy for warm water decreases during the night, with the same modulation as the internal heat release due to cooking and electrical appliances.

The total CO₂ fluxes due to buildings (F_{CO_2bld}) is modelled as the sum of the contributions from heating (F_{CO_2heat}) and domestic warm water (F_{CO_2hw}):

$$F_{CO_2bld} = F_{CO_2heat} + F_{CO_2hw}. \quad (1)$$

Air conditioning is not considered because we assume that it is entirely electric. Building energy demands not related to heating, ventilation and air conditioning (non-HVAC) are also assumed to be entirely electric. This leads to a slight underestimation of the CO₂ fluxes because cooking appliances may use gas or fuel instead of electricity. This approximation is acceptable because the energy consumption due to cooking is usually small compared to heating energy consumption (less than 10% in France¹). However, this value is only valid in France and could vary for countries with different climates (Velasco et al., 2013) or socio-economic contexts.

Fractions of buildings heated by a given source of energy (f_{SOE}) are introduced as new input parameters in TEB for the modelling of CO₂ fluxes due to heating. f_{SOE} are relative to the energy demand and not the energy consumed. The efficiency of the heating system (η_{SOE}) is used to relate the energy demand and the energy consumption:

$$F_{CO_2heat} = Q_{heat} * \left(\sum_{SOE} f_{SOE} * \frac{EF_{SOE}}{\eta_{SOE}} \right), \quad (2)$$

where Q_{heat} is the energy demand for heating per square meter of building.

The main sources of energy for domestic warm water are gas and electricity. The fraction of water heated by gas can be provided to TEB by the user; the default value is set to zero. We assume that the remaining part is heated via electricity:

$$F_{CO_2hw} = Q_{hw} * N_{floor} * \left(f_{HW_GAS} * \frac{EF_{GAS}}{\eta_{GAS}} + (1 - f_{HW_GAS}) * \frac{EF_{ELEC}}{\eta_{ELEC}} \right), \quad (3)$$

where Q_{hw} is the energy demand for domestic warm water per square meter of floor. The efficiencies are assumed to be the same for heating systems and water heaters.

We also introduced a calculation of the latent heat emissions due to space heating in the buildings. Details are given in Appendix A.

Table 1

Characteristics of heating systems by source of energy. The values for the emission factors are taken from ADEME (the French Agency for Environment and Energy Management) (Chêne-Pezot, 2005). The efficiency is defined as the ratio between the useful energy and the total available energy (sensible heat and latent heat). HHV/LHV is the ratio between the Higher Heating Value and the Lower Heating Value (see Appendix A). It matches the ratio between the total quantity of energy (latent and sensible) and the quantity of sensible energy contained in a source of energy.

Source of energy (SOE)	Emission factor (kgCO ₂ /J) (EF)	Efficiency (η)	HHV/LHV
ELEC	0	1.0	1.00
FUEL	5.7×10^{-8}	0.7	1.11
GAS	7.5×10^{-8}	0.7	1.07
OTHER	9.2×10^{-8}	0.7	1.11

2.2. Vegetation

We use the approach introduced by Lemonsu et al. (2012) to describe the in-canyon urban vegetation. The ISBA model (Noilhan and Planton, 1989) is called from within TEB, which means that the interactions between the meteorological conditions in the street canyon and the urban vegetation are explicitly taken into account. The soil is described using the multilayer diffusion scheme of ISBA (Boone et al., 2000; Decharme et al., 2011). The ISBA model follows a big leaf approach. We distinguish three patches: bare ground, low vegetation and high vegetation. Several vegetation types are available for each patch. The vegetative characteristics are adjusted as a function of the vegetation type.

The daily cycles of the carbon and water vapour fluxes between the vegetation and the air in the street canyon are simulated using the CO₂ responsive A-gs version of ISBA (Calvet et al., 1998, 2004). The CO₂ fluxes are calculated as the difference between assimilation due to photosynthesis and release due to respiration.

Photosynthesis constitutes the net CO₂ assimilation of the canopy. CO₂ assimilation is first estimated at the leaf level. The assimilation depends on the CO₂ concentration in the prevailing air, the skin temperature of the plant and the photosynthetically active radiation (PAR). No distinction between direct and diffuse radiation is made here; the PAR at the top of the vegetation canopy is derived from the incident down-welling solar radiation with a constant factor of 0.48. The influence of droughts is taken into account via different modelling strategies depending on the vegetation height (low or high vegetation) and the way the vegetation deals with moisture stress (drought avoiding or drought tolerant) (Calvet, 2000; Calvet et al., 2004). The net assimilation of the vegetation canopy (photosynthesis) is calculated by integrating the net CO₂ assimilation at the leaf level using a three-point Gauss quadrature method. For this integration, we assume that the vertical distribution of leaves is homogeneous and that wet leaves (after rainfall) do not assimilate CO₂.

The ecosystem respiration R_e is calculated using a Q_{10} model based on Van't Hoff's equation, with a reference temperature of 25°C:

$$R_e = Re_{25} * f(w_g) * Q_{10}^{(T_{soil}-25)/10}. \quad (4)$$

Here, Q_{10} is set to 2.0. T_{soil} is the temperature in degrees Celsius of the root-zone soil layer. Re_{25} , the reference respiration rate of the ecosystem at 25°C, needs to be specified by the user. $f(w_g)$ is a scale factor that takes into account the effect of the soil moisture (Albergel et al., 2010). It is calculated as

$$f(w_g) = \min(1, w_g/w_{fc}), \quad (5)$$

where w_g is the soil moisture and w_{fc} is the soil moisture at field capacity.

The leaf area index evolves during the simulation depending on the biomass evolution due to the photosynthetic activity (Calvet and Soussana, 2001). Three biomass pools are considered: the leaf biomass,

¹ Données statistiques du CEREN 2015 [2015 Statistical data from CEREN].

the active structural biomass and the below ground structural biomass. The effects of nitrogen dilution are taken into account.

2.3. Traffic

The CO₂ fluxes due to traffic are modelled using a simpler approach than the CO₂ fluxes due to buildings and urban vegetation because we assume that the meteorological conditions are not a key factor in explaining the spatiotemporal variability of traffic.

The user needs to provide the annual mean value of the CO₂ fluxes due to traffic for each grid mesh; this value is modulated as a function of the hour of the day, the day of the week and the month of the year (Equation (6)).

$$F_{CO_2tr}(m, d, h) = \overline{F_{CO_2tr}} * M_{tr}^y(m) * M_{tr}^w(d) * M_{tr}^d(h) \quad (6)$$

Here, F_{CO_2tr} denotes the CO₂ flux due to traffic, $\overline{F_{CO_2tr}}$ is its annual mean value and $M_{tr}^y(m)$, $M_{tr}^w(d)$ and $M_{tr}^d(h)$ are the modulation factors as a function of the month of the year, the day of the week and the hour of the day, respectively.

By default, the modulation is based on the solar time; however, it can be expressed as a function of the legal time if the latter is provided. There are default values for the modulation factors; however, we advise users to provide site-specific values to represent a spatiotemporal variability of the traffic-related CO₂ flux that is as detailed as possible.

We modified the existing approach for the calculation of the sensible and latent heat fluxes due to traffic to be more consistent. It is now similar to the approach followed for the CO₂ fluxes.

2.4. Human respiration

Human respiration can be an important source of CO₂ in urban areas. [Moriwaki and Kanda \(2004\)](#) reported that, in one residential area of Tokyo, human respiration accounted for 38% of the total CO₂ flux in summer and 17% of the total in winter.

The amount of CO₂ exhaled by one person depends on the person's activity level and physical characteristics. Here, we take the population average value of the CO₂ emission rate given by [Moriwaki and Kanda \(2004\)](#), which is 8.87×10^{-6} CO₂ kg/s/person. This average emission rate is multiplied by the population density to obtain the total CO₂ flux due to human respiration. The population density can be modulated depending on the hour of the day, the day of the week and the month of the year, as in the case of traffic. The CO₂ flux due to human respiration (F_{CO_2hr}) is expressed as

$$F_{CO_2hr}(m, d, h) = \overline{P_{dens}} * M_{hr}^y(m) * M_{hr}^w(d) * M_{hr}^d(h) * E_{hr}^{CO_2}, \quad (7)$$

where $\overline{P_{dens}}$ indicates the average population density and $M_{hr}^y(m)$, $M_{hr}^w(d)$ and $M_{hr}^d(h)$ indicate the modulation factors as a function of the month of the year, the day of the week and the hour of the day, respectively.

3. The CAPITOU campaign

The Canopy and Aerosol Particle Interactions in the Toulouse Urban Layer (CAPITOU) campaign took place in Toulouse between February 2004 and February 2005. Toulouse is located in the southwest of France. It is influenced by both the Atlantic Ocean (230 km to the west) and the Mediterranean Sea (150 km to the southeast). The Pyrenees Mountains are located 80 km south of Toulouse. Winters are mild, and summers hot and dry. Here, we focus on measurements taken in the city centre of Toulouse, at the Monoprix site. Details concerning the campaign and its instrumentation can be found in [Masson et al. \(2008\)](#). [Fig. 1](#) shows an aerial view of the site. The neighbourhood matches LCZ 2 ([Stewart and Oke, 2012](#)) with primarily 4–5 storey brick buildings and little vegetation. We first describe the CO₂ flux measurements in detail (data processing, representativeness and uncertainties) and then

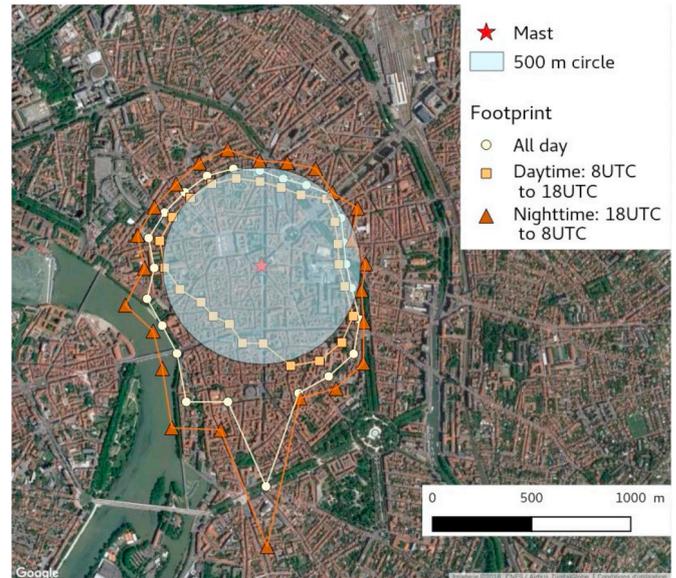


Fig. 1. Mean 80% fetch per direction (15° bins) for the CO₂ fluxes measured on the mast.

the dataset used for the model evaluation.

3.1. CO₂ flux measurements

3.1.1. Data processing

The CO₂ fluxes were measured using the eddy-covariance technique. An open-path LICOR-7500 combined with a GILL sonic anemometer measured the fluxes at the top of a pneumatic tower installed on the roof of a 20-m-high building (the Monoprix site). The eddy-covariance measurement device was located 48.05 m above ground level and was lowered to 38.23 m during strong wind events ([Appendix D](#)).

For the purpose of this study, several corrections were applied to the raw measurement data. Air density fluctuations were taken into account via the Webb correction ([Webb et al., 1980](#)). Isolated peak values of the wind speed and the CO₂ concentration were removed. A peak value is characterised by a difference between the actual value and the average of the previous and next values of more than 30 m s⁻¹ (at 50 Hz) for the wind speed and 28 ppm (at 20 Hz) for the CO₂ concentration. We also used a spike removal algorithm. The moving average and moving standard deviations were calculated with time intervals of 200 s for the wind speed and 60 s for the CO₂ concentration. Measurements were removed if the deviation from the mean was greater than seven standard deviations for the wind and four standard deviations for the CO₂ concentration. The lag between the anemometer and the LICOR was corrected. A high-pass filter with a cutoff frequency of 0.0008 Hz was applied to remove the long-term CO₂ concentration fluctuations. Observations made during rainy periods were removed depending on the strength of the signal received by the LICOR. The standard 2D rotation was applied. The main impact of this rotation is in the winter; it increases the average CO₂ flux by 1.8 μmol m⁻² s⁻¹, which represents only a 4% increase in the flux compared to that without the rotation correction. Two quality flags proposed by [Foken et al. \(2004\)](#) were calculated. One quality flag quantifies the stationary component of the turbulence; the other quantifies its intensity. Only the former was used because the validity of the second is questionable in urban environments because it is based on parameterizations derived for areas with low canopy heights ([Thomas and Foken, 2002](#)). The quality flag quantifying the stationary component of the turbulence compares the average CO₂ flux for a 30-min period with the averages for short 5-min intervals within this period. In this study, we only analysed data with a quality flag equal to or lower than five, which

means that the observations are of medium to very good quality and are usable for statistical analyses. Finally, a threshold on the friction velocity (0.15 m s^{-1}) was applied to remove periods with insufficient turbulence.

After all the corrections were applied, the data availability reached at least 51% for each season (Appendix B). We chose not to fill gaps in the time series because our goal was to compare the measured and modelled CO_2 fluxes. This comparison is based on instants when observations were available.

3.1.2. Data representativeness

We performed a footprint analysis to obtain the area represented by the CO_2 fluxes measured on the mast. Several types of footprint models are available (Vesala et al., 2008b). The easiest models are analytical ones; however, such models are not appropriate for a terrain as complex as a city. We used the Flux Footprint Predictions (FFP) model of Kljun et al. (2015), which is a parameterization based on the backward Lagrangian stochastic particle dispersion model LPDM-B (Kljun et al., 2002). This model was selected because the roughness length value for the simulated area is in the range of the values tested in the simulations that were performed to build the model. The advice of Kljun et al. (2015) to use the FFP model above the roughness sublayer and below the entrainment layer was followed because the eddy-covariance measurements were made in the inertial sublayer (Appendix D). We invalidated the footprint values when the observations did not fulfil the atmospheric stability condition proposed by Kljun et al. (2015): $-15.5 < z_m/L$, where z_m is the measurement height. With this criterion, a value for the footprint could be obtained for more than 99% of the CO_2 flux measurements.

The footprint model was applied each half hour. This implicitly assumes that the footprint is constant during each 30-min measurement period. The required parameters for the FFP model are defined as follows.

- The mean building height (z_H) is 15 m. This was calculated by Pigeon et al. (2008) based on administrative data of the building outlines and heights.
- Following Grimmond and Oke (1999), we set the aerodynamic roughness length (z_0) to 10% of z_H and the zero-plane displacement length (z_d) to 70% of z_H .
- The measurement height z_m was set equal to the receptor height minus z_d .
- No measurements of the boundary layer height were available. For stable and neutral conditions, we used the formula of Nieuwstadt (1981) as proposed by Kljun et al. (2015). For unstable conditions, the fetch is not very sensitive to the boundary layer height. We therefore assumed a boundary layer height of 250 m during the night (from 20 UTC to 6 UTC) and of 1000 m during the day (from 6 UTC to 20 UTC).

Mathematically, a footprint tends to infinity. Here, we define the fetch as the minimum radius of a circle centred on the mast such that at least 80% of the CO_2 that reaches the mast is emitted within this circle. The FFP model calculates a two-dimensional footprint with an along-wind distribution and a crosswind distribution. We used only the along-wind repartition to calculate the fetch for each half hour.

The 30-min periods were split into 24 classes according to the mean wind direction (bins of 15°). The average long-term fetch was then calculated for each wind direction class. The mean fetch was approximately 500 m for each class (Fig. 1). It was slightly larger for periods with a southerly wind direction; however, such periods are quite rare. Because the urban morphology is homogeneous in the vicinity of the mast, we assumed that the CO_2 fluxes measured at the mast were representative of the fluxes in a 500-m-radius circle centred on the mast.

3.1.3. Storage of CO_2 below the measurement height

Storage of CO_2 in the air column below the height of the eddy-covariance measurements leads to uncertainties in the temporal behaviour of the CO_2 emissions. Crawford et al. (2015) demonstrated that, in Vancouver during the night, the CO_2 concentration is 50 ppm higher at street level than 50 m above street level. The accumulation of CO_2 in the street canyon during the night leads to underestimations of emissions by tower measurements during the late evening and night and overestimations in the morning.

Storage below the mast observation level is quantified using the half-hourly CO_2 concentration observations at the mast and rooftop levels. Bjorkegren et al. (2015) showed that these two measurement heights are sufficient to quantify the CO_2 storage. More details concerning the storage calculation method are given in Appendix E.

The average storage is minimal in the afternoon and increases during the night, and maximal values occur around 7 UTC. At this time, the mean CO_2 storage flux is approximately $3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ and the 90th percentile is approximately $8 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. In percentage terms, the mean storage is maximal at 1 UTC when the storage is largest and the fluxes are smallest; at this time, it reaches 13% of the flux. CO_2 storage then decreases until 15 UTC when it accounts for less than 4% of the CO_2 flux. These percentages are very small compared to what has been reported for rural sites (Yang et al., 2007). This can be explained by the fact that the nocturnal boundary layer usually becomes stable in rural areas, whereas it remains neutral or slightly unstable in urban areas.

As suggested by Crawford et al. (2011), to avoid double counting the storage flux, no corrections of the measurements for the CO_2 storage were made. Instead, we chose to plot the mean absolute storage flux in the graphs in the evaluation section to provide an evaluation of the errors due to the storage phenomenon.

3.2. Input data for the TEB simulation

The goal of the TEB simulation is to simulate CO_2 fluxes comparable to the measured fluxes. Based on the results of the footprint analysis (Section 3.1.2), we simulated a 500-m-radius circle centred on the mast. This area was represented by a single grid mesh because we know that the urban morphology is relatively homogeneous in this area (Pigeon et al., 2008).

