



HAL
open science

Modélisation de la distribution spatiale de l'îlot de chaleur urbain à l'échelle locale : Mise en place et évaluation d'une approche par réseau de rues

Julie Soriano

► To cite this version:

Julie Soriano. Modélisation de la distribution spatiale de l'îlot de chaleur urbain à l'échelle locale : Mise en place et évaluation d'une approche par réseau de rues. Thermique [physics.class-ph]. INSA de Lyon, 2023. Français. NNT : 2023ISAL0107 . tel-04693837

HAL Id: tel-04693837

<https://theses.hal.science/tel-04693837v1>

Submitted on 11 Sep 2024

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.



INSA

N°d'ordre NNT : 2023ISAL0107

THESE de DOCTORAT DE L'INSA LYON, membre de l'Université de Lyon

**Ecole Doctorale N° 162
MECANIQUE, ENERGETIQUE, GENIE CIVIL, ACOUSTIQUE**

Spécialité/ discipline de doctorat :
Thermique Energétique

Soutenue publiquement le 18/12/2023, par :
Julie SORIANO

Modélisation de la distribution spatiale de l'îlot de chaleur urbain à l'échelle locale : mise en place et évaluation d'une approche par réseau de rues

Devant le jury composé de :

MUSY Marjorie	Directrice de Recherche, CEREMA	Rapportrice
FRANQUET Erwin	Professeur des Universités, POLYTECH'LAB	Rapporteur
GINESTET Stéphane	Professeur des Universités, LMDC	Examineur
MENEZO Christophe	Professeur des Universités, LOCIE	Examineur
KUZNIK Frédéric	Professeur des Universités, CETHIL	Directeur de thèse
SOULHAC Lionel	Professeur des Universités, LMFA	Co-directeur
MERLIER Lucie	Maître de conférences, CETHIL	Co-directrice
DAVID Damien	Maître de conférences, CETHIL	Examineur

Référence : TH1039_SORIANO Julie

L'INSA Lyon a mis en place une procédure de contrôle systématique via un outil de détection de similitudes (logiciel Compilatio). Après le dépôt du manuscrit de thèse, celui-ci est analysé par l'outil. Pour tout taux de similarité supérieur à 10%, le manuscrit est vérifié par l'équipe de FEDORA. Il s'agit notamment d'exclure les auto-citations, à condition qu'elles soient correctement référencées avec citation expresse dans le manuscrit.

Par ce document, il est attesté que ce manuscrit, dans la forme communiquée par la personne doctorante à l'INSA Lyon, satisfait aux exigences de l'Établissement concernant le taux maximal de similitude admissible.

Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	<u>CHIMIE DE LYON</u> https://www.edchimie-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage secretariat@edchimie-lyon.fr	M. Stéphane DANIELE C2P2-CPE LYON-UMR 5265 Bâtiment F308, BP 2077 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69616 Villeurbanne directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	<u>ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE</u> https://edeea.universite-lyon.fr Sec. : Stéphanie CAUVIN Bâtiment Direction INSA Lyon Tél : 04.72.43.71.70 secretariat.edeea@insa-lyon.fr	M. Philippe DELACHARTRE INSA LYON Laboratoire CREATIS Bâtiment Blaise Pascal, 7 avenue Jean Capelle 69621 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.72.43.88.63 philippe.delachartre@insa-lyon.fr
E2M2	<u>ÉVOLUTION, ÉCOSYSTÈME, MICROBIOLOGIE, MODÉLISATION</u> http://e2m2.universite-lyon.fr Sec. : Bénédicte LANZA Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr	Mme Sandrine CHARLES Université Claude Bernard Lyon 1 UFR Biosciences Bâtiment Mendel 43, boulevard du 11 Novembre 1918 69622 Villeurbanne CEDEX sandrine.charles@univ-lyon1.fr
EDISS	<u>INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTÉ</u> http://ediss.universite-lyon.fr Sec. : Bénédicte LANZA Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 secretariat.ediss@univ-lyon1.fr	Mme Sylvie RICARD-BLUM Institut de Chimie et Biochimie Moléculaires et Supramoléculaires (ICBMS) - UMR 5246 CNRS - Université Lyon 1 Bâtiment Raulin - 2ème étage Nord 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69622 Villeurbanne Cedex Tél : +33(0)4 72 44 82 32 sylvie.ricard-blum@univ-lyon1.fr
INFOMATHS	<u>INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES</u> http://edinfomaths.universite-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage Tél : 04.72.43.80.46 infomaths@univ-lyon1.fr	M. Hamamache KHEDDOUCI Université Claude Bernard Lyon 1 Bât. Nautibus 43, Boulevard du 11 novembre 1918 69 622 Villeurbanne Cedex France Tél : 04.72.44.83.69 hamamache.kheddouci@univ-lyon1.fr
Matériaux	<u>MATÉRIAUX DE LYON</u> http://ed34.universite-lyon.fr Sec. : Yann DE ORDENANA Tél : 04.72.18.62.44 yann.de-ordenana@ec-lyon.fr	M. Stéphane BENAYOUN Ecole Centrale de Lyon Laboratoire LTDS 36 avenue Guy de Collongue 69134 Ecully CEDEX Tél : 04.72.18.64.37 stephane.benayoun@ec-lyon.fr
MEGA	<u>MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE</u> http://edmega.universite-lyon.fr Sec. : Stéphanie CAUVIN Tél : 04.72.43.71.70 Bâtiment Direction INSA Lyon mega@insa-lyon.fr	M. Jocelyn BONJOUR INSA Lyon Laboratoire CETHIL Bâtiment Sadi-Carnot 9, rue de la Physique 69621 Villeurbanne CEDEX jocelyn.bonjour@insa-lyon.fr
ScSo	<u>ScSo*</u> https://edsciencessociales.universite-lyon.fr Sec. : Mélina FAVETON INSA : J.Y. TOUSSAINT Tél : 04.78.69.77.79 melina.faveton@univ-lyon2.fr	M. Bruno MILLY Université Lumière Lyon 2 86 Rue Pasteur 69365 Lyon CEDEX 07 bruno.milly@univ-lyon2.fr

*ScSo : Histoire, Géographie, Aménagement, Urbanisme, Archéologie, Science politique, Sociologie, Anthropologie

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier mes encadrants Lucie Merlier, Lionel Soulhac, Damien David et Frédéric Kuznik. Sans vous ce travail n'aurait pas été possible et vous avez chacun contribué à mener cette thèse à son terme. Lucie, ta disponibilité et ton empathie ont été de grands soutiens pendant cette thèse. Damien, tes questionnements et suggestions m'ont souvent fait réfléchir et évoluer, ils m'ont stimulée et ont contribué à maintenir ma motivation, j'ai donc eu beaucoup de chance de t'avoir eu comme encadrant officiel. Lionel, tu m'as également beaucoup aidée par ton analyse fine des situations, ton calme, ton optimisme et ta confiance. Je garderai de bons souvenirs des débats scientifiques riches et stimulants lors des réunions de suivi, merci donc à tous les quatre d'y avoir contribué.

Je souhaite également remercier les membres du jury : Stéphane Ginestet pour son rôle de président du jury, Marjorie Musy et Erwin Franquet pour avoir lu et commenté mon manuscrit en tant que rapporteurs et Christophe Menezo pour avoir examiné ce travail. Je vous remercie d'avoir pris le temps d'évaluer mon travail. Vos retours pertinents et vos questions lors de la soutenance m'ont permis de prendre du recul sur mon travail et m'ont donc été précieux.

Merci aux membres du projet ALBUS Sofia Fellini et Guillevic Lamaison, ainsi qu'aux membres de mon comité de thèse Pietro Salizzoni et Frédéric André, et aux chercheurs qui m'ont apporté leur aide ponctuellement Etienne Vergnaut, Hervé Pabiou, Mathieu Galtier au CETHIL, Jérôme Jacob au M2P2 et Antoine VERNAY au LEHNA. Merci également au personnel du CETHIL, les secrétaires Meriem et Brigitte et avant ça Edwige et Maryline, ainsi qu'à Loïc pour le support informatique.

Je souhaite remercier l'institut Carnot pour avoir financé le projet ALBUS et donc ma thèse.

Merci également aux autres doctorants du groupe ville pour leur aide et pour les échanges sur nos sujets respectifs : Félix, Adrien, Célia, Teddy, Aurore et Flavia, ainsi que Julien pour être venu à ma répétition. Enfin, merci aux autres doctorants /post-doctorants du labo : Thomas, Kiki, Vasilis et Sarah pour les après-midi jeu de société, Yuyao pour avoir partagé mes questions lors de la préparation de la soutenance, Cong pour les séances de bloc (avant nos blessures) et à tous les autres pour les repas de midi, les pauses ou les sorties : Yoann, Julien, Sreyash, Yann, Taha, Antoine, Liliane, Baqer, Markos, Hamza, Harold, Paul, Gabriele. Et j'en profite pour remercier ceux qui ont fait beaucoup d'efforts pour redonner vie au groupe des doc/pdoc, dont la cohésion avait souffert pendant le covid, c'est-à-dire surtout Aurore et Antoine.

Enfin, merci à mes parents pour leur confiance en moi, à Maxime pour ses encouragements et son soutien pendant les périodes difficiles et aux copains d'Ardèche, de l'Insa ou d'Erasmus d'être là tout simplement.

Résumé

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur encourage la prise en compte de l'îlot de chaleur urbain dans les choix des politiques d'aménagement urbain. Dans ce contexte, la modélisation du microclimat urbain est un outil précieux pour évaluer différentes configurations urbaines. Pour étudier le confort d'été, deux types de modèles sont souvent utilisés : des modèles détaillés ayant recours à la CFD, ou bien des modèles de canopée urbaine qui représentent un motif urbain répété avec les caractéristiques moyennes d'un quartier. Dans cette thèse, un nouveau modèle se plaçant entre ces deux catégories en termes de précision et de temps de calcul est développé. Son objectif est de modéliser les températures d'air dans la couche de canopée urbaine à l'échelle locale et sur une période de l'ordre d'une saison, en représentant explicitement les bâtiments.

Pour cela, une approche en réseau de rues canyon est proposée, inspirée de modèles de dispersion de polluants, et notamment du modèle SIRANE. Elle consiste à utiliser un maillage zonal dans lequel chaque rue canyon correspond à une maille. Les intersections relient entre elles les différentes rues, formant un réseau. Le champ de température dans la couche limite urbaine est obtenu par un modèle de panaches gaussiens, détourné de son application classique de dispersion des polluants.

Une première partie du travail de thèse consiste au développement d'un modèle paramétrique aéraulique, radiatif et thermique de rue canyon infinie, ayant vocation à être appliqué comme modèle de sous-maille sur chaque rue du réseau. Une attention particulière est donc apportée au compromis précision/temps de calcul. Une représentation paramétrique des arbres est également proposée et intègre leur impact sur les phénomènes aérauliques et radiatifs dans la rue, ainsi que l'évapotranspiration. Ce modèle est confronté à une semaine de mesures sur des rues expérimentales sans végétation (ClimaBat), montrant des erreurs quadratiques moyennes inférieures à 20 % de l'amplitude moyenne journalière. Enfin, la modélisation des arbres est comparée qualitativement à 24h de mesures sur une rue expérimentale arborée à Angers, montrant la cohérence des résultats concernant le modèle radiatif, mais des écarts sur l'évapotranspiration.

Dans une deuxième partie, un changement d'échelle est effectué et l'approche en réseau de rues est présentée en détail. Par ailleurs, afin de tenir compte des effets méso-échelle, un prétraitement des données météorologiques est développé. Son objectif est d'estimer la vitesse de friction, la stabilité atmosphérique et la hauteur de couche limite urbaine sur le quartier urbain simulé, à partir de mesures à une station météorologique péri-urbaine ou rurale. Il se base sur l'hypothèse d'une vitesse géostrophique uniforme et sur un bilan de surface paramétrique sur les zones rurale et urbaine. Des mesures à Bâle dans le cadre de la campagne BUBBLE ont permis de confronter le prétraitement

Résumé

météorologique à des mesures sur une période d'un mois. Des erreurs quadratiques moyennes inférieures à 30 % de l'amplitude moyenne journalière ont été obtenues. Finalement, le modèle complet est appliqué sur un quartier de Lyon, dans le but d'évaluer la cohérence des résultats obtenus. Dans l'ensemble, cette application a montré la capacité du modèle à représenter les phénomènes physiques attendus et son potentiel pour des études de microclimat urbain, bien que des développements supplémentaires soient encore nécessaires.

Mots-clés : Microclimat urbain, Îlot de chaleur urbain, Modélisation, Rue canyon, Réseau de rues, Arbres, Canopée urbaine, Couche limite urbaine

Abstract

The increasing heat waves frequency and intensity encourages the consideration of the urban heat island in the urban planning policy choices. In this context, the urban microclimate modelisation is a precious tool in order to assess hypothetical urban configurations. To investigate the urban summer confort, the most common methods are to use a detailed model based on CFD, or an urban canopy model which consider a street with the average neighborhood properties. In the thesis, a new model is developed and can be positioned between these two categories in terms of precision and computation time. Its purpose is to model the air temperatures in the urban canopy layer at local scale and on a period of the order of magnitude of a season, representing the building explicitly.

For that purpose, a street canyon network approach is proposed, inspired from pollutant dispersion models, and especially the model SIRANE. It consists to use a zonal mesh in which each street is described with one cell. The intersections connect the different streets, forming a network. The air temperature field within the urban boundary layer is obtained with a gaussian plume model, adapted from its classical application of pollutant dispersion.

A first part of the thesis work consists in the development of an aerodynamic, radiative and thermal parametric model representing an infinite street canyon, intended to be applied as a subgrid model to each street in the network. A compromise between the computation time and the model precision is therefore a specific point of attention. A parametric representation of trees is also proposed, including their impact on aerodynamic and radiative phenomena in the street, as well as evapotranspiration. This model is compared to a week of measurements on vegetation-free experimental streets (ClimaBat), showing root mean square errors of less than 20% of the daily average amplitude. Lastly, the tree modeling is qualitatively compared to 24 hours of measurements on an experimental street including trees in Angers, demonstrating consistency in the results regarding the radiative model but discrepancies in evapotranspiration.

In the second part, a change of scale is performed, and the street network approach is presented in detail. Furthermore, in order to account for mesoscale effects, a preprocessing of meteorological data is developed. Its goal is to estimate friction velocity, atmospheric stability, and urban boundary layer height over the simulated urban neighborhood, using measurements from a peri-urban or rural weather station. It relies on the assumption of uniform geostrophic velocity and a parametric surface balance in rural and urban areas. Measurements in Basel as part of the BUBBLE campaign were used to validate the meteorological preprocessing against measurements over a one-month period, yielding root mean square errors of less than 30% of the daily average amplitude. Finally, the complete model is applied to a neighborhood in Lyon to assess the consis-

Abstract

tency of the results obtained. Overall, this application demonstrated the model's ability to represent the expected physical phenomena and its potential for urban microclimate studies, although further developments are still required.

Keywords : Urban microclimate, Urban heat island, Modelisation, Street canyon, Trees, Urban canopy, Urban boundary layer.

Table des figures

1.1	Définition des échelles du climat	4
1.2	Définition des zones urbaines à l'aide des LCZ [Stewart & Oke 2012] . . .	4
1.3	Définition des zones péri-urbaines ou rurales à l'aide des LCZ [Stewart & Oke 2012]	4
1.4	Définition de la couche limite atmosphérique, de la couche limite urbaine et de la canopée urbaine	5
1.5	Définition d'une rue canyon selon [Nunez & Oke 1977]	7
1.6	Trois types d'écoulements en zone urbaine en fonction du rapport d'aspect H/W	8
1.7	Trois configurations idéalisées choisies pour comparer le piégeage radiatif et représentation des multiréflexions	9
1.8	Phénomènes physiques directement liés à la présence d'arbres dans une rue	11
1.9	Comparaison des bilans idéalisés de surface en zone rurale et urbaine par beau temps	13
1.10	Cycle journalier idéalisé de la couche limite atmosphérique	14
1.11	Forme de la couche limite urbaine dans les configurations "panache" et "dôme"	15
1.12	Représentations idéalisées de l'ICU dans la canopée urbaine	16
1.13	Types de modèles utilisés pour représenter les phénomènes physiques de l'échelle du bâtiment à l'échelle méso	17
1.14	Niveau de détail dans la paramétrisation urbaines	22
1.15	Comparaison de 12 modèles de paramétrisation urbaine selon le niveau de détail de la Figure 1.14	23
1.16	Classification des modèles de climat urbain calculant une température d'air et utilisant un bilan de surface	25
1.17	Structure du modèle SIRANE	27
1.18	Structure simplifiée de MATHIS	29
1.19	Liens entre les différents modules modèles de MATHIS. Les données météorologiques sont représentées en noir (T_{mes} [K] : température d'air, u_{mes} [m/s] : vitesse du vent, q_{mes} [kg/kg] : humidité absolue, ϕ [rad] : direction du vent, $S^{dir\downarrow}$, $S^{dif\downarrow}$, $I\downarrow$ [W/m ²] : densités de flux solaire direct, solaire diffus et infrarouge sur une surface horizontale). Les grandeurs calculées sont représentées en bleu et détaillées sur la Figure 1.20	30

Liste des figures

1.20	Définition des symboles utilisés sur la Figure 1.19	31
2.1	Données d'entrées et résultats du modèle aéraulique	34
2.2	Représentation des données d'entrée, des caractéristiques géométriques et des résultats attendus pour le modèle aéraulique de rue	35
2.3	Comparaison des modèles paramétriques de SIRANE et de MUNICH pour la vitesse longitudinale moyenne dans la rue	39
2.4	Géométrie utilisée pour représenter les arbres dans Code-Saturne [Maison <i>et al.</i> 2022b] et à l'origine du modèle aéraulique de MUNICH incluant des arbres	41
2.5	Modélisation paramétrique de MUNICH pour la vitesse longitudinale moyenne dans la rue en présence d'arbres	42
2.6	Définition de l'échange entre une rue canyon et la CLU	43
2.7	Comparaison des modèles de SIRANE et MUNICH pour la vitesse d'échange rue / CLU normalisée par l'écart-type des fluctuations de vitesse verticale σ_w	44
2.8	Modélisation de MUNICH pour la vitesse d'échange rue / CLU normalisée par l'écart-type de la vitesse verticale σ_w en présence d'arbres	45
2.9	Définition des vitesses proche paroi	47
2.10	Dispositif expérimental en soufflerie de [Salizzoni <i>et al.</i> 2011]	50
2.11	Conditions limites des simulations CFD et repère dans la rue d'intérêt	51
2.12	Maillages choisis pour les simulations dans la configuration A	53
2.13	Moyenne cumulée relative de la vitesse en cinq points dans la rue sur la période de moyennage	54
2.14	Profil vertical de vitesse dans l'écoulement externe au centre de la rue d'intérêt	55
2.15	Energie cinétique turbulente normalisée par U_{ref}^2	55
2.16	Écoulement dans la rue dans la configuration A	57
2.17	Caractéristiques de l'écoulement externe au centre de la rue d'intérêt	58
2.18	Écoulement dans la rue dans la configuration D	59
2.19	Vitesses moyenne dans la rue normalisées par u_{ref} (Configuration A - maillage fin	61
2.20	Vitesse horizontale à trois positions différentes (Configuration A - maillage fin)	62
2.21	Vitesse verticale à trois hauteur différentes (Configuration A - maillage fin)	62
2.22	Modélisation paramétrique des vitesses proche paroi	63
2.23	Définition de la vitesse U_{ref} et de l'angle $(\theta_{can} - \phi)$	64
3.1	Données d'entrée et résultats du modèle radiatif	67
3.2	Description des paramètres géométriques et des grandeurs d'entrée et de sortie du modèle radiatif	68
3.3	Bilan des flux solaires dans une rue sans arbres	70
3.4	Bilan des flux infrarouge dans une rue sans arbres	70

3.5	Bilans de surface dans une rue intégrant des arbres	71
3.6	Deux cas possibles pour le calcul du flux solaire direct entrant dans la rue	74
3.7	Atténuation du rayonnement par un élément de feuillage	75
3.8	Définitions des grandeurs intermédiaires utilisées pour déterminer le flux solaire direct sur les arbres et le sol	76
3.9	Hypothèse pour la prise en compte du rayonnement solaire direct transmis par le feuillage	77
3.10	Définition des facteurs de forme entre deux surfaces infinitésimales	78
3.11	Définition des facteurs de formes dans la rue sans arbres	79
3.12	Définition des facteurs de formes dans la rue	81
3.13	Géométries utilisées dans les différents modèles pour représenter les arbres	81
3.14	Configurations utilisées pour le calcul des transmittances par lancé de rayons	84
3.15	Détail du lancé de rayons pour un rayon mur-sol	85
3.16	Modélisation des réflexions solaires des arbres	89
3.17	Schéma du cas d'étude	92
3.18	Densité de flux incidente totale sur les deux murs et le sol à trois heures différentes	93
3.19	Densité de flux incidente totale sur les deux murs et le sol à 12h30 UTC pour le cas de deux murs de même taille, d'un mur plus grand de 3 m et de l'autre	94
3.20	Comparaison des différentes densités de flux à 12h30	95
4.1	Données d'entrée et résultats du modèle thermo-énergétique de rue	99
4.2	Représentation schématique du modèle de rue, avec les données d'entrée, les résultats et les caractéristiques géométriques	101
4.3	Bilan de surface sur chaque zone et longueurs considérées	102
4.4	Schématisme du modèle de conduction dans les parois	107
4.5	Évolution schématique des paramètres F_1 , F_2 et F_3 pour la modélisation de la résistance stomatique	112
4.6	Description du banc expérimental Climabat	113
4.7	Conditions météorologiques sur la période d'intérêt	114
4.8	Analyse du flux solaire piégé dans la rue	116
4.9	Mesures et simulation de la température de la route et température d'air mesurée	117
4.10	Mesures et simulation de la densité de flux conduit	118
4.11	Rue expérimentale à Angers	119
4.12	Instrumentation dans la rue expérimentale à Angers	119
4.13	Données météo utilisées en entrée du modèle	120
4.14	Localisation du dispositif expérimental et de la station météo Angers- Beaucouzé	121
4.15	Flux radiatif entrant et sortant dans la rue sans végétation	122

Liste des figures

4.16	Températures de surface dans la rue sans végétation	122
4.17	Flux conduit aux murs dans la rue sans végétation	123
4.18	Influence des arbres sur les flux radiatif entrant et sortant de la rue	124
4.19	Influence des arbres sur les températures de surface	125
4.20	Influence des arbres sur le flux conduit aux murs	126
4.21	Analyse du flux latent des arbres simulé et mesuré (Exp 1, Exp 2 et Exp 3 correspondent aux trois arbres différents)	127
5.1	Données d'entrée et résultats attendus du modèle de quartier	132
5.2	Représentation des données d'entrée et des résultats du modèle de quartier	133
5.3	Description des flux de chaleur considérés dans le modèle d'intersection .	134
5.4	Méthodes utilisées pour déterminer les débits d'air verticaux et horizon- taux aux intersections	135
5.5	Traitement des intersections en bord de domaine lorsqu'elles se trouvent en amont de la rue dans le sens du vent, vue sur une coupe horizontale . .	136
5.6	Description du modèle aéraulique de CLU	139
5.7	Sensibilité des écart-types de la vitesse à la vitesse de friction pour une atmosphère neutre	141
5.8	Sensibilité des fluctuations de vitesses à la stabilité atmosphérique pour une vitesse de friction de 0,3 m/s et $L_{ob} = 30$ (stable), $L_{ob} = -10000$ (neutre) et $L_{ob} = -30$ (instable)	141
5.9	Description du modèle thermique de CLU	142
5.10	Principe du modèle de panache Gaussien	144
5.11	Cas étudié : sources ponctuelles régulièrement espacées au sol	147
5.12	Sensibilité à la vitesse de friction du cas d'étude présenté Figure 5.11, pour $h_{cla} = 200m$	149
5.13	Profils verticaux et horizontaux de l'échauffement sur le domaine présenté sur la Figure 5.11 avec différents u_* , pour $h_{cla} = 200m$	149
5.14	Sensibilité à hauteur de couche limite atmosphérique du cas d'étude présenté Figure 5.11, pour $u_* = 0,3m/s$	150
5.15	Profils verticaux et horizontaux de l'échauffement sur le domaine présenté sur la Figure 5.11 avec différents h_{cla} , pour $u_* = 0,2m/s$	150
6.1	Intégration des effets méso-échelle sur le domaine simulé	154
6.2	Données d'entrée et résultats attendus du prétraitement météorologique .	155
6.3	Structure de la couche limite atmosphérique et lois d'échelles adaptées .	156
6.4	Représentation des vent moyens dans l'atmosphère libre et la CLA	156
6.5	Équations régissant les profils de vitesse dans la CLA en condition neutre	160
6.6	Principe de la paramétrisation des conditions limites	162
6.7	Principe du prétraitement météorologique	165
6.8	Détail des modèles rural et urbain du prétraitement météorologique. Les données d'entrée sont en noir, les variables intermédiaires en bleu et les résultats en rouge.	166

6.9	Sites rural et urbain de la campagne de mesure BUBBLE choisis pour la comparaison et données d'entrée et de comparaison du modèle	172
6.10	Données météorologiques moyennées sur les 29 jours étudiés	173
6.11	Grandeurs mesurées et simulées, en ville et au site rural, moyennées sur 29 jours	174
6.12	Données météorologiques sur la périodes du 25/06/2002 au 07/07/2002	175
6.13	Grandeurs mesurées et simulées en ville du 25/06 au 07/07	176
7.1	Localisation géographique du domaine étudié à Lyon	180
7.2	Données météorologiques à la station de Lyon-Bron moyennées sur juillet 2022	181
7.3	Construction de la géométrie	182
7.4	Configurations étudiées pour le cas d'application à Lyon	186
7.5	Évolution temporelle de l'échauffement de la température d'air par rapport à celle à l'entrée du domaine (θ_b) dans les rues amont et aval	187
7.6	Position des rues amont et aval	188
7.7	Rapport d'aspect H/W	188
7.8	Distribution spatiale de l'ICU nocturne (moyenne entre 21h et 4h)	190
7.9	Impact du rapport d'aspect sur l'échauffement moyen nocturne (entre 21h et 4h) dans les rues dans le cas A	191
7.10	Grandeurs (moyenne entre 21h et 4h) expliquant l'échauffement nocturne croissant avec le rapport d'aspect dans le cas A	191
7.11	Paramètres impactant l'échauffement moyen nocturne (entre 21h et 4h) dans les rues dans le cas D	193
7.12	Représentation des flux de chaleur émis par le domaine tracés sur la Figure 7.13	193
7.13	Flux sensible émis par le domaine simulé calculé par MATHIS dans les cas A et D (émis par les rues et toits) comparé à celui calculé par le prétraitement météorologique	194
7.14	Profils verticaux de température potentielle dans la CLU modélisés par panaches Gaussiens (Cas D) au dessus des rues amont et aval	195
7.15	Caractéristiques de la rue arborée isolée étudiée	197
7.16	Grandeurs simulées sur les arbres dans la rue isolée avec les paramètres du Tableau 7.5	198
7.17	Bilan d'énergie sur les arbres avec deux variations de la disponibilité en eau200	
7.18	Grandeurs simulées sur les parois dans la rue isolée avec et sans arbres	201
7.19	Bilan d'énergie sur le système { parois + arbres } dans la rue isolée avec et sans arbres	202
7.20	Formalisation du bilan d'énergie sur la zone d'air dans une rue isolés (Cas A)	203
7.21	Effet des arbres sur la vitesse d'échange verticale et la température d'air	204