The meteorological forcing parameters required by TEB are listed in Table 2. Nearly all the parameters were measured each minute at the mast. Hourly means of the meteorological parameters were calculated to obtain the forcing data for TEB. Data gaps were filled by observations from a meteorological station operated by Météo-France located 6.5 km west-southwest of the mast (the Météopole station). The temperature and relative humidity from the Météopole station were corrected with the mean difference between the Météopole station and the mast. Mean differences were calculated for each hour of the day. The cloud cover measured at the Blagnac airport (7 km northeast of the mast) was used to separate the direct from the scattered downward short-wave radiation. Linear interpolation was used to complete the cloud cover and CO_2 concentration time series. All precipitation was assumed to be liquid (snow is very rare in Toulouse). The wind speed was measured at different heights depending on the weather conditions because the mast was lowered for safety reasons when high wind speeds were forecast. The wind speed measured at the lowest positions of the mast were corrected to the reference level (the highest position) assuming a logarithmic wind profile:

$$u(z_{rec}) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z_{rec} - z_d}{z_0} \right), \quad (8)$$

where u is the wind speed, z_{rec} is the receptor height, u_* is the friction velocity, κ is the von Kármán constant, z_d is the zero plane displacement height and z_0 is the roughness length. See Section 3.1.2 for more details

Table 2

Meteorological forcing data for the TEB model. The Blagnac airport is located 7 km to the northeast of the mast. The Météopole station is located 6.5 km to the west-southwest of the mast and is operated by Météo-France.

Model forcing parameter	Observed parameter	Main source	Fill in source/method	Data processing
Pressure (Pa)	Pressure	Mast	Météopole and Blagnac	–
Air temperature (°C)	Air temperature	Mast	Météopole with correction	–
Specific humidity (kg kg^{-1})	Relative humidity	Mast	Météopole with correction	–
Direct downward short-wave radiation (W m^{-2})	Downward short-wave radiation	Mast	Météopole	Direct/scattered separation depending on cloud cover
Scattered downward short-wave radiation (W m^{-2})	Cloud cover	Blagnac	Linear interpolation	Direct/scattered separation depending on cloud cover
	Downward short-wave radiation	Mast	Météopole	
Downward long-wave radiation (W m^{-2})	Cloud cover	Blagnac	Linear interpolation	–
	Downward long-wave radiation	Mast	Météopole	
CO ₂ concentration (kg m^{-3})	CO ₂ concentration	Mast	Linear interpolation	–
Rain rate ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	Rain rate	Mast	Météopole	–
Snow rate ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	–	–	–	Precipitation is assumed to be liquid
Wind speed (m s^{-1})	Wind speed	Mast	Météopole	Height correction assuming a logarithmic wind profile
Wind direction (degrees from North, clockwise)	Wind direction	Mast	Météopole	–

concerning z_d and z_0 .

By division, we obtain

$$u(z_{ref}) = u(z_{rec}) * \frac{\ln\left(\frac{z_{ref} - z_d}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{rec} - z_d}{z_0}\right)}, \quad (9)$$

where z_{ref} is the reference level.

The main site characteristics are listed in Table 3. The most relevant parameters for the CO₂ flux calculation are given in Table 4.

In the study area, most buildings are historical (pre-WWII) mid-rise red brick buildings with tiled roofs (Table F.7) originally for residential use. Many buildings have been converted at least partially into offices, commercial establishments and restaurants. To represent this variety of building uses, we employed the method proposed by Schoetter et al. (2017), who distinguished a non-heated fraction, a commercial fraction, an office fraction and three residential fractions with different heating setpoints. The fractions of the non-residential building uses are given in Table 4. The fractions of the residential uses with different heating setpoints were derived from the energy control behaviour (ECR) (see Schoetter et al. (2017) for more details, ECR is referred to as ET in this earlier study). The ECR, defined by Bourgeois et al. (2017), combines information on the heating system type (collective or individual), the source of energy for space heating and the age of the inhabitants.

Various parameters are required for each fractional building use, e.g. daily schedules for building occupation, the temperature setpoint, the non-HVAC internal heat release, the use of ventilation and shading. We used the values proposed by Schoetter et al. (2017). In Schoetter et al. (2017), the non-HVAC internal heat release in residential

Table 3
Main site characteristics.

Parameter	Value
Building plan area density (λ_p) ^a	0.62
Road plan area density (λ_r) ^a	0.28
Vegetation plan area density (λ_v) ^a	0.10
Facade surface density ^{a,b}	1
Building height (z_H) ^c	15 m
Roughness length for the momentum (z_0)	1.5 m

^a Bocher et al. (2018): mapuce.org.

^b Total facade area surface divided by the total horizontal urban surface.

^c Pigeon et al. (2008).

Table 4

Relevant parameters for the CO₂ flux calculation.

Buildings	
Fraction of electrical heating ^a (f_{ELEC})	0.6
Fraction of gas heating ^a (f_{GAS})	0.39
Fraction of fuel heating ^a (f_{FUEL})	0.01
Fraction of households using gas for domestic warm water ^a (f_{HW_GAS})	0.5
Fraction of collective housing ^b	0.25
Fraction of commercial building use ^b	0.10
Fraction of office and educational building use ^b	0.55
Fraction of non-heated buildings ^b	0.10
Fraction of households with high energy control behaviour (ECR) ^c	0.60
Fraction of households with low ECR ^c	0.40
Fraction of households with high Equipment-Intensity-of-Use ^c	0.24
Fraction of households with medium Equipment-Intensity-of-Use ^c	0.70
Fraction of households with low Equipment-Intensity-of-Use ^c	0.06
Vegetation	
Leaf area index (high vegetation)	3.5
Respiration rate of the ecosystem at 25°C (Re_{25})	$2.2 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Traffic	
Mean annual CO ₂ flux	$5.6 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Mean emission factors of CO ₂ ^d	0.47 kg km^{-1}
Human respiration	
Population density ^e	13,000 hab km ⁻²

^a 2011 census of the French population by the French National Institute on Economics and Statistics (INSEE) <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2028584a>.

^b Estimated by combining information on the building type, urban morphology and population density (Bocher et al., 2018). The methodology is described in Schoetter et al. (2017).

^c These indicators have been defined by Bourgeois et al. (2017). They use the ENERGIHAB survey on human behaviour in the Île-de-France region to calibrate statistical models that allow the prediction of indicators based on the French national census.

^d Derived from Hugrel and Joumard (2006).

^e Bocher et al. (2018): mapuce.org.

buildings was specified depending on the Equipment-Intensity-of-Use indicator (defined by Bourgeois et al. (2017)). This indicator depends on the number of inhabitants per habitable floor area, the space heating system type (collective/individual) and the heating source. Its values for the area of investigation are given in Table 4. For the residential use, we set the energy consumed for domestic warm water to 25% of the

Table 5
Description of the different model configurations used in the sensitivity experiment.

Configuration	Description/Modifications	Motivations
DEF	Constant internal building temperature (19°C).	Simple parameterization
REAL_BEHA	Use of fractional building use and behaviour with default values. (Schoetter et al., 2017)	–
INT_MASS	Representation of intermediary floors by a 20-cm-thick concrete layer and a 3-cm-thick wood layer.	Intermediary floors are represented by a 3-cm-thick layer of wood in the architectural database, which might lead to an underestimation of the heat storage capacity of the building and, as a consequence, deteriorate the simulated daily cycle of the heating energy consumption.
TEMPE	In residential buildings, the heating setpoint temperature is reduced by 2°C when the buildings are vacant and during the night. In office, commercial and educational buildings, the heating setpoint temperature is set to 22°C (previously 21°C) when the buildings are occupied during the day and 17.5°C (previously 20°C) otherwise.	The difference in the heating setpoint temperature between night/day and unoccupied/occupied buildings is only 1°C in the configuration proposed by Schoetter et al. (2017). This relatively low difference was retained because no information on the heating setpoint modulation between day and night was available.
OCCUP	The occupation probability of offices between 16 UTC and 19 UTC was increased from 0.25 to 0.7. The occupation probability of commercial establishments between 16 UTC and 19 UTC was increased from 0.8 to 0.9 on weekdays and from 0.75 to 0.95 on Saturdays.	These modified schedules better represent the use and occupation of offices and commercial establishments in the domain of the investigation.
QIN	The non-HVAC internal heat release in commercial, office and educational buildings was reduced from 10 to 15 W m ⁻² to 7 W m ⁻² .	The original value could be realistic for an office with a large number of electrical appliances but is likely too high when an entire building including corridors, halls and meeting rooms is modelled. Lower non-HVAC internal heat releases lead to an increased heating energy demand and, as a consequence, larger CO ₂ fluxes during the heating season.

non-HVAC energy consumption. The energy was set to 0% for the other building uses.

The vegetation consists primarily of temperate broad-leaf cold-deciduous summer-green high vegetation (Table F.8). The value of Re_{25} needs to be specified to account for the CO₂ emissions due to respiration by the urban vegetation (Section 2.2). Usually, Re_{25} is determined from the CO₂ fluxes measured at night when photosynthesis does not take place. This method cannot be used in urban areas because sources of CO₂ other than vegetation exist at night. The ratio of the ecosystem respiration to the gross primary production (GPP) over one year is relatively constant from one year to another and equal to 0.71 for French agricultural sites (J.-C. Calvet, personal communication). Using Equation (4), we obtained a value of $2.2 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for Re_{25} with the following relation:

$$Re_{25} = \frac{0.71 * \int_{\text{year}} GPP(t) dt}{\int_{\text{year}} f(w_g(t)) * Q_{10}^{(T_{\text{soil}}(t)-25)/10} dt} \quad (10)$$

The GPP values were calculated by the ISBA model using a 5-min time step.

The average daily, weekly and annual traffic cycles (Fig. 2) were calculated based on traffic count data taken during the campaign near the mast for two different roads: Rue d'Alsace-Lorraine and Rue de Lafayette. The daily, weekly and annual cycles for these two roads are very similar; therefore, we averaged them.

In the footprint area of CAPITOUL, vehicles adopt an urban driving style with a speed limit of 50 km h⁻¹. The fleet is composed of cars (78%), vans (13%), heavy vehicles (6%) and motorcycles (3%). The mean emission factors of CO₂, sensible heat and latent heat for a fleet representative of traffic in Toulouse were derived from the emission factors for French urban traffic per type of vehicle (Hugrel and Jourard, 2006) combined with the distribution of the traffic per type of vehicle observed during the campaign.

We divided the annual average value of the sensible heat flux due to traffic given by Pigeon (2007) for the centre of Toulouse (8 W m⁻²) by the average emission factor for sensible heat to obtain an estimate of the number of kilometres travelled. The CO₂ and latent heat emissions were then estimated by multiplying the number of kilometres travelled by the respective emission factors (Table F.9).

The population density was assumed to be constant; spatiotemporal variations, for example due to commuting, were neglected. The main

reason for neglecting these fluctuations was the difficulty in obtaining a reliable estimate of the population density fluctuation through time for our case study.

The initial conditions for our simulation were taken from a spin-up simulation of 1 year using the above-mentioned forcing from 20 February 2004 to 19 February 2005. This spin-up initialised the biomass reservoirs, temperature in the buildings, soil temperature and soil moisture.

4. Model evaluation for a dense European city centre

4.1. Sensitivity of modelled CO₂ fluxes on parameters related to building use and human behaviour

4.1.1. Adjustment of the parameters and model sensitivity

In this section, we investigate the sensitivity of the modelled CO₂ fluxes to parameters related to building use and human behaviour. Different configurations of BEM are investigated: a default (DEF) configuration, which is the historical configuration of BEM without fractional use and behaviour, and five configurations with fractional use and behaviour. Using fractional use and behaviour requires the adjustment of numerous parameters. We used our knowledge of the modelled area to adjust the default values proposed by Schoetter et al. (2017). We used a step-by-step approach, changing one parameter after another. A new experiment was performed each time to study the influence of each modification. The different model configurations are described in detail in Table 5. We only show results for DJF (December, January and February) because it is the season when, due to the high energy demand for space heating, the CO₂ fluxes due to buildings are the largest.

The default configuration (DEF) is very simple but is unable to reproduce the daily cycle of the CO₂ fluxes well: the model and the observations are in phase opposition (Fig. 3). The CO₂ fluxes are too high during the night and too low during the day. Using the fractional use and behaviour with default values for the parameters (the REAL_BEHA configuration) improves the results during the night; however, the CO₂ fluxes are still overestimated. There is also a minimum in the CO₂ fluxes at midday that is not present in the observations. Increasing the thickness of the intermediary floors with a 20-cm concrete layer (the INT_MASS configuration) slightly lowers the CO₂ fluxes during the night and increases them during the day. This is due to the increased

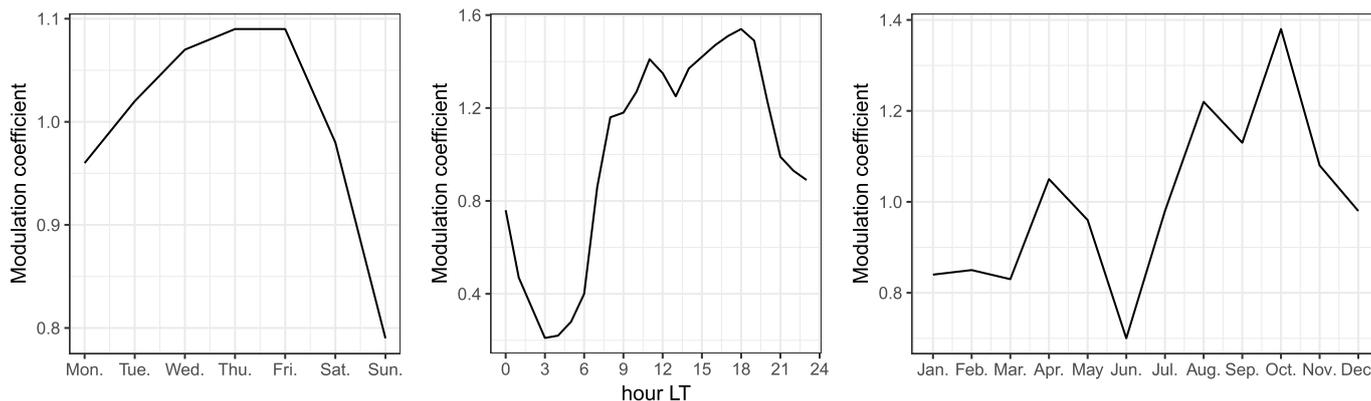


Fig. 2. Daily, hourly and annually modulation coefficients of the traffic emissions. The coefficients were calculated from the traffic count during the CAPITOUL campaign near the measurement mast.

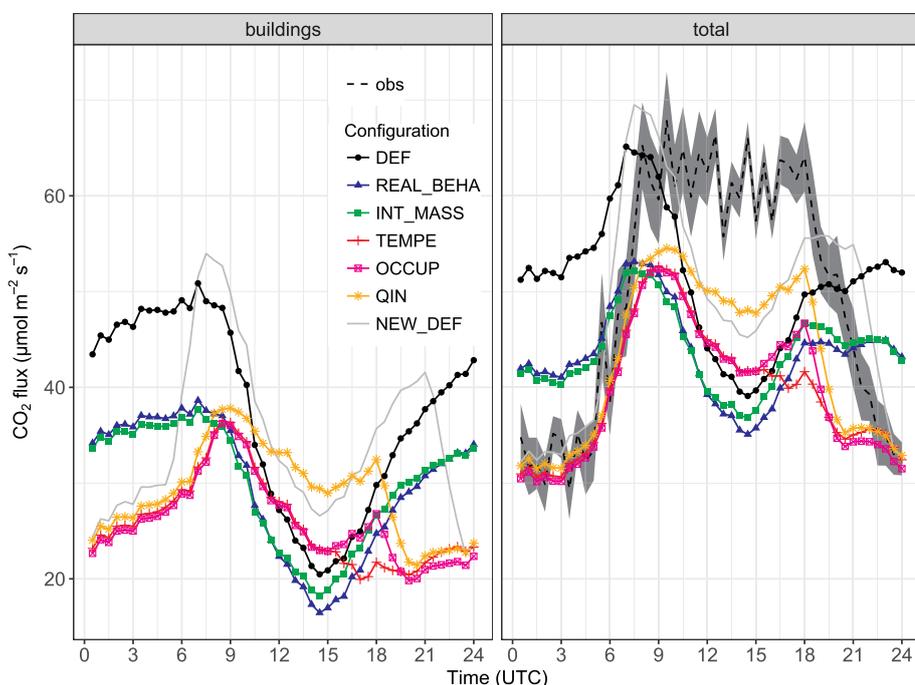


Fig. 3. Daily cycle of the average modelled CO₂ fluxes in DJF for several model configurations: the default model configuration (DEF), a detailed description of the residential behaviour (REAL_BEHA), a larger heat storage capacity of buildings due to thicker intermediary floors (INT_MASS), a change in the heating setpoint temperature (TEMPE), a change in the occupation schedule for offices (OCCUP) and a lower non-NVAC internal heat release in offices (QIN). The experiments are described in detail in Table 5. In the left panel, only the CO₂ fluxes due to buildings are shown. In the right panel, the total CO₂ fluxes are compared to the observations. The grey shading represents the uncertainties in the observations due to CO₂ storage in the air column below the eddy-covariance measurements.

heat storage capacity of the buildings. However, the modification of the CO₂ fluxes due to this change in the building structure is not substantial. Increasing the heating setpoint temperature during the day and decreasing it during the night (the TEMPE configuration) slightly increases the CO₂ fluxes around midday and decreases them during the night. As a result, there is an improvement in the modelled daily cycle of the CO₂ fluxes. A higher occupation of offices between 16 UTC and 19 UTC (the OCCUP configuration) increases the CO₂ fluxes during this time period due to the higher setpoint temperature for space heating. Lowering the non-HVAC heat release inside buildings (the QIN configuration) leads to an increase in the CO₂ fluxes because the heating energy demand increases.