Liste des tableaux

7.22	Effet des arbres sur les grandeurs nocturnes (moyenne de 21 h à 4 h) sur les différentes rues du quartier dans la configuration A - rues isolées (Tableau 7.4)	205
7.23	Formalisation du bilan d'énergie sur la zone d'air dans une rue du modèle complet (Cas D)	206
7.24	Effet des arbres sur la température d'air nocturne (moyenne de 21 h à 4 h) sur les différentes rues du quartier dans la configuration D - modèle complet (Tableau 7.4)	207
7.25	Distribution spatiale de la fraction d'arbres réaliste selon la base de données de la Métropole de Lyon [Métropole de Lyon]	209
7.26	Effet des arbres sur la distribution spatiale de la température d'air nocturne (de 21h à 4h) dans le cas D - modèle complet (Tableau 7.4)	209
A.1	Structure du code de MATHIS	227
B.1	Maillages choisis pour les simulations dans la configuration D	229
C.1	Représentation des erreurs d'interpolation des transmittances pour les 100 cas aléatoires détaillés sur les Figures C.2 et C.3	230
C.2	Cas choisis aléatoirement sur lesquels sont comparés les transmittances interpolées dans la base de données et calculées avec de lancé de rayons avec 2 000 000 rayons. Cas 1 à 50.	231
C.3	Cas choisis aléatoirement sur lesquels sont comparés les transmittances interpolées dans la base de données et calculées avec de lancé de rayons avec 2 000 000 rayons. Cas 50 à 100.	232
E.1	Hypothèse et dénominations pour le modèle de Summers. Adapté de [Summers 1964].	235

Liste des tableaux

1.1	Échelles adaptées aux ICU de surface, de canopée urbaine et de couche limite urbaine	6
1.2	Comparaison des flux radiatifs des configurations de la Figure 1.7 à température de surface et albédo/émissivité égales	10
1.3	Différents types de modèles de climat urbain	18
1.4	Comparaison des phénomènes physiques représentés dans quatre modèles zonaux et objectifs des modèles	20
2.1	Trois types d’approche existantes pour la CFD	47
2.2	Caractéristiques de l’écoulement externe à l’équilibre des configurations A et D	50
2.3	Taille de la veine expérimentale [Salizzoni <i>et al.</i> 2011], recommandations LES [Zheng <i>et al.</i> 2021] et taille du domaine choisies pour les simulations	51
2.4	Erreurs absolue moyenne et erreur quadratique moyenne pour la configuration A	58
2.5	Erreurs absolue moyenne et erreur quadratique moyenne pour la configuration D	60
2.6	Valeurs obtenues pour les coefficients $C_{m_1}^\perp$, $C_{m_2}^\perp$ et C_s^\perp	63
3.1	Modélisation des facteurs de forme incluant les arbres	82
3.2	Erreurs dues à l’interpolation dans la base de données pour les 3 configurations différentes, déterminées sur 100 points tirés au sort dans l’espace des paramètres comparés à du lancé de rayons avec 2 000 000 rayons	87
4.1	Modélisation thermique des solides	106
4.2	Propriétés de surface choisies pour la simulation sur le cas d’étude ClimaBat115	115
4.3	Propriétés des matériaux pour la simulation sur le cas d’étude ClimaBat	115
4.4	Erreur moyenne absolue (MAE) et erreur quadratique moyenne (RMSE) des grandeurs comparées	116
4.5	Paramètres choisis pour modéliser les arbres sur le cas d’étude d’Angers	121
4.6	Propriétés de surface choisies pour la simulation	122
4.7	Propriétés des matériaux choisies pour la simulation sur le cas d’étude d’Angers	123

Nomenclature

5.1	Paramètres du cas d'étude idéal pour la sensibilité de l'étalement du panache	147
6.1	Stabilité atmosphérique	158
6.2	Prise en compte des effets méso-échelle dans les modèles de climat urbain	161
6.3	Comparaisons des différents modèles utilisant une paramétrisation des conditions limites	163
6.4	MAE et RMSE des résultats du prétraitement météorologique	177
7.1	Propriétés des matériaux utilisés pour le cas d'application à Lyon	183
7.2	Propriétés de surface utilisées pour le cas d'application à Lyon	184
7.3	Données d'entrée du prétraitement météorologique pour le cas d'application à Lyon	184
7.4	Quatre configurations utilisées pour les simulations	185
7.5	Paramètres choisis pour modéliser arbres	198
7.6	Consommation d'eau sur la journée considérée	200
7.7	Temps de calcul pour 24 h simulées avec un ordinateur portable équipé d'un processeur Intel Core i7-10850H (6 coeurs, 12 Mo de mémoire cache, 2,7 GHz) et de 32 Go de mémoire RAM	209
D.1	Paramétrisation du bilan de surface en fonction des LCZ (α : albédo, ϵ : émissivité, C_{jour} : coefficient de stockage diurne, C_{nuit} : coefficient de stockage nocturne, f_v : fraction de végétation)	234
F.1	Significativité des coefficients de corrélation présentées dans le chapitre 7	238

Nomenclature

Accronymes

CCU	Couche de Canopée Urbaine
CLA	Couche Limite Atmosphérique
CLO	Courtes Longueur d'Ondes
CLU	Couche Limite Urbaine
CU	Canopée Urbaine
GLO	Gourtes Longueur d'Ondes
ICU	Ilôt de Chaleur Urbain
TKE	Energie cinétique turbulente (<i>Turbulent Kinetic Energy</i>)

Lettres capitales

A_a^{rad}	Longueur fictive associée à l'émission des arbres	[m]
A_c	Longueur fictive fermant le sommet de la rue infinie	[m]
F	Facteurs de forme	[-]
F_1, F_2, F_3, F_4	Coefficients atténuant la résistance stomatique	[-]
H	Hauteur moyenne de la rue	[m]
H_1	Hauteur moyenne du mur 1 de la rue	[m]
H_2	Hauteur moyenne du mur 2 de la rue	[m]
$H_{a,min}, H_{a,max}$	Hauteur minimum et maximum du houppier des arbres	[m]
I_i^*	Densité de flux infrarouge net après multiréflexions sur la surface i	[W/m ²]
I^\downarrow	Densité de flux infrarouge incident sur une surface horizontale	[W/m ²]
I_i^\downarrow	Densité de flux infrarouge incident avant multiréflexions sur la surface i	[W/m ²]
I_i^{refl}	Densité de flux infrarouge issue des multiréflexions sur la surface i	[W/m ²]
J_i^{emis}	Densité de flux infrarouge émis par la surface i	[W/m ²]
J_i	Radiosité la surface i	[W/m ²]
L	Longueur de la rue	[m]
L_{ob}	Longueur de Monin-Obukhov	[m]

Nomenclature

LAD	Densité de surface foliaire (<i>Leaf Area Index</i>)	$[m^2/m^3]$
LAI	Indice foliaire (<i>Leaf Area Index</i>)	$[-]$
Q^*	Densité de flux radiatif net	$[W/m^2]$
Q_E	Densité de flux latent	$[W/m^2]$
Q_H	Densité de flux convectif	$[W/m^2]$
Q_G	Densité de flux conduit	$[W/m^2]$
Q_{adv}	Densité de flux advectée longitudinalement, ramenée à la surface du sol	$[W/m^2]$
Q_{top}	Densité de flux sensible entre la rue et la CLU	$[W/m^2]$
R	Résistance thermique	$[K/(Wm^2)]$
S_i^*	Densité de flux solaire net après multiréflexions sur la surface i	$[W/m^2]$
$S_i^{dif\downarrow}$	Densité de flux solaire diffus incident sur une surface horizontale	$[W/m^2]$
$S_i^{dif\downarrow}$	Densité de flux solaire diffus incident avant multiréflexions sur la surface i	$[W/m^2]$
$S_i^{dir\downarrow}$	Densité de flux solaire direct incident sur une surface horizontale	$[W/m^2]$
$S_i^{dir\downarrow}$	Densité de flux solaire direct incident avant multiréflexions sur la surface i	$[W/m^2]$
S_i^{refl}	Densité de flux solaire issue des multiréflexions sur la surface i	$[W/m^2]$
$S_{can}^{dir\downarrow}$	Densité de flux solaire direct entrant dans la rue exprimée sur une section horizontale de rue	$[W/m^2]$
T_L	Temps lagrangien	$[s]$
T_{can}	Température d'air moyenne dans la rue	$[K]$
T_{clu}	Température d'air en chaque point de la CLU	$[K]$
T_{mes}	Température mesurée à la station météorologique	$[K]$
U_H	Vitesse au sommet de la rue	$[m/s]$
U_{can}	Vitesse moyenne longitudinale dans la rue	$[m/s]$
U_{ref}	Vitesse à une hauteur de 10 H	$[m/s]$
W	Largeur moyenne de la rue	$[m]$

Lettres minuscules

d_0	Hauteur de déplacement aérodynamique	$[m]$
d_t	Hauteur de déplacement thermique	$[m]$
f_a	Fraction de recouvrement horizontal des arbres	$[-]$
f_r	Fraction de recouvrement horizontal de la route	$[-]$
f_v	Fraction de recouvrement horizontal de la végétation basse	$[-]$
h	Coefficient convectif	$[W/(m^2K)]$
h_{cla}	Hauteur de la CLA	$[m]$
k	Coefficient d'extinction lié à l'orientation des feuilles	$[-]$

q_{can}	Humidité absolue moyenne dans la rue	[-]
q_{mes}	Humidité absolue mesurée à la station météorologique	[-]
r_a	Résistance aérodynamique	[s/m]
r_s	Résistance stomatique	[s/m]
$r_{s,min}$	Résistance stomatique minimum	[s/m]
u_*	Vitesse de friction	[m/s]
u_d	Vitesse d'échange entre la rue et la CLU	[m/s]
u_M	Vitesse moyenne d'un panache gaussien	[m/s]
u_{m_1}, u_{m_2}, u_s	Vitesse proches paroi dans la rue pour le mur 1, le mur 2 et le sol	[m/s]
u_{mes}	Vitesse mesurée à la station météorologique	[m/s]
z_M	Hauteur moyenne d'un panache gaussien	[m]
z_0	Longueur de rugosité aérodynamique	[m]
z_t	Longueur de rugosité thermique	[m]

Lettres grecques

α	Albédo	[-]
ϕ_{can}	Orientation de la rue par rapport au Nord	[rad]
ϕ_{azi}	Angle azimutal	[rad]
ϵ	Emissivité infrarouge	[-]
λ	Conductivité thermique	[W/(mK)]
ϕ	Direction du vent par rapport au Nord	[rad]
σ_v, σ_w	Ecart-type des fluctuations de vitesse transversale et verticale dans la CLU	[m/s]
σ_y, σ_z	Ecart-types d'un panache gaussien	[m]
τ	Transmittance décrivant la semi-transparence des arbres	[-]
θ_{can}	Température potentielle de l'air moyenne dans la rue	[K]
θ_{clu}	Température potentielle de l'air en chaque point de la CLU	[K]
ϕ_{zen}	Angle zénital	[rad]

Exposants

0	Grandeurs dans une rue sans arbres
clo	Courtes longueurs d'ondes
glo	Grandes longueurs d'ondes

Indices

a	Arbres
m_1, m_2	Mur 1 et mur 2 dans une rue
r, v	Route et végétation basse, soient des sous-ensembles du sol

Nomenclature

<i>can</i>	Rue
<i>s</i>	Sol d'une rue
<i>toit</i>	Toit
<i>met</i>	Station météorologique rurale ou péri-urbaine
<i>urb</i>	Quartier urbain

Constantes

γ	Constante d'Euler	[-]
κ	Constante de Von Karman	[-]
λ_{vap}	Chaleur latente de vaporisation de l'eau	[J/kg]
σ	Constante Stefan-Boltzmann	[W/(m ² K ⁴)]

Table des matières

Contexte	1
1 Etat de l'art et problématique	3
1.1 Définitions	4
1.1.1 Échelles du climat	4
1.1.2 Zones urbaine, péri-urbaine et rurale	4
1.1.3 Couche limite atmosphérique, couche limite urbaine et couche de canopée urbaine	5
1.1.4 Stabilité atmosphérique	5
1.1.5 Ilot de chaleur urbain et surchauffes urbaines	6
1.1.6 Rue canyon	6
1.2 Phénoménologie	7
1.2.1 Phénomènes à l'échelle de la rue	7
1.2.2 Bilan de chaleur dans la canopée urbaine	12
1.2.3 Structure de la couche limite urbaine	14
1.2.4 Ilot de chaleur urbain dans la couche de canopée urbaine	16
1.3 Modélisation du climat urbain	16
1.3.1 Différentes approches existantes	17
1.3.2 Modèles zonaux	19
1.3.3 Modèles paramétriques	21
1.3.4 Couplages et combinaisons d'outils	24
1.3.5 Bilan : modèles pour évaluer l' <i>ICU_{CCU}</i>	25
1.4 Problématique, hypothèses et enjeux	26
1.4.1 Problème et enjeu	26
1.4.2 Approche en réseau de rues	27
1.5 MATHIS : un nouveau modèle de climat urbain	28
1.5.1 Principe du modèle et apport de la thèse	28
1.5.2 Plan du manuscrit	29

I	Modélisation d'une rue canyon isolée	32
2	Modélisation aéraulique	33
2.1	Objectif	34
2.2	Vitesse moyenne longitudinale	36
2.2.1	Vitesse moyenne longitudinale dans une rue sans arbre	36
2.2.2	Modélisation de l'effet des arbres	40
2.2.3	Choix de la modélisation pour MATHIS	42
2.3	Échange entre une rue et la CLU	42
2.3.1	Vitesse d'échange au sommet d'une rue sans arbre	43
2.3.2	Modélisation de l'effet des arbres	44
2.3.3	Choix de la modélisation pour MATHIS	46
2.4	Modélisation paramétrique des vitesses proche paroi à l'aide de simulations CFD-LES	46
2.4.1	Problématique	46
2.4.2	Approche de modélisation CFD	47
2.4.3	Validation de la configuration avec des mesures en soufflerie	49
2.4.4	Modélisation paramétrique des vitesses proche paroi	60
2.5	Conclusion	64
3	Modélisation radiative	66
3.1	Présentation générale du modèle	67
3.2	Éclairements primaires	72
3.2.1	Éclairements primaires dans une rue sans arbres	72
3.2.2	Modélisation des arbres	75
3.3	Facteurs de forme	78
3.3.1	Généralités	78
3.3.2	Facteurs de forme dans une rue sans arbre	79
3.3.3	Modélisation des arbres	80
3.4	Modélisation des flux nets	87
3.4.1	Flux nets dans une rue sans arbres	87
3.4.2	Modélisation des arbres	89
3.5	Comparaison du modèle radiatif sans arbres avec la méthode de Monte Carlo	92
3.5.1	Présentation du cas d'étude et du modèle Monte Carlo	92
3.5.2	Résultats pour le flux solaire	93
3.5.3	Résultats pour le flux infrarouge	95
3.6	Conclusion	96
4	Modélisation thermo-énergétique	98
4.1	Description générale du modèle	99

4.1.1	Géométrie considérée et propriétés nécessaires	100
4.1.2	Expression des bilans énergétiques sur chaque élément	100
4.2	Modélisation des flux convectifs	104
4.2.1	Parois de la rue	104
4.2.2	Arbres	105
4.3	Modélisation transferts conductifs dans les solides	105
4.3.1	Méthodes existantes	105
4.3.2	Discrétisation de l'équation de la chaleur	106
4.4	Modélisation de l'évapotranspiration	108
4.4.1	Végétation basse	109
4.4.2	Arbres	109
4.4.3	Résistance aérodynamique	110
4.4.4	Résistance stomatique	111
4.5	Validation avec des mesures expérimentales dans une rue sans végétation	113
4.5.1	Présentation du cas d'étude et mise en données	113
4.5.2	Résultats	115
4.6	Validation avec des mesures expérimentales dans une rue arborée	118
4.6.1	Présentation du cas d'étude	118
4.6.2	Mise en données	119
4.6.3	Résultats	123
4.7	Conclusion	128
II Modélisation d'un quartier		130
5 Développement d'une approche de modélisation du climat urbain à l'échelle du quartier		131
5.1	Description générale du modèle	132
5.2	Modélisation des intersections	134
5.3	Modélisation des toits et places	136
5.4	Modélisation aéraulique de la couche limite urbaine	138
5.4.1	Modélisation de la vitesse moyenne	139
5.4.2	Modélisation des écart-types de la vitesse	140
5.5	Dispersion de la chaleur dans la couche limite urbaine	142
5.5.1	Principe du modèle de panache gaussien	143
5.5.2	Paramètres du panache	145
5.5.3	Sensibilité de l'étalement du panache	147
5.6	Conclusion	151
6 Intégration des effets méso-échelle		153
6.1	Problématique	154

Table des matières

6.2	Notions de météorologie de la couche limite atmosphérique	155
6.2.1	Théorie des similarités de Monin-Obukhov	157
6.2.2	Théorie des similarités du nombre de Rossby	158
6.2.3	Loi de traînée géostrophique	159
6.3	Intégration des effets méso-échelle dans les modèles de climat urbain . . .	160
6.3.1	Différents types d’approches	160
6.3.2	Modélisation paramétrique des conditions limites	162
6.4	Développement d’un prétraitement des données météorologiques	164
6.4.1	Principe du modèle	164
6.4.2	Caractéristiques des surfaces urbaine et rurale	166
6.4.3	Bilan de surface	167
6.4.4	Hauteur de la couche limite atmosphérique	170
6.4.5	Bilan	171
6.5	Validation du prétraitement des données météorologiques avec la cam- pagne de mesures BUBBLE	171
6.5.1	Présentation du cas d’étude et mise en données	171
6.5.2	Jour moyen	173
6.5.3	Période du 25/06 au 07/07	175
6.5.4	Écarts sur la période complète	176
6.6	Conclusion	177
7	Application sur un quartier de Lyon incluant des arbres	179
7.1	Description du cas d’étude et des simulations	180
7.1.1	Description du cas d’étude	180
7.1.2	Mise en données	181
7.1.3	Configuration des simulations et présentation des résultats	185
7.2	Application sur un quartier de Lyon sans végétation	186
7.2.1	Résultats dans la couche de canopée urbaine	187
7.2.2	Résultats dans la couche limite urbaine	192
7.2.3	Conclusion	196
7.3	Effet de la modélisation des arbres sur une rue isolée	196
7.3.1	Choix des paramètres	196
7.3.2	Bilan énergétique sur les arbres	198
7.3.3	Modification du bilan énergétique sur les parois	201
7.3.4	Modification du bilan énergétique dans la rue et effet sur la température d’air	202
7.3.5	Conclusion	204
7.4	Effet de la modélisation des arbres sur le quartier	204
7.4.1	Arbres homogènes sur le quartier	205
7.4.2	Arbres réalistes	207

7.5 Coût de calcul	208
7.6 Conclusion	210
Conclusion et perspectives	211
ANNEXES	225
A Structure du code de MATHIS	226
B Maillages dans la configuration D	228
C Erreurs d'interpolation pour le calcul des transmittances	230
D Paramétrisation des surfaces urbaines et rurales avec les LCZ	233
E Hauteur de la couche limite urbaine nocturne	235
F Coefficients de corrélation	237

Contexte

Constat : amplification des surchauffes urbaines

Depuis la révolution industrielle, d'importantes et rapides évolutions bousculent les sociétés humaines, qui sont devenues la principale force de changement sur Terre. L'étalement massif des villes, ainsi que leur densification, s'inscrivent dans cette dynamique. Les villes accueillent ainsi aujourd'hui 55 % de la population mondiale, soit 4,2 milliards de personnes. Selon les Nations Unies, cette proportion devrait croître encore jusqu'à atteindre 70 % en 2050, ce qui représentera – en tenant compte de la croissance démographique – 6,8 milliards d'êtres humains [ONU 2018]. Or, les villes modifient localement le climat, les températures d'air y sont notamment plus élevées par rapport à l'environnement rural, principalement en fin d'après-midi et la nuit : ce phénomène est nommé Îlot de Chaleur Urbain (ICU).

Si dans un climat froid, l'ICU permet de réduire les besoins en chauffage, dans un climat chaud au contraire, les conséquences peuvent être importantes sur le confort et la santé des habitants. En effet, le fait que les températures ne redescendent pas la nuit empêche les habitants de récupérer et réduit l'efficacité de la ventilation naturelle pour rafraîchir les bâtiments. Par ailleurs, le réchauffement climatique vient se greffer sur ce contexte. Il est prévu qu'en plus de l'augmentation moyenne de la température, la fréquence et l'intensité des événements extrêmes augmentent. Parmi eux, les vagues de chaleur sont particulièrement problématiques pour les villes, où elles viennent souvent amplifier les conséquences de l'ICU. Le problème des surchauffes urbaines apparaît, au croisement entre conséquences du réchauffement climatique et de l'îlot de chaleur urbain.

Enfin, tous les citoyens n'ont pas la même vulnérabilité aux surchauffes urbaines [Ellena *et al.* 2020]. C'est en effet l'environnement local qui impacte chaque individu. Or, l'ICU n'est pas uniforme et varie en fonction des propriétés locales ainsi que du sens du vent. De même, certains logements sont plus vulnérables que d'autres, en fonction - entre autres - de la géométrie, de l'isolation ou de la présence de climatisation. Par ailleurs, le mode de vie, la constitution physique, ainsi que l'âge, le sexe et la santé de chacun va également impacter l'expérience vécue. Par exemple, quelqu'un ayant un métier d'extérieur sera plus exposé qu'un employé de bureau. De la même façon, les personnes âgées sont souvent plus vulnérables que le reste de la population. Ainsi, le vieillissement de la population augmente le nombre de personnes vulnérables et donc aggrave l'impact des surchauffes urbaines.

Adaptation aux surchauffes urbaines

Face au problème grandissant des surchauffes urbaines, une adaptation de plus en plus répandue est la climatisation, avec la consommation d'énergie finale pour la climatisation qui a augmenté de 50 % dans l'Union Européenne entre 2000 et 2016, et qui devrait

encore doubler d'ici 2050 selon l'Agence Internationale de l'Energie [IEA 2018]. Cette option permet d'offrir aux citoyens des zones refuges avec des ambiances confortables.

Pourtant, elle pose plusieurs problèmes. Premièrement, les rejets de chaleur des climatiseurs augmentent l'ICU et créent donc un cercle vicieux [Tremeac *et al.* 2012]. Cela contribue à rendre l'air extérieur moins confortable, ce qui dégrade la qualité de vie de tous les citoyens. Mais cela crée également une fracture entre ceux qui peuvent rester dans des logements et bureaux climatisés, et ceux qui doivent passer du temps à l'extérieur ou ne peuvent pas investir dans un climatiseur. L'installation massive de climatiseurs serait donc nuisible au confort, voire à la santé des personnes rentrant dans cette deuxième catégorie. Ensuite, la climatisation est responsable de rejets de gaz à effet de serre de deux façons : par la consommation énergétique et par les fuites de fluides réfrigérants, qui ont souvent un pouvoir de réchauffement global élevé. Cela contribue donc à aggraver le réchauffement climatique, et donc les vagues de chaleur, dans un deuxième cercle vicieux. Enfin, plus l'air extérieur est chaud et plus les performances des climatiseurs se dégradent [Santamouris *et al.* 2001]. Cet élément contribue à amplifier les deux cercles vicieux qui viennent d'être décrits. Pour conclure, la climatisation apporte un mieux être momentané aux personnes qui en profitent, cependant elle aggrave le problème dans son ensemble.

Pour atténuer les conséquences des surchauffes urbaines, les collectivités recherchent donc de plus en plus d'autres pistes d'adaptation. La réduction de l'ICU est l'une des pistes privilégiées, de manière à permettre aux habitants de récupérer la nuit et d'améliorer le confort en journée. Parmi les actions appliquées par les collectivités pour réduire l'ICU, on peut citer la végétalisation (qui a de nombreuses autres vertues), l'installation de points d'eau ou l'application de revêtements avec un albédo élevé [Leroy *et al.* 2021].

Intérêt de la modélisation du climat urbain

Déterminer quelles sont les actions prioritaires d'adaptation et quels seront leurs effets n'est pas aisé. En effet, l'ICU varie dans le temps et l'espace. Par exemple, une action peut mener à une amélioration du confort la nuit, mais à une détérioration en journée. De plus, les pistes d'adaptation font intervenir de nombreux phénomènes physiques, il est donc ardu a priori de comparer les solutions ou d'en prédire les effets. Dans ce contexte, la modélisation du microclimat urbain est un outil permettant d'aiguiller les décisions, par exemple en identifiant les zones prioritaires ou en comparant des options d'aménagements.

Par ailleurs, certains aménagements qu'on peut penser neutres a priori ne le sont pas forcément, comme l'orientation bâtiments. Un outil de simulation peut ainsi permettre d'étudier l'effet sur l'ICU de différentes configurations urbaines.

Chapitre 1

Etat de l'art et problématique

Ce premier chapitre a pour but de positionner ce travail vis-à-vis de l'état de l'art et de définir la problématique de cette thèse. Après avoir défini les principaux concepts, le contexte phénoménologique du climat urbain est détaillé. Un état de l'art des modèles de climat urbain est ensuite effectué. La problématique de la thèse ainsi que la méthodologie choisie sont finalement présentées.