This step-by-step modification of the parameter values shows that CO₂ modelling is strongly sensitive to parameters describing human behaviour: the daily cycle of the CO₂ fluxes due to buildings in the last experiment (QIN) is in phase opposition with the experiment with the default values (REAL_BEHA). Except for the modification of the internal mass, all the modifications (setpoint temperature, occupation probability and internal energy demand) have a clear impact on the CO₂ fluxes. The impacts are immediate: the modification of a parameter for

a given period impacts the CO₂ fluxes during this period, for example, a decrease in the night-time setpoint temperature has an effect during the night-time.

The sensitivity analysis shows that the CO₂ fluxes are particularly sensitive to the heating setpoint temperature. We therefore propose a new default setup for the TEB parameters (NEW_DEF) that includes a modulation of the heating setpoint temperature but remains very simple because no fractional building use or human behaviour is considered. This makes it applicable to cities for which these parameters are unknown. The NEW_DEF configuration is similar to the DEF configuration except that the night-time heating setpoint temperature is lowered by 2°C. The daily cycle of the CO₂ fluxes of the NEW_DEF configuration is clearly improved compared to the DEF configuration, and the nocturnal fluxes are close to the observations. The CO₂ fluxes around midday are also closer to the observed values, giving a result comparable to the QIN configuration. In the early morning and late evening, however, the modelled CO₂ fluxes are higher than the observations.

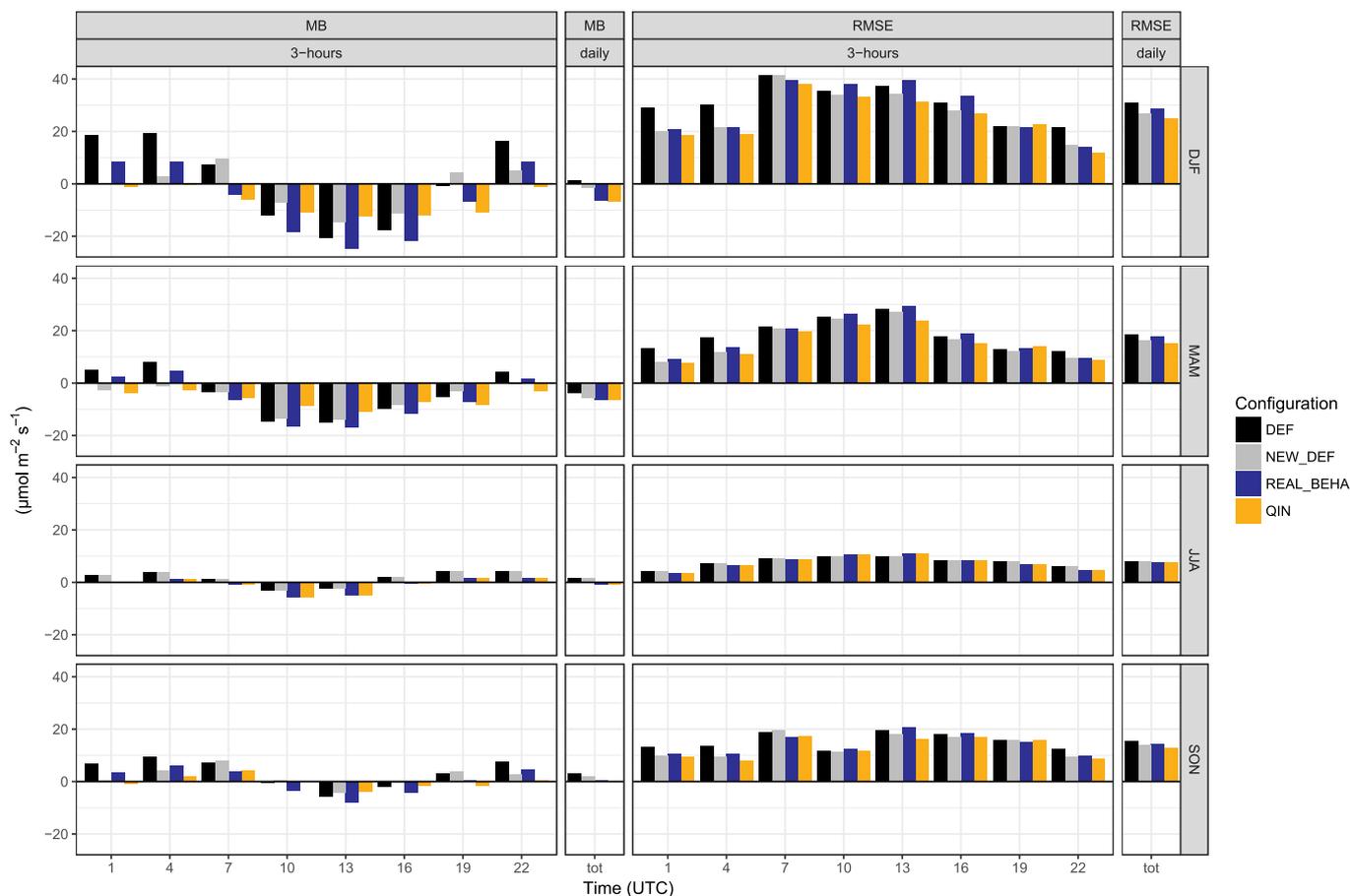


Fig. 4. Mean bias (MB) and root mean square error (RMSE) between the modelled and observed CO₂ fluxes per season for one-year simulations of four model configurations: the historical configuration (DEF), the historical configuration with a decreased setpoint temperature during the night (NEW_DEF), a configuration with fractional building use and behaviour with the default parameter values from Schoetter et al. (2017) (REAL_BEHA) and a configuration with fractional building use and behaviour with adjusted parameter values (QIN). Scores are plotted for each 3-h period as well as for the entire day.

4.1.2. Model statistical scores for the different configurations

We can compare the different model configurations more objectively by calculating statistical scores (mean bias and root mean square error (RMSE)). The comparison is made for the entire year to verify whether the performance of the different experiments in DJF can be generalised to the full year.

The daily average bias for the DEF configuration is low; however, this is a result of the compensation of the negative bias in the afternoon by the positive bias during the night (Fig. 4). The NEW_DEF configuration has a lower bias than the DEF configuration except in MAM (March, April and May). It reproduces the daily cycle of the CO₂ fluxes much better than the DEF configuration. The RMSE is also reduced for the NEW_DEF configuration. The REAL_BEHA configuration performs better (lower RMSE) than the DEF configuration but worse than the NEW_DEF configuration. This result emphasizes that adjustments in the model parameters are essential to fully benefit from the introduction of fractional building use and behaviour. The QIN configuration performs better in terms of the RMSE than any of the other configurations.

The differences between the model configurations are lowest in JJA (June, July and August) because the CO₂ fluxes due to buildings are the smallest in this season. The benefit of a detailed description of building use and behaviour is therefore largest during the heating season.

The NEW_DEF configuration does not perform as well as the QIN configuration; however, it is more robust because it requires less input parameters. Hereafter, the configuration with the fractional building use and behaviour and the adjusted parameters (QIN) will be denoted as the reference configuration (REF).

4.2. Model evaluation for the reference model configuration

The sensitivity study in the previous section highlighted the relevance of model parameters related to building use and human behaviour for the modelled CO₂ fluxes. In this section, we evaluate the results of the REF configuration in detail compared to the observations from the CAPITOUL campaign. We only consider the model output when temporally matching observations are available. In the REF configuration, the parameter values that describe human behaviour have been specifically adjusted for the area of investigation. The results in this section, therefore, quantify the ability of the model to estimate CO₂ fluxes when a large amount of information on the building use and human behaviour is available.

4.2.1. Sensitivity of CO₂ fluxes to footprint variations

Differences between the footprint area for the observations and the modelled area might lead to systematic biases in the model results. We therefore investigated whether the model bias depends on the wind direction and the fetch. Fig. 5 shows that the bias of the CO₂ flux does not depend much on the wind direction. The nocturnal bias for northeasterly wind is slightly smaller in SON (September, October and November) and DJF than that for other wind directions. However, this might not be a robust result due to the small number of observations available for the northeasterly wind direction. An anisotropy in the bias is also found during the day in DJF and to a lesser extent in MAM and SON; however, similar to the nocturnal bias, this is only found for wind directions with few available observations.

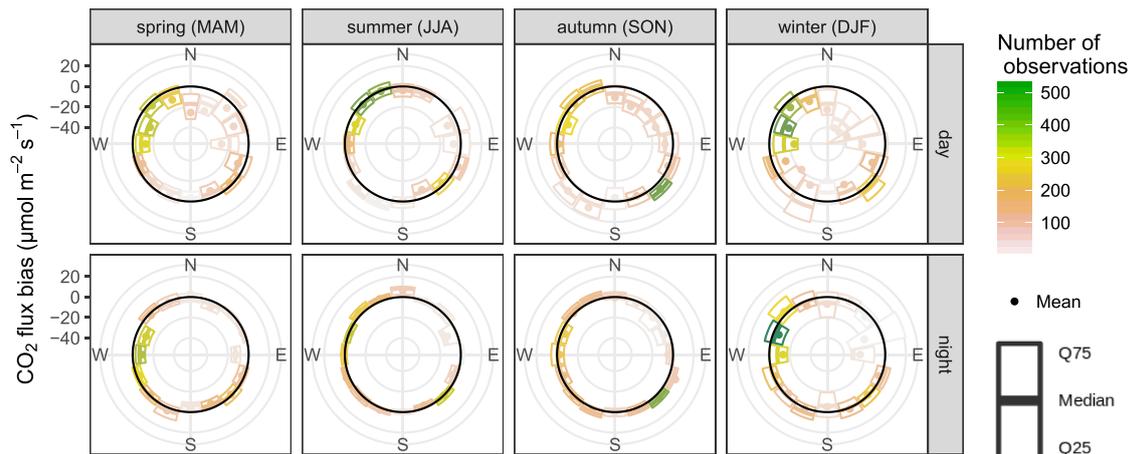


Fig. 5. Seasonal boxplots of the model biases for the CO₂ fluxes per wind direction. Data are split between daytime (from 7 UTC to 19 UTC) on the first line and night-time (from 19 UTC to 7 UTC) on the second line. The black circle indicates no bias.

The model bias (Fig. 6) is not very sensitive to the fetch except when the footprint is very small. This is particularly true in DJF when the model exhibits a larger negative bias during the day and a larger positive bias during the night for periods with a low fetch. In view of these results, we invalidated data when the fetch was in the first decile (a fetch lower than 337 m). The larger negative bias during the day is likely due to chimneys near the measurement mast. For low fetches, their contribution to the total measured CO₂ flux increases and leads to high measured fluxes, which are not representative of the area defined by a circle with a 500-m radius around the mast.

4.2.2. Evaluation of turbulent heat fluxes

Building energy consumption, vegetation and motor traffic influence both the CO₂ fluxes and the turbulent heat fluxes.

Therefore, an evaluation of the turbulent heat fluxes allows a check of whether the adjustment of the BEM parameters that improved the modelled CO₂ fluxes deteriorated the modelled turbulent heat fluxes.

Fig. 7 displays the seasonal average daily cycle of the turbulent latent and sensible heat fluxes. The simulated sensible heat flux agrees

well with observations for all seasons. There are larger discrepancies for the latent heat flux. We reduced the maximum surface of the puddles as proposed by Demuzere et al. (2017). This modification improves the results; however, TEB still underestimates the latent heat flux by 5–10 W m⁻². No relevant relationship between the latent heat flux bias and the wind speed or time since the last precipitation event was found. The irrigation of urban vegetation and roads could partly explain the negative bias during the day but not during the night. Similar biases have been reported in TEB results by Karsisto et al. (2016) over the Kumpula and Tornio sites in Helsinki, Finland. The cause could be missing anthropogenic moisture sources or errors in the eddy-covariance measurements.

4.2.3. Evaluation of CO₂ fluxes

Fig. 8 shows that, for each season, the modelled and observed daily cycles of the CO₂ fluxes agree quite well on weekdays. The daily cycle on Sundays is also captured well. TEB underestimates the daytime CO₂ flux on Saturdays during the heating season. This could be due to the numerous customers visiting commercial establishments, which leads

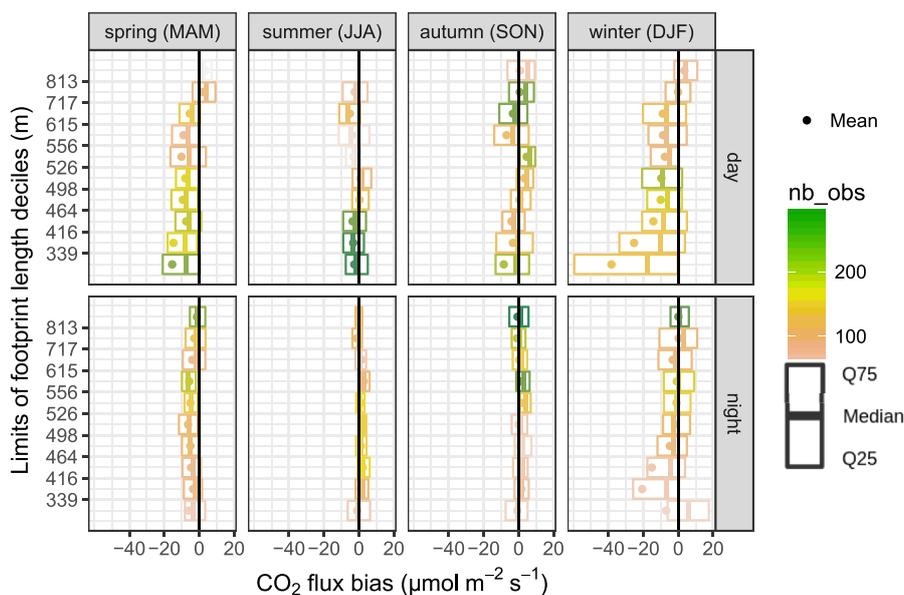


Fig. 6. Seasonal boxplots of the model biases for the CO₂ fluxes per decile of the fetch. Data are split between daytime (from 7 UTC to 19 UTC) on the first line and night-time (from 19 UTC to 7 UTC) on the second line. The black line indicates no bias.

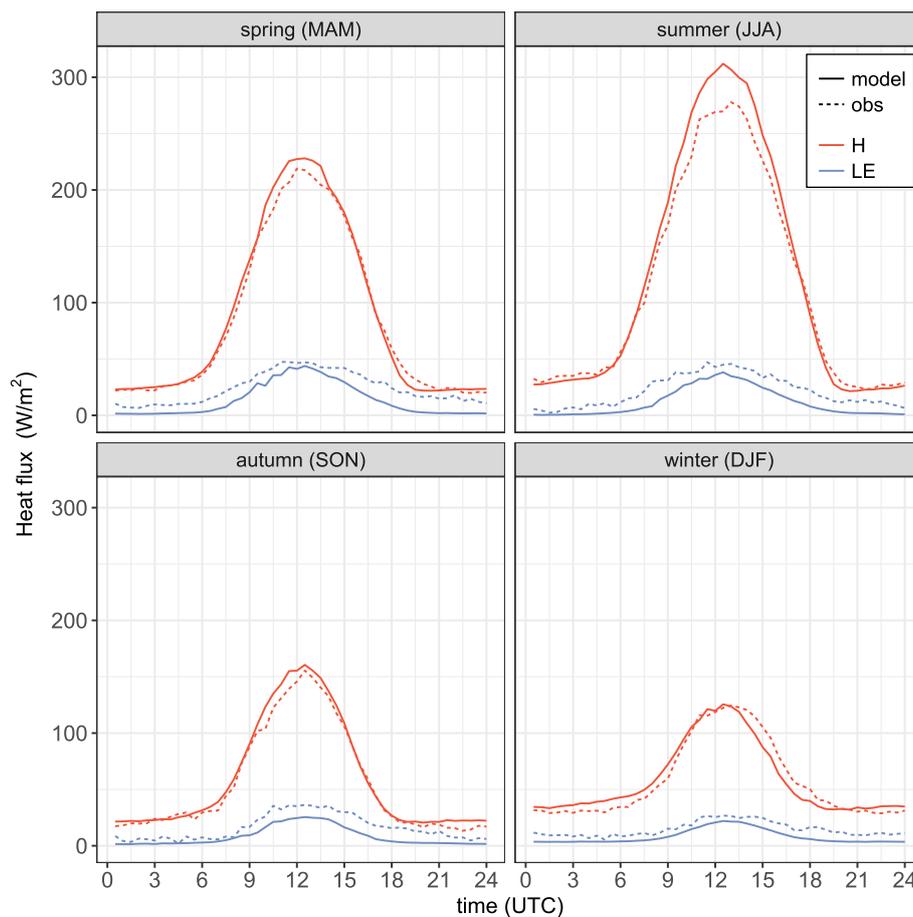


Fig. 7. Seasonal average daily cycle of the observed and modelled turbulent fluxes of sensible (H) and latent (LE) heat.

to frequent door openings. Each time a door is opened, warm indoor air exits the building and is replaced by cold outdoor air. This might increase the building energy consumption related to heating and therefore CO₂ emissions, and this process is not represented in the model. The negative bias of the model in DJF and MAM could be due to the fact that thermal bridges in buildings are not implemented in the model.

The time series of the modelled and observed daily average CO₂ fluxes are displayed in Fig. 9 for the entire year of the CAPITOU observation campaign. In general, TEB captures the time series of the CO₂ fluxes well but underestimates their temporal variability. Variations in time of the observed footprint area might lead to variability in the observed CO₂ flux that cannot be reproduced by TEB because the modelled area is fixed.

The modelling approach allows the contribution of each source to the total CO₂ flux to be calculated. The most important sources are traffic (48%) and buildings (42%). Human respiration accounts for nearly 10% of the total CO₂ flux. The contribution from urban vegetation is very low (−0.5%). The contribution of each source to the total CO₂ flux strongly fluctuates with the season. In JJA, traffic accounts for more than four-fifths (82%) of the total CO₂ flux, human respiration 17%, buildings 3% and vegetation −2.5%. This highlights the relevance of high-quality traffic data for the modelling of urban CO₂ fluxes. In DJF, the main source of the CO₂ fluxes is buildings (65.7%); traffic accounts for 27.5%, human respiration for 6.5% and vegetation for less than 0.3% of the total flux.

The mean RMSE of the half-hourly modelled CO₂ flux is 15.3 μmol m^{−2} s^{−1}. This value is comparable to the model of Crawford and Christen (2015), who used the spatial heterogeneity of their studied site (Sunset, Vancouver, Canada) to calibrate a statistical model for each source and sink of the urban CO₂ flux. Their model was able to

predict the half-hourly CO₂ fluxes with an annual RMSE of 12.41 μmol m^{−2} s^{−1}, a daytime (from 05 LST to 15 LST) bias of 4 μmol m^{−2} s^{−1} and a night-time (from 22 LST to 04 LST) bias of −2.5 μmol m^{−2} s^{−1}. For Toulouse, TEB simulates a daytime (from 10 UTC to 16 UTC) bias of −7.1 μmol m^{−2} s^{−1} and a night-time (from 19 UTC to 07 UTC) bias of −1.4 μmol m^{−2} s^{−1}. Järvi et al. (2012) performed a regression between the observed wintertime CO₂ fluxes and the traffic count data for the Kumpula site in Helsinki, Finland. During the winter season, traffic is almost the only source of CO₂ in Helsinki because the ground is covered by snow and the buildings are heated with a district heating system, which does not locally emit CO₂. The RMSE between the predicted CO₂ fluxes from the regression and the observed CO₂ fluxes is 5.24 μmol m^{−2} s^{−1}. This is comparable to the RMSE of our model in summer when traffic is the major contributor to the total CO₂ flux. The 7.5 μmol m^{−2} s^{−1} RMSE for Toulouse is of the same order of magnitude as the RMSE found by Järvi et al. (2012).

5. Discussion and conclusions

In this study, we introduced a modelling of the CO₂ fluxes due to buildings, urban vegetation, traffic and human respiration in the urban canopy model TEB. The CO₂ fluxes due to buildings and urban vegetation strongly depend on the prevailing meteorological conditions. For example, the CO₂ flux due to the heating of buildings is highly dependent on air temperature, whereas the CO₂ uptake due to photosynthesis by urban vegetation depends on solar radiation. The contributions of buildings and vegetation to the total CO₂ flux are therefore explicitly modelled using BEM and the ISBA vegetation model. The CO₂ fluxes due to traffic and human respiration are relatively independent of the meteorological conditions. For this reason, simple

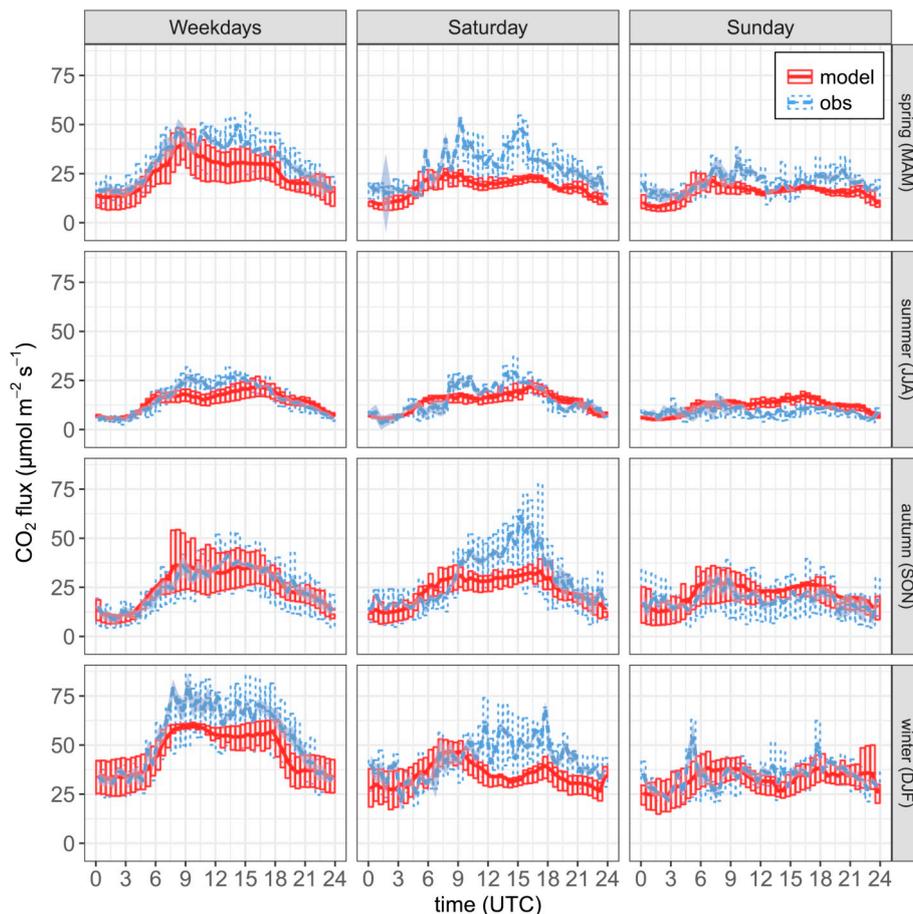


Fig. 8. Mean daily cycle by season for the CO₂ flux. The shading represents the uncertainty associated with the CO₂ flux storage (3.1.3). The boxes show the interquartile range.

parameterisations were implemented in TEB for traffic and human respiration and we assumed that it is not necessary to implement additional detailed parameterisations in TEB because these parameters would not interact with the urban climate modelled by TEB. Users need to specify the annual means for the traffic CO₂ emissions and the average population density. It is also possible to specify modulation

factors for the CO₂ emissions due to traffic and human respiration as a function of the hour of the day, the day of the week and the month of the year, as we have done in the present study. Modulation factors and averaged values can be obtained from existing models and inventories such as Agency (2014) for traffic and West et al. (2009) for human respiration.

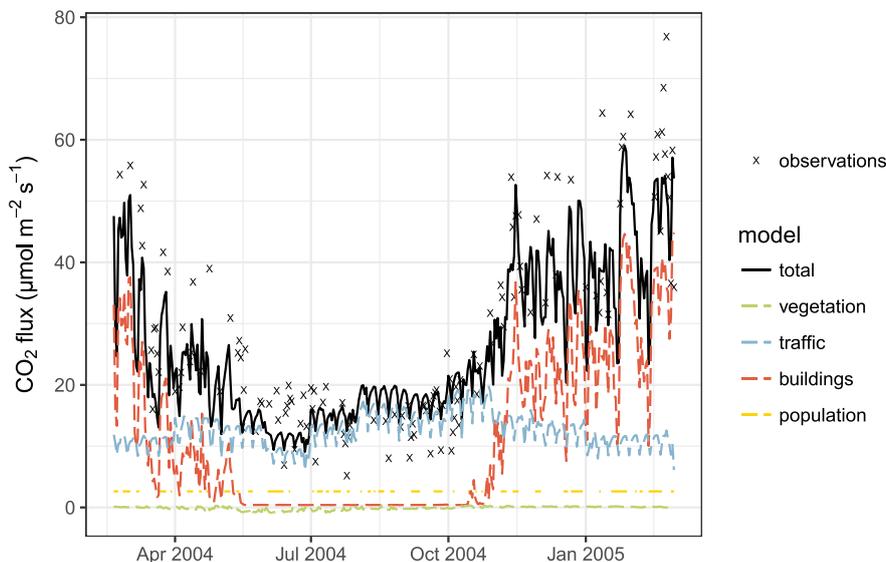


Fig. 9. Times series of the daily average CO₂ fluxes. Observations are plotted when more than 70% of the half-hourly observations are available for a given day.

We investigated the modelled CO₂ fluxes for the centre of Toulouse, a mid-latitude city located in southern France, which is characterised by dense mid-rise (LCZ 2) historical red brick buildings and a strong variety of building uses including offices, commercial establishments, restaurants and residences. The modelled CO₂ fluxes for this area were compared with eddy-covariance measurements made at a pneumatic tower during the CAPITOUL campaign (from February 2004 to February 2005). A sensitivity study indicated that, for the winter season, the modelled CO₂ fluxes strongly depend on data characterising the building equipment (e.g. the type of the heating system), the building use and the human behaviour (e.g. the setpoint temperature for heating). Information concerning the traffic (e.g. fleet composition, number of kilometres travelled and traffic peak time) is also crucial, especially during the summer season when traffic accounts for 83% of the total CO₂ flux at the investigated site. Obtaining such data for any given city of interest worldwide is a major challenge that will need to be addressed by the community. Based on our sensitivity study, we proposed a TEB configuration with a reduced set of input parameters that performs nearly as well as the most detailed configuration. This simpler configuration might be easier to transfer to other cities.

The evaluation of the modelled CO₂ fluxes versus the eddy-covariance measurements provided promising results. TEB, which is independent of the observed CO₂ fluxes, performs similarly to the inverse modelling developed in previous studies based on observations. However, it needs to be kept in mind that evaluations of the urban CO₂ fluxes with eddy-covariance measurements are challenging because these fluxes represent the total CO₂ flux, which is a result of different contributions. In TEB, each contribution is modelled separately and a good model performance for the total CO₂ could be due to error compensations between different contributions (e.g. CO₂ emission due to traffic and CO₂ uptake due to vegetation). An evaluation of TEB for other cities would be beneficial to assess the ability of TEB to model the CO₂ fluxes for a variety of urban areas with different morphologies, building structures, traffic patterns, building uses and behaviours. In particular, the very small relevance of urban vegetation to the total CO₂ fluxes at the CAPITOUL site did not allow any conclusion about the ability of TEB to simulate the CO₂ fluxes due to urban vegetation to be drawn.

This model is a first attempt to implement CO₂ flux modelling in an urban climate model. The different potential improvements to the model include:

- a fluctuating human respiration rate based on the occupation

Appendix. ASupplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100042>.

Appendix A. Building Energy Model (BEM)

We modified TEB to consider the latent heat release due to building heating and therefore improve the modelled energy balance. In the previous version of TEB, all energy released by heating was considered to be sensible heat. This energy is now partitioned between sensible heat and latent heat.

The partitioning can be derived from the ratio between the Higher Heating Value (HHV) and the Lower Heating Value (LHV). HHV is the total quantity of energy (latent and sensible) contained in a source of energy. LHV considers only the sensible heat.

The sensible heat consumed can be expressed as

$$H_{cons} = Q_{cons} * \frac{LHV}{HHV}, \quad (A.1)$$

where H_{cons} is the sensible energy consumed and Q_{cons} is the total energy consumed. The HHV/LHV ratio depends on the source of energy (SOE) used.

Fractions of buildings heated by a given source of energy (f_{SOE}) and efficiency of heating system are used to rewrite Equation (A.1):

probability of the buildings;

- better vegetation respiration modelling due to the inclusion of a version of ISBA with more vegetation reservoirs (Gibelin et al., 2008); and
- improvements in the building representation in the model, for example, via the implementation of thermal bridges.

In this study, the CO₂ fluxes were modelled for a single grid point representing the centre of Toulouse, France. The advantage of the modelling approach is its extensibility to the city scale as long as we have access to the spatial distribution of the input parameters: the urban morphology (e.g. building density and height), building construction practices, building use, resident behaviour and traffic. TEB can be used to model the spatiotemporal distribution of the CO₂ fluxes with a horizontal resolution of a few hundred meters and a temporal resolution of half an hour. The influence of urban vegetation on the CO₂ fluxes can be investigated by varying their proportions in the model. However, the accuracy of the impact of urban vegetation on the CO₂ fluxes could not be investigated in the present study due to the low plan area density of vegetation in the case study. The modification of the CO₂ fluxes due to changes in the building structure (e.g. the use of insulation materials to reduce the energy demand for heating) or practices related to building use (e.g. a lower setpoint temperature for heating) can be quantified using TEB at the scale of the urban agglomeration.

Code and data availability

The source code of the version of TEB described in this study will be freely available with the next release of SURFEX (SURFEX v9.0) at <http://www.umr-cnrm.fr/surfex/>. Datasets from the CAPITOUL campaign can be found at <http://capitoul.sedoo.fr>.

Declaration of interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements

The authors would like to thank William Maurel for his great help in data processing. The authors are grateful to Jennifer Salmond for providing the source code for processing the CO₂ fluxes.

$$H_{cons} = Q_{dem} * \sum_{SOE} \frac{f_{SOE}}{\eta_{SOE}} * \left(\frac{LHV}{HHV} \right)_{SOE}, \quad (A.2)$$

where Q_{dem} is the total energy demand and η_{SOE} is the efficiency of the heating system. In TEB, the efficiency is expressed with respect to the HHV, which means that it is the ratio between the useful heat and the total heat (latent and sensible) contained in the energy source. The consumed latent heat is the difference between the total heat and the sensible heat:

$$LE_{cons} = Q_{dem} * \sum_{SOE} \frac{f_{SOE}}{\eta_{SOE}} * \left(1 - \left(\frac{LHV}{HHV} \right)_{SOE} \right). \quad (A.3)$$

For both forms of consumed heat (H_{cons} and LE_{cons}), we differentiate between demanded heat and waste heat. This is important for the energy balance of TEB because waste heat is rejected outside buildings through the roofs (e.g. chimneys) or walls, whereas demanded heat is injected inside buildings.

For traditional heating systems, only the sensible energy is used to heat the air in the buildings. We therefore consider that all the latent energy consumed by heating is waste heat, leaving us with the following:

$$LE_{waste} = LE_{cons}, \quad (A.4)$$

$$H_{waste} = Q_{cons} - Q_{dem} - LE_{waste}, \quad (A.5)$$

where LE_{waste} and H_{waste} are the latent and sensible energy waste by the heating system, respectively.

Appendix B. Data availability

After the data quality checks, measurements of the CO₂ fluxes based on the eddy-covariance technique were available for more than 50% of the time during each season (Figure B10). The data availability was lowest in winter (51%), which is due to the increased number of precipitation events compared to other seasons. No day of the week was particularly under- or over-represented for any given season or time of the day. We are therefore confident that the shape of the seasonal average daily cycle of the measured CO₂ fluxes is not biased by the availability of the CO₂ flux measurements.

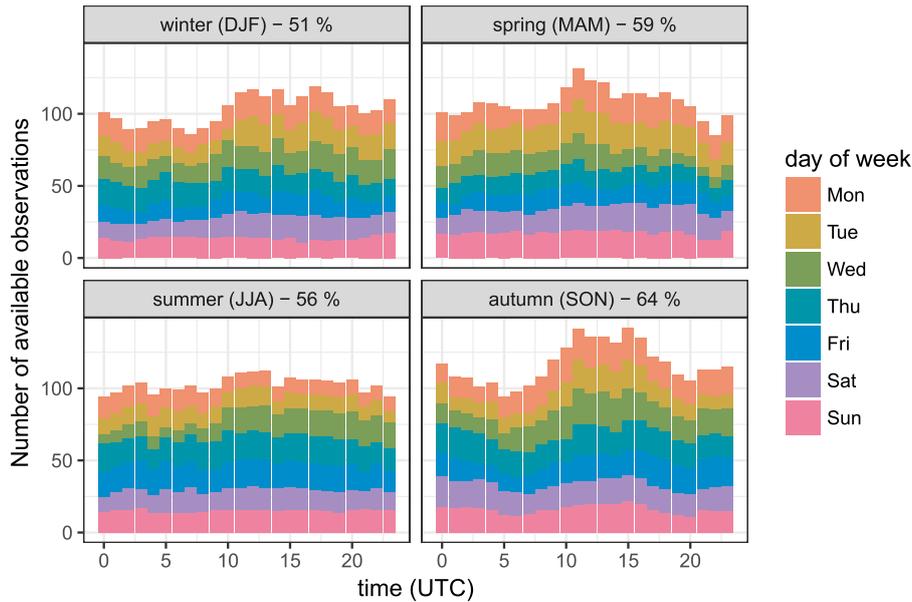


Figure B.10. Availability of CO₂ flux measurements of at least medium quality per season and per day of the week.

Appendix C. Wind rose

The wind rose measured at the mast (Figure C11) is typical of Toulouse, France. The predominant wind directions are southeast and northwest due to wind channelling via the regional topography.