Sommaire

1.1 Définitions	4
1.1.1 Échelles du climat	4
1.1.2 Zones urbaine, péri-urbaine et rurale	4
1.1.3 Couche limite atmosphérique, couche limite urbaine et couche de canopée urbaine	5
1.1.4 Stabilité atmosphérique	5
1.1.5 Ilot de chaleur urbain et surchauffes urbaines	6
1.1.6 Rue canyon	6
1.2 Phénoménologie	7
1.2.1 Phénomènes à l'échelle de la rue	7
1.2.2 Bilan de chaleur dans la canopée urbaine	12
1.2.3 Structure de la couche limite urbaine	14
1.2.4 Ilot de chaleur urbain dans la couche de canopée urbaine	16
1.3 Modélisation du climat urbain	16
1.3.1 Différentes approches existantes	17
1.3.2 Modèles zonaux	19
1.3.3 Modèles paramétriques	21
1.3.4 Couplages et combinaisons d'outils	24
1.3.5 Bilan : modèles pour évaluer l' ICU_{CCU}	25
1.4 Problématique, hypothèses et enjeux	26
1.4.1 Problème et enjeu	26
1.4.2 Approche en réseau de rues	27
1.5 MATHIS : un nouveau modèle de climat urbain	28
1.5.1 Principe du modèle et apport de la thèse	28
1.5.2 Plan du manuscrit	29

1.1 Définitions

Dans cette première partie, les termes et concepts importants utilisés au cours de la thèse sont définis.

1.1.1 Échelles du climat

Tout au long de la thèse, les termes d'échelle méso, locale et micro seront utilisés. Ils réfèrent approximativement respectivement à l'échelle régionale, celle du quartier et celle de la rue. Elles sont définies plus précisément sur la Figure 1.1, selon la classification proposée par [Oke 1978].

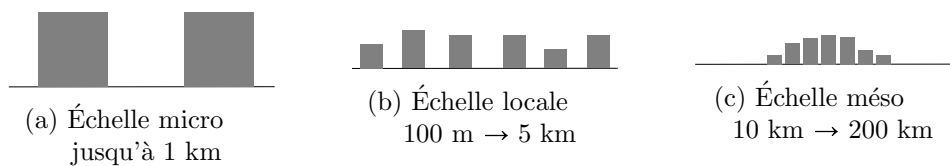


FIGURE 1.1 – Définition des échelles du climat [Oke 1978] (p 3)

1.1.2 Zones urbaine, péri-urbaine et rurale

Deux types de zones d'intérêt seront cités au cours de la thèse :

- La zone urbaine, qui est la zone d'intérêt principale, au cœur du travail de thèse
- La zone péri-urbaine ou rurale, qui correspond à la station météorologique la plus proche, et sert de référence pour définir l'îlot de chaleur urbain.

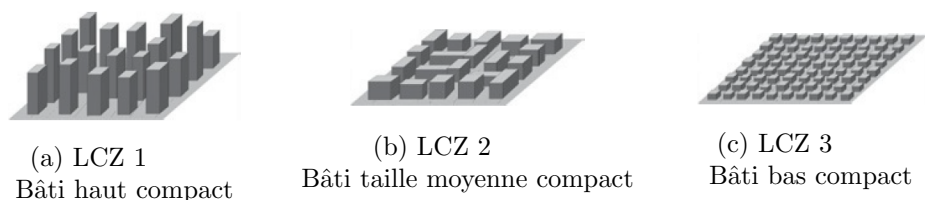


FIGURE 1.2 – Définition des zones urbaines à l'aide des LCZ [Stewart & Oke 2012]

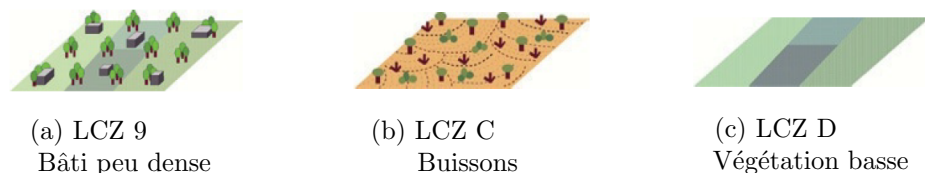


FIGURE 1.3 – Définition des zones péri-urbaines ou rurales à l'aide des LCZ [Stewart & Oke 2012]

Pour définir ces deux types de surfaces, il a été choisi de s'appuyer sur la classification des *Local Climate Zone* (LCZ), qui propose 17 types de surfaces terrestres [Stewart & Oke 2012]. La définition d'une zone urbaine dans le cadre de cette thèse est

ainsi restreinte aux LCZs 1, 2 et 3, représentées sur la Figure 1.2 ce qui correspond aux zones urbaines denses. De même, les zones péri-urbaine et rurale sont définies par les LCZs 9, C et D, qui correspondent à du bâti peu dense ou des zones ouvertes, par exemple agricoles (Figure 1.3).

1.1.3 Couche limite atmosphérique, couche limite urbaine et couche de canopée urbaine

Les concepts de Couche Limite Atmosphérique (CLA), Couche Limite Urbaine (CLU) et Couche de Canopée Urbaine (CCU) sont définis dans cette partie.

La CLA correspond à la couche inférieure de l'atmosphère terrestre, dans laquelle l'influence de la surface terrestre se fait sentir sur des échelles de temps inférieures à un jour [Garratt 1999]. Elle n'est pas propre aux zones urbaines, et est représentée sur la Figure 1.4a. La couche se situant au dessus de la CLA est nommée atmosphère libre.

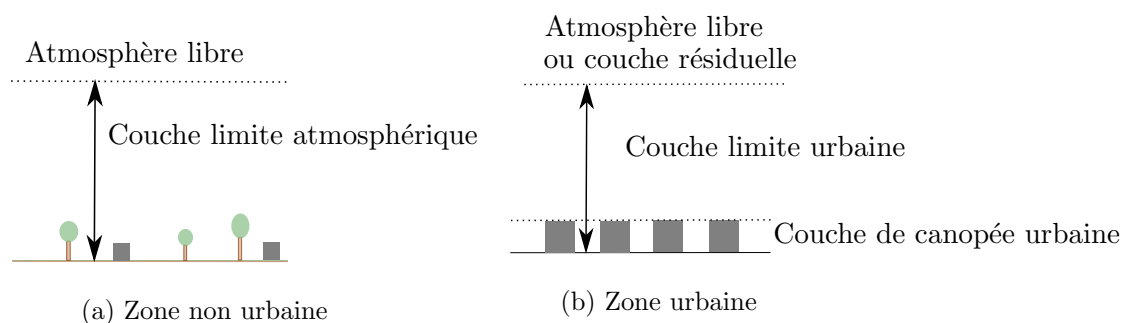


FIGURE 1.4 – Définition de la couche limite atmosphérique, de la couche limite urbaine et de la couche de canopée urbaine (adapté de [Oke *et al.* 2017] p 31)

La CLU correspond à la partie de la CLA impactée par les effets dynamiques et thermiques de la ville [Oke *et al.* 2017]. Elle est représentée sur la Figure 1.4b. Dans le cas où l'entièreté de la CLA est impactée par la ville, la CLU est surplombée par l'atmosphère libre. Sinon, une couche résiduelle provenant de la CLA rurale est présente. Enfin, la CCU est la zone d'air qui s'étend du sol jusqu'au sommet des bâtiments [Oke *et al.* 2017]. Selon [Oke *et al.* 2017], on distingue la Couche de Canopée Urbaine, qui désigne l'air, de la Canopée Urbaine (CU), qui désigne les éléments urbains (bâtiments, arbres, sol des rues).

1.1.4 Stabilité atmosphérique

La stabilité atmosphérique permet de quantifier les mouvements verticaux dans la CLA [Oke 1978]. Plus l'atmosphère est stable moins il y a de mouvements d'air verticaux ; plus elle est instable et plus il y en a.

Le signe de la différence de température entre la surface et l'air permet à lui seul de définir si l'atmosphère est stable ou instable [Garratt 1999]. Si la surface est plus chaude que l'air, des cycles de convection se créent, générant de la turbulence, des mouvements d'air verticaux et donc de l'instabilité. Si elle est moins chaude que l'air au contraire, la flottabilité tend à supprimer les mouvements d'air verticaux, empêchant l'air de s'élever

et détruisant la turbulence. Dans le cas où le flux de chaleur convectif entre la surface et l'air est nul, on parle de stratification neutre.

La vitesse de friction (u_*) joue également un rôle important dans la stabilité atmosphérique [Garratt 1999]. Cette grandeur quantifie la turbulence générée mécaniquement par la friction au niveau du sol, elle croit donc avec la vitesse du vent et la rugosité du sol. Lorsque l'atmosphère est instable, les mouvements d'air horizontaux et la turbulence générée mécaniquement perturbent les cycles de convection et diminuent donc l'instabilité. En revanche, dans une situation stable, la turbulence générée par la friction crée des mouvements d'air verticaux, elle diminue donc aussi la stabilité. En résumé, plus la vitesse de friction est importante et plus la stabilité se rapproche de l'état neutre.

1.1.5 Ilot de chaleur urbain et surchauffes urbaines

Le phénomène d'Ilot de Chaleur Urbain (ICU) est défini comme la différence de température entre la ville et le milieu environnant. Au moins trois ICUs peuvent être distingués ([Oke *et al.* 2017], Tableau 1.1) :

- A la surface (ICU_{surf}), défini comme la différence de température entre la surface urbaine et la surface rurale. L'échelle caractéristique associée à cet ICU est l'échelle micro, soit jusqu'à 1 km.
- Dans la Couche de Canopée Urbaine (ICU_{CCU}), c'est-à-dire la différence de température d'air entre la CCU et les mêmes hauteurs à la station météorologique rurale. L'échelle appropriée pour décrire ce phénomène est l'échelle locale, soit entre 100 m et 10 km.
- Dans la Couche Limite Urbaine (ICU_{CLU}), c'est-à-dire la différence de température entre la CLU et les mêmes hauteurs à la station météorologique rurale. Cet ICU se développe à l'échelle locale et méso, entre 100 m et 100 km.

Surface (ICU_{surf})	Couche de canopée urbaine (ICU_{CCU})	Couche limite urbaine (ICU_{CLU})
Échelle micro	Échelle locale	Échelles locale et méso

TABLE 1.1 – Échelles adaptées aux ICU de surface, de couche de canopée urbaine et de couche limite urbaine ([Oke *et al.* 2017] p198)

La notion de surchauffe urbaine [Marie *et al.* 2017] décrit l'inconfort des citoyens dû aux fortes chaleurs. L'îlot de chaleur urbain joue donc un rôle mais ce n'est pas le seul facteur en cause. En effet, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur due au dérèglement climatique impacte également la surchauffe urbaine. De même, la sensibilité des individus et leur mode de vie sont des facteurs importants.

1.1.6 Rue canyon

La rue canyon est un concept qui permet de représenter de façon simplifiée les morphologies urbaines. Elle est définie par [Nunez & Oke 1977] comme un parallépipède rectangle d'air, bordé de deux parallépipèdes rectangles identiques opaques correspondant aux bâtiments, selon la représentation Figure 1.5.

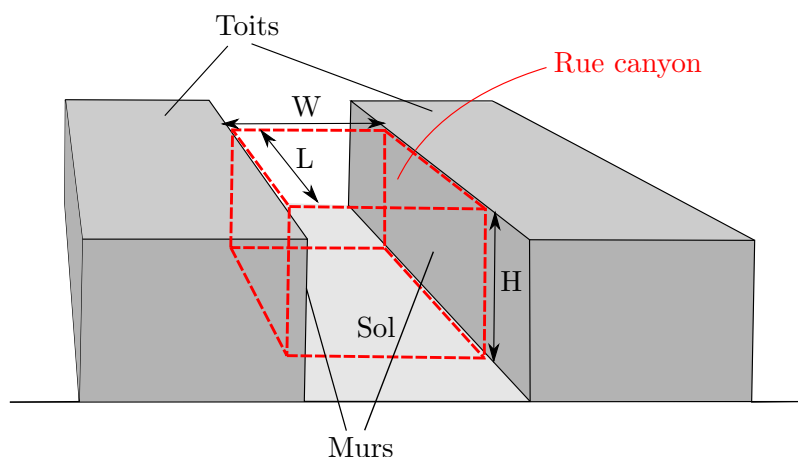


FIGURE 1.5 – Définition d'une rue canyon selon [Nunez & Oke 1977]

Au cours de cette thèse, ce concept sera adapté selon deux variantes :

- La rue canyon infinie, pour laquelle la longueur L définie sur la Figure 1.5 est infinie
- La rue canyon asymétrique, pour laquelle les deux parallélépipèdes rectangles représentant les bâtiments ne sont pas forcément identiques.

Le terme de parois sera utilisé pour désigner les murs et le sol de la rue.

1.2 Phénoménologie

Les phénomènes physiques ayant un impact sur le climat urbain, à travers le prisme des surchauffes urbaines, sont détaillés dans cette partie. Premièrement, les phénomènes sont décrits selon une échelle croissante : d'abord dans la rue, puis à travers un bilan d'énergie sur la canopée urbaine, et enfin dans la couche limite urbaine. Par la suite, la compréhension des phénomènes à ces différentes échelles permettra d'explicitier l'effet d'îlot de chaleur urbain.

1.2.1 Phénomènes à l'échelle de la rue

Certains phénomènes ayant lieu à l'échelle de la rue sont détaillés dans cette partie, en considérant une rue canyon telle que définie précédemment. Le but n'est pas d'effectuer un inventaire exhaustif, mais de cibler ceux qui sont le plus important pour la suite de la thèse. En particulier, les phénomènes thermo-aérauliques, radiatifs et conductifs ainsi que les phénomènes liés à la présence d'arbres sont abordés. Une description plus détaillée des phénomènes peut être trouvée dans [Oke *et al.* 2017].

1.2.1.1 Phénomènes thermo-aérauliques

Écoulement en conditions isothermes

Lorsque l'écoulement externe est transversal à la rue, la forme de l'écoulement dans la rue est très dépendante du rapport d'aspect H/W , H étant la hauteur de la rue et W sa largeur. Trois régimes sont distingués et représentés sur la Figure 1.6. Lorsque les bâtiments sont espacés ($H/W < 0,35$), les déviations de l'écoulement provoquées par un

bâtiment restent isolées les unes des autres, et l'écoulement est dit de type rugosité isolée (*isolated roughness flow*). Si les bâtiments sont plus rapprochés ($0,35 < H/W < 0,65$), une interférence apparaît entre la zone de recirculation en aval d'un bâtiment et celle en amont du suivant : il s'agit d'un écoulement de type interférence des sillages (*wake interference flow*). Enfin, pour un rapport d'aspect supérieur à 0,65, l'écoulement externe ne pénètre que très peu dans la rue, découplant partiellement l'écoulement dans la rue et l'écoulement externe. Il s'agit d'un écoulement de type rasant (*skimming flow*). Pour un rapport d'aspect autour de 1, représenté sur la Figure 1.6c, un tourbillon apparaît dans la rue. Dans le cas de rues plus encaissées, deux voire trois tourbillons peuvent apparaître sur la hauteur de la rue.

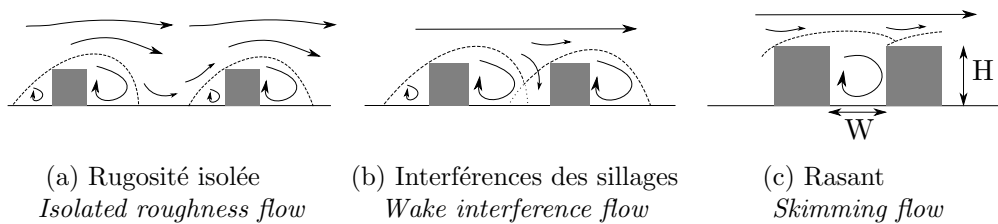


FIGURE 1.6 – Trois types d'écoulements en zone urbaine en fonction du rapport d'aspect H/W (adapté de [Oke *et al.* 2017] p 88)

Lorsque l'écoulement externe est dans l'axe de la rue, les tourbillons représentés sur la Figure 1.6 disparaissent, les bâtiments n'offrant plus de résistance frontale.

Enfin, lorsque l'écoulement externe n'est ni transversal à l'axe de la rue, ni longitudinal, il adopte dans la rue une forme hélicoïdale. La Figure 1.6 reste toutefois valable. Dans ce cas, une composante longitudinale supplémentaire apparaît, non visible dans le plan représenté sur la Figure 1.6. Il a été montré que les composantes longitudinales et transversales de l'écoulement sont découplées dans cette situation [Soulhac *et al.* 2008].

Échange de chaleur par convection

La température de surface des parois urbaines est en réalité différente de la température d'air. Un échange de chaleur a alors lieu entre la surface et l'air, appelé convection. Deux types de convection sont distingués [Lienhard IV & Lienhard V 2017] :

- La convection forcée, pour laquelle l'écoulement est dépendant d'une condition de forçage externe, ce qui correspond donc aux écoulements présentés au paragraphe précédent. Dans ce cas, l'échange de chaleur est proportionnel à la différence de température entre la surface et l'air.
- La convection naturelle, pour laquelle la flottabilité est le moteur de l'écoulement, qui résulte des différences de température d'air induite par l'échange de chaleur avec la paroi. Dans ce cas, l'échange de chaleur n'est pas simplement proportionnel à la différence de température entre la paroi et l'air.

D'une manière générale, plus la vitesse caractéristique de l'écoulement est élevée et plus la convection est efficace. Ainsi, l'échange de chaleur en convection forcée est plus important qu'en convection naturelle, pour une même différence de température entre paroi et air.

Lorsqu'un cas de figure implique un mélange de convection forcée et de convection

naturelle, on parle de convection mixte. Par exemple, le cas d'une rue soumise à un écoulement externe dont une seule paroi est chauffée a été étudié dans [Allegrini *et al.* 2012] à l'aide de mesures en soufflerie. Il a été observé que le tourbillon décrit au paragraphe précédent est accéléré lorsque le mur amont est chauffé. En revanche, le tourbillon principal dans la rue est ralenti si le mur aval est chauffé. Cela s'explique par le fait que la flottabilité assiste le flux dans le premier cas, alors qu'elle s'y oppose dans le second.

1.2.1.2 Échanges de chaleur radiatifs

Deux bandes spectrales sont souvent distinguées pour décrire le rayonnement [Palme & Salvati 2021] :

- Entre 0,1 et 3 μm : nommée solaire ou Courtes Longueur d'Ondes (CLO), cette bande spectrale concentre la quasi-totalité de l'énergie solaire.
- Entre 3 et 100 μm : nommée infrarouge ou Grandes Longueur d'Ondes (GLO), cette bande spectrale correspond aux émissions de l'atmosphère, de la surface terrestre et plus généralement des corps à température ambiante.

Bande spectrale solaire

Lorsqu'un rayon frappe une surface opaque, il est en partie absorbé et en partie réfléchi. Cette réflexion peut être spéculaire, c'est-à-dire avec une direction précise ; ou diffuse, c'est-à-dire sans direction précise et suivant une répartition lambertienne. Sur la Figure 1.7a, ce phénomène est représenté sur une surface plane horizontale, dans le cadre d'une réflexion spéculaire.

Dans une rue, une partie du flux solaire est réfléchi de paroi en paroi avant d'être absorbée ou de s'échapper vers le ciel. Ces multi-réflexions induisent un piégeage radiatif. Plus le rapport d'aspect H/W est élevé et plus le piégeage radiatif est important, le nombre de multiréflexions augmentant. Les Figures 1.7b et 1.7c illustrent ce phénomène.

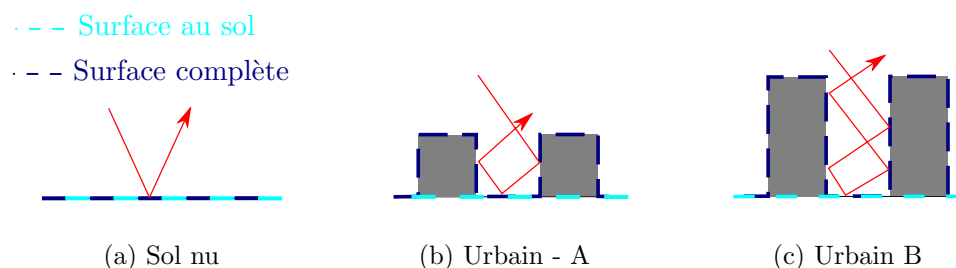


FIGURE 1.7 – Trois configurations idéalisées choisies pour comparer le piégeage radiatif et représentation des multiréflexions

Le flux solaire absorbé par la rue est donc d'autant plus important que le rapport d'aspect est élevé, pour une même surface au sol. Pourtant, si le flux solaire absorbé est exprimé par unité de surface complète (définie sur la Figure 1.7), l'effet du rapport d'aspect est opposé [Theeuwes *et al.* 2014], dû à l'ombrage des murs. Le Tableau 1.2 résume cette conclusion.

Bande spectrale infrarouge

Pour l'infrarouge les mêmes phénomènes sont observés mais produisent un effet opposé. En effet, contrairement au rayonnement solaire, le rayonnement infrarouge ne provient pas uniquement du ciel, mais est également émis par les parois. La température du ciel étant plus froide que celle de la surface terrestre, Le flux infrarouge est majoritairement un vecteur de rafraîchissement de la surface terrestre. En zone urbaine, le piégeage radiatif diminue l'efficacité de ce rafraîchissement [Oke 1981].

Cette fois, plus le rapport d'aspect est important (rue encaissée) et plus les émissions infrarouge par unité de surface au sol sont importantes. Au contraire, plus la rue est encaissée et moins les parois (murs et sol) bénéficient d'un rafraîchissement efficace (Tableau 1.2). Le facteur de vue du ciel dans la rue, c'est-à-dire portion de ciel visible depuis un point donné, diminue donc à mesure que le rapport d'aspect d'une rue augmente.

	Par unité de surface au sol	Par unité de surface complète
Flux CLO absorbé net	Sol nu < Urbain A < Urbain B	Urbain B < Urbain A < Sol nu
Flux GLO émis net	Sol nu < Urbain A < Urbain B	Urbain B < Urbain A < Sol nu

TABLE 1.2 – Comparaison des flux radiatifs des configurations de la Figure 1.7 à température de surface et albédo/émissivité égales

Les phénomènes décrits pour le flux solaire et le flux infrarouge se compensent donc partiellement, mais ont une temporalité différente, le premier étant nul la nuit. Selon [Theeuwes *et al.* 2014], une augmentation du rapport d'aspect cause une augmentation de la température d'air nocturne dû au piégeage infrarouge. A partir d'un rapport d'aspect suffisamment grand toutefois, le moindre flux solaire absorbé provoque une diminution de la température d'air nocturne.

1.2.1.3 Échanges de chaleur par conduction

Au sein des solides, par exemple les parois des bâtiments ou le sol, l'échange de chaleur a lieu de proche en proche par conduction dans le matériau. Ce mode de transfert de chaleur est plus lent que ceux décrits précédemment, il est donc à l'origine du stockage de chaleur dans les matériaux solides et de l'inertie thermique.

Les caractéristiques thermiques du sol et du bâti impactent cette capacité à stocker la chaleur, notamment :

- La conductivité thermique ($\lambda [W/(mK)]$), qui décrit la capacité d'un matériau à conduire une densité de flux de chaleur
- La masse volumique ($\rho [kg/m^3]$), qui correspond à la densité du matériau
- La capacité thermique massique ($c_p [J/(kgK)]$), qui représente la quantité d'énergie à apporter pour élever d'un degré un kilogramme de matériau. Le produit ρc_p représente donc la capacité d'un volume donné à stocker la chaleur.

1.2.1.4 Effet de la végétation

Plusieurs types de végétation peuvent être observés en ville, par exemple des arbres, des buissons, des plantes basses, des murs végétalisés. Cette végétation peut être intégrée de différentes façons à la ville, par exemple dans des parcs, des cours, des jardins particuliers ou des rues. Dans cette partie, le cas d'une rue canyon est considéré.

La végétation basse (buissons de faible taille, plantes basses) et les murs végétalisés ont un impact sur les transferts de chaleur ayant lieu aux parois. Notamment, la plupart des plantes sont capables de réguler leur température à l'aide d'évapotranspiration. Cet effet participe à une plus faible élévation des températures de surface sur les zones végétalisées, ce qui est recherché dans le cadre des surchauffes urbaines [Leroy *et al.* 2021]. La capacité d'une plante à évapotranspirer est toutefois très dépendante de la disponibilité en eau.

L'impact d'arbres dans une rue est complexe, intervenant à la fois dans le volume d'air et dans le bilan radiatif. Les quatre phénomènes physiques directement liés à la présence d'arbres sont représentés sur la Figure 1.8, et sont [Bowler *et al.* 2010, Gillner *et al.* 2015, Mballo *et al.* 2021, Akbari 2002] :

- L'ombrage, soit l'interception du rayonnement solaire par le feuillage
- Le piégeage infrarouge, soit l'interception du rayonnement infrarouge par le feuillage
- L'obstruction aéraulique par le feuillage
- L'évapotranspiration qui crée un flux latent et permet aux feuilles de ne pas subir un échauffement trop important.

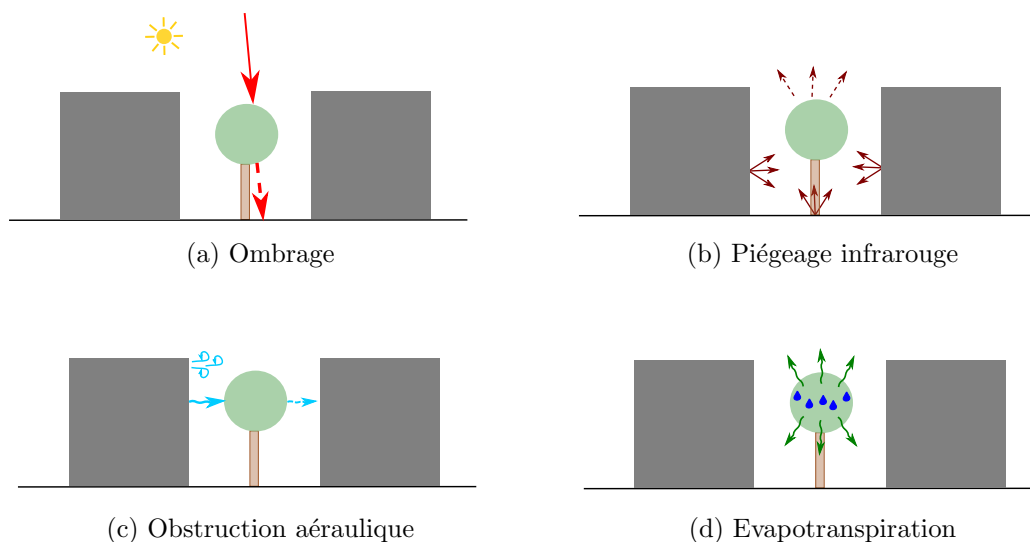


FIGURE 1.8 – Phénomènes physiques directement liés à la présence d'arbres dans une rue

En journée, l'ombrage et l'évapotranspiration induisent un rafraîchissement des températures d'air et de surface [Bowler *et al.* 2010, Gillner *et al.* 2015]. La nuit, ces deux phénomènes ne jouent plus de rôle direct. L'obstruction aéraulique et le piégeage infrarouge peuvent alors devenir dominants dans certains cas, et provoquer une augmentation de la température d'air [Wujeska-Klause & Pfautsch 2020, Huang *et al.* 2008, Loughner *et al.* 2012]. Cela n'est

toutefois pas une conclusion systématique, et des simulations ont conclu à une diminution de la température d'air nocturne [Wang & Akbari 2016, Loughner *et al.* 2012].