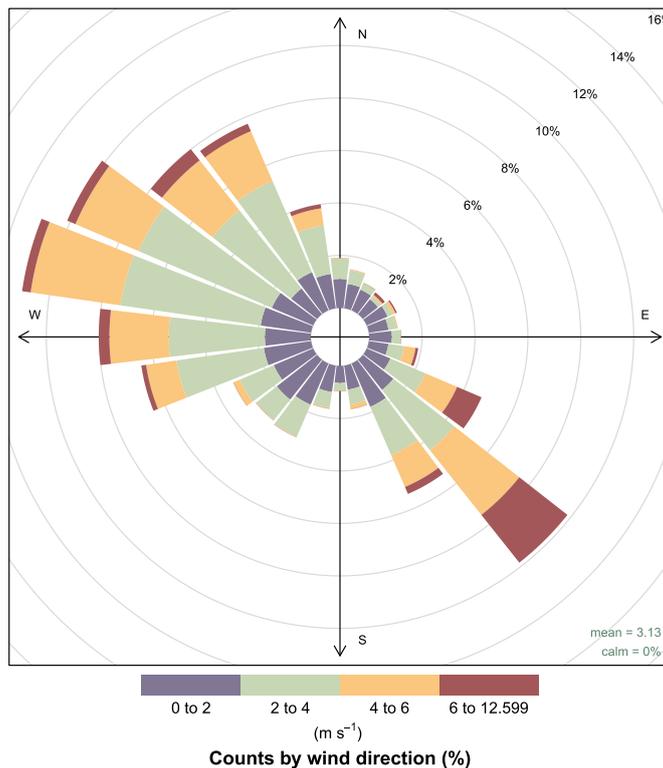


Figure C.11. Wind rose measured at the mast.

Appendix D. Mast position

The mast used for the eddy-covariance measurements has a rated height of 48.05 m above ground level (agl). For safety reasons, it is lowered during strong wind events. Four different heights are used (Table D.6). Observations made at position 2 are rare, and the heights of positions 2 and 3 differ by less than 1 m. For these reasons, measurements at position 2 are considered to have been made at position 3.

Table D.6
Receptor heights for the different positions of the mast.

Mast position	Receptor height (m agl)
1	48.05
2	38.98
3	38.23
4	26.93

In order to analyse only the CO₂ fluxes representative of the local scale, we restricted our analysis to measurements made in the inertial sublayer. Grimmond et al. (2002) advised taking measurements at a minimum of twice the mean building height. Data from position 4 were therefore not analysed.

We further investigated whether observations made at positions 1 or 3 were taken in the inertial sublayer. Two sonic anemometers were mounted on the tower: one at the top of the tower (for the eddy-covariance measurements) and a second a few meters lower (40.01 m for position 1 and 34.03 m for position 3). One feature of the inertial sublayer is that the friction velocity is constant within it. The ratio between the friction velocity measured by the lower and upper anemometers was tested for each mast position (Figure D12). On average, this ratio was around one, which confirms that the measurements were taken in the inertial sublayer.

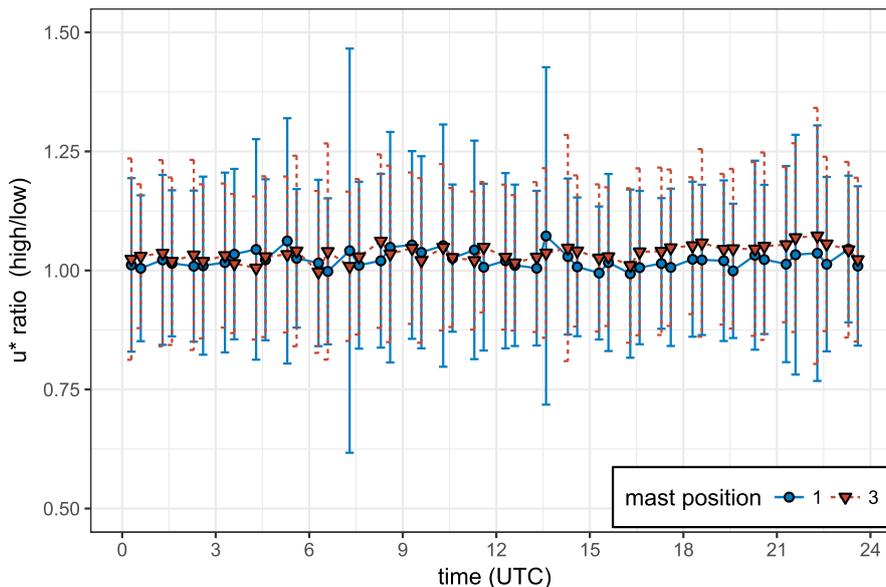


Figure D.12. Mean daily cycle of the ratio between the friction velocity at the upper and lower anemometer positions. The latter were taken at mast positions 1 and 3. The error bars represent one standard deviation.

We also checked whether the data measured at positions 1 and 3 were from the same statistical population. However, a direct comparison of the means, medians or daily cycles of both datasets would not be helpful because measurements at positions 1 and 3 were made during different meteorological situations. For example, the wind speed is higher for the mast position 3 because predicted high-speed winds are the reason for lowering the mast. We therefore investigated the dependency of the CO₂ flux on the wind speed and daily mean temperature for each mast position (Figure D13). For both positions, the measured CO₂ fluxes were very similar; they increased below 15°C and very high values occurred at very low speeds. This finding encouraged us to retain the data from both positions. In this study, the data from positions 1 and 3 were treated as a single dataset.

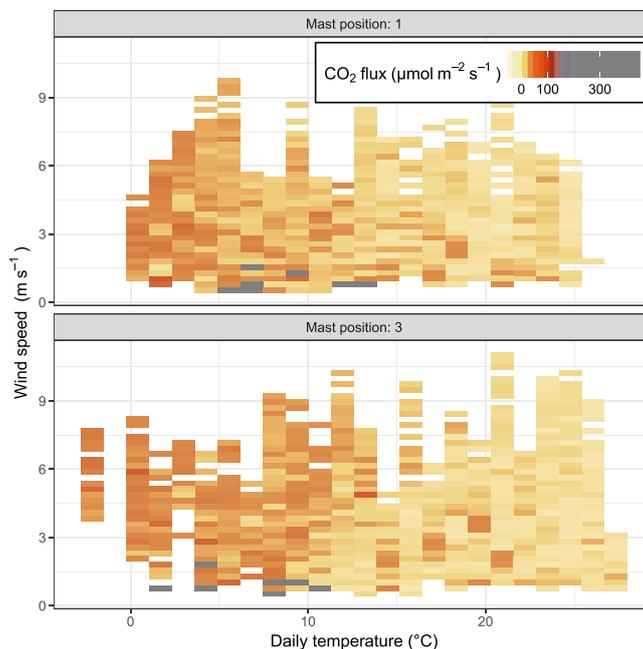


Figure D.13. Measured CO₂ fluxes as a function of the wind speed and daily mean temperature.

Appendix E. Storage

This section describes our methodology for estimating the CO₂ storage below the mast measurement height. For this estimation, we used the half-hourly CO₂ concentration measured at the mast and by two booms at the rooftop level. The booms were located over the two roads adjacent to the building on which the mast was mounted (Rue Alsace-Lorraine and Rue de la Pomme). The measurements of the CO₂ concentrations were taken by two LICOR-7500 instruments placed at a distance of one third of a street width from the building.

The CO₂ concentration variations measured at the mast level can be explained by two physical processes: storage below the mast level or

advection. We estimated the CO₂ storage flux for each 30-min period by assuming that only storage below the mast level (S_STORE) or that only advection (S_ADVEC) was responsible for the CO₂ concentration fluctuations.

We made the following assumptions:

- the CO₂ concentration at the boom level (the roof level) is the mean of the CO₂ concentration measured at the two booms;
- the CO₂ concentration is constant with height between the boom level and the ground level; and
- the CO₂ concentration changes linearly with height between the boom level and the mast level.

First, we assumed that only the advection phenomenon was responsible for the CO₂ fluctuations measured at the mast level. Only the variation of the over-concentration of CO₂ at the boom level compared to the concentration at the mast level is responsible for the storage. The storage at time t is therefore equal to the difference between the volumes P_i and P_{i-1} in Figure E14. The P_i volume depth is f_{canyon} (the fraction of ground not occupied by buildings) below the boom level and 1 above the boom level. This gives the following relationships:

$$P_i = (C_{booms}(t_i) - C_{mast}(t_i)) * \left(z_{booms} * f_{canyon} + \frac{z_{mast} - z_{booms}}{2} \right), \quad (E.1)$$

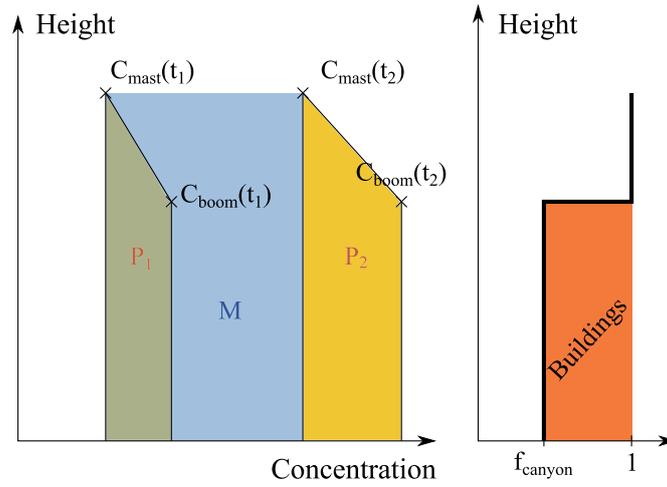


Figure E.14. Illustration of the CO₂ storage calculation method.

$$S_{ADVEC}(t) = \frac{(P_i - P_{i-\Delta t})}{\Delta t}, \quad (E.2)$$

where Δt is the time between two measurements (30 min), C_{booms}/C_{mast} is the CO₂ concentration at the boom/mast level and z_{booms}/z_{mast} is the receptor height on the boom/mast.

When we calculate S_{STORE} , we assume that variations in the concentration at the mast level are due to storage. We therefore need to add the M volume to the previous formula. This gives the following, still considering the shape of the canyon:

$$S_{STORE}(t) = \frac{(P_i - P_{i-\Delta t} + M)}{\Delta t}, \quad (E.3)$$

where

$$M = (C_{mast}(t) - C_{mast}(t - \Delta t)) * (z_{booms} * f_{canyon} + z_{mast} - z_{booms}) \quad (E.4)$$

$$= (C_{mast}(t) - C_{mast}(t - \Delta t)) * (z_{booms} * (1 - f_{canyon}) + z_{mast}). \quad (E.5)$$

We calculated the storage according to both methods (S_{ADVEC} and S_{STORE}) for each 30-min period. We then retained the maximum (in absolute value) of the two values (hereafter referred to as S_{MAX}).

When data were not available at the boom level, we assumed that the CO₂ concentration at the boom level was equal to the concentration at the mast level. Then,

$$S_{ADVEC}(t) = 0 \quad (E.6)$$

$$S_{STORE}(t) = \frac{M}{\Delta t}. \quad (E.7)$$

In this case, the S_{STORE} formula is equivalent to the formula proposed by Crawford and Christen (2014).

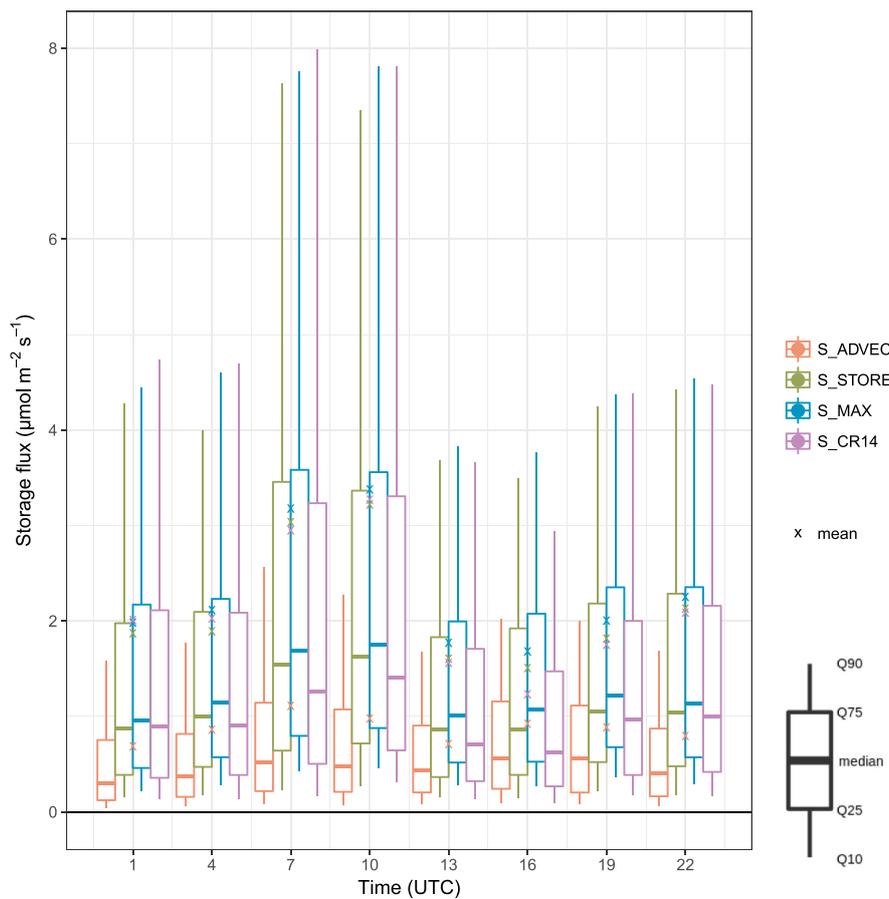


Figure E.15. Storage fluxes for several storage flux calculation methods.

We compared the absolute values of the CO₂ storage flux obtained using the two methods (Figure E15). In general, S_{ADVEC} is lower than S_{STORE} ; however, it can be higher. The method for the CO₂ storage flux calculation proposed by Crawford and Christen (2014) (S_{CR14}), which does not require boom level observations, gives lower estimates than S_{MAX} , especially around noon. However, the mean values for S_{STORE} , S_{MAX} and S_{CR14} are very close. Therefore, the estimation of the CO₂ storage flux obtained with the S_{CR14} method is regarded as valid for time periods for which no observations at the boom level are available.

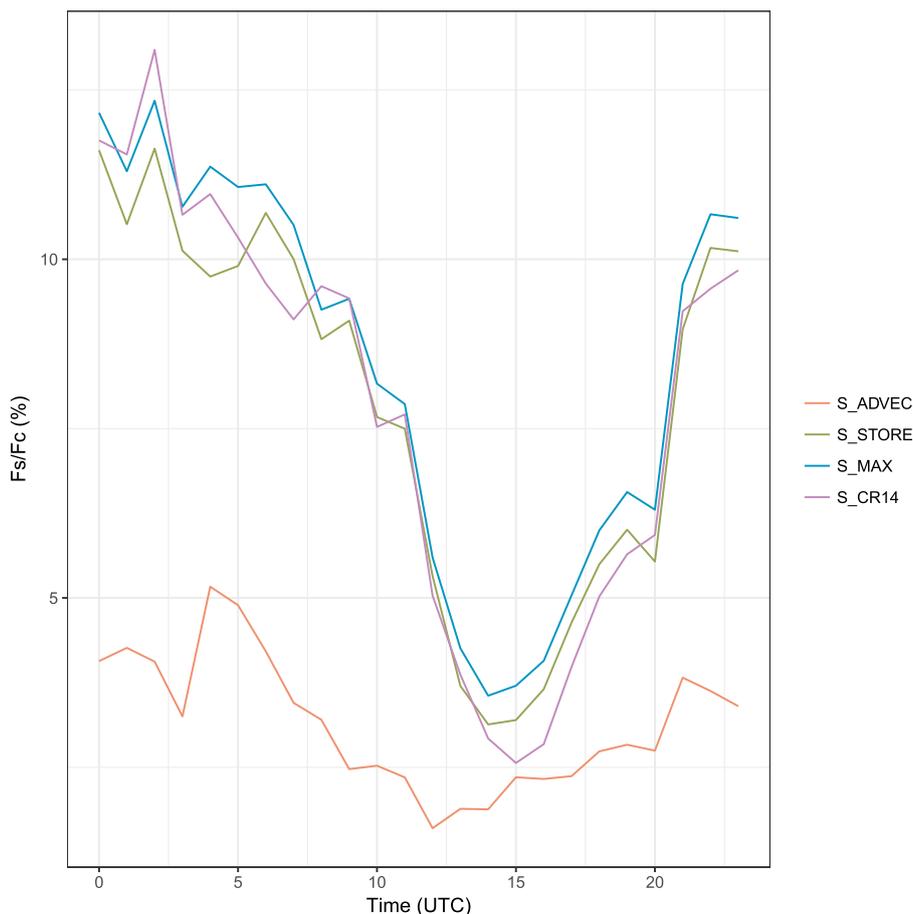


Figure E.16. Daily cycle of the mean absolute CO₂ storage flux divided by the mean absolute CO₂ flux for different methods of estimating the storage flux. The ratio between the mean absolute CO₂ storage flux and the mean absolute CO₂ flux is very similar for S_STORE, S_MAX and S_CR14 (Figure E16). We retained the S_MAX estimation for the storage calculation.

Appendix F. Simulation parameters

This section provides information on the building construction materials and their physical characteristics (Table F.7), on the urban vegetation characteristics (Table F.8) and on the traffic characteristics (Table F.9) for the area in the centre of Toulouse that was simulated with TEB.

Table F.7

Architectural characteristics of buildings. Parameters are initialised via the database on French building archetypes compiled by Tornay et al. (2017). The centre of Toulouse is dominated by historical (pre-WWII) red brick buildings with tiled roofs that were initially primarily for residential use.