1.2.2 Bilan de chaleur dans la canopée urbaine

La zone d'intérêt est élargie dans cette partie : la rue est laissée au profit de la canopée urbaine dans son ensemble. Afin de comprendre les différences entre une zone rurale et une zone urbaine, les flux impliqués dans un bilan de chaleur idéalisé pour ces deux milieux est présenté sur la Figure 1.9. Les courbes idéalisées pour la zone rurale sont inspirées de celles pour un champs d'orge en Angleterre en juin ([Oke 1978] p 24) et pour un sol nu humide au Canada fin mai ([Oke 1978] p 135). De la même façon, les flux en zone urbaine sont inspirés de ceux pour une journée estivale à Marseille ([Oke *et al.* 2017] p 174), début septembre à Vancouver (p 184) et début décembre à Mexico ([Oke *et al.* 2017] p 191). Le but de la Figure 1.9 se limite toutefois à comparer les ordres de grandeurs des flux, les valeurs pouvant varier en fonction de nombreux paramètres. Dans les cas représentés, l'advection horizontale de chaleur est négligée, et le bilan s'écrit donc (en W/m^3) :

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

$$\text{Avec : } \left\{ \begin{array}{l} Q^* : \text{Le flux radiatif net incident} \\ Q_F : \text{Le flux anthropique émis} \\ Q_H : \text{Le flux convectif quittant la surface} \\ Q_E : \text{Le flux latent quittant la surface} \\ \Delta Q_S : \text{Le flux stocké} \end{array} \right.$$

Comme évoqué dans la partie précédente, le flux radiatif peut être décomposé en fonction des bandes spectrales selon :

$$Q^* = S^* + I^* \quad (1.2)$$

$$\text{Avec : } \left\{ \begin{array}{l} S^* : \text{Le flux solaire net incident} \\ I^* : \text{Le flux infrarouge net incident} \end{array} \right.$$

Tout d'abord, conformément au Tableau 1.2, le flux radiatif a été représenté légèrement plus important en ville en journée. Par ailleurs, un apport de chaleur supplémentaire a été représenté en ville, nommé flux anthropique. Il correspond à la production de chaleur due à certaines activités humaines, de l'ordre de $30 W/m^2$ en été pour une ville comme Toulouse [Pigeon *et al.* 2007]. Dans un contexte estival, la climatisation et le trafic routier (combustion) sont les deux principales sources de chaleur. Deux pics aux heures de pointes sont décrits dans [Oke *et al.* 2017] (p165) et ont été représentés sur la Figure 1.9b.

Les apports de chaleur en journée sont donc plus importants en ville. Ils sont également dissipés différemment pour les zones urbaines et rurales. Une première différence est l'ordre de grandeur du flux latent, qui est largement supérieur dans le cas d'une zone rurale. Cela est dû à une présence plus importante de végétation ainsi qu'à

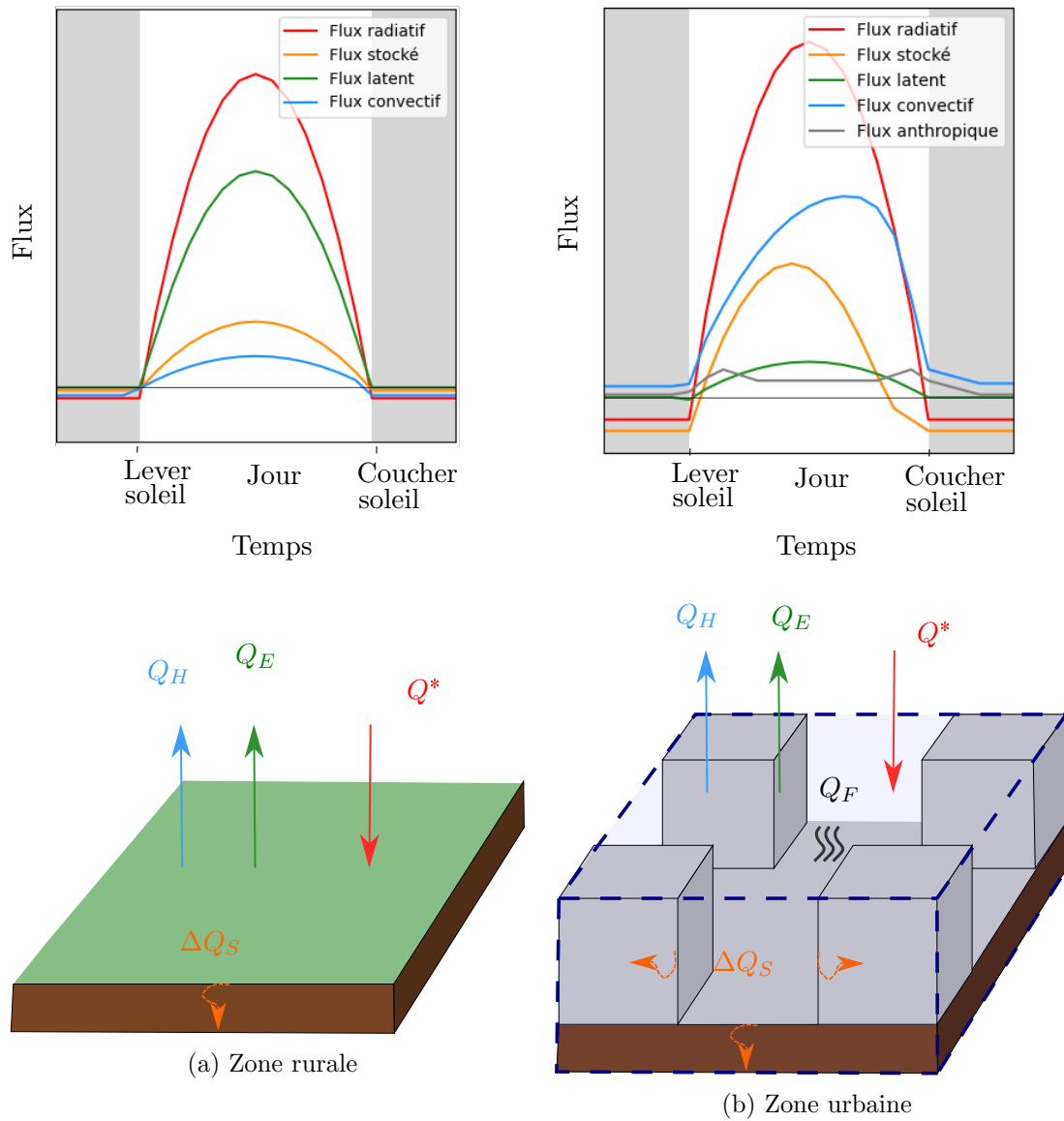


FIGURE 1.9 – Comparaison des bilans idéalisés de surface en zone rurale et urbaine par beau temps (inspiré de [Oke *et al.* 2017] et [Oke 1978]). Q_H : flux convectif, Q_E : flux latent, Q^* : flux radiatif, ΔQ_S : flux stocké, Q_F : flux anthropique.

la perméabilité des sols, qui leur permet de rester plus humides. En ville, la dissipation de chaleur par convection est plus importante. La part de flux stocké en journée est également supérieure. Le rapport de Bowen, défini comme le rapport du flux convectif sur le flux latent, est ainsi supérieur à 1 en ville et largement inférieur à 1 en milieu rural [Oke *et al.* 2017].

La nuit, une émission infrarouge plus importante est observée en ville, due à la fois à la géométrie (Tableau 1.2) et à des températures de surface plus importantes. Un déstockage (flux stocké négatif) de chaleur plus prononcé est également observé. Ces deux phénomènes se compensent partiellement. L'ordre de grandeur du déstockage est néanmoins souvent supérieur à celui du rafraîchissement infrarouge (situation observée à Marseille et Mexico [Oke *et al.* 2017]). Selon l'équation de bilan 1.1, cela implique donc un flux convectif nocturne positif en ville, c'est-à-dire une surface plus chaude que l'air. Ce phénomène n'est pas observé en milieu rural, où le flux déstocké est plus faible. Cette différence joue un rôle important dans l'ICU, et sera abordée ultérieurement dans la partie dédiée à celui-ci.

1.2.3 Structure de la couche limite urbaine

La CLU se développe en trois dimensions et évolue au long de la journée. Dans cette partie, les variations horizontales sont négligées et seules les variations verticales et l'évolution temporelle sont étudiées. Pour cela, les cycles journaliers de la stratification verticale rurale et urbaine sont décrits dans le cas d'un jour de ciel clair. L'influence des grandeurs météorologiques est ensuite discutée.

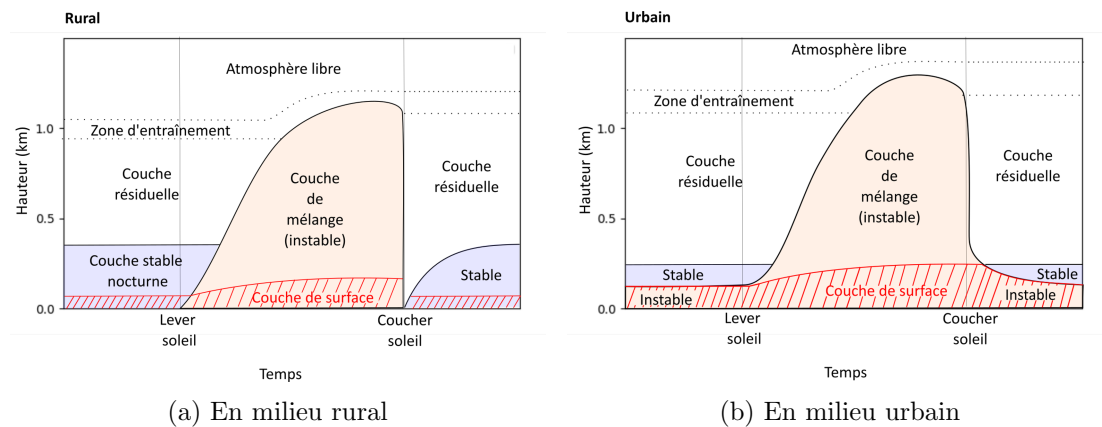


FIGURE 1.10 – Cycle journalier idéalisé de la couche limite atmosphérique (adapté de [Oke *et al.* 2017])

Cycle journalier en milieu rural

Le cycle journalier en milieu rural est représenté sur la Figure 1.10a. En journée, le soleil chauffe la surface terrestre, qui devient plus chaude que l'air. Une couche instable avec des cycles de convection se développe alors, appelée couche de mélange. Quand la nuit tombe, la surface se rafraîchit plus efficacement que l'air grâce à ses émissions infrarouge. Une couche stable se développe donc petit à petit, appelée couche stable nocturne. Au dessus, la couche convective développée en journée est toujours présente, c'est la couche résiduelle.

Cycle journalier en milieu urbain

La Figure 1.10b illustre le cycle journalier en milieu urbain. En journée, la couche limite urbaine ressemble à une couche limite atmosphérique rurale : une couche instable se forme.

La nuit en revanche, le comportement en ville est différent du milieu rural. La surface urbaine reste souvent plus chaude que l'air toute la nuit. Dans la majorité des cas, une couche légèrement instable perdure durant la nuit. Si la couche stable nocturne du milieu environnant est plus haute que la couche urbaine instable, elle vient alors recouvrir cette dernière comme un couvercle, limitant sa croissance et donc sa capacité à évacuer la chaleur de la ville (ainsi que les polluants).

Enfin, sur la Figure 1.10, la couche de surface est représentée. Elle est définie comme la couche dans laquelle l'influence de la surface terrestre est largement dominante et la force de Coriolis devient négligeable [Garratt 1999]. Ici, il est important de noter que la couche de surface est très différente la nuit entre le milieu urbain et rural. Lors d'une nuit dégagée suivant un jour de beau temps, elle est en effet stable dans le milieu rural et instable dans le milieu urbain.

Influence des grandeurs météorologiques

Jusqu'ici, nous avons étudié les phénomènes en jeu un jour de ciel clair. Si le temps est nuageux au contraire, plusieurs différences apparaissent. Le rayonnement solaire incident étant plus faible, la différence de stockage rural/urbain est également plus faible. Ainsi, la couche de surface nocturne instable observée en ville peut laisser place à une couche de stabilité atmosphérique neutre. Par ailleurs, si la nuit est nuageuse, le refroidissement infrarouge de la surface rurale sera plus faible, et la couche de surface rurale aura plutôt tendance à être neutre. Ainsi, l'inversion agissant comme un couvercle sur la ville la nuit disparaîtra.

La vitesse du vent est un autre paramètre décisif. C'est elle qui va déterminer la forme de la CLU (Figure 1.11) :

- En présence d'un vent modéré ou fort, la CLU s'étire dans le sens du vent au dessus de la couche limite rurale : c'est le panache urbain.
- Si le vent est très calme, des cycles de convection se forment au dessus de la ville : c'est le dôme urbain.

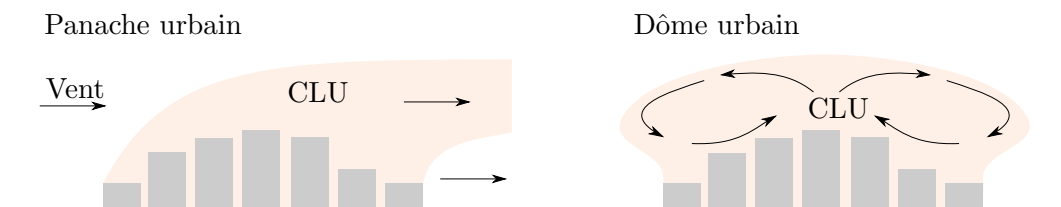


FIGURE 1.11 – Forme de la couche limite urbaine dans les configurations "panache" et "dôme" (adapté de [Oke *et al.* 2017])

Si la ville est observée de loin comme une surface rugueuse, la configuration panache correspond à une situation de convection forcée alors que la configuration dôme correspond à une situation de convection naturelle. Plus la vitesse de l'écoulement est importante et plus la chaleur émise par la ville est donc évacuée facilement. Par ailleurs,

un autre élément accentue cet effet la nuit. Plus le vent est fort et plus la couche stable nocturne recouvrant la couche limite urbaine tendra vers le neutre, facilitant l'expansion verticale de la CLU.

1.2.4 Ilot de chaleur urbain dans la couche de canopée urbaine

Cette dernière partie du contexte phénoménologique est consacrée à l'ICU de la couche de canopée urbaine (ICU_{CCU}), pour lequel tous les phénomènes décrits précédemment interviennent. Il a été choisi de cibler spécifiquement l' ICU_{CCU} , conformément au sujet de cette thèse, car cette grandeur impacte directement le confort des citoyens, tout en impliquant des phénomènes plus complexes que l'ICU surfacique.

L' ICU_{CCU} suit un motif caractéristique, étant faible en journée et augmentant en soirée pour atteindre un maximum dans la nuit, selon la Figure 1.12a [Oke *et al.* 2017]. En journée, le flux convectif urbain est plus important (Figure 1.9). Cependant, la présence d'une couche de mélange instable restreint l'accumulation de chaleur au niveau du sol. Un ICU_{CCU} très faible ou inexistant est donc observé. La nuit, le flux convectif continue à réchauffer l'air en ville, alors qu'il devient négatif en zone rurale. La couche stable provenant du milieu environnant et surplombant la ville (Figure 1.10b) empêche la dissipation de la chaleur émise par la ville, ce qui provoque un ICU_{CCU} .

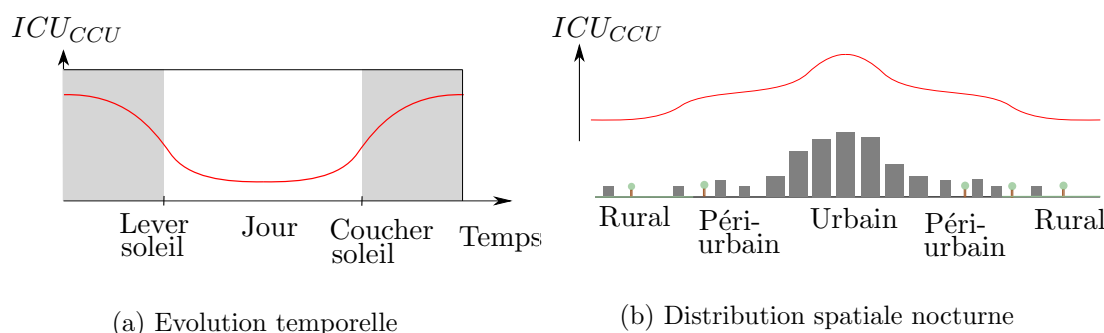


FIGURE 1.12 – Représentations idéalisées de l'ICU dans la canopée urbaine (adapté de [Oke *et al.* 2017])

Enfin, la Figure 1.12b illustre le fait que l' ICU_{CCU} nocturne augmente avec la densité de bâtiments et avec la diminution de végétation, et atteint donc un sommet en centre ville. Cela est cohérent avec les phénomènes décrits dans les parties précédentes, notamment l'influence du flux stocké, de la végétation et du rapport d'aspect des rues.

De nombreux phénomènes, souvent couplés, et intervenant à différentes échelles expliquent donc la formation de l'ICU de la couche de canopée urbaine. Plusieurs approches existent à ce jour pour les représenter à l'aide de modèles numériques.

1.3 Modélisation du climat urbain

La modélisation du climat urbain vise généralement trois types d'objectifs [Mirzaei 2015] :

- L'évaluation de stratégies d'atténuation de l'ICU, comme le choix des matériaux
- L'amélioration du confort ou de la santé des habitants

— La prévision de la consommation énergétique des bâtiments.

La modélisation numérique est un outil complémentaire aux campagnes de mesures en conditions réelles, aux dispositifs expérimentaux et aux modèles empiriques [Oke *et al.* 2017]. En effet, les modèles numériques permettent un contrôle complet du cas d'étude et un accès à l'ensemble des résultats, mais ne sont que des représentations de la réalité et nécessitent de poser des hypothèses parfois restrictives. Ils doivent donc être validés à l'aide de mesures expérimentales et en conditions réelles. Les modèles empiriques, qui se basent sur une approche statistique, permettent également d'accéder simplement à des résultats généraux, utiles pour la compréhension des phénomènes.

La variété et la complexité des phénomènes physiques interdépendant décrits dans la partie précédente, entrant en jeu à différentes échelles spatiales et temporelles, rendent toutefois la modélisation numérique délicate. Chaque modèle doit donc choisir ses limites (domaine spatial et temporel, physique urbaine représentée) en fonction de son objectif.

1.3.1 Différentes approches existantes

Catégories de modèles selon les échelles spatiales

Trois grands types d'approches permettent de représenter les phénomènes à différentes échelles [Mirzaei 2015] :

- Les modèles méso-échelle
- Les modèles de climat urbain
- Les modèles de bâtiment.

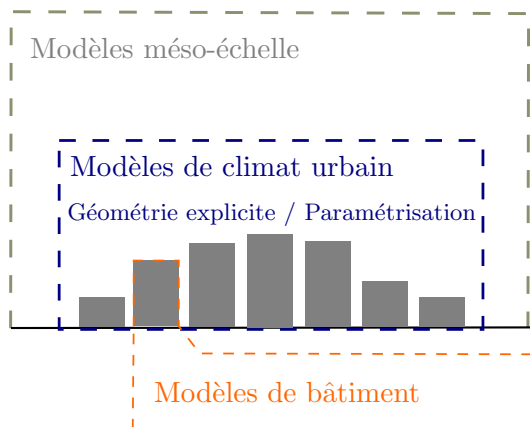


FIGURE 1.13 – Types de modèles utilisés pour représenter les phénomènes physiques de l'échelle du bâtiment à l'échelle méso

Les modèles atmosphériques régionaux simulent les phénomènes à méso-échelle. Parmi-eux, on peut citer Meso-NH [Lac *et al.* 2018], WRF [Skamarock *et al.* 2005] et COSMO [Rockel *et al.* 2008]. Par ailleurs, de nombreux modèles sont dédiés à la simulation du bâtiment, comme TRNSYS [Trnsys] ou EnergyPlus [EnergyPlus]. Enfin, entre ces deux échelles, les modèles de climat urbain vont être présentés plus en détail.

Modèles de climat urbain

Les modèles de climat urbain sont nombreux et d'une grande diversité. Par exemple, [Jänicke *et al.* 2021] en liste 54. Dans le Tableau 1.3, une catégorisation est proposée. L'ensemble des modèles va être présenté succinctement. Deux groupes dans le Tableau 1.3 feront l'objet d'un traitement plus détaillé dans des sections à part, et regroupent les modèles prévus pour simuler à la fois les phénomènes aérauliques et radiatifs à l'échelle locale. Il s'agit en effet des types de modèles les plus proches du sujet de cette thèse, et un traitement plus approfondi est donc pertinent.

Parmi les modèles de climat urbain, deux sous-catégories principales peuvent être distinguées, selon que la géométrie soit représentée de manière explicite ou non.

	Type	Exemples
Géométrie explicite	Modèles radiatifs	RayMan [Matzarakis <i>et al.</i> 2010]
		SOLWEIG [Lindberg <i>et al.</i> 2008]
		SOLENE [Idczak <i>et al.</i> 2010]
		QESRadiant [Overby <i>et al.</i> 2016]
		CityComfort+ [Huang <i>et al.</i> 2014]
Modèle thermo-énergétique avec CFD	Envi-met [Bruse 1999]	
	Solene-microclimat [Bouyer 2009]	
	Ansys-Fluent [Poole <i>et al.</i> 1995]	
	MITRAS [Salim <i>et al.</i> 2018],	
	Modèles zonaux	Détaillé section 1.3.2
Paramétrisation de la géométrie	Aéraulique (profil vertical)	CIM [Mauree <i>et al.</i> 2017]
		MOST-RSL [Theeuwes <i>et al.</i> 2019]
	Modèles dalle	Détaillé section 1.3.3
	Modèles canopée urbaine	Détaillé section 1.3.3

TABLE 1.3 – Différents types de modèles de climat urbain

Parmi les modèles représentant explicitement la géométrie, un premier groupe se focalise sur les phénomènes radiatifs, avec des niveaux de détail variables. Les modèles RayMan [Matzarakis *et al.* 2010], SOLWEIG [Lindberg *et al.* 2008] ont pour but le calcul de la température radiante moyenne à l'échelle d'un quartier, avec une attention à la facilité de mise en données. SOLENE [Idczak *et al.* 2010] modélise un niveau de détail plus important, avec un maillage surfacique et l'application de la méthode des radiosités entre les différentes facettes pour la prise en compte des multi-réflexions. Enfin, QESRadiant [Overby *et al.* 2016] et CityComfort+ [Huang *et al.* 2014] traitent le rayonnement par lancé de rayons. La principale différence entre la méthode des radiosités et le lancé de rayons est la capacité de la deuxième à modéliser les réflexions spéculaires [Howell *et al.* 2021a]. Ces méthodes seront abordées au chapitre 3.

Dans un deuxième groupe, un modèle radiatif est couplé à un modèle de surface ainsi qu'à un modèle aéraulique CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Cette approche permet une représentation plus détaillée des phénomènes, mais engendre un coût de calcul important, ce qui nécessite de limiter la période et le domaine d'étude. Parmi ces modèles, Envi-met [Bruse 1999] est le plus utilisé [Jänicke *et al.* 2021, Palme & Salvati 2021], et permet une représentation détaillée de la végétation, associée à un modèle hydrologique. Solene-microclimat [Bouyer 2009] couple le modèle radiatif SOLENE avec le modèle CFD Code-Saturne, et inclus un modèle de bâtiment et de végétation, mais pas de modèle hydrologique. Enfin, Ansys-Fluent [Poole *et al.* 1995] et MITRAS [Salim *et al.* 2018] n'incluent ni modèle de végétation, ni de bâtiment, ni hydrologique, mais visent une modélisation CFD plus détaillée avec la possibilité d'utiliser la méthode LES (*Large Eddy Simulation*), alors que les modèles décrits précédemment utilisaient la méthode RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*). La méthode LES résout une partie de la turbulence, et vise une meilleure représentation des écoulements complexes et des recirculations (abordé à la section 2.4.2).

Enfin, les modèles zonaux couplent un modèle radiatif et un modèle aéraulique sans CFD, et sont laissés de côté pour l'instant : ils seront détaillés à la section 1.3.2.

Parmi les modèles représentant la géométrie de façon paramétrique, certains se concentrent sur les phénomènes aérauliques, proposant une expression de profil vertical de vitesse moyenne adapté à la ville. CIM [Mauree *et al.* 2017] et MOST-RSL [Theeuwes *et al.* 2019] appartiennent à cette catégorie.

Les deux dernières catégories, les modèles dalles et les modèles de canopée urbaine, représentent quant à eux de manière couplée les phénomènes radiatifs, aéraulique ainsi qu'un modèle de surface et seront détaillés à la section 1.3.3.

1.3.2 Modèles zonaux

Cette partie se concentre sur les modèles zonaux, évoqués dans le Tableau 1.3 mais qui n'ont pas encore été détaillés. En effet, cette catégorie de modèles est l'une des plus proches du travail effectué lors de cette thèse.

Les modèles zonaux représentent explicitement la géométrie des bâtiments, mais sans avoir recours à la CFD pour la modélisation aéraulique. Un maillage grossier (zonal) dans le volume d'air est adopté, et des méthodes simplifiées sont utilisées pour simuler l'écoulement. Cela permet de modéliser un domaine de l'ordre du quartier, avec un coût de calcul moindre par rapport aux modèles utilisant de la CFD.

Quatre modèles zonaux ont été recensés, et sont comparés dans le Tableau 1.4 selon les phénomènes physiques représentés et leurs objectifs respectifs. Trois de ces modèles utilisent comme modèle radiatif l'un des modèles déjà cités dans le Tableau 1.3 : RayMan, CityComfort+ et Solene.

Tout d'abord, Advanced SkyHelios [Fröhlich 2018] a pour objectif l'évaluation du confort thermique extérieur. L'écoulement est déterminé à l'aide de lois empiriques, appliquées sur des zones définies autour des bâtiments : la zone de stagnation amont, la zone de recirculation aval et la rue canyon. En revanche, il s'agit d'un modèle purement aéraulique et la température d'air est considérée uniforme sur le domaine. Ce modèle n'effectue pas de bilan énergétique sur les surfaces, et estime de façon sim-

1.3. Modélisation du climat urbain

	Advanced SkyHelios	UMsim	UGBE	EnviBatE
Aéraulique	X	X	X (UMsim)	X (QUIC-URB)
Radiatif	X (RayMan)	X	X (CityComfort+)	X (Solene)
Bilan de surface		X	X	X
Evapotranspiration			X	
Confort thermique	X		X	
Emissions anthropiques			X	
Modèle de bâtiment				X
Objectif du modèle	Confort thermique extérieur	Évaluation de l'ICU	Impact de la végétation sur le confort thermique extérieur	Conso. énergétique des bâtiments

TABLE 1.4 – Comparaison des phénomènes physiques représentés dans quatre modèles zonaux et objectifs des modèles (Advanced SkyHelios : [Fröhlich 2018]; UMsim : [Yao *et al.* 2011]; UGBE : [Huang *et al.* 2022]; EnviBatE : [Gros 2013])

plifiée les températures de surface, à l'aide d'un modèle paramétrique faisant intervenir la température d'air, le flux radiatif, la vitesse du vent et le rapport de Bowen [Matzarakis *et al.* 2010]. La densité de flux conduit dans les parois est modélisée comme une fraction du flux radiatif.

Par ailleurs, UMsim a pour objectif l'évaluation de l'ICU à l'échelle de la ville, et modélise donc les phénomènes de façon simplifiée [Yao *et al.* 2011]. Il est basé sur l'exploitation d'un modèle d'élévation digitale, qui permet également de représenter les résultats. Un modèle thermo-aéraulique zonal est utilisé afin de déterminer les échanges de masse et d'énergie entre des zones interconnectées, en tenant compte de la flottabilité et en considérant un régime permanent. Les températures de surfaces sont déterminées à l'aide d'un bilan de chaleur aux surfaces selon un maillage surfacique zonal. La conduction thermique est modélisée par l'équation de la chaleur en une dimension. En revanche, aucun modèle d'évapotranspiration n'est inclus, et la végétation est prise en compte à travers un coefficient. Ce modèle a été appliqué pendant un jour sur une ville de 64 km² [Yao *et al.* 2015].

Ensuite, UGBE [Huang *et al.* 2022] associe le modèle zonal thermo-aéraulique d'UMsim à des modules supplémentaires. CityComfort+ est notamment utilisé pour la partie radiative. UGBE cible particulièrement l'impact des arbres dans une ville de forte densité sur le confort thermique extérieur. Cet objectif implique l'intégration de modèles d'évapotranspiration, de confort thermique et d'émission anthropique. UGBE a été va-

lidé sur une période de 3 jours, sur une zone de forte densité urbaine de 4 ha, qui a nécessité un temps de calcul de 14 h sur un ordinateur portable. L'intégration de modules supplémentaires par rapport à UMSim implique donc une forte différence de temps de calcul entre ces deux modèles.

Enfin, EnviBatE [Gros 2013] a pour objectif l'évaluation de la consommation énergétique des bâtiments à l'échelle du quartier. Un modèle de bâtiment est donc inclus, contrairement aux autres modèles zonaux. La modélisation de l'écoulement est basée sur le modèle QUIC-URB et applique des lois empiriques dans différentes zones d'écoulement qui dépendent de la géométrie urbaine et de la direction du vent. Un bilan de chaleur aux surfaces tient compte des flux radiatif, conduit et convectif sur chaque maille surfacique. Le flux latent est négligé et les surfaces végétalisées sont prises en compte en fixant leur température comme égale à la température d'air. La conduction dans les parois est modélisée par la méthode des facteurs de réponses, qui permet un coût de calcul plus faible que l'utilisation de l'équation de la chaleur. EnviBatE a été appliqué pendant un an sur un quartier de 13,6 hectares composé de 22 logements collectifs et 8 habitations individuelles.

1.3.3 Modèles paramétriques

Dans cette section, les modèles de dalle et de canopée urbaine, décrivant la géométrie urbaine de façon paramétrique, vont être détaillés. Dans ces modèles, la surface urbaine est décrite par un motif répété qu'il n'est nécessaire de simuler qu'une seule fois. On cherche à évaluer les flux moyens sur la zone d'étude, sans accéder à leur distribution spatiale. Deux méthodes sont distinguées :

- Les modèles dalle (*bulk/slab model*) : un bilan de surface est réalisé et les bâtiments sont considérés comme des éléments de rugosité.
- Les modèles de canopée urbaine, où un motif répété (rue canyon infinie ou bloc de bâtiment) avec les propriétés moyennes du quartier est considérée. Le motif urbain est alors soit représenté comme une zone homogène verticalement (modèle de canopée urbaine à une couche) ou au contraire plusieurs zones sont distinguées verticalement (modèle de canopée urbaine multicouches).

Une grande variété de modèles utilisant ce type d'approches paramétriques existe. Dans [Grimmond *et al.* 2011], 32 modèles de ce type sont confrontés.

Dans cette partie, 12 modèles sont comparés : TEB [Redon 2017], UWG [Bueno *et al.* 2013]; VCWG [Moradi 2021]; BEP-Tree [Krayenhoff *et al.* 2014]; PUCM : [Wang *et al.* 2013, Ryu *et al.* 2016]; ASLUM [Wang *et al.* 2021]; UT&C [Meili *et al.* 2020]; VUCM [Lee & Park 2008]; SM2-U [Dupont *et al.* 2006]; Duan 2019 [Duan *et al.* 2019]; SUEWS-RSL : [Ward *et al.* 2016, Tang *et al.* 2021]; UrbClim : [De Ridder *et al.* 2015].

Tout d'abord, ces modèles disposent d'un certain nombre de points communs. La méthode de modélisation des phénomènes radiatifs est la méthode des radiosités pour chacun d'eux (méthode détaillée au chapitre 3). Les réflexions sont donc considérées diffuses. La conduction aux parois est représentée par l'équation de Fourier. La vitesse est considérée uniforme ou bien suit un profil vertical, mais néglige la flottabilité dans les deux cas.

Cependant, certaines différences sont également observées. Elles sont illustrées sur

1.3. Modélisation du climat urbain

la Figure 1.14, selon un niveau de détail croissant, pour le détail vertical, le modèle de végétation, les conditions limites, le modèle hydrologique et la présence d'un modèle de bâtiment. Les différences sur les douze modèles sont ensuite comparées sur la Figure 1.15, selon les niveaux de détail décrits sur la Figure 1.14.

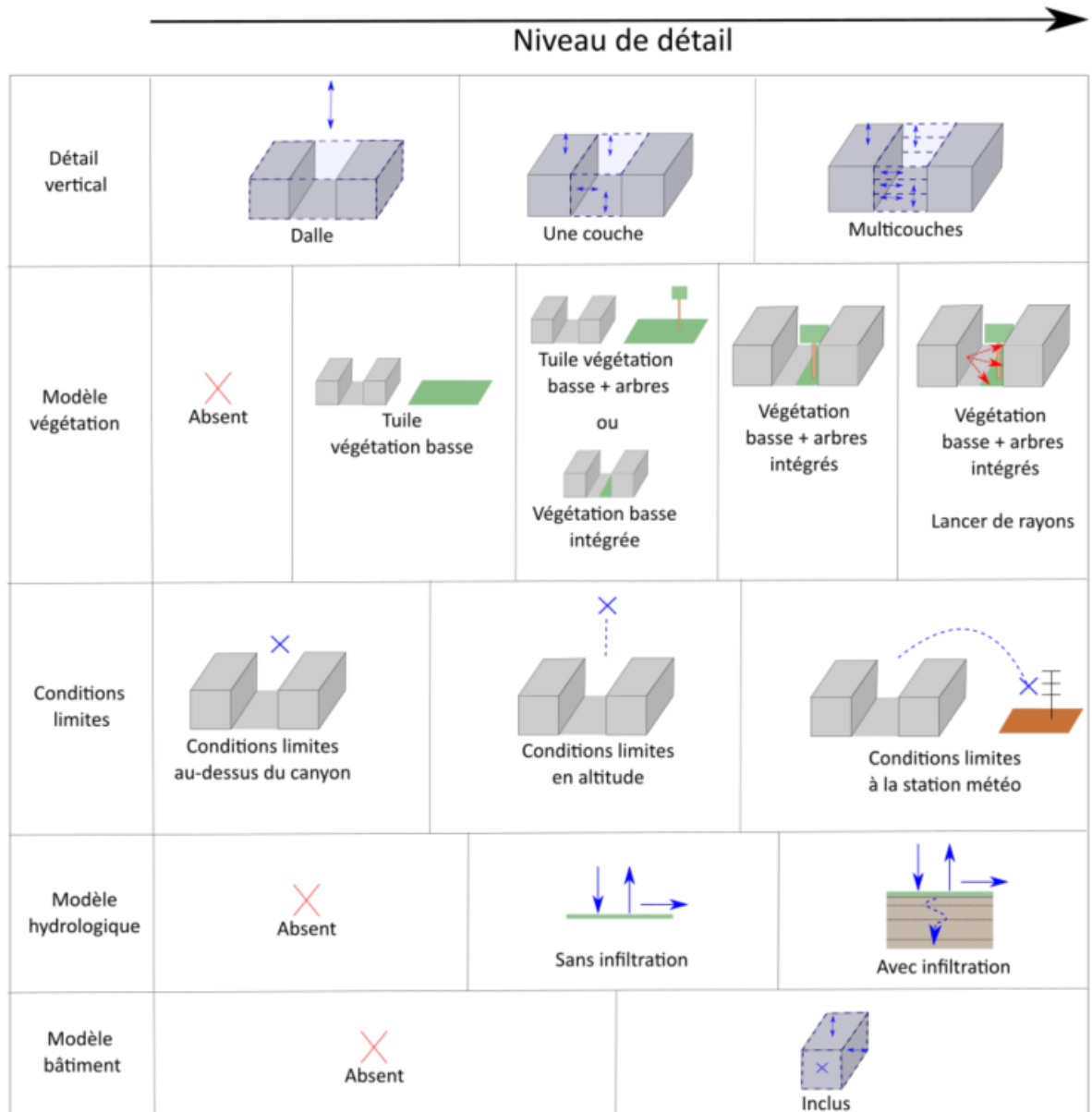


FIGURE 1.14 – Niveau de détail dans la paramétrisation urbaines

Lorsque la végétation est modélisée, quatre niveaux de précision sont recensés sur la Figure 1.14 :

- L'option la plus simple pour prendre en compte la végétation consiste à ne considérer que la végétation basse, et à la traiter séparément du reste du modèle, comme une tuile indépendante, et à exprimer ensuite le résultat final comme une combinaison de la rue sans végétation et de la végétation seule.
- Deuxièmement, certains modèles considèrent la végétation haute (arbres), mais

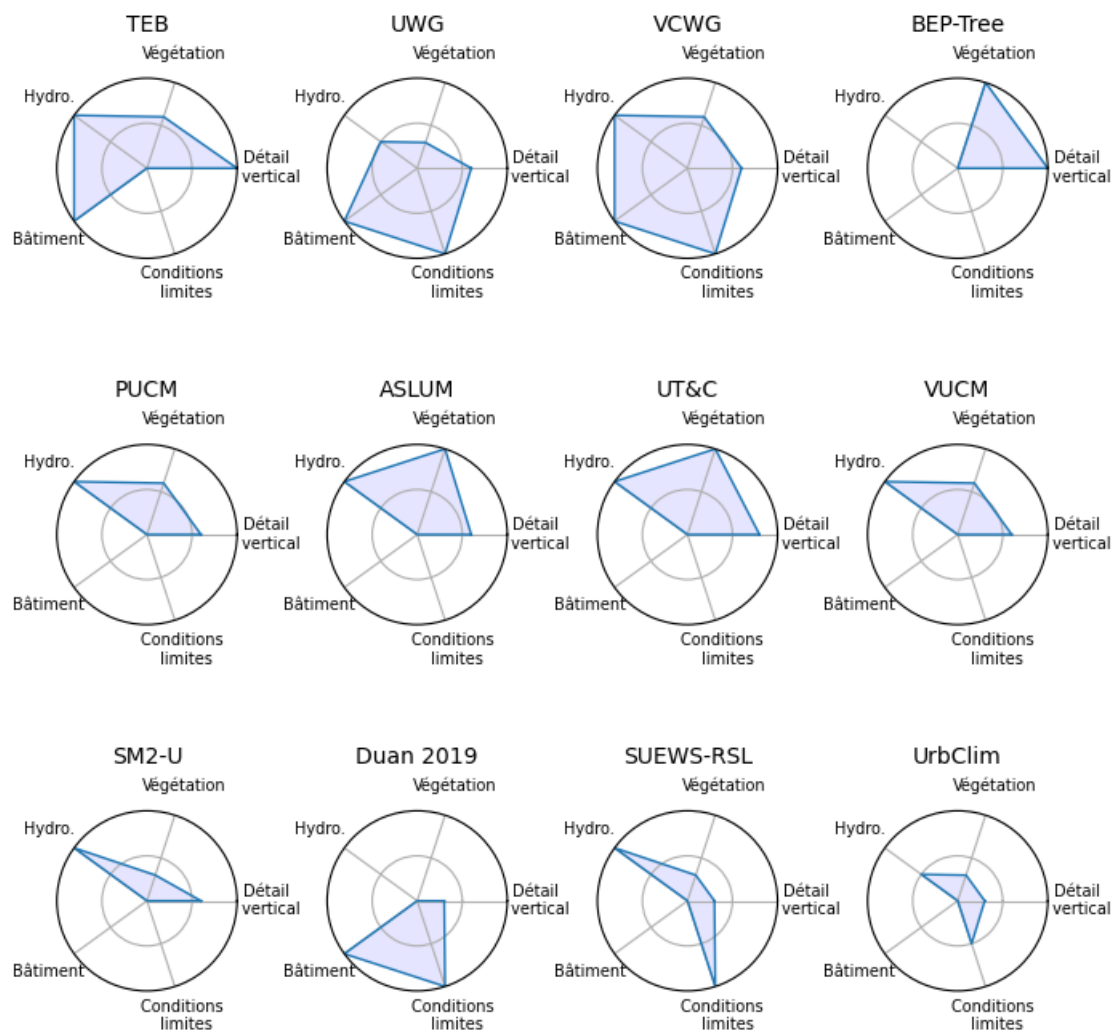


FIGURE 1.15 – Comparaison de 12 modèles de paramétrisation urbaine selon le niveau de détail de la Figure 1.14 (TEB [Redon 2017], UWG [Bueno *et al.* 2013]; VCWG [Moradi 2021]; BEP-Tree [Krayenhoff *et al.* 2014]; PUCM : [Wang *et al.* 2013, Ryu *et al.* 2016]; ASLUM [Wang *et al.* 2021]; UT&C [Meili *et al.* 2020]; VUCM [Lee & Park 2008]; SM2-U [Dupont *et al.* 2006]; Duan 2019 [Duan *et al.* 2019]; SUEWS-RSL : [Ward *et al.* 2016, Tang *et al.* 2021]; UrbClim : [De Ridder *et al.* 2015])

en conservant l'approche en tuile. D'autres intègrent à la rue la végétation basse uniquement. Le niveau de détail de ces deux méthodes est considéré équivalent sur la Figure 1.14. En effet, dans les deux cas les interactions complexes entre le feuillage des arbres et le reste de la rue sont négligées. Notons que les modèles de type dalle ne peuvent accéder qu'à ce premier niveau de détail pour la végétation.

- Ensuite, lorsque les arbres sont intégrés à la rue, l'utilisation de la méthode des radiosités nécessite la détermination de facteurs de formes incluant les arbres. Pour cela, [Redon 2017] et [Lee & Park 2008] utilisent des formules analytiques simplifiées.
- D'autres modèles [Krayenhoff *et al.* 2014, Wang *et al.* 2021, Meili *et al.* 2020] cal-

culent les facteurs de forme plus précisément à l'aide de lancé de rayons, qui peut être intégré au code ou bien utilisé en prétraitement. Notons que dans tous les cas, la méthode des radiosités est utilisée pour les multiréflexions, et le lancé de rayon n'est utilisé que pour le calcul des facteurs de forme. Le chapitre 3 reviendra sur cette méthode.

Par ailleurs, trois niveaux de détails sont décrits sur la Figure 1.14 concernant les conditions limites :

- Certains modèles nécessitent la spécification de conditions limites directement au dessus de la rue.
- UrbClim [De Ridder *et al.* 2015] modélise des profils verticaux de vitesse, température et humidité, et permet donc d'adopter des conditions limites en hauteur.
- D'autres modèles peuvent utiliser directement les conditions météorologiques à une station rurale comme données d'entrée (UWG [Bueno *et al.* 2013], VCWG [Moradi 2021], [Duan *et al.* 2019] et SUEWS-RSL [Tang *et al.* 2021]). Ils seront décrits plus en détail au chapitre 6.

Les différentes catégories de modèles hydrologiques et de modèles de bâtiment sont peu détaillées, n'étant pas le sujet central de cette thèse. Toutefois, pour le modèle hydrologique, la prise en compte ou non de l'infiltration est distinguée sur la Figure 1.14.

Il apparait nettement sur la Figure 1.15 que les mêmes phénomènes ne sont pas ciblés dans les différents modèles. Certains, comme ASLUM [Wang *et al.* 2021] et UT&C [Meili *et al.* 2020], ciblent la végétation et l'hydrologie, quand d'autres, comme UWG [Bueno *et al.* 2013] et [Duan *et al.* 2019] privilégient la modélisation des conditions limites. De même, UrbClim [De Ridder *et al.* 2015] est conçu pour une utilisation plus rapide, avec des modélisations simplifiées, alors que TEB [Masson 2000] vise au contraire une précision plus importante. Une complémentarité des différentes approches en fonction du but recherché est donc mise en évidence.

1.3.4 Couplages et combinaisons d'outils

Enfin, les catégorisations de modèles présentées dans cet état de l'art sont poreuses, et des couplages ou combinaisons d'outils sont fréquents.

Notamment, des couplages sont observés entre les trois échelles de modélisation présentées sur la Figure 1.13 (modèles à échelle méso, modèles de climat urbain et modèles de bâtiments). Par exemple, de nombreux couplages entre modèles de bâtiments et modèles de climat urbain ont été recensés dans [Lauzet *et al.* 2019]. De même, des couplages entre modèles méso-échelle et modèle de climat urbain sont courants, par exemple entre TEB et Meso-NH [Schoetter *et al.* 2020]. Enfin, un couplage entre les trois échelles de modèles est également possible [Ribeiro *et al.* 2021]. Par ailleurs, certains modèles de climat urbain incluent un modèle de bâtiment, comme Solene-microclimat [Bouyer 2009] ou EnviBatE [Gros 2013].

Enfin, certains outils sont axés sur la facilité d'utilisation en combinant des modèles existants afin de les rendre plus accessibles aux utilisateurs. Notamment, UMEP [Lindberg *et al.* 2018] facilite les modélisations avec SOLWEIG et avec un modèle dalle (SUEWS), ainsi que d'autres outils. De même, Grasshoper, décrit dans [Palme & Salvati 2021], facilite le couplage entre le modèle de bâtiment EnergyPlus et le modèle de canopée urbaine UWG.

1.3.5 Bilan : modèles pour évaluer l' ICU_{CCU}

L'état de l'art a mis en évidence la diversité des modèles de climat urbain. Dans le cadre de cette thèse, la grandeur ciblée est la température d'air, qui intervient dans l'îlot de chaleur urbain de la couche de canopée urbaine (ICU_{CCU}). Pour conclure cet état de l'art, les modèles de climat urbain calculant une température d'air sont donc représentés sur la Figure 1.16, en fonction de leur niveau de détail géométrique et de leur échelle temporelle.

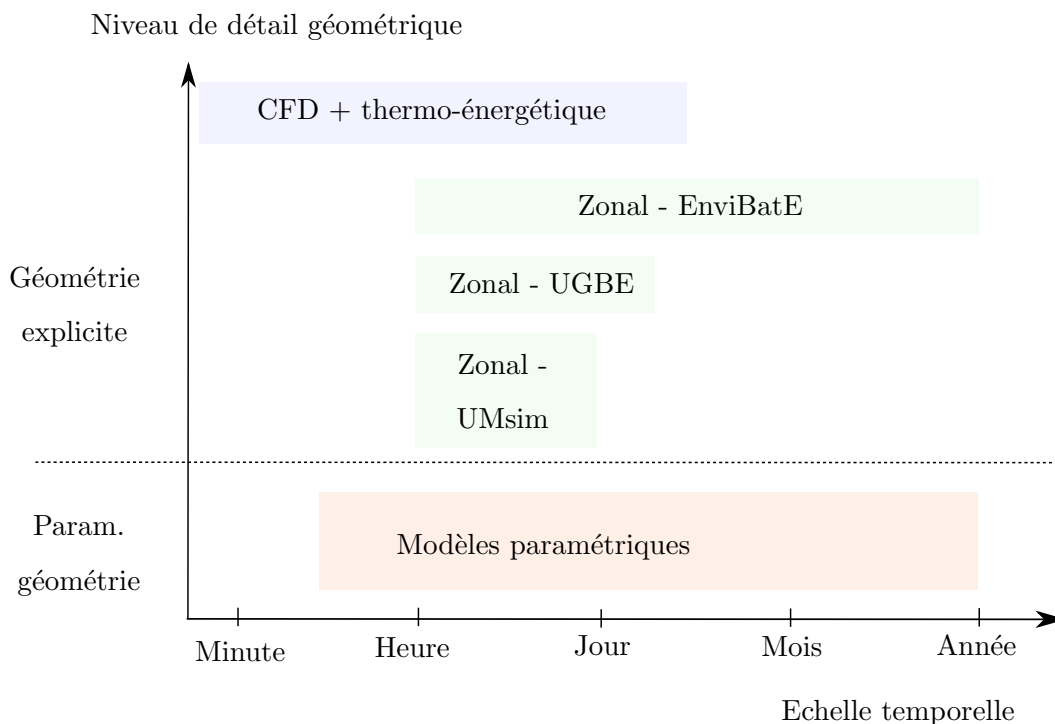


FIGURE 1.16 – Classification des modèles de climat urbain calculant une température d'air. Le bord inférieur des rectangles sur l'échelle temporelle représente le pas de temps, le bord supérieur la période pouvant être simulée.

De nombreux modèles permettent d'évaluer la température d'air sans représenter explicitement les bâtiments, en considérant un motif géométrique idéal répété sur la zone urbaine simulée. Il est possible, en discrétisant un domaine, d'utiliser ces modèles sur chaque maille pour obtenir une distribution de l' ICU_{CCU} à l'échelle du quartier ou de la ville. Cette approche est notamment utilisée avec SUEWS dans UMEP [Lindberg *et al.* 2018] et avec UWG dans [Bueno *et al.* 2013].

Par ailleurs, les simulations microclimatiques à l'aide de modèles détaillés couplant un modèle radiatif, un modèle aérodynamique CFD et un modèle de surface sont fréquentes, notamment avec Envi-met [Jänicke *et al.* 2021]. Le coût de calcul de cette approche la rend toutefois moins accessible pour simuler des périodes de temps supérieures à quelques jours ou des domaines larges.

Enfin, trois modèles (EnviBatE, UGBE et UMsim) utilisent une approche zonale, qui permet de représenter la géométrie explicitement tout en limitant le coût de calcul. Les approches zonales sont donc encore peu représentées parmi la diversité des modèles de climat urbain. Parmi ces trois modèles, EnviBatE a pour but l'évaluation de

la consommation énergétique des bâtiments, et ne dispose pas dans ce cadre de modèle de végétation. UMSim et UGBE partagent le même modèle thermo-aéraulique, mais UGBE inclus un modèle radiatif plus détaillé, ainsi qu'un modèle de confort thermique, de flux anthropique et de végétation. La différence de temps de calcul entre UMSim et UGBE illustre bien l'enjeu autour de l'équilibre entre une modélisation détaillée des phénomènes et un temps de calcul abordable. En effet, UMSim a été utilisé sur un domaine de 64 km² pendant 24h, quand UGBE s'est limité à 4 ha pendant 3 jours, soit une surface inférieure de trois ordres de grandeur.

1.4 Problématique, hypothèses et enjeux

1.4.1 Problème et enjeu

La réduction de l'ICU est l'un des axes de la lutte contre les surchauffes urbaines [Leroy *et al.* 2021]. Pour cela, différentes solutions vertes et grises de rafraîchissement peuvent être envisagées : la végétalisation, l'ajout de points d'eau, l'application de revêtements à albédo élevé ou la prescription de certaines géométries urbaines. Toutefois, l'évaluation des effets des différentes options est complexe. La modélisation permet de tester différentes configurations afin d'aiguiller les prises de décision.

L'état de l'art a fait ressortir la difficulté de combiner dans la modélisation du climat urbain à la fois une taille de domaine correspondant à l'échelle locale (ordre de grandeur du kilomètre carré) et une représentation réaliste de la géométrie urbaine sans utilisation de motif répété. Cela permettrait pourtant de repérer les rues les plus vulnérables sur une zone étendue, et donc potentiellement de cibler certaines actions.

Le but de cette thèse est donc de proposer un modèle visant spécifiquement l'évaluation de la température d'air dans les différentes rues d'un quartier, à l'échelle locale, et avec une représentation explicite ou semi-explicite des bâtiments. Pour cela, la principale difficulté est de trouver un compromis précision / temps de calcul avec deux contraintes contradictoires :

- Un multitude de phénomènes, couplés et multi-échelles sont impliqués, parmi lesquels : les échanges de chaleur par conduction, convection, rayonnement et changement de phase sur les éléments urbains et par advection diffusion dans l'air sur la zone urbaine ; les phénomènes hydrologiques et biologiques, les phénomènes climatiques méso-échelle, ainsi que les émissions de chaleur anthropiques par extension le comportement des habitants.
- Modéliser un quartier tout en gardant une géométrie explicite nécessite que le temps de calcul sur chaque maille soit très réduit, donc de faire un choix parmi les phénomènes à représenter et d'utiliser des modèles adaptés.