	Material	Thickness (m)	Thermal conductivity (W m ⁻¹ K ⁻¹)	Thermal capacity (J kg ⁻¹ K ⁻¹)	Density (kg m ⁻³)	Albedo	Emissivity
Wall	brick	0.6	0.71	840	1500	0.35	0.9
Roof covering	tile brick	0.02	1.00	837	1700	0.25	0.8
Roof inner layer	plaster, wood	0.02	0.21	850	900	-	0.9
Intermediary floor	wood	0.03	0.23	1600	810	-	0.85
	Glazing type	Glazing ratio	U-Value (W m⁻²K⁻¹)	Solar heat gain coefficient			
Windows	single glazing	0.1	4.95	0.6			

Table F.8
Vegetation characteristics.

Parameter	Value
Fraction of high vegetation	0.98
Fraction of low vegetation	0.01
Fraction of bare soil	0.01

(continued on next page)

Table F.8 (continued)

Parameter	Value
Leaf area index for high vegetation	3.5
Leaf area index for low vegetation	1.0
Height of trees	15 m
Respiration rate of the ecosystem at 25°C	$2.2 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Cuticular conductance	0.15 mm s^{-1}
Mesophyll conductance (without soil water stress)	1 mm s^{-1}
Maximum air saturation deficit tolerated by vegetation (without soil water stress)	0.1 kg kg^{-1}
Maximum effective life expectancy	365 days

Table F.9

Traffic characteristics. Mean emission factors are calculated from emission factors taken from Hugrel and Joumard (2006).

Mean annual flux density	
Latent flux LE	0.8 W m^{-2}
Sensible flux H	8 W m^{-2}
CO ₂ flux	$5.6 \times 10^{-7} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$
Mean emission factors	
Latent heat	471 kJ km^{-1}
Sensible heat	4709 kJ km^{-1}
CO ₂	0.47 kg km^{-1}

References

- Agency, U.E.P., 2014. MOVES2014 Technical Guidance: Using MOVES to Prepare Emission Inventories for State Implementation Plans and Transportation Conformity. Transportation and Climate Division Office of Transportation and Air Quality Technical report.
- Albergel, C., Calvet, J.-C., Gibelin, A.-L., Lafont, S., Roujean, J.-L., Berne, C., Traullé, O., Fritz, N., 2010. Observed and modelled ecosystem respiration and gross primary production of a grassland in southwestern France. *Biogeosciences* 7 (5), 1657–1668.
- Baldocchi, D., Falge, E., Gu, L., Olson, R., others, 2001. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 82 (11), 2415.
- Björkregren, A.B., Grimmond, C.S.B., Kotthaus, S., Malamud, B.D., 2015. CO₂ emission estimation in the urban environment: measurement of the CO₂ storage term. *Atmos. Environ.* 122, 775–790.
- Björkregren, A., Grimmond, C., 2018. Net carbon dioxide emissions from central London. *Urban Clim.* 23, 131–158.
- Bocher, E., Petit, G., Bernard, J., Palominos, S., 2018. A geoprocessing framework to compute urban indicators: the MAPUCE tools chain. *Urban Clim.* 24, 153–174.
- Boone, A., Masson, V., Meyers, T., Noilhan, J., 2000. The influence of the inclusion of soil freezing on simulations by a soil-vegetation-atmosphere transfer scheme. *J. Appl. Meteorol.* 39 (9), 1544–1569.
- Bourgeois, A., Pellegrino, M., Lévy, J.-P., 2017. Modeling and mapping domestic energy behavior: insights from a consumer survey in France. *Energy Res. Soc. Sci.* 32, 180–192.
- Bueno, B., Pigeon, G., Norford, L.K., Zibouche, K., Marchadier, C., 2012. Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme. *Geosci. Model Dev. (GMD)* 5 (2), 433–448.
- Calvet, J.-C., 2000. Investigating soil and atmospheric plant water stress using physiological and micrometeorological data. *Agric. For. Meteorol.* 103 (3), 229–247.
- Calvet, J.-C., Noilhan, J., Roujean, J.-L., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Olioso, A., Wigneron, J.-P., 1998. An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites. *Agric. For. Meteorol.* 92 (2), 73–95.
- Calvet, J.-C., Rivalland, V., Picon-Cochard, C., Guehl, J.-M., 2004. Modelling forest transpiration and CO₂ fluxes—response to soil moisture stress. *Agric. For. Meteorol.* 124 (3–4), 143–156.
- Calvet, J.-C., Soussana, J.-F., 2001. Modelling CO₂-enrichment effects using an interactive vegetation SVAT scheme. *Agric. For. Meteorol.* 108 (2), 129–152.
- Christen, A., Coops, N.C., Crawford, B.R., Kellett, R., Liss, K.N., Olchovski, I., Tooke, T.R., van der Laan, M., Voogt, J.A., 2011. Validation of modeled carbon-dioxide emissions from an urban neighborhood with direct eddy-covariance measurements. *Atmos. Environ.* 45 (33), 6057–6069.
- Chêne-Pezot, A., 2005. Facteurs d'émissions de dioxyde de carbone pour les combustibles. Les chiffres ADEME à utiliser. Technical report, ADEME, Service économie. \url{http://auditenergetique.fr/wa_files/Facteurs_d_emission_CO2_combustibles-2.pdf}.
- Crawford, B., Christen, A., 2014. Spatial variability of carbon dioxide in the urban canopy layer and implications for flux measurements. *Atmos. Environ.* 98, 308–322.
- Crawford, B., Christen, A., 2015. Spatial source attribution of measured urban eddy covariance CO₂ fluxes. *Theor. Appl. Climatol.* 119 (3–4), 733–755.
- Crawford, B., Christen, A., McKendry, I., 2015. Diurnal course of carbon dioxide mixing ratios in the urban boundary layer in response to surface emissions. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 55 (3), 507–529.
- Crawford, B., Grimmond, C.S.B., Christen, A., 2011. Five years of carbon dioxide fluxes measurements in a highly vegetated suburban area. *Atmos. Environ.* 45 (4), 896–905.
- Decharme, B., Boone, A., Delire, C., Noilhan, J., 2011. Local evaluation of the Interaction between Soil Biosphere Atmosphere soil multilayer diffusion scheme using four pedotransfer functions. *J. Geophys. Res.: Atmosphere* 116 (D20).
- Demuzere, M., Harshan, S., Järvi, L., Roth, M., Grimmond, C.S.B., Masson, V., Oleson, K.W., Velasco, E., Wouters, H., 2017. Impact of urban canopy models and external parameters on the modelled urban energy balance in a tropical city. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 143 (704), 1581–1596.
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Minx, J.C., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., von Stechow, C., Zwickel, T. (Eds.), 2014. *Climate change 2014: Mitigation of Climate Change; Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Climate Change 2014. Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 892580682 OCLC.
- Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K., 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IPCC, Japan Technical report.
- Foken, T., Gööckede, M., Mauder, M., Mahrt, L., Amiro, B., Munger, W., 2004. Post-field data quality control. In: *Handbook of Micrometeorology*. Springer, pp. 181–208.
- Gibelin, A.-L., Calvet, J.-C., Viovy, N., 2008. Modelling energy and CO₂ fluxes with an interactive vegetation land surface model-Evaluation at high and middle latitudes. *Agric. For. Meteorol.* 148 (10), 1611–1628.
- Grimmond, C.S.B., King, T.S., Cropley, F.D., Nowak, D.J., Souch, C., 2002. Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments: methodological challenges and results from Chicago. *Environ. Pollut.* 116 (Suppl. 1), S243–S254.
- Grimmond, C.S.B., Oke, T.R., 1999. Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *J. Appl. Meteorol.* 38 (9), 1262–1292.
- Hugrel, C., Joumard, R., 2006. Directives et facteurs agrégés d'émission des véhicules routiers en France de 1970 à 2025. INRETS Technical report. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00916989>.
- Järvi, L., Nordbo, A., Junninen, H., Riikonen, A., Moilanen, J., Nikinmaa, E., Vesala, T., 2012. Seasonal and annual variation of carbon dioxide surface fluxes in Helsinki, Finland, in 2006–2010. *Atmos. Chem. Phys.* 12 (18), 8475–8489.
- Karsisto, P., Fortelius, C., Demuzere, M., Grimmond, C.S.B., Oleson, K.W., Kouznetsov, R., Masson, V., Järvi, L., 2016. Seasonal surface urban energy balance and wintertime stability simulated using three land-surface models in the high-latitude city Helsinki. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 142 (694), 401–417.
- Kljun, N., Calanca, P., Rotach, M.W., Schmid, H.P., 2015. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geosci. Model Dev.* 8 (11), 3695–3713.
- Kljun, N., Rotach, M.W., Schmid, H.P., 2002. A three-dimensional backward Lagrangian footprint model for a wide range of boundary-layer stratifications. *Boundary-Layer Meteorol.* 103 (2), 205–226.
- Kordowski, K., Kuttler, W., 2010. Carbon dioxide fluxes over an urban park area. *Atmos. Environ.* 44 (23), 2722–2730.
- Lemonsu, A., Masson, V., Shashua-Bar, L., Erell, E., Pearlmutter, D., 2012. Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geosci. Model Dev. (GMD)* 5 (6), 1377–1393.
- Liu, H.Z., Feng, J.W., Järvi, L., Vesala, T., 2012. Four-year (2006–2009) eddy covariance measurements of CO₂ flux over an urban area in Beijing. *Atmos. Chem. Phys.* 12 (17), 7881–7892.
- Masson, V., 2000. A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric

- models. *Boundary-Layer Meteorol.* 94 (3), 357–397.
- Masson, V., Gomes, L., Pigeon, G., Lioussé, C., Pont, V., Lagouarde, J.-P., Voogt, J., Salmund, J., Oke, T.R., Hidalgo, J., Legain, D., Garrouste, O., Lac, C., Connan, O., Briottet, X., Lachéradé, S., Tulet, P., 2008. The canopy and Aerosol particles interactions in Toulouse urban layer (CAPITOU) experiment. *Meteorol. Atmos. Phys.* 102 (3–4), 135–157.
- Masson, V., Le Moigne, P., Martin, E., Faroux, S., Alias, A., Alkama, R., Belamari, S., Barbu, A., Boone, A., Bouyssel, F., Brousseau, P., Brun, E., Calvet, J.-C., Carrer, D., Decharme, B., Delire, C., Donier, S., Essaouini, K., Gibelin, A.-L., Giordani, H., Habets, F., Jidane, M., Kerdraon, G., Kourzeneva, E., Lafaysse, M., Lafont, S., Lebeaupin Brossier, C., Lemonsu, A., Mahfouf, J.-F., Marguinaud, P., Mokhtari, M., Morin, S., Pigeon, G., Salgado, R., Seity, Y., Taillefer, F., Tanguy, G., Tulet, P., Vincendon, B., Vionnet, V., Voldoire, A., 2013. The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of Earth surface variables and fluxes. *Geosci. Model Dev. (GMD)* 6, 929–960.
- Moriwaki, R., Kanda, M., 2004. Seasonal and diurnal fluxes of radiation, heat, water vapor, and carbon dioxide over a suburban area. *J. Appl. Meteorol.* 43 (11), 1700–1710.
- Nemitz, E., Hargreaves, K.J., McDonald, A.G., Dorsey, J.R., Fowler, D., 2002. Micrometeorological measurements of the urban heat budget and CO₂ emissions on a city scale. *Environ. Sci. Technol.* 36 (14), 3139–3146.
- Nieuwstadt, F.T.M., 1981. The steady-state height and resistance laws of the nocturnal boundary layer: theory compared with cabauw observations. *Boundary-Layer Meteorol.* 20 (1), 3–17.
- Noilhan, J., Planton, S., 1989. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Weather Rev.* 117 (3), 536–549.
- Pigeon, G., 2007. *Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine - projets Clu-escompte et Capitoul*. PhD thesis. Université Paul Sabatier - Toulouse 3. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00186764/document>.
- Pigeon, G., Mosicki, M.A., Voogt, J.A., Masson, V., 2008. Simulation of fall and winter surface energy balance over a dense urban area using the TEB scheme. *Meteorol. Atmos. Phys.* 102 (3–4), 159–171.
- Pigeon, G., Zibouche, K., Bueno, B., Le Bras, J., Masson, V., 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. *Energy Build.* 76 (Suppl. C), 1–14.
- Roth, M., Jansson, C., Velasco, E., 2017. Multi-year energy balance and carbon dioxide fluxes over a residential neighbourhood in a tropical city. *Int. J. Climatol.* 37 (5), 2679–2698.
- Satterthwaite, D., 2008. Cities' contribution to global warming: notes on the allocation of greenhouse gas emissions. *Environ. Urbanization* 20 (2), 539–549.
- Schoetter, R., Masson, V., Bourgeois, A., Pellegrino, M., Lévy, J.-P., 2017. Parametrisation of the variety of human behaviour related to building energy consumption in the Town Energy Balance (SURFEX-TEB v. 8.2). *Geosci. Model Dev. (GMD)* 10 (7), 2801–2831.
- Soegaard, H., Møller-Jensen, L., 2003. Towards a spatial CO₂ budget of a metropolitan region based on textural image classification and flux measurements. *Rem. Sens. Environ.* 87 (2–3), 283–294.
- Stagakis, S., Chrysoulakis, N., Spyridakis, N., Feigenwinter, C., Vogt, R., 2019. Eddy Covariance measurements and source partitioning of CO₂ emissions in an urban environment: application for Heraklion, Greece. *Atmos. Environ.* 201, 278–292.
- Stewart, I.D., Oke, T.R., 2012. Local climate zones for urban temperature studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 93 (12), 1879–1900.
- Thomas, C., Foken, T., 2002. Re-evaluation of integral turbulence characteristics and their parameterisations. In: Paper Presented at 15th Symposium on Boundary Layers and Turbulence. Am. Meteorol. Soc., Wageningen, Netherlands.
- Tornay, N., Schoetter, R., Bonhomme, M., Faraut, S., Masson, V., 2017. GENIUS: a methodology to define a detailed description of buildings for urban climate and building energy consumption simulations. *Urban Clim.* 20, 75–93.
- U.S. Environmental Protection Agency, 2016. Greenhouse Gas Inventory Guidance. U.S. Environmental Protection Agency Technical report.
- Velasco, E., Perrusquia, R., Jiménez, E., Hernández, F., Camacho, P., Rodríguez, S., Retama, A., Molina, L.T., 2014. Sources and sinks of carbon dioxide in a neighborhood of Mexico City. *Atmos. Environ.* 97, 226–238.
- Velasco, E., Roth, M., Tan, S.H., Quak, M., Nabarro, S.D.A., Norford, L., 2013. The role of vegetation in the CO₂ flux from a tropical urban neighbourhood. *Atmos. Chem. Phys.* 13 (20), 10185–10202.
- Vesala, T., Järvi, L., Launainen, S., Sogachev, A., Rannik, U., Mammarella, I., Siivola, E., Keronen, P., Rinne, J., Riikonen, A., Nikinmaa, E., 2008a. Surface-atmosphere interactions over complex urban terrain in Helsinki, Finland. *Tellus B* 60 (2), 188–199.
- Vesala, T., Kljun, N., Rannik, U., Rinne, J., Sogachev, A., Markkanen, T., Sabelfeld, K., Foken, T., Leclerc, M.Y., 2008b. Flux and concentration footprint modelling: state of the art. *Environ. Pollut.* 152 (3), 653–666.
- Vogt, R., Christen, A., Rotach, M.W., Roth, M., Satyanarayana, A.N.V., 2006. Temporal dynamics of CO₂ fluxes and profiles over a Central European city. *Theor. Appl. Climatol.* 84 (1–3), 117–126.
- Webb, E.K., Pearman, G.I., Leuning, R., 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 106 (447), 85–100.
- Weissert, L., Salmund, J., Turnbull, J., Schwendenmann, L., 2016. Temporal variability in the sources and fluxes of CO₂ in a residential area in an evergreen subtropical city. *Atmos. Environ.* 143, 164–176.
- West, T.O., Marland, G., Singh, N., Bhaduri, B.L., Roddy, A.B., 2009. The human carbon budget: an estimate of the spatial distribution of metabolic carbon consumption and release in the United States. *Biogeochemistry* 94 (1), 29–41.
- Yang, Bai, Hanson Paul, J., Riggs Jeffery, S., Pallardy Stephen, G., Mark, Heuer, Hosman Kevin, P., Meyers Tilden, P., Wullschlegler Stan, D., Gu, Lian-Hong, 2007. Biases of CO₂ storage in eddy flux measurements in a forest pertinent to vertical configurations of a profile system and CO₂ density averaging. *J. Geophys. Res.: Atmosphere* 112 (D20).