Compte tenu de l'objectif de cette thèse et de ces contraintes, une approche de modélisation du climat urbain par réseau de rues canyon est choisie. Cette approche a été proposée initialement pour la dispersion des polluants avec le modèle SIRANE [Soulhac *et al.* 2011], et a ensuite été reprise par le modèle MUNICH [Kim *et al.* 2018]. Elle a notamment permis avec le modèle SIRANE d'accéder aux concentrations en polluants dans la ville de Lyon [Soulhac *et al.* 2017].

L'avantage de l'approche proposée est de valoriser la modélisation aéraulique développée dans les modèles en réseau de rue, que ce soit SIRANE ou MUNICH, en l'adaptant et la complétant pour pouvoir l'appliquer pour un but différent. Par ailleurs,

des méthodes développées pour la dispersion des polluants, telle la méthode des panaches Gaussiens, seront donc mises à l'épreuve pour la dispersion de chaleur, ce qui n'a jamais été testé dans la littérature. La question de recherche posée pour de cette thèse est donc la suivante.

Dans quelle mesure une approche de modélisation par un réseau de rues incluant une représentation semi-explicite des bâtiments permet-elle d'évaluer la distribution spatiale de l'ilot de chaleur dans les différentes rues d'un quartier ?

Pour poser les bases du travail effectué, le paragraphe suivant résume les grands principes de l'approche en réseau de rues appliquée à la dispersion de polluants et de son adaptation pour l'ilot de chaleur urbain. Enfin, la section 1.5 présentera la structure générale du modèle développé afin de pouvoir situer chacun des sous-modèles qui seront présentés plus en détails dans les chapitres suivants.

1.4.2 Approche en réseau de rues

Principe

L'approche en réseau de rues consiste à utiliser un maillage zonal pour lequel chaque rue canyon correspond à une maille (Figure 1.17a). Les rues sont ensuite reliées en réseau par les intersections, sur lesquelles un bilan de matière est réalisé (Figure 1.17b). Dans cette approche, telle que développée dans le modèle SIRANE, l'advection et la diffusion dans la CLU (au dessus des rues) sont modélisées avec des panaches Gaussiens (Figure 1.17c). Chaque rue et intersection représente une source de polluant, qui induit un panache dans la CLU. Le champ de concentration dans la CLU est calculé en sommant les contributions de tous les panaches. Finalement, la concentration en polluants dans chaque rue du domaine est déterminée (Figure 1.17d).

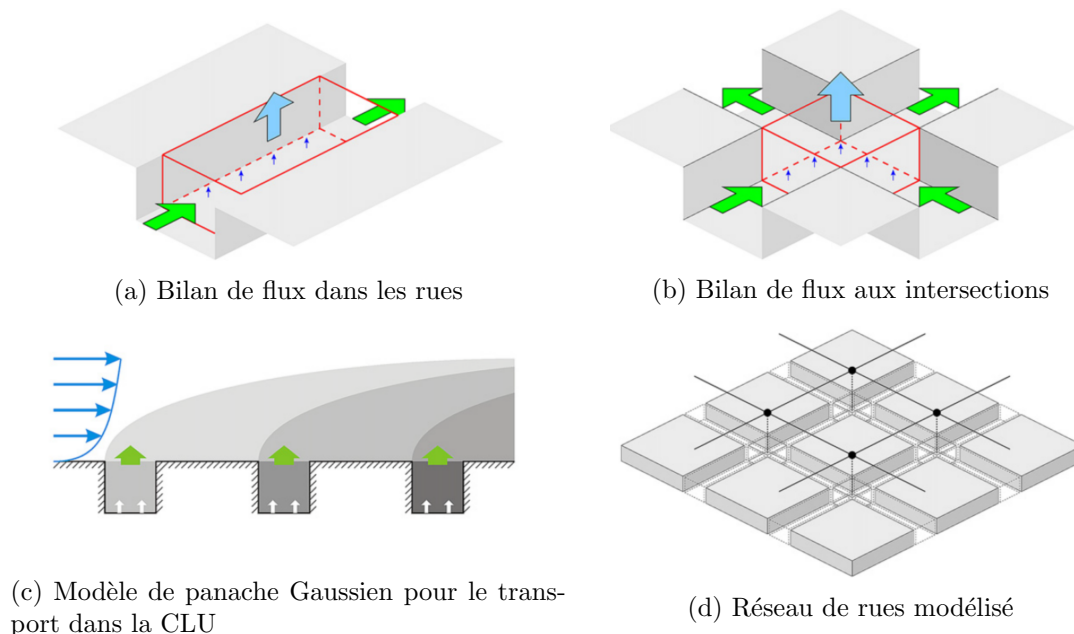


FIGURE 1.17 – Structure du modèle SIRANE [Soulhac *et al.* 2011]

Les hypothèses principales de cette approche, telle que développée dans le modèle

SIRANE, sont les suivantes :

- La concentration en polluants est uniforme dans le volume d'air d'une rue.
- Les rues sont des canyons idéaux, avec une hauteur et largeur uniformes le long du segment.
- Le régime permanent est considéré pour chaque pas de temps.
- La flottabilité est négligée.
- Aux intersections, les lignes de courant ne se croisent pas.
- La turbulence à l'interface rue / CLU provient majoritairement de l'écoulement extérieur, et celle générée à l'interface est négligée.

Adaptation de l'approche pour la modélisation de l'îlot de chaleur urbain

Dans cette thèse, l'approche en réseau de rues va être adaptée pour le calcul de l'ICU.

Deux éléments principaux doivent être modifiés pour évaluer l'ICU au lieu de polluants :

- Les sources de chaleur doivent être modélisées et venir remplacer les sources de polluants. Cela signifie que les phénomènes au sol et aux parois des bâtiments, en tenant compte de l'inertie, ainsi que les interactions avec la végétation doivent être modélisés.
- Contrairement aux pics de pollution, l'ICU a lieu principalement la nuit. L'évaluation des phénomènes météorologiques nocturnes (stabilité atmosphérique, hauteur de la couche limite urbaine) est donc particulièrement importante pour l'évaluation de l'ICU.

Ces adaptations d'un modèle en réseau de rues ont été le cœur du travail effectué dans cette thèse.

1.5 MATHIS : un nouveau modèle de climat urbain

1.5.1 Principe du modèle et apport de la thèse

Dans cette thèse, un nouveau modèle de climat urbain est présenté, nommé Microscale Atmospheric Temperature and Heat Island Simulation (MATHIS).

La structure du modèle est représentée sur la Figure 1.18 . Il se compose de trois sous-modèles, qui vont être détaillés dans les paragraphes suivants.

Le prétraitement météorologique

Le prétraitement météorologique fait le lien entre les mesures de la station météorologique et les grandeurs météorologiques sur le quartier d'intérêt. Ce sous-modèle est présent dans SIRANE et a été modifié et complété lors de cette thèse. Il est basé sur l'égalité de la vitesse géostrophique entre la station météorologique et la zone urbaine d'intérêt.

La couche limite urbaine

L'advection/diffusion dans la couche limite urbaine est représentée par le modèle de panaches Gaussiens. Ce sous-modèle est directement issu de SIRANE.

La couche de canopée urbaine

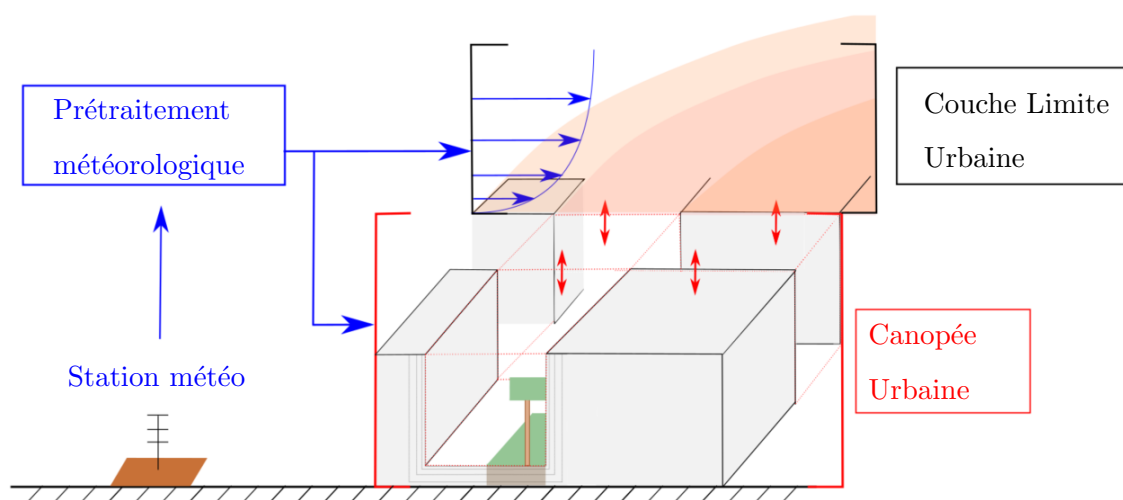


FIGURE 1.18 – Structure simplifiée de MATHIS

La couche de canopée urbaine est constituée d'un réseau de rues canyon connectées aux intersections. L'advection dans le réseau de rues et l'échange avec la couche limite urbaine proviennent des modèles de dispersion de polluant SIRANE et MUNICH.

La modélisation des sources de chaleur dans chaque rue constitue un apport de cette thèse. Pour cela, un modèle similaire à un modèle de canopée urbaine à une couche a été développé et représente les flux conduits, radiatifs, convectifs et latents dans la rue. Il inclut deux types de végétation : un sol végétalisé et des arbres.

Le code est développé en langage python et sa structure est présentée en Annexe A.

1.5.2 Plan du manuscrit

Pour décrire les sous-modèles de MATHIS, leurs évaluations, leurs couplages ainsi que les possibilités offertes en termes de résultats et de temps de calcul, la suite du manuscrit est organisée de la façon suivante.

Les trois premiers chapitres constituent une première partie et sont consacrés à un modèle de rue isolée, sous l'aspect aéraulique (chapitre 2), radiatif (chapitre 3) et thermo-énergétique (chapitre 4).

Ensuite, les trois chapitres suivants appartiennent à une deuxième partie consacrée à la modélisation d'un quartier. L'assemblage des rues pour former le modèle de quartier, basé sur SIRANE, est décrit dans le chapitre 5. Enfin, le prétraitement météorologique est présenté dans le chapitre 6. Finalement, le septième chapitre est consacré à l'application de MATHIS sur un quartier de Lyon.

La Figure 1.19 permet d'avoir une vision d'ensemble des différents chapitres de la thèse, tout en décrivant pour chacun ses données d'entrée et ses résultats. Il y sera fait référence tout au long de la thèse avec une focalisation sur chacun de ses blocs, elle sera donc décrite plus en détail au fur et à mesure du manuscrit.

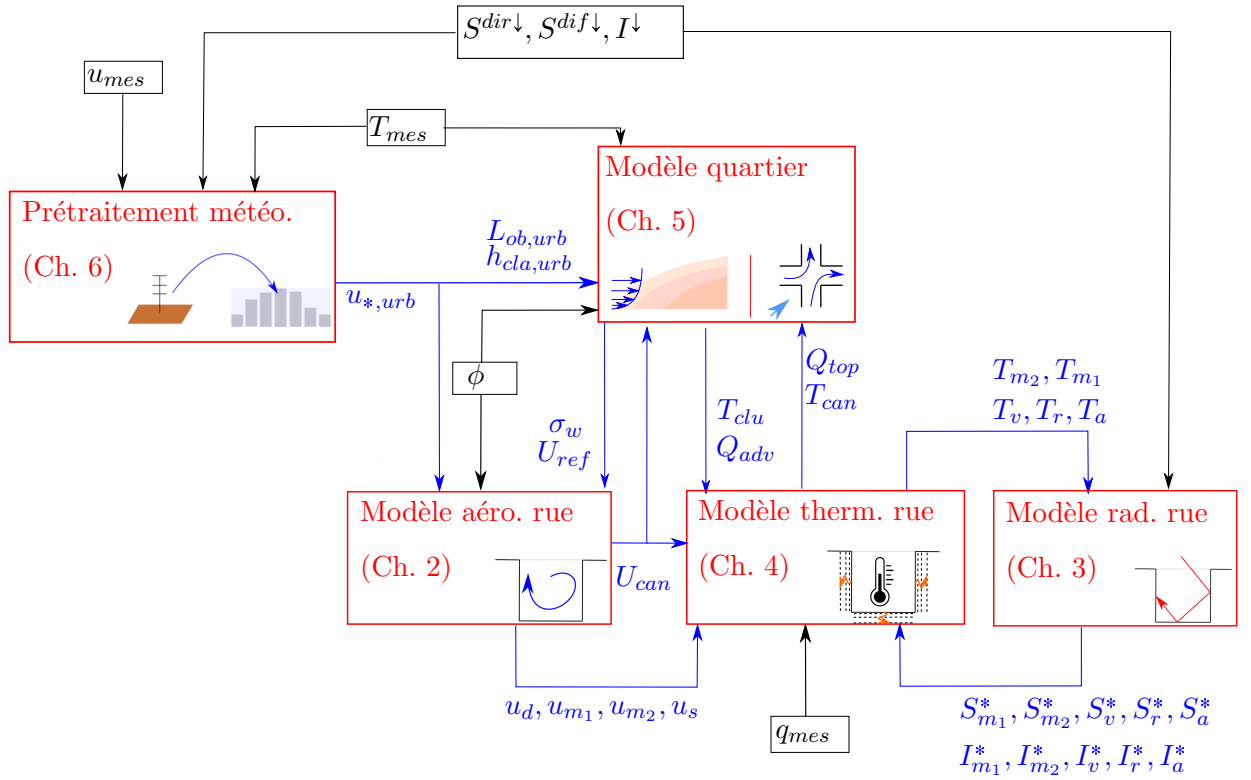
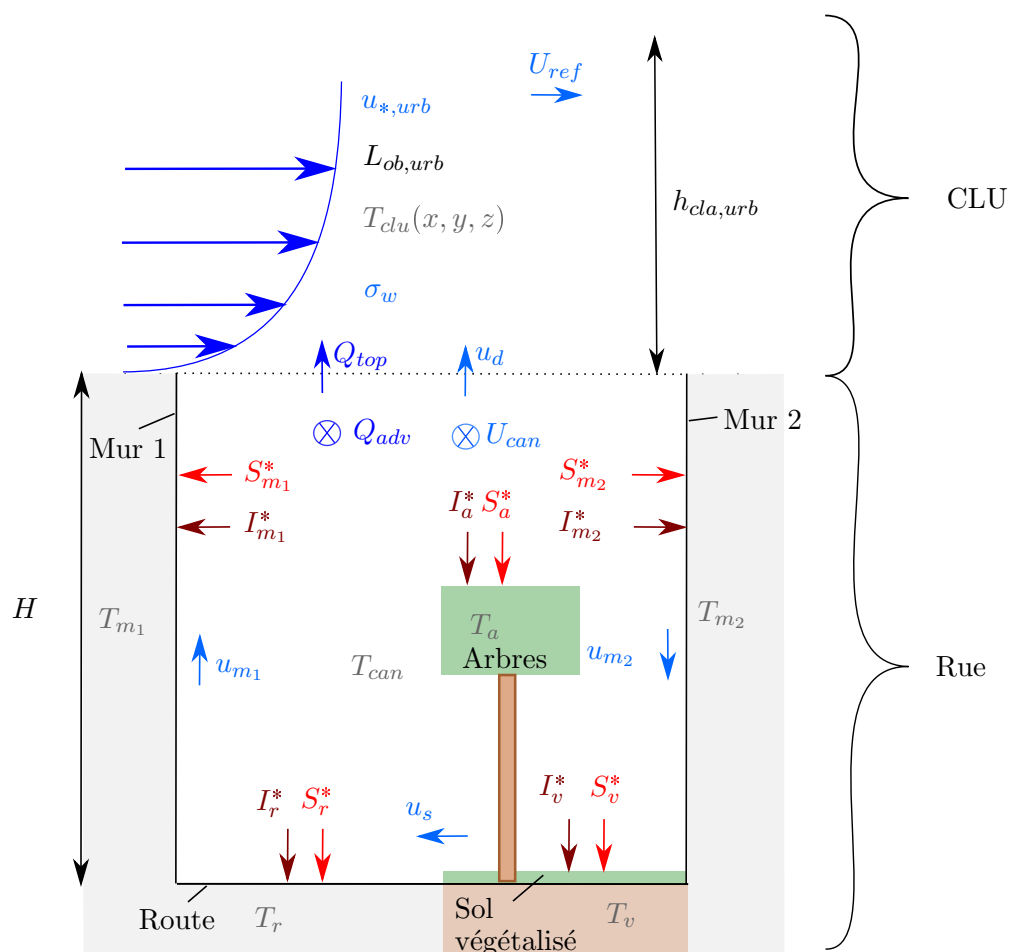


FIGURE 1.19 – Liens entre les différents modules modèles de MATHIS. Les données météorologiques sont représentées en noir (T_{mes} [K] : température d'air, u_{mes} [m/s] : vitesse du vent, q_{mes} [kg/kg] : humidité absolue, ϕ [rad] : direction du vent, $S^{dir\downarrow}$, $S^{dif\downarrow}$, I^\downarrow [W/m^2] : densités de flux solaire direct, solaire diffus et infrarouge sur une surface horizontale). Les grandeurs calculées sont représentées en bleu et détaillées sur la Figure 1.20



CLU
U_{ref} [m/s] : Vitesse à 10 H
$u_{*,urb}$ [m/s] : Vitesse de friction
σ_w [m/s] : Ecart-type de la vitesse verticale au sommet de la rue
$L_{ob,urb}$ [m] : Longueur d'Obukhov
$h_{clu,urb}$ [m] : Hauteur de la CLU
T_{clu} [K] : Champ de température
Rue
Indices : r : route; v : sol végétalisé; m_1, m_2 : murs; a : arbres
S_i^* [W/m ²] : Densité de flux solaire nette
I_i^* [W/m ²] : Densité de flux infrarouge nette
T_i [K] : Température de surface
T_{can} [K] : Température d'air
u_i [m/s] : Vitesses proche paroi
U_{can} [m/s] : Vitesse moyenne longitudinale
u_d [m/s] : Vitesse d'échange rue/CLU
Q_{top} [W/m ²] : Densité de flux de chaleur vertical
Q_{adv} [W/m ²] : Densité de flux de chaleur advecté longitudinalement

FIGURE 1.20 – Définition des symboles utilisés sur la Figure 1.19

Première partie

Modélisation d'une rue canyon
isolée

Chapitre 2

Modélisation aéraulique

L'aéraulique dans une rue infinie est modélisée dans ce chapitre de façon simplifiée en fonction de l'écoulement externe et des propriétés géométriques de la rue. Dans un premier temps, deux modélisations paramétriques issues de la littérature sont comparées pour la vitesse moyenne longitudinale et la vitesse d'échange verticale au sommet de la rue. Ensuite, des simulations CFD-LES sont utilisées afin de développer une modélisation paramétrique pour les vitesses proche paroi.

Sommaire

2.1	Objectif	34
2.2	Vitesse moyenne longitudinale	36
2.2.1	Vitesse moyenne longitudinale dans une rue sans arbre	36
2.2.2	Modélisation de l'effet des arbres	40
2.2.3	Choix de la modélisation pour MATHIS	42
2.3	Échange entre une rue et la CLU	42
2.3.1	Vitesse d'échange au sommet d'une rue sans arbre	43
2.3.2	Modélisation de l'effet des arbres	44
2.3.3	Choix de la modélisation pour MATHIS	46
2.4	Modélisation paramétrique des vitesses proche paroi à l'aide de simulations CFD-LES	46
2.4.1	Problématique	46
2.4.2	Approche de modélisation CFD	47
2.4.3	Validation de la configuration avec des mesures en soufflerie	49
2.4.4	Modélisation paramétrique des vitesses proche paroi	60
2.5	Conclusion	64

2.1 Objectif

Les écoulements d'air en milieu urbain se révèlent souvent d'une grande complexité, dû notamment à l'interdépendance de différents phénomènes physiques (turbulence, convection,...) ayant lieu à différentes échelles spatiales et temporelles ainsi qu'à la variété des morphologies urbaines [Merlier 2016].

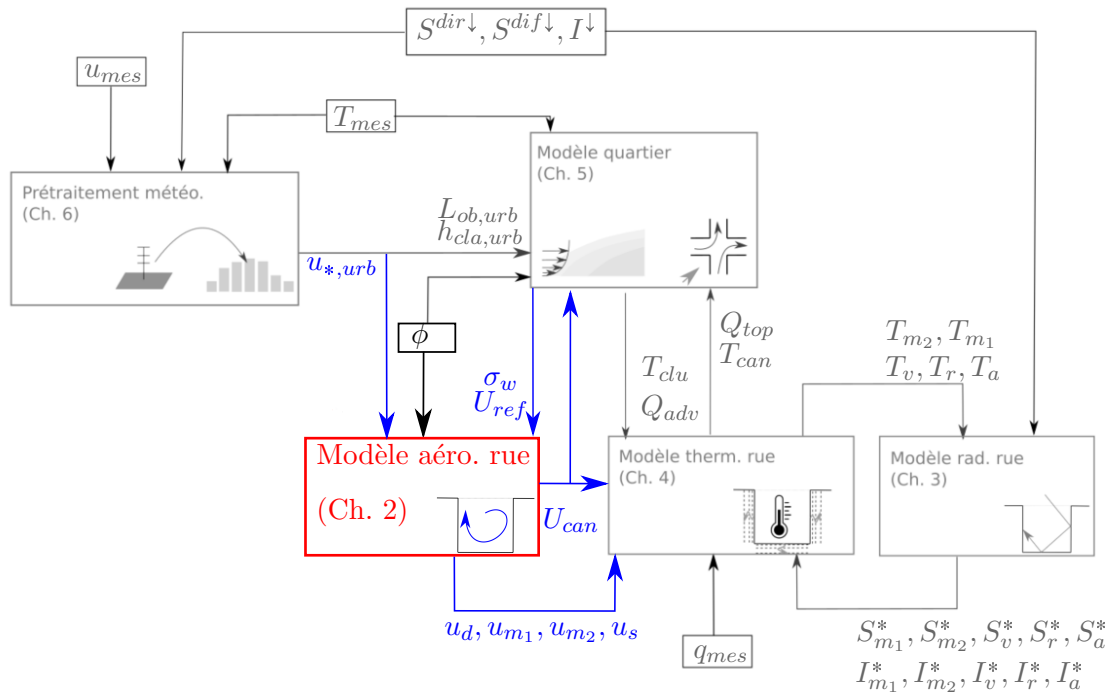


FIGURE 2.1 – Données d'entrées et résultats du modèle aéroulque (u_d [m/s] : vitesse d'échange verticale; U_{can} [m/s] : vitesse moyenne longitudinale; u_{m_1}, u_{m_2}, u_s [m/s] : vitesses proche paroi, U_{ref} [m/s] : vitesse à 10 H, σ_w [m/s] : écart-type de la vitesse verticale au sommet de la rue; $u_{*,urb}$ [m/s] : vitesse de friction; ϕ [rad] : orientation du vent par rapport au nord)

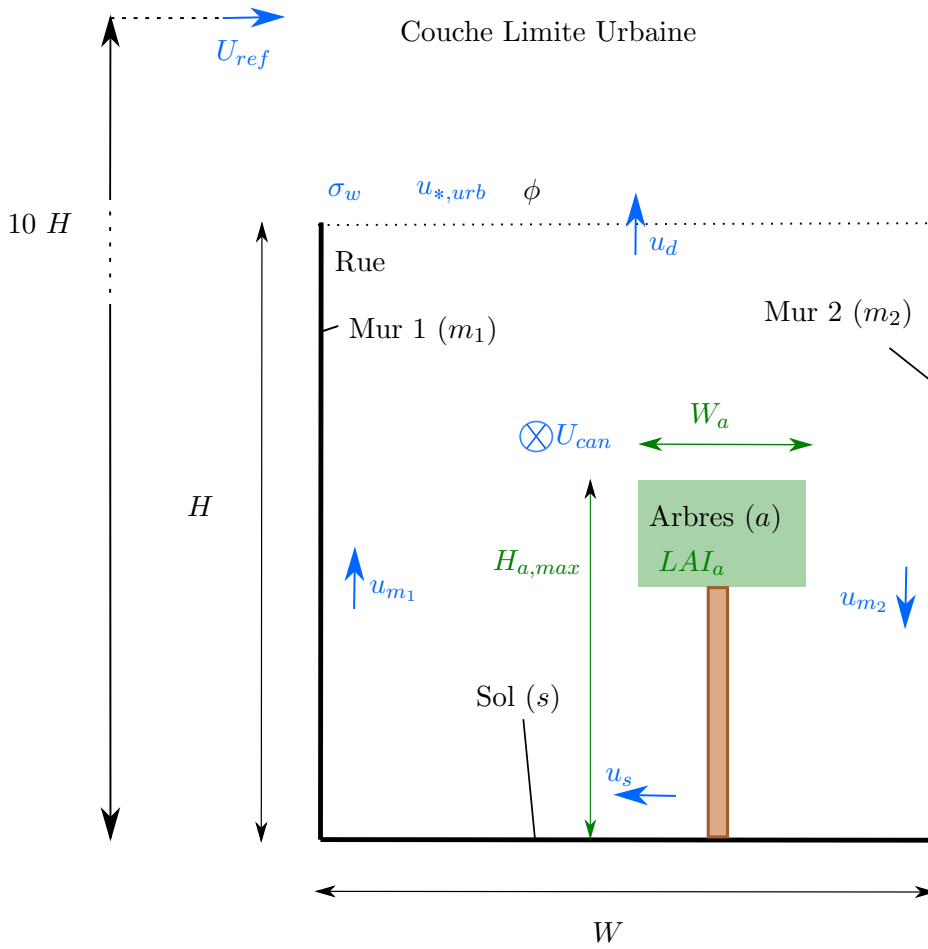
Dans ce chapitre, l'aéroulque est étudiée sur une configuration simplifiée : la rue canyon infinie. Un régime permanent est considéré et la flottabilité est négligée. L'objectif est de modéliser cinq grandeurs (voir Figures 2.1 et 2.2) :

- u_d [m/s] : La vitesse d'échange verticale entre la rue et la Couche Limite Urbaine (CLU), caractérisant l'échange à travers la couche de mélange
- U_{can} [m/s] : La vitesse moyenne longitudinale, soit la vitesse dans l'axe de la rue, moyennée dans le temps et dans l'espace sur tout le volume d'air de la rue
- u_{m_1}, u_{m_2}, u_s [m/s] : Les vitesses proche paroi, soient les vitesses moyennes parallèles aux parois, qui serviront à la caractérisation de l'échange convectif.

Le but est d'exprimer ces grandeurs d'intérêt en fonction de paramètres décrivant la CLU, soient (voir Figures 2.1 et 2.2) :

- $u_{*,urb}$ [m/s] : La vitesse de friction, qui quantifie la turbulence générée mécaniquement par la friction au niveau du sol [Garratt 1999]
- σ_w [m/s] : L'écart-type de la vitesse verticale au sommet de la rue (écart-type des vitesses instantanées)

— U_{ref} [m/s] : La vitesse moyenne horizontale à $10 H$, H étant la hauteur de la rue.



$$f_a = \frac{W_a}{W}$$

$$LAI_{can} = f_a LAI_a$$

FIGURE 2.2 – Représentation des données d’entrée, des caractéristiques géométriques et des résultats attendus pour le modèle aéraulique de rue (u_d [m/s] : vitesse d’échange verticale ; U_{can} [m/s] : vitesse moyenne longitudinale ; u_{m1} , u_{m2} , u_s [m/s] : vitesses proche paroi, U_{ref} [m/s] : vitesse à $10 H$, σ_w [m/s] : écart-type de la vitesse verticale au sommet de la rue ; $u_{*,urb}$ [m/s] : vitesse de friction ; ϕ [rad] : orientation du vent par rapport au nord)

Les paramètres géométriques de la rue (hauteur, largeur) et la rugosité des parois interviennent également dans les modélisations présentées dans ce chapitre. Enfin, pour les modélisations de la vitesse moyenne longitudinale (U_{can}) et de la vitesse d’échange entre rue et CLU (u_d), une représentation des arbres est intégrée. Dans ce cas, ces derniers sont décrits par :

— LAI_{can} [-] : Le *Leaf Area Index* des arbres ramené à la surface de la rue, le *Leaf Area Index* correspondant à la surface cumulée des feuilles (d’un seul côté) par mètre carré au sol. Le LAI sur la surface arborée uniquement (LAI_a) est lié au LAI_{can} par la fraction arborée (f_a), définie sur la Figure 2.2, par $LAI_{can} =$

- $f_a LAI_a$
- $H_{a,max}$ [m] : La hauteur maximale du houppier.

Tout d’abord, la modélisation de la vitesse moyenne longitudinale (U_{can}) et de la vitesse d’échange entre la rue et la CLU (u_d) sont abordées dans les deux premières parties. Pour cela, les modélisations utilisées par les modèles MUNICH [Kim *et al.* 2018] et SIRANE [Soulhac *et al.* 2011] sont décrites et comparées. Ensuite, une modélisation des vitesses proche paroi est développée à l’aide de simulations CFD-LES avec le logiciel ProLB, utilisant la méthode de Boltzmann sur réseau.

2.2 Vitesse moyenne longitudinale

Dans cette partie, la vitesse moyenne longitudinale dans une rue canyon infinie est étudiée. Elle correspond à la composante de la vitesse dans l’axe de la rue, moyennée dans le temps et dans l’espace sur tout le volume de la rue. Cette grandeur ne permet pas une description détaillée de l’écoulement dans la rue ; cependant, si on s’intéresse à l’advection horizontale dans la rue, il s’agit de la grandeur la plus pertinente. Ainsi, dans l’optique de décrire l’advection dans un réseau de rues connectées (voir chapitre 5), la modélisation de cette vitesse, notée U_{can} , est importante.

Dans la littérature, deux modèles de dispersion de polluants adoptent une approche en réseau de rue et modélisent cette grandeur : SIRANE [Soulhac *et al.* 2011] et MUNICH [Kim *et al.* 2018]. Ces modèles sont donc décrits et comparés dans cette partie dans le cas d’une rue sans arbres. Seul le modèle MUNICH propose une intégration des arbres, qui est détaillée dans une deuxième partie.

2.2.1 Vitesse moyenne longitudinale dans une rue sans arbre

Dans un premier temps, le calcul de la vitesse moyenne au sommet de la rue (U_H [m/s]) est abordé. Ensuite, les équations des modèles SIRANE et MUNICH, normalisées par U_H sont décrites. Finalement, l’influence de l’orientation de l’écoulement externe et du rapport aspect des rues est comparés pour les deux modèles.

Vitesse au sommet de la rue U_H

Les modèles SIRANE et MUNICH décrivent la vitesse moyenne longitudinale dans la rue (U_{can}) comme une fraction de la vitesse moyenne au sommet de la rue (U_H). Avant de pouvoir comparer ces deux modèles, il est donc pertinent de s’intéresser au calcul de U_H .

Un modèle analytique a été développé par [Soulhac *et al.* 2008] sur une rue canyon infinie avec deux murs de même taille. Un régime permanent est considéré et la flottabilité est négligée. La rue est divisée en trois régions :

- Deux régions sous l’influence des murs
- Une région sous l’influence du sol.

Les équations de Navier-Stokes sont appliquées dans la région sous l’influence des murs, et il est supposé que l’écoulement dans cette zone ne dépend que de l’écoulement extérieur et de la distance aux murs. Un développement analytique permet ensuite d’exprimer la vitesse au sommet de la rue U_H :

$$U_H = u_* \sqrt{\frac{\pi}{\sqrt{2}\kappa^2 C} \left[Y_0(C) - \frac{J_0(C)Y_1(C)}{J_1(C)} \right]} \quad (2.1)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \kappa [-] : \text{La constante de Von Karman} \\ J_0, J_1, Y_1 : \text{Les fonctions de Bessel} \\ u_* [m/s] : \text{La vitesse de friction dans l'écoulement externe.} \end{cases}$$

La constante sans dimension C est définie comme la solution de :

$$\frac{z_{0,parois}}{\delta_i} = \frac{2}{C} \exp \left[\frac{\pi}{2} \frac{Y_1(C)}{J_1(C)} - \gamma \right] \quad (2.2)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \gamma [-] : \text{La constante d'Euler} \\ J_1, Y_1 : \text{Les fonctions de Bessel} \\ z_{0,parois} [m] : \text{La longueur de rugosité aéroudynamique des parois.} \end{cases}$$

L'épaisseur de la couche limite aéroudynamique δ_i intervient dans cette équation, et est donnée par :

$$\delta_i = \min(H; W/2) \quad (2.3)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \delta_i [m] : \text{L'épaisseur de la couche limite aéroudynamique} \\ W [m] : \text{La largeur de la rue} \\ H [m] : \text{La hauteur de la rue.} \end{cases}$$

L'équation 2.3 distingue deux régimes d'écoulement différents : l'un pour les rues étroites ($H/W > 0,5$) et l'autre pour les rues larges ($H/W < 0,5$).

Ce modèle pour U_H est utilisé dans SIRANE [Soulhac *et al.* 2011] pour lequel il a été développé, et il est également implémenté dans MUNICH [Maison *et al.* 2022a]. C'est donc cette option qui a été retenue pour MATHIS. A partir de cette grandeur, la vitesse moyenne longitudinale U_{can} peut être calculée. Pour cela, deux options vont être détaillées dans les paragraphes suivants.

Modèle de SIRANE pour U_{can}

Dans le modèle SIRANE, la vitesse moyenne longitudinale dans les rues est calculée selon le modèle analytique de [Soulhac *et al.* 2008] :

$$U_{can} = U_H \cos(\theta_{can} - \phi) \frac{\delta_i^2}{HW} \left[\frac{2\sqrt{2}}{C} (1 - B_2) \left(1 - \frac{C^2}{3} + \frac{C^4}{45} \right) + B_2 \frac{2B_1 - 3}{B_1} + \left(\frac{W}{\delta_i} - 2 \right) \frac{B_1 - 1}{B_1} \right] \quad (2.4)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \phi [rad] : \text{L'orientation du vent par rapport au nord} \\ \theta_{can} [rad] : \text{L'orientation de la rue par rapport au nord} \end{cases}$$

Dans l'équation 2.4, les paramètres δ_i , H , W et C sont ceux définis au paragraphe précédent (équations 2.2 et 2.3). B_1 et B_2 sont des constantes sans dimension, déterminées par :

$$\begin{aligned} B_1 &= \ln\left(\frac{\delta_i}{z_{0,parois}}\right) \\ B_2 &= \exp\left[\frac{C}{\sqrt{2}}\left(1 - \frac{H}{\delta_i}\right)\right] \end{aligned} \quad (2.5)$$

$z_{0,parois}$ [m] étant la longueur de rugosité aérodynamique des parois de la rue.

Pour arriver à l'équation 2.4, les hypothèses et le raisonnement décrits au paragraphe précédent sont utilisés à nouveau. En addition, un profil logarithmique correspondant à une couche limite rugueuse classique est appliqué dans la région sous l'influence du sol. La continuité est ensuite vérifiée entre les régions proches des murs et la région proche de sol. Le modèle théorique a ensuite été validé à l'aide de simulations CFD-RANS.

Modèle de MUNICH pour U_{can}

Dans MUNICH, un profil vertical de vitesse dans les rues est modélisé [Maison *et al.* 2022a]. La forme de ce profil est issue d'un modèle analytique pour les canopées végétales clairsemées développé par [Wang 2012]. Une canopée homogène horizontalement est considérée, et traitée comme un milieu poreux perméable à l'air soumis à une couche limite atmosphérique neutre (flottabilité négligée). En intégrant ce profil sur la hauteur de la rue, on obtient la vitesse moyenne longitudinale :

$$U_{can} = \frac{U_H \cos(\theta_{can} - \phi)}{H} \int_0^H [C_1 I_0(g(z)) + C_2 K_0(g(z))] dz \quad (2.6)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} C_1 = \frac{1}{I_0(g(H)) - I_0(g(z_{0,s}))} \frac{K_0(g(H))}{K_0(g(z_{0,s}))} [-] : \text{Une constante d'intégration} \\ C_2 = -\frac{C_1 I_0(g(z_{0,s}))}{K_0(g(z_{0,s}))} [-] : \text{Une constante d'intégration} \\ I_0, K_0 : \text{Les fonctions de Bessel modifiées du premier et deuxième type} \\ g(z) = 2\sqrt{\alpha \frac{z}{H}} \\ z_{0,s} [m] : \text{Longueur de rugosité aérodynamique du sol.} \end{cases}$$

Le paramètre α apparaissant dans la fonction $g(z)$ est un coefficient d'atténuation sans dimension et indépendant de z . Cette formulation a été adaptée par [Maison *et al.* 2022a] pour les canopées urbaines à l'aide de simulations CFD-RANS avec Code-Saturne sur une rue canyon 2D, à travers l'étude de trois rues canyon infinies, de rapport d'aspect 0,3, 0,5 et 1. Le paramètre α est modélisé par :

$$\alpha = \frac{C_B H}{W \kappa s_H} \quad (2.7)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_B = 0,31[1 - \exp(-1.6H/W)]f_\phi [-] : \text{Un coefficient qui dépend du} \\ \text{coefficient de traînée et de la densité de la canopée} \\ s_H = \frac{l_{cb}}{l_{cb} + \kappa H} [-] : \text{Un coefficient représentant l'effet des éléments de la} \\ \text{canopée sur la longueur de mélange} \\ l_{cb} = 0,5W [m] : \text{La longueur caractéristique des éléments de la canopée} \end{array} \right.$$

La fonction f_ϕ modélise l'impact de l'orientation de l'écoulement externe par rapport à la rue :

$$f_\phi = \begin{cases} |\cos(2(\theta_{can} - \phi))|^3 & \text{si } (\theta_{can} - \phi) \in [0, 45^\circ] \cup [135, 225^\circ] \cup [315, 360^\circ] \\ 0 & \text{si } (\theta_{can} - \phi) \in]45, 135^\circ[\cup]225, 315^\circ[\end{cases} \quad (2.8)$$

Comparaison des deux modèles pour U_{can}

Les deux modèles décrits dans les paragraphes précédents sont comparés dans cette partie. Pour cela, il est supposé que la longueur de rugosité aérodynamique des trois parois intervenant dans SIRANE $z_{0,parois}$ et la longueur de rugosité aérodynamique du sol intervenant dans MUNICH $z_{0,s}$ sont égales. On note $z_0 = z_{0,parois} = z_{0,s}$.

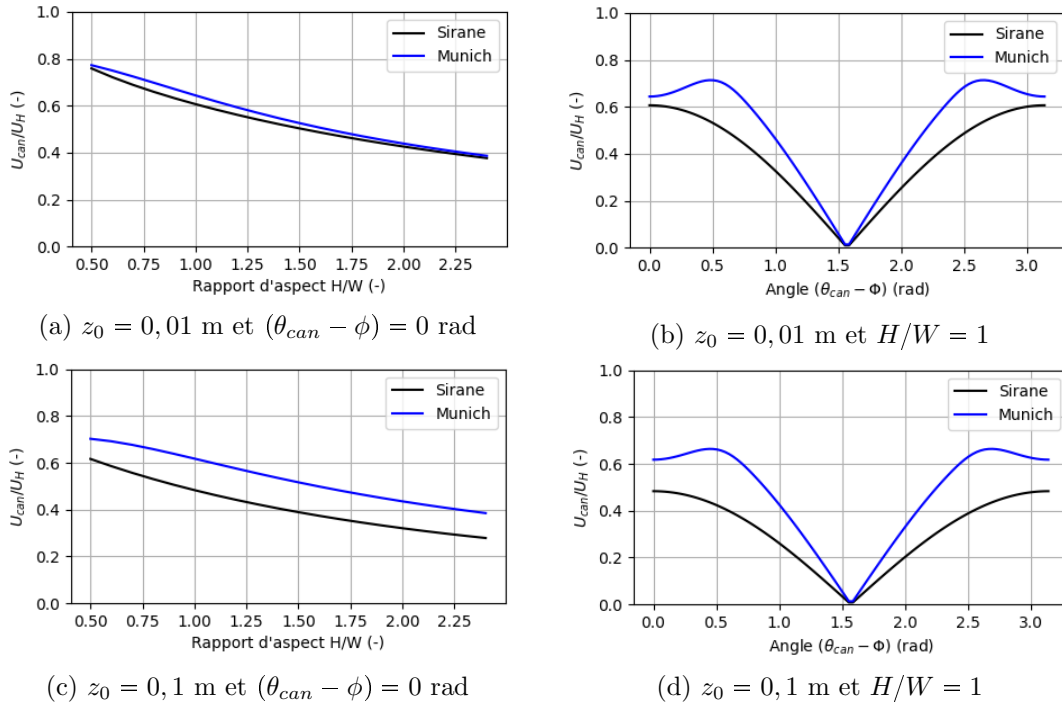


FIGURE 2.3 – Comparaison des modélisation paramétriques de SIRANE et de MUNICH pour la vitesse longitudinale moyenne dans la rue (z_0 correspond à $z_{0,parois}$ pour SIRANE et $z_{0,s}$ pour MUNICH)

Deux valeurs de z_0 différentes sont choisies, séparées d'un facteur dix. Ces choix correspondent schématiquement à des éléments de rugosité sur les parois de 10 cm et 1 m. La Figure 2.3 compare pour les deux modélisations l'impact du rapport d'aspect de la rue et de l'angle de l'écoulement externe par rapport à la rue pour les deux z_0 différents.

La plage de variation des rapport d'aspect se situe entre $H/W = 0,5$ et $H/W = 2,5$, et l'angle entre l'écoulement extérieur et la rue varie entre 0° et 360° .

La vitesse dans la rue évolue de manière quasiment linéaire avec le rapport d'aspect : plus la rue est encaissée et plus la vitesse diminue. Si la forme de la courbe est très similaire pour SIRANE et MUNICH, plus les parois sont rugueuses et plus un décalage se dessine, qui dépasse $0,1 U_H$ pour $z_0 = 0,1m$.

En revanche, l'évolution de la vitesse dans la rue en fonction de l'angle de l'écoulement est différente pour les deux modèles. Dans les deux cas, la vitesse est nulle pour un vent perpendiculaire à la rue (angle de $\pi/2$), et augmente à mesure que l'axe de la direction du vent se rapproche de celui de la rue. Toutefois, pour MUNICH, le maximum de vitesse est obtenu pour un angle autour de 30° par rapport à la rue. Cela est dû à la fonction f_ϕ qui intervient dans l'équation 2.6, en plus du cosinus. Pour SIRANE au contraire, le maximum est obtenu pour un vent dans l'axe de la rue, ce qui est bien cohérent avec la présence du terme $\cos(\theta_{can} - \phi)$ en facteur dans l'équation 2.4 .

Dans l'ensemble, l'ordre de grandeur des résultats est semblable pour les deux modélisations. Sans disposer de confrontation à des mesures en configuration réelle, il est donc difficile d'en privilégier une par rapport à l'autre. Notamment, la forme de la courbe de la vitesse dans la rue par rapport à l'angle du vent montre une divergence qu'il serait intéressant de trancher. Toutefois, l'avantage de la modélisation de MUNICH est la possibilité d'inclure des arbres, ce qui n'est pour l'instant pas développé dans SIRANE.

2.2.2 Modélisation de l'effet des arbres

L'un des effets des arbres est de faire partiellement obstruction au vent, diminuant ainsi la vitesse moyenne longitudinale dans la rue. Dans le modèle MUNICH, des simulations CFD-RANS avec Code-Saturne dans une rue 2D incluant des arbres comme deux cylindres poreux ont permis d'adapter la modélisation décrite à la partie précédente [Maison *et al.* 2022b]. Ce choix de géométrie pour les arbres est représenté sur la Figure 2.4.

Pour inclure les arbres, l'expression du paramètre s_H donnée à la partie précédente (équation 2.7) a été modifiée :

$$s_H = \begin{cases} \frac{l_{cb}}{l_{cb} + \kappa H} & \text{sans arbres} \\ \frac{l_{cb} l_{ct} f_{b \times t}}{\kappa H (l_{cb} + l_{ct} f_{b \times t}) + l_{cb} l_{ct} f_{b \times t}} & \text{avec arbres .} \end{cases} \quad (2.9)$$

Dans cette équation, la longueur caractéristique des arbres apparait, calculée par :

$$l_{ct} = \frac{0,054H}{C_{Dt} \frac{1}{2} LAI_{can}} \quad (2.10)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} l_{ct} [m] : \text{La longueur caractéristique des arbres} \\ C_{Dt} = 0,2 [-] : \text{Coefficient de traînée des arbres} \\ LAI_{can} [-] : \text{Le Leaf Area Index ramené à la surface de la rue.} \end{cases}$$

Une fonction qui tient compte des interactions entre le feuillage et les bâtiments est

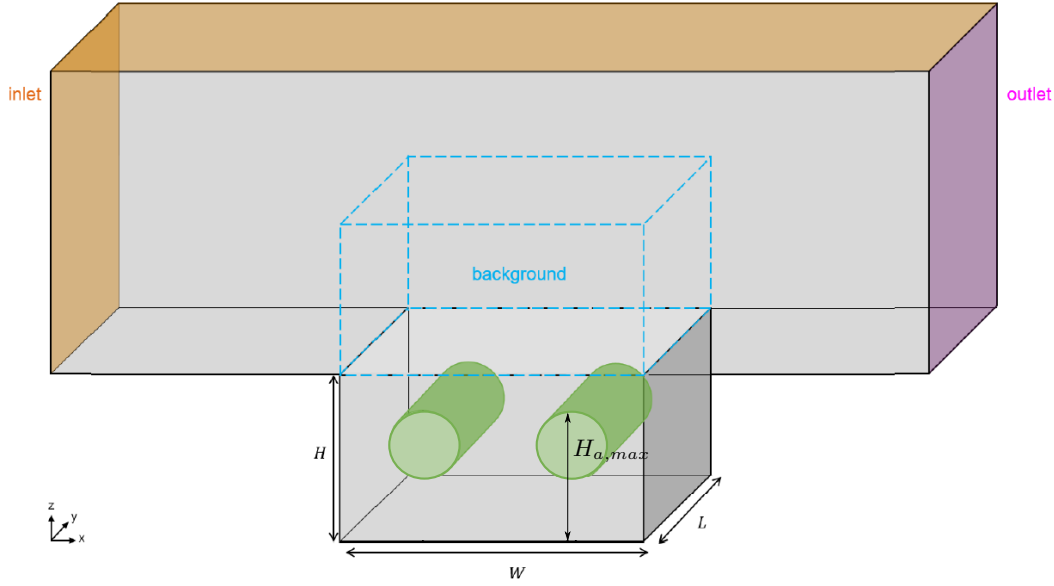


FIGURE 2.4 – Géométrie utilisée pour représenter les arbres dans Code-Saturne [Maison *et al.* 2022b] et à l’origine du modèle aéraulique de MUNICH incluant des arbres

également modélisée :

$$f_{bxt} = \frac{a_0 + a_1 \exp(a_2 H/W)}{(H_{a,max}/H)^2} \quad (2.11)$$

Avec : $\left\{ \begin{array}{l} a_0 = 3,26; a_1 = 0,0256; a_2 = 6,70 : \text{Des coefficients sans dimension} \\ \text{déterminés numériquement} \\ H_{a,max} [m] : \text{La hauteur maximum du houppier, définie sur la Figure 2.4.} \end{array} \right.$

Un avantage de ce modèle est donc sa facilité d’utilisation, puisque les arbres ne sont décrits que par deux paramètres : une hauteur maximum du houppier ($H_{a,max}$) et une densité de feuillage (LAI_{can}).

Sensibilité de la vitesse aux paramètres LAI_{can} et $H_{a,max}$

L’influence des deux paramètres décrivant les arbres LAI_{can} et $H_{a,max}$ sur la vitesse moyenne longitudinale est représentée sur la Figure 2.5. Le LAI_{can} varie entre 0 et 5, et $H_{a,max}$ varie entre 0 et H, H étant la hauteur moyenne de la rue. La valeur maximum de LAI_{can} correspond à une canopée forestière d’arbres feuillus en climat tempéré [Bréda 2008]. Une longueur de rugosité aéraulique de $z_0 = 0,05 m$ est choisie, cette valeur se trouvant à mi-chemin des deux cas étudiés à la partie précédente.

L’évolution de la vitesse dans la rue en fonction du LAI_{can} suit une forme rappelant une exponentielle décroissante. L’influence des arbres est significative, avec une diminution de la vitesse dans la rue de l’ordre de 30% pour un LAI_{can} de 1 par rapport à une rue sans arbre. L’influence de la hauteur du houppier est en revanche moins significative. Pour un rapport d’aspect de 1, elle n’est pas perceptible sur l’espace des paramètres étudié. Pour une rue plus ouverte ($H/W=0,5$), une faible influence de $H_{a,max}$ est visible, avec une légère diminution de la vitesse dans la rue à mesure que le sommet du houppier se rapproche du sommet de la rue.

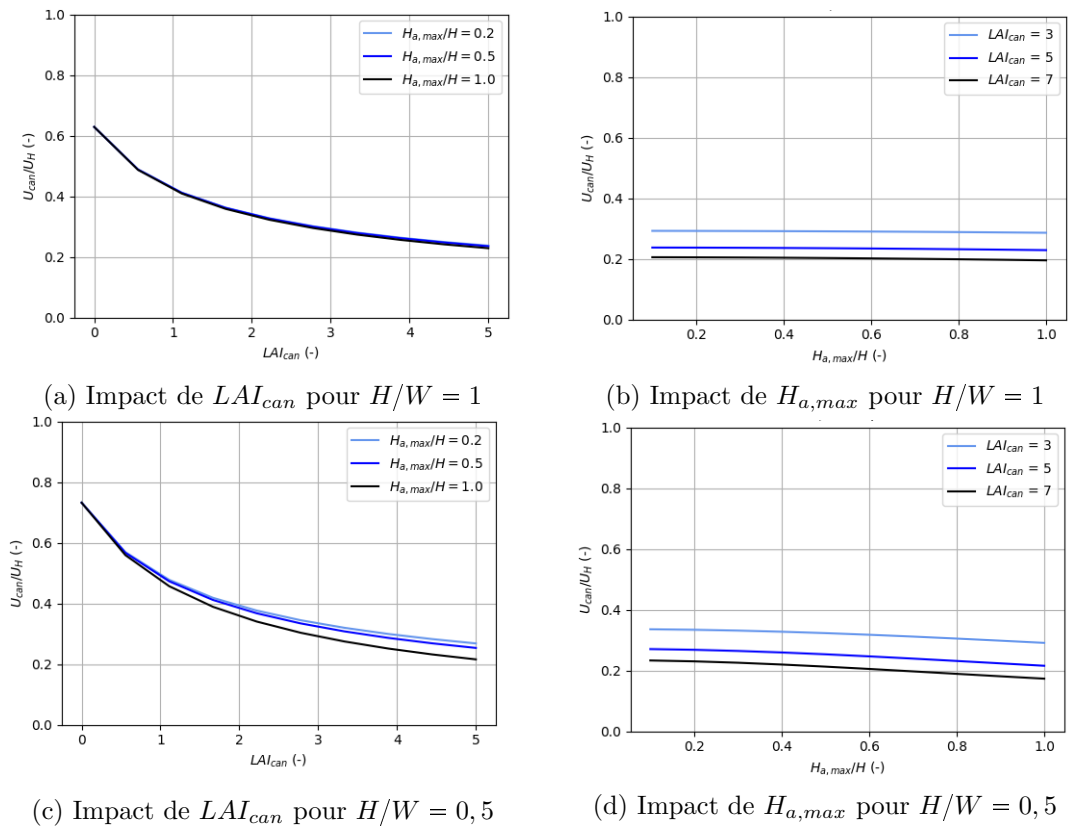


FIGURE 2.5 – Modélisation paramétrique de MUNICH pour la vitesse longitudinale moyenne dans la rue en présence d’arbres (avec $z_0 = 0,05$)

Finalement, la modélisation décrite ici est récente et n’a pour l’instant pas pu être confrontée à d’autres jeux de données que celui qui a servi à sa mise en place. Même si les résultats semblent cohérents, il serait donc intéressant à l’avenir de pouvoir la comparer par exemple à des mesures expérimentales.

2.2.3 Choix de la modélisation pour MATHIS

La modélisation de MUNICH est choisie par défaut dans MATHIS. En effet, l’inclusion de l’effet des arbres sur l’aérodynamique, permise par MUNICH, est un atout. Comme évoqué lors de la description des phénomènes (partie 1.2.1.4), l’obstruction aérodynamique peut être décisive pour évaluer l’influence des arbres sur la température d’air. Ce choix permettra également de mettre en perspective cette modélisation, en observant son comportement sur des cas d’études complexes, notamment sur un quartier de Lyon au chapitre 7. La modélisation de SIRANE est toutefois également implémentée dans MATHIS, dans le but de permettre à l’utilisateur de faire un choix différent.