Bibliographie

- ALBERGEL, C., CALVET, J.-C., GIBELIN, A.-L., LAFONT, S., ROUJEAN, J.-L., BERNE, C., TRAULLÉ, O. et FRITZ, N. (2010). Observed and modelled ecosystem respiration and gross primary production of a grassland in southwestern France. *Biogeosciences*, 7(5) : 1657–1668.
- ANDRES, R. J., BODEN, T. A. et HIGDON, D. (2014). A new evaluation of the uncertainty associated with CDIAC estimates of fossil fuel carbon dioxide emission. *Tellus B : Chemical and Physical Meteorology*, 66(1) :23616.
- ANDRES, R. J. O., BODEN, T. A. et HIGDON, D. M. (2016). Gridded uncertainty in fossil fuel carbon dioxide emission maps, a CDIAC example. *Atmospheric Chemistry and Physics (Online)*, 16(23).
- AZEVEDO, J. A., CHAPMAN, L. et MULLER, C. L. (2016). Quantifying the Daytime and Night-Time Urban Heat Island in Birmingham, UK : A Comparison of Satellite Derived Land Surface Temperature and High Resolution Air Temperature Observations. *Remote Sensing*, 8(2) :153.
- BALDOCCHI, D., FALGE, E., GU, L., OLSON, R. et OTHERS (2001). FLUXNET : A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor, and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(11) :2415.
- BJORKEGREN, A. B., GRIMMOND, C. S. B., KOTTHAUS, S. et MALAMUD, B. D. (2015). CO2 emission estimation in the urban environment : Measurement of the CO2 storage term. *Atmospheric Environment*, 122 :775–790.
- BJÖRKEGREN, A. et GRIMMOND, C. (2018). Net carbon dioxide emissions from central London. *Urban Climate*, 23 :131–158.
- BOCHER, E., PETIT, G., BERNARD, J. et PALOMINOS, S. (2018). A geoprocessing framework to compute urban indicators : The MApUCE tools chain. *Urban Climate*, 24 :153–174.
- BONHOMME, M. (2013). *Contribution à la génération de bases de données multi-scalaires et évolutives pour une approche pluridisciplinaire de l'énergétique urbaine*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse.
- BOONE, A., MASSON, V., MEYERS, T. et NOILHAN, J. (2000). The Influence of the Inclusion of Soil Freezing on Simulations by a Soil–Vegetation–Atmosphere Transfer Scheme. *Journal of Applied Meteorology*, 39(9) :1544–1569.
- BORNSTEIN, R. et LIN, Q. (2000). Urban heat islands and summertime convective thunderstorms in Atlanta : three case studies. *Atmospheric Environment*, 34(3) :507–516.
- BORYS, R. D., LOWENTHAL, D. H., COHN, S. A. et BROWN, W. O. J. (2003). Mountaintop and radar measurements of anthropogenic aerosol effects on snow growth and snowfall rate. *Geophysical Research Letters*, 30(10).

- BOTTEMA, M. (1997). Urban roughness modelling in relation to pollutant dispersion. *Atmospheric Environment*, 31(18) :3059–3075.
- BOURGEOIS, A., PELLEGRINO, M. et LÉVY, J.-P. (2017). Modeling and mapping domestic energy behavior : Insights from a consumer survey in France. *Energy Research & Social Science*, 32 :180–192.
- BRIOUDE, J., ANGEVINE, W. M., AHMADOV, R., KIM, S.-W., EVAN, S., MCKEEN, S. A., HSIE, E.-Y., FROST, G. J., NEUMAN, J. A., POLLACK, I. B., PEISCHL, J., RYERSON, T. B., HOLLOWAY, J., BROWN, S. S., NOWAK, J. B., ROBERTS, J. M., WOFSEY, S. C., SANTONI, G. W., ODA, T. et TRAINER, M. (2013). Top-down estimate of surface flux in the Los Angeles Basin using a mesoscale inverse modeling technique : assessing anthropogenic emissions of CO, NO_x and CO₂ and their impacts. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13(7) :3661–3677.
- BRÉON, F. M., BROQUET, G., PUYGRENIER, V., CHEVALLIER, F., XUEREF-REMY, I., RAMONET, M., DIEUDONNÉ, E., LOPEZ, M., SCHMIDT, M., PERRUSSEL, O. et CIAIS, P. (2015). An attempt at estimating Paris area CO₂ emissions from atmospheric concentration measurements. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(4) :1707–1724.
- BUENO, B., PIGEON, G., NORFORD, L. K., ZIBOUCHE, K. et MARCHADIER, C. (2012). Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme. *Geoscientific Model Development*, 5(2) :433–448.
- BURBA, G. (2013). *Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural, and regulatory applications : a field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates*. LI-COR Biosciences. OCLC : 850616326.
- CA, V. T., ASAEDA, T. et ASHIE, Y. (1999). Development of a numerical model for the evaluation of the urban thermal environment. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81(1) :181–196.
- CALVET, J.-C. (2000). Investigating soil and atmospheric plant water stress using physiological and micrometeorological data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103(3) :229–247.
- CALVET, J.-C., GIBELIN, A.-L., ROUJEAN, J.-L., MARTIN, E., LE MOIGNE, P., DOUVILLE, H. et NOILHAN, J. (2008). Past and future scenarios of the effect of carbon dioxide on plant growth and transpiration for three vegetation types of southwestern France. *Atmos. Chem. Phys.*, 8(2) :397–406.
- CALVET, J.-C., NOILHAN, J., ROUJEAN, J.-L., BESSEMOULIN, P., CABELGUENNE, M., OLIOSO, A. et WIGNERON, J.-P. (1998). An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92(2) :73–95.
- CALVET, J.-C., RIVALLAND, V., PICON-COCHARD, C. et GUEHL, J.-M. (2004). Modelling forest transpiration and CO₂ fluxes—response to soil moisture stress. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124(3–4) :143–156.
- CALVET, J.-C. et SOUSSANA, J.-F. (2001). Modelling CO₂-enrichment effects using an interactive vegetation SVAT scheme. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108(2) :129–152.
- CHANGNON, S., éditeur (1981). *METROMEX : A Review and Summary*. Meteorological Monographs. American Meteorological Society.

BIBLIOGRAPHIE

- CHRISTEN, A., COOPS, N. C., CRAWFORD, B. R., KELLETT, R., LISS, K. N., OLCHOVSKI, I., TOOKE, T. R., van der LAAN, M. et VOOGT, J. A. (2011). Validation of modeled carbon-dioxide emissions from an urban neighborhood with direct eddy-covariance measurements. *Atmospheric Environment*, 45(33) :6057–6069.
- CIAIS, P., RAYNER, P., CHEVALLIER, F., BOUSQUET, P., LOGAN, M., PEYLIN, P. et RAMONET, M. (2010). Atmospheric inversions for estimating CO₂ fluxes : methods and perspectives. *Climatic Change*, 103(1) :69–92.
- CITEPA (2019). Rapport OMINEA - 16ème édition. Rapport technique, CITEPA.
- CLARKE, K. C., HOPPEN, S. et GAYDOS, L. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area. *Environment and Planning B : Planning and Design*, 24(2) :247–261.
- CRAWFORD, B. et CHRISTEN, A. (2014). Spatial variability of carbon dioxide in the urban canopy layer and implications for flux measurements. *Atmospheric Environment*, 98 : 308–322.
- CRAWFORD, B. et CHRISTEN, A. (2015). Spatial source attribution of measured urban eddy covariance CO₂ fluxes. *Theoretical and Applied Climatology*, 119(3-4) :733–755.
- CRAWFORD, B., CHRISTEN, A. et MCKENDRY, I. (2015). Diurnal Course of Carbon Dioxide Mixing Ratios in the Urban Boundary Layer in Response to Surface Emissions. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(3) :507–529.
- CRAWFORD, B., GRIMMOND, C. S. B. et CHRISTEN, A. (2011). Five years of carbon dioxide fluxes measurements in a highly vegetated suburban area. *Atmospheric Environment*, 45(4) :896–905.
- DECHARME, B., BOONE, A., DELIRE, C. et NOILHAN, J. (2011). Local evaluation of the Interaction between Soil Biosphere Atmosphere soil multilayer diffusion scheme using four pedotransfer functions. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 116(D20).
- DEMUZERE, M., HARSHAN, S., JÄRVI, L., ROTH, M., GRIMMOND, C. S. B., MASSON, V., OLESON, K. W., VELASCO, E. et WOUTERS, H. (2017). Impact of urban canopy models and external parameters on the modelled urban energy balance in a tropical city. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143(704) :1581–1596.
- DOGUET, B. (2018). Une croissance démographique toujours très soutenue en Occitanie. *INSEE flash*, 84 :2.
- DOUKARI, O., AGUEJDAD, R. et HOUET, T. (2016). SLEUTH* : un modèle d'expansion urbaine scénario-dépendant. *Revue Internationale de Géomatique*, 26(1) :7–32.
- DUPONT, S., OTTE, T. L. et CHING, J. K. S. (2004). Simulation of Meteorological Fields Within and Above Urban and Rural Canopies with a Mesoscale Model. *Boundary-Layer Meteorology*, 113(1) :111–158.
- EGGLESTON, H. S., BUENDIA, L., MIWA, K., NGARA, T. et TANABE, K. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Rapport technique, IPCC, Japan.
- FENG, S., LAUVAUX, T., NEWMAN, S., RAO, P., AHMADOV, R., DENG, A., DÍAZ-ISAAC, L. I., DUREN, R. M., FISCHER, M. L., GERBIG, C., GURNEY, K. R., HUANG, J., JEONG, S., LI, Z., MILLER, C. E., O'KEEFFE, D., PATARASUK, R., SANDER, S. P., SONG, Y., WONG, K. W. et YUNG, Y. L. (2016). Los Angeles megacity : a high-resolution land-atmosphere

- modelling system for urban CO₂ emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(14) : 9019–9045.
- FOKEN, T., GÖCKEKE, M., MAUDER, M., MAHRT, L., AMIRO, B. et MUNGER, W. (2004). Post-field data quality control. In *Handbook of micrometeorology*, pages 181–208. Springer.
- FOKEN, T. et WICHURA, B. (1996). Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. *Agricultural and Forest Meteorology*, 78(1) :83–105.
- GIBELIN, A.-L., CALVET, J.-C. et VIOVY, N. (2008). Modelling energy and CO₂ fluxes with an interactive vegetation land surface model-Evaluation at high and middle latitudes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 148(10) :1611–1628.
- GIEC (2018). Résumé à l’intention des décideurs, Réchauffement planétaire de 1,5 °C, Rapport spécial du GIEC sur les conséquences d’un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d’émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté [Publié sous la direction de V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor et T. Waterfield]. Rapport technique, Organisation météorologique mondiale, Geneva, Switzerland.
- GORET, M., MASSON, V., SCHOETTER, R. et MOINE, M.-P. (2019). Inclusion of CO₂ flux modelling in an urban canopy layer model and an evaluation over an old European city centre. *Atmospheric Environment : X*, page 100042.
- GORET, M., MOINE, M.-P. et MASSON, V. (2016). Impacts de l’expansion urbaine sur le micro-climat urbain : optimisation d’une plateforme de modélisation et application à différentes villes françaises. Rapport de stage de fin d’étude.
- GRIMMOND, C. S. B., KING, T. S., CROPLEY, F. D., NOWAK, D. J. et SOUCH, C. (2002). Local-scale fluxes of carbon dioxide in urban environments : methodological challenges and results from Chicago. *Environmental Pollution*, 116, Supplement 1 :S243–S254.
- GRIMMOND, C. S. B. et OKE, T. R. (1999). Aerodynamic Properties of Urban Areas Derived from Analysis of Surface Form. *Journal of Applied Meteorology*, 38(9) :1262–1292.
- HAMDI, R. et MASSON, V. (2008). Inclusion of a Drag Approach in the Town Energy Balance (TEB) Scheme : Offline 1d Evaluation in a Street Canyon. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 47(10) :2627–2644.
- HAN, J.-Y., BAIK, J.-J. et LEE, H. (2014). Urban impacts on precipitation. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 50(1) :17–30.
- HARDE, H. (2017). Scrutinizing the carbon cycle and CO₂ residence time in the atmosphere. *Global and Planetary Change*, 152 :19–26.
- HIDALGO, J., MASSON, V., BAKLANOV, A., PIGEON, G. et GIMENO, L. (2008). Advances in Urban Climate Modeling. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146(1) :354–374.
- HOGUE, S., MARLAND, E., ANDRES, R. J., MARLAND, G. et WOODARD, D. (2016). Uncertainty in gridded CO₂ emissions estimates. *Earth’s Future*, 4(5) :225–239.
- HUGREL, C. et JOUMARD, R. (2006). Directives et facteurs agrégés d’émission des véhicules routiers en France de 1970 à 2025. Rapport technique, INRETS, <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00916989>.

BIBLIOGRAPHIE

- HUTCHINS, M. G., COLBY, J. D., MARLAND, G. et MARLAND, E. (2017). A comparison of five high-resolution spatially-explicit, fossil-fuel, carbon dioxide emission inventories for the United States. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 22(6) :947–972.
- INOUE, T. et KIMURA, F. (2004). Urban effects on low-level clouds around the Tokyo metropolitan area on clear summer days. *Geophysical Research Letters*, 31(5).
- IPCC, . (2014). *Climate Change 2014 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- JÄRVI, L., MAMMARELLA, I., EUGSTER, W., IBROM, A., SIIVOLA, E., DELLWIK, E., KERONEN, P., BURBA, G. et VESALA, T. (2009a). Comparison of net CO₂ fluxes measured with open- and closed-path infrared gas analyzers in an urban complex environment. *Boreal Environment Research*, 14 :16.
- JÄRVI, L., NORDBO, A., JUNNINEN, H., RIIKONEN, A., MOILANEN, J., NIKINMAA, E. et VESALA, T. (2012). Seasonal and annual variation of carbon dioxide surface fluxes in Helsinki, Finland, in 2006–2010. *Atmos. Chem. Phys.*, 12(18) :8475–8489.
- JÄRVI, L., RANNIK, \., MAMMARELLA, I., SOGACHEV, A., AALTO, P. P., KERONEN, P., SIIVOLA, E., KULMALA, M. et VESALA, T. (2009b). Annual particle flux observations over a heterogeneous urban area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(20) :7847–7856.
- KANDA, M. (2006). Progress in the scale modeling of urban climate : Review. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1-3) :23–33.
- KARSISTO, P., FORTELIUS, C., DEMUZERE, M., GRIMMOND, C. S. B., OLESON, K. W., KOUZNETSOV, R., MASSON, V. et JÄRVI, L. (2016). Seasonal surface urban energy balance and wintertime stability simulated using three land-surface models in the high-latitude city Helsinki. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(694) :401–417.
- KIENZLE, S. W. (2008). A new temperature based method to separate rain and snow. *Hydrological Processes*, 22(26) :5067–5085.
- KLJUN, N., CALANCA, P., ROTACH, M. W. et SCHMID, H. P. (2015). A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geosci. Model Dev.*, 8(11) :3695–3713.
- KLJUN, N., ROTACH, M. W. et SCHMID, H. P. (2002). A Three-Dimensional Backward Lagrangian Footprint Model For A Wide Range Of Boundary-Layer Stratifications. *Boundary-Layer Meteorology*, 103(2) :205–226.
- KORDOWSKI, K. et KUTTLER, W. (2010). Carbon dioxide fluxes over an urban park area. *Atmospheric Environment*, 44(23) :2722–2730.
- KUSAKA, H., KONDO, H., KIKEGAWA, Y. et KIMURA, F. (2001). A Simple Single-Layer Urban Canopy Model For Atmospheric Models : Comparison With Multi-Layer And Slab Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 101(3) :329–358.
- LAC, C., CHABOUREAU, J.-P., MASSON, V., PINTY, J.-P., TULET, P., ESCOBAR, J., LERICHE, M., BARTHE, C., AOUIZERATS, B., AUGROS, C., AUMOND, P., AUGUSTE, F., BECHTOLD, P., BERTHET, S., BIELLI, S., BOSSEUR, F., CAUMONT, O., COHARD, J.-M., COLIN, J., COUVREUX, F., CUXART, J., DELAUTIER, G., DAUHUT, T., DUCROCQ, V., FILIPPI, J.-B., GAZEN, D., GEOFFROY, O., GHEUSI, F., HONNERT, R., LAFORE, J.-P., LEBEAUPIN BROSSIER, C., LIBOIS, Q., LUNET, T., MARI, C., MARIC, T., MASCART, P.,

- MOGÉ, M., MOLINIÉ, G., NUISSIER, O., PANTILLON, F., PEYRILLÉ, P., PERGAUD, J., PERRAUD, E., PIANEZZE, J., REDELSPERGER, J.-L., RICARD, D., RICHARD, E., RIETTE, S., RODIER, Q., SCHOETTER, R., SEYFRIED, L., STEIN, J., SUHRE, K., TAUFOR, M., THOURON, O., TURNER, S., VERRELLE, A., VIÉ, B., VISENTIN, F., VIONNET, V. et WAUTELET, P. (2018). Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications. *Geoscientific Model Development*, 11(5) :1929–1969.
- LAUVAUX, T., MILES, N. L., DENG, A., RICHARDSON, S. J., CAMBALIZA, M. O., DAVIS, K. J., GAUDET, B., GURNEY, K. R., HUANG, J., O’KEEFE, D., SONG, Y., KARION, A., ODA, T., PATARASUK, R., RAZLIVANOV, I., SARMIENTO, D., SHEPSON, P., SWEENEY, C., TURNBULL, J. et WU, K. (2016). High-resolution atmospheric inversion of urban CO₂ emissions during the dormant season of the Indianapolis Flux Experiment (INFLUX). *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 121(10) :5213–5236.
- LECONTE, F. (2014). *Caractérisation des îlots de chaleur urbain par zonage climatique et mesures mobiles : Cas de Nancy*. phdthesis, Université de Lorraine.
- LEMONSU, A., MASSON, V., SHASHUA-BAR, L., ERELL, E. et PEARLMUTTER, D. (2012). Inclusion of vegetation in the Town Energy Balance model for modelling urban green areas. *Geoscientific Model Development*, 5(6) :1377–1393.
- LIU, H. Z., FENG, J. W., JÄRVI, L. et VESALA, T. (2012). Four-year (2006–2009) eddy covariance measurements of CO₂ flux over an urban area in Beijing. *Atmos. Chem. Phys.*, 12(17) :7881–7892.
- MARTILLI, A. (2002). Numerical Study of Urban Impact on Boundary Layer Structure : Sensitivity to Wind Speed, Urban Morphology, and Rural Soil Moisture. *Journal of Applied Meteorology*, 41(12) :1247–1266.
- MASSON, V. (2000). A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models. *Boundary-Layer Meteorology*, 94(3) :357–397.
- MASSON, V., GOMES, L., PIGEON, G., LIOUSSE, C., PONT, V., LAGOUARDE, J.-P., VOOGT, J., SALMOND, J., OKE, T. R., HIDALGO, J., LEGAIN, D., GARROUSTE, O., LAC, C., CONNAN, O., BRIOTTET, X., LACHÉRADE, S. et TULET, P. (2008). The Canopy and Aerosol Particles Interactions in TOulouse Urban Layer (CAPITOUL) experiment. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3-4) :135–157.
- MASSON, V., LE MOIGNE, P., MARTIN, E., FAROUX, S., ALIAS, A., ALKAMA, R., BELAMARI, S., BARBU, A., BOONE, A., BOUYSSSEL, 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., LAFAYSSSE, 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. et VOLDOIRE, A. (2013). The SURFEXv7.2 land and ocean surface platform for coupled or offline simulation of Earth surface variables and fluxes. *Geoscientific Model Development*, 6 :929–960.
- MILLS, G. (1997). An urban canopy-layer climate model. *Theoretical and Applied Climatology*, 57(3) :229–244.
- MORIWAKI, R. et KANDA, M. (2004). Seasonal and Diurnal Fluxes of Radiation, Heat, Water Vapor, and Carbon Dioxide over a Suburban Area. *Journal of Applied Meteorology*, 43(11) :1700–1710.

BIBLIOGRAPHIE

- NEMITZ, E., HARGREAVES, K. J., McDONALD, A. G., DORSEY, J. R. et FOWLER, D. (2002). Micrometeorological Measurements of the Urban Heat Budget and CO₂ Emissions on a City Scale. *Environmental Science & Technology*, 36(14) :3139–3146.
- NIEUWSTADT, F. T. M. (1981). The steady-state height and resistance laws of the nocturnal boundary layer : Theory compared with cabauw observations. *Boundary-Layer Meteorology*, 20(1) :3–17.
- NIYOGI, D., PYLE, P., LEI, M., ARYA, S. P., KISHTAWAL, C. M., SHEPHERD, M., CHEN, F. et WOLFE, B. (2010). Urban Modification of Thunderstorms : An Observational Storm Climatology and Model Case Study for the Indianapolis Urban Region. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(5) :1129–1144.
- NOILHAN, J. et PLANTON, S. (1989). A Simple Parameterization of Land Surface Processes for Meteorological Models. *Monthly Weather Review*, 117(3) :536–549.
- NORDBO, A., JÄRVI, L. et VESALA, T. (2012). Revised eddy covariance flux calculation methodologies – effect on urban energy balance. *Tellus B : Chemical and Physical Meteorology*, 64(1) :18184.
- OKE, T. R., MILLS, G., CHRISTEN, A. et VOOGT, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University Press, Cambridge.
- PATAKI, D. E., BOWLING, D. R. et EHLERINGER, J. R. (2003). Seasonal cycle of carbon dioxide and its isotopic composition in an urban atmosphere : Anthropogenic and biogenic effects. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 108(D23).
- PATAKI, D. E., XU, T., LUO, Y. Q. et EHLERINGER, J. R. (2007). Inferring biogenic and anthropogenic carbon dioxide sources across an urban to rural gradient. *Oecologia*, 152(2) : 307–322.
- PIACENTINI, A., MOREL, T., THÉVENIN, A. et DUCHAINE, F. (2011). O-PALM : an open source dynamic parallel coupler. page 11.
- PIGEON, G. (2007). *Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine - projets Clu-escompte et Capitoul*. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse 3. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00186764/document>.
- PIGEON, G., MOSCICKI, M. A., VOOGT, J. A. et MASSON, V. (2008). Simulation of fall and winter surface energy balance over a dense urban area using the TEB scheme. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 102(3-4) :159–171.
- RAN, Y., LI, X., SUN, R., KLJUN, N., ZHANG, L., WANG, X. et ZHU, G. (2016). Spatial representativeness and uncertainty of eddy covariance carbon flux measurements for upscaling net ecosystem productivity to the grid scale. *Agricultural and Forest Meteorology*.
- ROSENFELD, D. (2000). Suppression of Rain and Snow by Urban and Industrial Air Pollution. *Science*, 287(5459) :1793–1796.
- ROTH, M., JANSSON, C. et VELASCO, E. (2017). Multi-year energy balance and carbon dioxide fluxes over a residential neighbourhood in a tropical city. *International Journal of Climatology*, 37(5) :2679–2698.
- SANTAREN, D., PEYLIN, P., VIOVY, N. et CIAIS, P. (2007). Optimizing a process-based ecosystem model with eddy-covariance flux measurements : A pine forest in southern France. *Global Biogeochemical Cycles*, 21(2).

- SARMIENTO, J. L., GLOOR, M., GRUBER, N., BEAULIEU, C., JACOBSON, A. R., MIKALOFF FLETCHER, S. E., PACALA, S. et RODGERS, K. (2010). Trends and regional distributions of land and ocean carbon sinks. *Biogeosciences*, 7(8) :2351–2367.
- SATTERTHWAITE, D. (2008). Cities' contribution to global warming : notes on the allocation of greenhouse gas emissions. *Environment and Urbanization*, 20(2) :539–549.
- SCHNEIDER, A., FRIEDL, M. A. et POTERE, D. (2009). A new map of global urban extent from MODIS satellite data. *Environmental Research Letters*, 4(4) :044003.
- SCHOETTER, R., HIDALGO, J., JOUGLA, R., MASSON, V., GORET, M., REGA, M. et PERGAUD, J. (2019a). A statistical-dynamical downscaling for the urban heat island and building energy consumption. Analysis of its uncertainties. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*.
- SCHOETTER, R., MASSON, V., AMOSSÉ, A., BERNARD, J., BOCHER, E., BONHOMME, M., BOURGEOIS, A., FARAUT, S., GARDES, T., GORET, M., HIDALGO, J., LÉVY, J.-P., LONG, N., PELLEGRINO, M., PETIT, G., PLUMEJEAUD, C., POITEVIN, C. et TORNAY, N. (2019b). Caractérisation du tissu urbain français pour la modélisation du climat urbain et de son interaction avec la consommation énergétique dans les bâtiments. *La météorologie*, 1(105).
- SCHOETTER, R., MASSON, V., BOURGEOIS, A., PELLEGRINO, M. et LÉVY, J.-P. (2017). Parametrisation of the variety of human behaviour related to building energy consumption in the Town Energy Balance (SURFEX-TEB v. 8.2). *Geoscientific Model Development*, 10(7) :2801–2831.
- SETO, K. C., DHAKAL, S., BIGIO, A., BLANCO, H., DELGADO, G., DEWAR, D., HUANG, L., INABA, A., KANSAL, A., LWASA, S., MCMAHON, J., MÜLLER, D., MURAKAMI, J., NAGENDRA, H. et RAMASWAMI, A. (2014). *Human Settlements, Infrastructure and Spatial Planning*. In : *Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- SOEGAARD, H. et MØLLER-JENSEN, L. (2003). Towards a spatial CO₂ budget of a metropolitan region based on textural image classification and flux measurements. *Remote Sensing of Environment*, 87(2-3) :283–294.
- SPITTERS, C. J. T., TOUSSAINT, H. A. J. M. et GOUDRIAAN, J. (1986). Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis Part I. Components of incoming radiation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 38(1) :217–229.
- STAGAKIS, S., CHRYSOULAKIS, N., SPYRIDAKIS, N., FEIGENWINTER, C. et VOGT, R. (2019). Eddy Covariance measurements and source partitioning of CO₂ emissions in an urban environment : Application for Heraklion, Greece. *Atmospheric Environment*, 201 :278–292.
- STEWART, I. D. et OKE, T. R. (2012). Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12) :1879–1900.
- THOMAS, C. et FOKEN, T. (2002). Re-evaluation of integral turbulence characteristics and their parameterisations, paper presented at 15th Symposium on Boundary Layers and Turbulence. *Am. Meteorol. Soc., Wageningen, Netherlands*.

BIBLIOGRAPHIE

- TORNAY, N., SCHOETTER, R., BONHOMME, M., FARAUT, S. et MASSON, V. (2017). GENIUS : A methodology to define a detailed description of buildings for urban climate and building energy consumption simulations. *Urban Climate*, 20 :75–93.
- UNITED NATIONS (2019). *World Urbanization Prospects : The 2018 Revision (ST/ESA/SER.A/420)*. UNITED NATIONS Department of Economic and Social Affairs, Population Division, New York : United Nations. OCLC : 1120698127.
- URANO, A., ICHINOSE, T. et HANAKI, K. (1999). Thermal environment simulation for three dimensional replacement of urban activity. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81(1) :197–210.
- van den HEEVER, S. C. et COTTON, W. R. (2007). Urban Aerosol Impacts on Downwind Convective Storms. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 46(6) :828–850.
- VELASCO, E., PERRUSQUIA, R., JIMÉNEZ, E., HERNÁNDEZ, F., CAMACHO, P., RODRÍGUEZ, S., RETAMA, A. et MOLINA, L. T. (2014). Sources and sinks of carbon dioxide in a neighborhood of Mexico City. *Atmospheric Environment*, 97 :226–238.
- VELASCO, E. et ROTH, M. (2010). Cities as Net Sources of CO₂ : Review of Atmospheric CO₂ Exchange in Urban Environments Measured by Eddy Covariance Technique : Urban CO₂ flux measurements by eddy covariance. *Geography Compass*, 4(9) :1238–1259.
- VELASCO, E., ROTH, M., TAN, S. H., QUAK, M., NABARRO, S. D. A. et NORFORD, L. (2013). The role of vegetation in the CO₂ flux from a tropical urban neighbourhood. *Atmos. Chem. Phys.*, 13(20) :10185–10202.
- VESALA, T., JÄRVI, L., LAUNIAINEN, S., SOGACHEV, A., RANNIK, U., MAMMARELLA, I., SIIVOLA, E., KERONEN, P., RINNE, J., RIIKONEN, A. et NIKINMAA, E. (2008a). Surface–atmosphere interactions over complex urban terrain in Helsinki, Finland. *Tellus B*, 60(2) :188–199.
- VESALA, T., KLJUN, N., RANNIK, U., RINNE, J., SOGACHEV, A., MARKKANEN, T., SABELFELD, K., FOKEN, T. et LECLERC, M. Y. (2008b). Flux and concentration footprint modelling : State of the art. *Environmental Pollution*, 152(3) :653–666.
- VOGT, R., CHRISTEN, A., ROTACH, M. W., ROTH, M. et SATYANARAYANA, A. N. V. (2006). Temporal dynamics of CO₂ fluxes and profiles over a Central European city. *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1-3) :117–126.
- WEBB, E. K., PEARMAN, G. I. et LEUNING, R. (1980). Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106(447) :85–100.
- WEISSERT, L., SALMOND, J., TURNBULL, J. et SCHWENDENMANN, L. (2016). Temporal variability in the sources and fluxes of CO₂ in a residential area in an evergreen subtropical city. *Atmospheric Environment*, 143 :164–176.
- WMO (2018). WMO climate statement : past 4 years warmest on record. Rapport technique, WMO.
- XUEREF-REMY, I., DIEUDONNÉ, E., VUILLEMIN, C., LOPEZ, M., LAC, C., SCHMIDT, M., DELMOTTE, M., CHEVALLIER, F., RAVETTA, F., PERRUSSEL, O., CIAIS, P., BRÉON, F.-M., BROQUET, G., RAMONET, M., SPAIN, T. G. et AMPE, C. (2018). Diurnal, synoptic and seasonal variability of atmospheric CO₂ in the Paris megacity area. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(5) :3335–3362.

YANG, B., J., H. P., RIGGS JEFFERY S., PALLARDY STEPHEN G., HEUER MARK, HOSMAN KEVIN P., MEYERS TILDEN P., WULLSCHLEGER STAN D. et GU LIAN-HONG (2007). Biases of CO₂ storage in eddy flux measurements in a forest pertinent to vertical configurations of a profile system and CO₂ density averaging. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 112(D20).

Liste des sigles

ACCLILMAT	Adaptation au Changement CLImatique de l'Agglomération Toulousaine (projet STAE/RTRA)
ADEME	Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie
BEM	Building Energy Model (modèle d'énergétique des bâtiments)
CAPITOU	Canopy and Aerosol Particle Interactions in the Toulouse Urban Layer
CERFACS	Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
CFD	Computational Fluid Dynamics (dynamique des fluides numérique)
CLA	Couche Limite Atmosphérique
CLU	Couche Limite Urbaine
CLUE	CLimat Urbain Etude
CNRM	Centre National de Recherches Météorologiques
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique
CO ₂	Dioxyde de Carbone
CWIPI	Coupling With Interpolation Parallel Interface
DJF	Décembre Janvier Février
EET	Eastern European Time (fuseau horaire de l'europe de l'est)
EQM	Erreur Quadratique Moyenne
FFP	Flux Footprint Predictions (modèle de calcul de footprint)
GENIUS	GENérateur d'îlots UrbainS
GES	Gaz à Effet de Serre
GIEC	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
H	Chaleur sensible
ICU	Ilot de Chaleur Urbain
INSEE	Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques
ISBA	Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère
JJA	Juin Juillet Aout
LAI	Leaf Area Index (indice de surface foliaire)
LCZ	Local Climate Zones (zones climatique locales)
LE	Chaleur latente

LST Local Standard Time (fuseau horaire standard local)
LT Local Time (heure légale)
MAM Mars Avril Mai
MAPUCE Modélisation APpliquée et droit de l'Urbanisme : Climat urbain et Énergie
Méso-NH Mésoscale Non-Hydrostatic model
ONERA Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales
OpenPALM Projet d'Assimilation par Logiciel Multi-méthodes
PAR Photosynthetically Active Radiation (Rayonnement photosynthétiquement actif)
PCI Produit Calorifique Inférieur
PCS Produit Calorifique Supérieur
RTRA Réseau Thématique de Recherche Avancée
SEB Surface Energy Balance (bilan d'énergie de la surface)
SLEUTH Slope, Land cover, Exclusion, Urbanization, Transportation, Hillshade
SON Septembre Octobre Novembre
STAE Sciences et Technologies pour l'Aéronautique et l'Espace
SURFEX SURface EXternalisée
TEB Town Energy Balance (bilan d'énergie de la ville)
UTC Coordinated Universal Time (temps universel coordonné)

Le CO₂ est le principal gaz à effet de serre d'origine anthropique. L'augmentation de sa concentration dans l'atmosphère a été identifiée comme étant la principale cause du réchauffement climatique. Les surfaces urbaines jouent un rôle important dans l'augmentation de cette concentration puisqu'on estime que 30 à 40% des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique ont lieu en ville.

D'autre part, la forte artificialisation des surfaces urbaines modifie localement les conditions météorologiques, créant le micro-climat urbain (îlot de chaleur, modification de la stabilité de l'atmosphère...). Cette thèse vise à modéliser et étudier les liens qui existent entre le micro-climat urbain et le CO₂.

Pour cela une modélisation des échanges de CO₂ entre les surfaces urbaines et l'atmosphère a été introduite dans le modèle de micro-climat urbain TEB. Cette modélisation a été validée sur deux sites d'études : Toulouse et Kumpula (Finlande). Ces deux sites ont prouvé la capacité du modèle à reproduire les échanges de CO₂ entre les surfaces urbaines et l'atmosphère ainsi que leurs cycles journaliers et saisonniers. Le site de Toulouse a souligné l'importance de connaître finement le comportement énergétique des habitants pour simuler les émissions de CO₂ des bâtiments. Celui de Kumpula a démontré que le modèle ISBA, conçu pour décrire les interactions entre la végétation en milieu non urbain et l'atmosphère, est également capable de décrire les échanges de CO₂ entre la végétation urbaine et l'atmosphère.

Le modèle, ainsi validé, a été utilisé pour réaliser des simulations d'émissions de CO₂ par les bâtiments à l'échelle de l'ensemble de l'agglomération urbaine de Toulouse. Ces simulations ont mis en évidence que la forme du panache de CO₂ dégagé par la ville est avant tout pilotée par la circulation synoptique et les variations de la hauteur de la couche limite tandis que l'intensité des émissions de CO₂ dépend fortement du comportement énergétique des habitants.



CO₂ is the main greenhouse gas of anthropogenic origin. The increase in its concentration in the atmosphere has been identified as the main cause of global warming. Urban areas play an important role in the increase in CO₂ concentration, as it is estimated that 30 to 40% of anthropogenic greenhouse gas emissions occur in cities.

On the other hand, the strong artificialization of urban surfaces locally modifies meteorological and climatic conditions, creating the urban micro-climate (heat island, modification of the stability of the atmosphere, etc.). This thesis aims to model and study the links between urban micro-climate and CO₂.

For this purpose, a model of the exchanges of CO₂ between urban surfaces and the atmosphere was introduced into the TEB urban microclimate model. This modelling was validated at two study sites : Toulouse and Kumpula (Finland). These two sites demonstrated the model's ability to reproduce the exchanges of CO₂ between urban surfaces and the atmosphere as well as their daily and seasonal cycles. The Toulouse site stressed the importance of a detailed knowledge of the inhabitants' energy behaviour in order to simulate the CO₂ emissions of buildings. The Kumpula model demonstrated that the ISBA model, designed to describe the interactions between non-urban vegetation and the atmosphere, is also able to describe the exchanges of CO₂ between urban vegetation and the atmosphere.

The model, thus validated, was used to simulate CO₂ emissions from buildings on the scale of the entire urban agglomeration of Toulouse. These simulations have shown that the shape of the CO₂ plume released by the city is primarily driven by synoptic circulation and variations in the height of the boundary layer while CO₂ emission intensity highly depends on the energy behaviour of the inhabitants.