2.3 Échange entre une rue et la CLU

Comme dans la première partie, les modèles de SIRANE et de MUNICH pour la vitesse d’échange verticale u_d sont décrits et comparés dans le cas d’une rue sans arbres. La modélisation de l’effet des arbres de MUNICH est ensuite analysée.

2.3.1 Vitesse d'échange au sommet d'une rue sans arbre

Définition

Les échanges de chaleur entre la rue et la Couche Limite Urbaine (CLU) sont modélisés à travers d'une vitesse d'échange verticale u_d [m/s], définie par :

$$Q_{top} = \rho c_p u_d (T_{can} - T_{clu}) \quad (2.12)$$

Avec :

- Q_{top} [W/m^2] : Le flux de chaleur sensible entre la rue et l'atmosphère (voir Figure 2.6)
- T_{can} [K] : La température d'air moyenne dans la rue (voir Figure 2.6)
- T_{clu} [K] : La température d'air au-dessus de la couche de mélange (voir Figure 2.6)
- ρc_p [$J/K/m^3$] : La capacité thermique volumique de l'air.

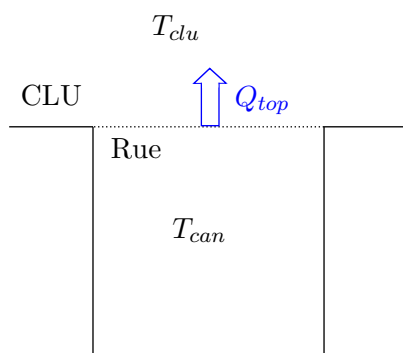


FIGURE 2.6 – Définition de l'échange entre une rue canyon et la CLU

Modèle de SIRANE

Dans le modèle SIRANE, cette vitesse d'échange est calculée par [Soulhac *et al.* 2011] :

$$u_d = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2\pi}} \quad (2.13)$$

Avec σ_w l'écart-type de la vitesse verticale au sommet de la rue en m/s, dont l'estimation est détaillée dans le chapitre 5. Cette équation, développée dans [Soulhac 2000], se base sur l'hypothèse que la turbulence provenant de l'écoulement externe est dominante par rapport à celle créée à l'interface. Elle vient de l'application des équations de Navier-Stokes à l'interface en régime permanent et sans flottabilité, et a été confortée par des mesures en soufflerie [Salizzoni *et al.* 2009].

Modèle de MUNICH

Dans le modèle MUNICH, la forme de l'équation 2.13 est reprise [Maison *et al.* 2022a]. Cependant, l'hypothèse selon laquelle la turbulence à l'interface provient uniquement de l'écoulement externe est remise en cause. Ainsi, les simulations

CFD-RANS évoquées dans la partie précédente ont permis d'inclure une dépendance au rapport d'aspect de la rue, selon :

$$u_d = \sigma_w \kappa H s_H \quad (2.14)$$

Avec s_H le paramètre déjà cité dans l'équation 2.6.

Comparaison des deux modèles

Les deux modèles pour la vitesse d'échange, normalisée par σ_w , sont représentées sur la Figure 2.7. L'écart-type de la vitesse verticale σ_w étant une caractéristique de l'écoulement externe, il n'est pas supposé dépendre du rapport d'aspect de la rue. Sur la Figure 2.7, l'influence du rapport d'aspect sur u_d peut donc être observé. Comme à la partie précédente, le rapport d'aspect varie entre 0,5 et 2.

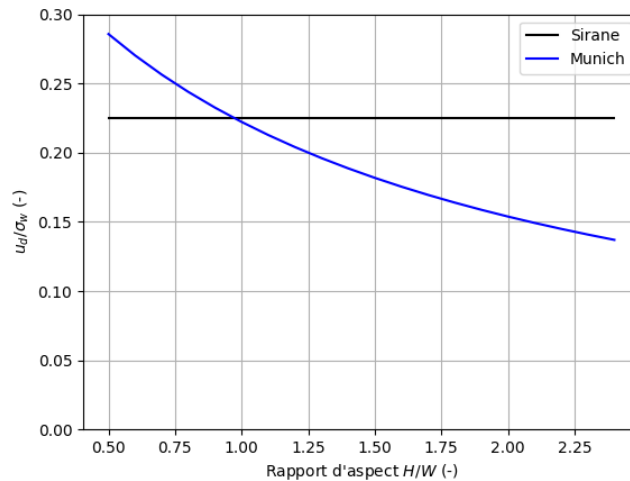


FIGURE 2.7 – Comparaison des modèles de SIRANE et MUNICH pour la vitesse d'échange rue / CLU normalisée par l'écart-type des fluctuations de vitesse verticale σ_w

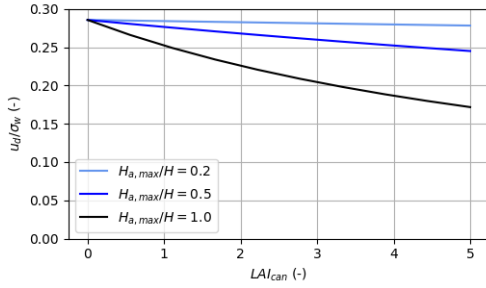
Dans le modèle MUNICH, la vitesse d'échange diminue à mesure que la rue devient encaissée. Parmi les rapports d'aspect étudiés, les deux modèles sont relativement proches pour des rapport d'aspect proches de 1, mais avec un écart qui atteint jusqu'à 40% de la valeur du modèle SIRANE pour une rue très encaissée ($H/W = 2, 5$).

Enfin, rappelons que les deux modèles se basent sur une hypothèse d'absence de flottabilité. Or, dans un contexte d'îlot de chaleur urbain, la flottabilité n'est pas forcément négligeable. Même si la stabilité atmosphérique pourra être prise en compte dans l'écart-type de la vitesse verticale σ_w , il se peut qu'en période de forte chaleur, cette vitesse d'échange u_d soit sous-estimée avec les deux modélisations.

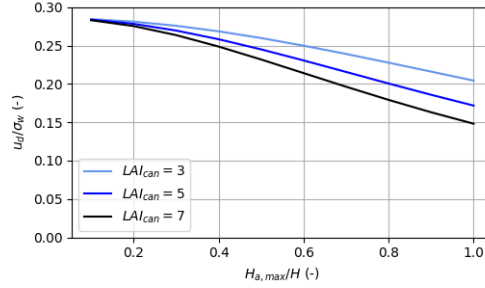
2.3.2 Modélisation de l'effet des arbres

Le modèle MUNICH permet d'inclure les arbres à la description de la vitesse d'échange. Pour cela, l'expression de s_H donnée par l'équation 2.9 est utilisée dans l'équation 2.14. La sensibilité de la vitesse d'échange par rapport au LAI_{can} , à $H_{a,max}$ et au rapport d'aspect est représentée sur la Figure 2.8. Trois rapports d'aspect entre

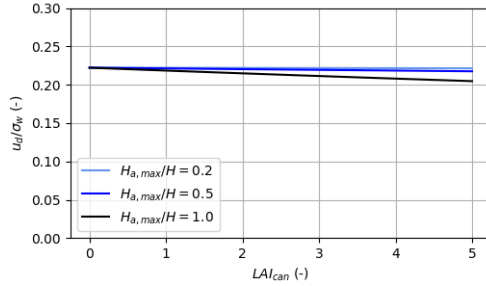
0,5 et 2 sont étudiés. Les plages de variations des paramètres des arbres sont les mêmes qu'à la partie 2.2.2 : LAI_{can} varie entre 0 et 5 et $H_{a,max}$ entre 0 et 1.



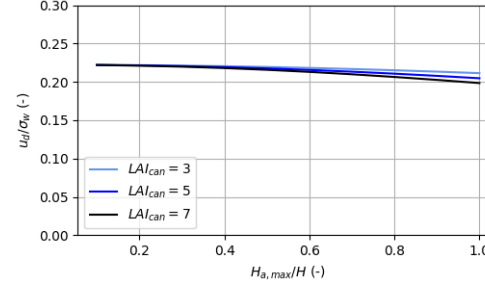
(a) Impact de LAI_{can} pour $H/W = 0,5$



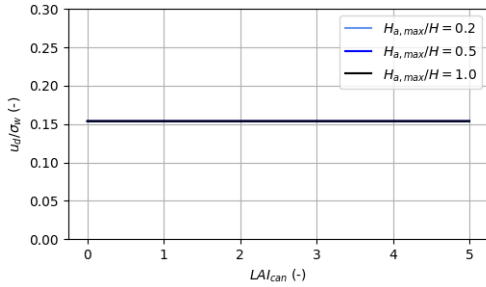
(b) Impact de $H_{a,max}$ pour $H/W = 0,5$



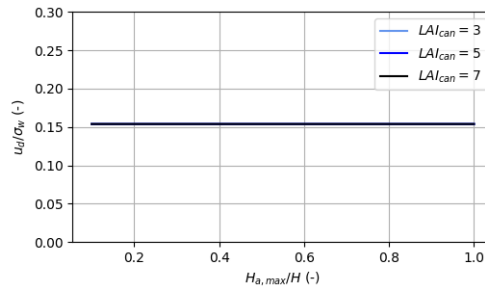
(c) Impact de LAI_{can} pour $H/W = 1$



(d) Impact de $H_{a,max}$ pour $H/W = 1$



(e) Impact de LAI_{can} pour $H/W = 2$



(f) Impact de $H_{a,max}$ pour $H/W = 2$

FIGURE 2.8 – Modélisation de MUNICH pour la vitesse d'échange rue / CLU normalisée par l'écart-type de la vitesse verticale σ_w en présence d'arbres

Tout d'abord, notons que dans cette modélisation, l'influence des arbres sur la vitesse d'échange dépend beaucoup du rapport d'aspect. En effet, pour une rue très encaissée ($H/W=2$), l'influence des arbres est totalement négligeable. A l'extrême inverse, pour une rue très ouverte ($H/W=0,5$), leur influence peut quasiment faire varier la vitesse d'échange du simple au double. Contrairement à la vitesse moyenne longitudinale, l'influence du LAI_{can} et de $H_{a,max}$ est ici à peu près comparable. Il semble en effet cohérent que plus les arbres sont proches du sommet de la rue et plus leur impact sur la vitesse d'échange s'accroît.

Comme pour la vitesse moyenne longitudinale, ce modèle est récent (publié en 2022) et une comparaison avec d'autres jeux de données pourrait à l'avenir être intéressante.

2.4. Modélisation paramétrique des vitesses proche paroi à l'aide de simulations CFD-LES

2.3.3 Choix de la modélisation pour MATHIS

De la même façon que pour la vitesse moyenne longitudinale, le modèle de MUNICH est sélectionné par défaut dans MATHIS. Cela est motivé par l'inclusion de l'effet des arbres ainsi que par la dépendance au rapport d'aspect dans MUNICH. Comme pour la vitesse moyenne longitudinale, le modèle de SIRANE est également implémenté dans MATHIS, laissant à l'utilisateur la possibilité de faire un choix différent.

2.4 Modélisation paramétrique des vitesses proche paroi à l'aide de simulations CFD-LES

2.4.1 Problématique

Dans une optique d'étude des transferts thermiques, et notamment de la convection, la connaissance des vitesses proche paroi est importante. Ces vitesses ne sont pas calculées dans les modèles de dispersion de polluants utilisant une approche en réseau de rues, SIRANE [Soulhac *et al.* 2011] et MUNICH [Kim *et al.* 2018]. Dans cette partie, une modélisation de ces vitesses est développée à partir des caractéristiques de l'écoulement externe. Elles seront utilisées pour la modélisation thermo-énergétique d'une rue (chapitre 4), afin de calculer des coefficients convectifs sur les parois.

Une rue canyon infinie est considérée et la flottabilité est négligée. Les trois vitesses proche paroi sont représentées sur la Figure 2.9. A priori, on peut supposer que ces vitesses dépendent :

- De la forme du profil vertical de l'écoulement externe
- De l'orientation de l'écoulement externe par rapport à la rue
- Du rapport d'aspect de la rue
- De la rugosité des parois de la rue.

Un cas simplifié est étudié dans cette partie. On considère une rue isotherme de rapport d'aspect 1, avec une légère rugosité sur les parois ($= H/1000$) soumise à un écoulement externe décrit par une loi logarithmique neutre. Concernant l'orientation de l'écoulement externe par rapport à la rue, il a été montré par [Soulhac *et al.* 2008] qu'il était possible de considérer séparément la composante parallèle à la rue et la composante perpendiculaire. L'écoulement est donc considéré perpendiculaire dans un premier temps. La vitesse moyenne longitudinale décrite dans la section 2.2 est ensuite utilisée pour formuler une modélisation pour tous types d'orientation.

Enfin, il faut définir à quelle distance des parois sont souhaitées les vitesses proche paroi. Ce choix dépend en réalité de la corrélation utilisée pour le calcul des coefficients d'échange convectif. Toutefois, si une corrélation est développée à partir de mesures de vitesse à une certaine distance d'un mur, cela n'implique pas qu'il faille réutiliser cette distance telle quelle. En effet, l'écoulement n'étant pas le même, transposer arbitrairement une distance n'est pas pertinent. Ici, les vitesses proche paroi seront définies comme les vitesses au sommet de la couche limite dynamique qui se développe le long des parois.

Dans une première partie, l'approche de CFD sélectionnée est décrite. Ensuite, la méthode de modélisation est validée à l'aide d'une comparaison avec des mesures en soufflerie. Finalement, une modélisation paramétrique des vitesses proche paroi à partir des caractéristiques de l'écoulement externe est développée.

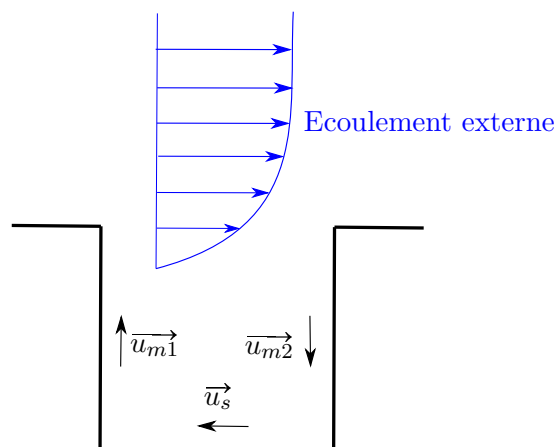


FIGURE 2.9 – Définition des vitesses proche paroi

2.4.2 Approche de modélisation CFD

Tout d’abord, l’approche CFD retenue est détaillée dans cette partie.

Approche CFD-LES : méthode de Boltzmann sur réseau

Trois types d’approches sont utilisées en CFD (*Computational Fluid Dynamics*) et sont décrites dans le Tableau 2.1. D’une manière générale, elles se basent sur la description de l’écoulement par les équations de Navier-Stokes. L’approche RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) résout l’écoulement moyen et modélise la turbulence. Il s’agit de la plus accessible en temps de calcul. L’approche LES (*Large Eddy Simulation*) résout les grandes échelles contenant le plus d’énergie et modélise les petites échelles, tout en permettant une représentation dynamique des phénomènes. Les simulations LES sont donc plus couteuses en temps de calcul que celles effectuées par RANS, mais deviennent malgré tout accessibles avec l’augmentation des puissances de calcul. Le modèle de microclimat urbain PALM-4U utilise par exemple une approche LES [Steuri *et al.* 2020]. Enfin, l’approche DNS (*Direct Numerical Simulation*) résout toutes les échelles de la turbulence. Cette dernière approche n’est utilisable que sur des cas simples.

Type d’approche	Écoulement moyen	Turbulence grandes échelles	Turbulence petites échelles
RANS	Equations de Navier-Stokes moyennées	Modélisation	
LES	Equations de Navier-Stokes filtrées		Modélisation
DNS	Equations de Navier-Stokes		

TABLE 2.1 – Trois types d’approche existantes pour la CFD

Une meilleure reproduction des écoulements dans différentes configurations urbaines a été observée avec l’approche LES par rapport à l’approche RANS, avec notamment une représentation de la turbulence et des recirculations plus réaliste [Zheng *et al.* 2020,

2.4. Modélisation paramétrique des vitesses proche paroi à l'aide de simulations CFD-LES

Zheng & Yang 2021, Salim *et al.* 2011]. Il a donc été choisi d'utiliser un logiciel de CFD-LES.

Le logiciel ProLB, qui utilise la méthode de Boltzmann sur réseau (*Lattice-Boltzmann Method*, soit LBM), a été sélectionné pour effectuer les simulations [Jacob *et al.* 2021]. Contrairement aux approches classiques, la méthode de Boltzmann sur réseau n'est pas basée sur les équations de Navier-Stokes mais sur l'équation de transport de Boltzmann. Cette dernière décrit le comportement des particules à l'échelle microscopique, c'est-à-dire les collisions entre particules ainsi que leur propagation, alors que les équations de Navier-Stokes s'intéressent directement aux grandeurs macroscopiques. Ces deux formulations sont toutefois mathématiquement équivalentes, et l'expansion de Chapman-Enskog permet de passer de l'une à l'autre. L'un des avantages de la LBM est d'être facilement parallélisable, ce qui permet souvent de réduire le temps de calcul par rapport aux approches LES classiques. Une description plus détaillée de la méthode de Boltzmann sur réseau est disponible dans [Krüger *et al.* 2017].

ProLB utilise un schéma D3Q19, ce qui signifie que le code considère trois dimensions d'espace et que les particules peuvent adopter 19 vitesses discrètes différentes à l'échelle microscopique. Le maillage est cartésien, et un facteur deux est présent entre deux niveaux de raffinement. Les autres caractéristiques du code (opérateur de collision, modèle de sous-maille) ne sont pas données ici mais sont décrites en détail dans [Jacob *et al.* 2019].

Traitement de la paroi

D'une manière générale, l'approche privilégiée pour modéliser l'écoulement au contact de la surface des solides dépend du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (2.15)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} U [m/s] : \text{Un ordre de grandeur de la vitesse du fluide} \\ D [m] : \text{Une distance caractéristique} \\ \nu [m^2/s] : \text{La viscosité cinématique du fluide.} \end{cases}$$

La surface des solides peut être traitée de deux façons différentes en CFD [Blocken *et al.* 2009] :

- Par l'approche bas nombre de Reynolds, qui résout explicitement la couche limite aérodynamique jusqu'à la sous-couche visqueuse, en raffinant le maillage proche paroi.
- Avec une loi de paroi, qui modélise l'écoulement au premier point du maillage à l'aide de lois semi-empiriques.

Les écoulements atmosphériques sont caractérisés par une turbulence élevée, avec un nombre Reynolds autour de 10^6 (pour une longueur de l'ordre de la dizaine de mètres et une vitesse de quelques mètres par seconde). Pour le cas étudié à la partie suivante, aux dimensions d'une soufflerie, le nombre de Reynolds est plus faible ($2,6 \times 10^4$), mais l'écoulement reste largement turbulent.

Cette turbulence élevée implique d'avoir une sous-couche visqueuse très fine le long des solides. C'est pourquoi l'approche bas nombre de Reynolds implique souvent pour les écoulements atmosphériques des tailles de cellule extrêmement petites au niveau des

parois, ce qui a un impact sur le temps de calcul [Blocken *et al.* 2009]. C'est donc l'approche par loi de paroi qui a été choisie ici. Dans ProLB, une loi de paroi puissance, qui s'adapte selon la distance du premier point, est utilisée [Wilhelm *et al.* 2018].

Génération de la turbulence en entrée par SEM

En LES, l'écoulement d'entrée doit représenter les fluctuations de vitesse des grandes échelles, c'est-à-dire les tenseurs de Reynolds résolus et donc l'énergie cinétique turbulente résolue. Or, par définition, les fluctuations de vitesse impliquent des phénomènes stochastiques, tout en respectant certaines lois physiques, ce qui les rend complexes à modéliser. Dans une couche limite atmosphérique, la turbulence en entrée du domaine joue un rôle important et ne peut donc être négligée. Deux familles de méthodes existent à ce jour pour répondre à cette problématique [Tabor & Baba-ahmadi 2010] :

- L'utilisation de simulations sur un domaine précurseur pour laisser la turbulence se créer d'elle même, par exemple en permettant à un écoulement de balayer un même domaine rugueux plusieurs fois avant d'entrer dans le domaine d'intérêt. L'inconvénient de ces méthodes est de rajouter du temps de calcul pour générer la turbulence.
- La reconstruction synthétique de la turbulence, qui consiste à générer des fluctuations aléatoires mais respectant le plus possible la physique de l'écoulement. L'avantage de ces méthodes est d'être plus rapides. Cependant, la turbulence risque d'être moins réaliste que celle produite par un domaine précurseur.

Dans ProLB, la *Synthetic Eddy Method* (SEM) est implémentée [Buffa *et al.* 2021]. Cette méthode appartient à la deuxième famille citée et produit aléatoirement N tourbillons de taille L sur le domaine d'entrée, permettant de modéliser un profil vertical d'énergie cinétique turbulente.

2.4.3 Validation de la configuration avec des mesures en soufflerie

Avant de s'intéresser aux vitesses proche paroi, la démarche de modélisation est validée à l'aide d'une comparaison avec des mesures en soufflerie.

2.4.3.1 Présentation du cas d'étude

Les mesures en soufflerie réalisées par [Salizzoni *et al.* 2011] ont été choisies comme cas d'étude. Le dispositif expérimental est présenté sur la Figure 2.10. Les dimensions de la veine sont 8 m de longueur, 1 m de haut et 0,7 m de large. Pour créer de la turbulence sur l'écoulement d'approche, trois pointes verticales, ainsi que des cubes rugueux ont été positionnés en amont du domaine étudié. Le domaine d'intérêt est composé d'une série de rues infinies (2D) de rapport d'aspect H/D , puis d'une rue de rapport d'aspect $H/W = 1$, dans laquelle la vitesse est mesurée. Le but de cette configuration est de pouvoir observer l'impact de l'écoulement d'approche sur une même rue.

Le profil de vitesse dans l'écoulement externe est mesuré par un anémomètre à fil chaud, à une distance de l'entrée de la soufflerie correspondant à 12 fois la hauteur des éléments générant la turbulence. Cette distance permet de mesurer un écoulement à l'équilibre, c'est-à-dire qui n'évolue plus le long de la veine. Dans la rue d'intérêt, des mesures par PIV ont été effectuées, avec une résolution de $1,280 \times 1,024$ pixels. Les deux méthodes de mesures ont été comparées sur une hauteur H au dessus de la rue d'intérêt, montrant une bonne concordance.

2.4. Modélisation paramétrique des vitesses proche paroi à l'aide de simulations CFD-LES

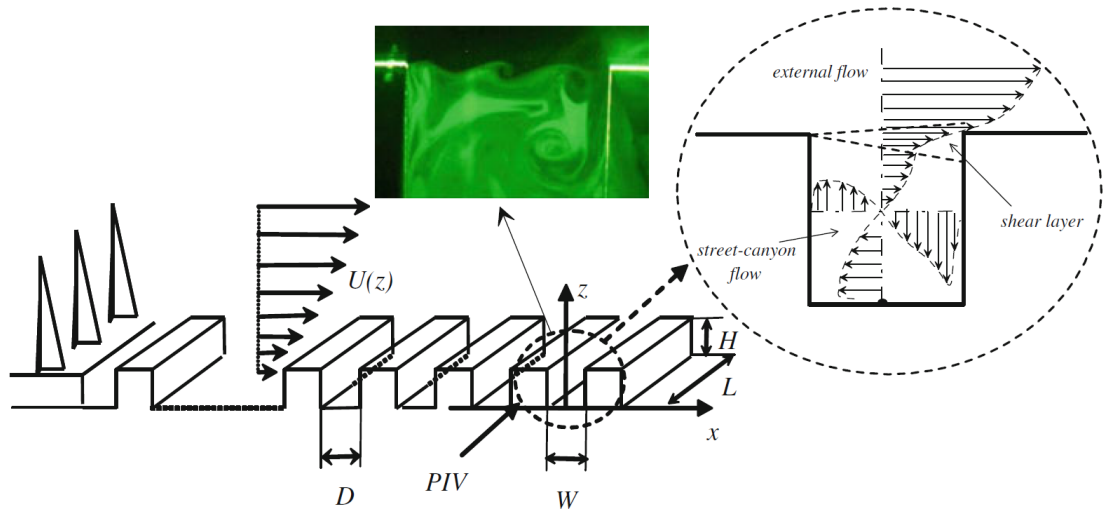


FIGURE 2.10 – Dispositif expérimental en soufflerie de [Salizzoni *et al.* 2011]

La vitesse dans l'écoulement externe $U_{ref} = 6,75 \text{ m/s}$ a été gardée constante dans [Salizzoni *et al.* 2011], et quatre rapports d'aspect différents pour les rues en amont ont été étudiés. Pour la comparaison avec les simulations CFD, seuls les deux cas les plus différents ont été sélectionnés, qui seront désignés par cas A et cas D. Les caractéristiques de l'écoulement d'approche dans ces deux cas sont présentés dans le Tableau 2.2.

Cas	H (mm)	H/W	H/D	u_* (m/s)	z_0 (mm)	d_0 (mm)
A	60	1	1	0,33	0,3	57
D	60	1	1/3	0,46	2,7	46

TABLE 2.2 – Caractéristiques de l'écoulement externe à l'équilibre des configurations A et D (u_* , z_0 , d_0 : vitesse de friction, longueur de rugosité aérodynamique et hauteur de déplacement de l'écoulement externe)

2.4.3.2 Configuration A

Configuration des simulations

Les dimensions choisies pour le domaine CFD sont présentées dans le Tableau 2.3. Pour la hauteur et la largeur, le minimum entre les dimensions de la veine expérimentale et les recommandations LES de [Zheng *et al.* 2021] a été choisi. En pratique, cela revient pour ces deux grandeurs à prendre la valeur de [Zheng *et al.* 2021]. Une largeur de $2,5 H$ peut sembler étroite, notons qu'elle va de paire avec des conditions périodiques sur les côtés. En pratique, un test (non montré) a mis en évidence que les résultats n'étaient pas changés par une largeur de $5 H$, soit doublée. Pour l'expérience, la longueur amont est très importante de manière à créer la turbulence. En CFD, l'utilisation de la SEM permet de s'affranchir de cette contrainte. Toutefois, une valeur supérieure aux recommandations a été choisie, de manière à laisser l'écoulement s'approcher de l'équilibre. La longueur aval au contraire est inférieure aux recommandations. Il a en effet été observé (non montré) que l'impact de cette dimension était négligeable sur les résultats dans la rue.

	Soufflerie	Recommandations	Choix modélisation
Longueur amont	133 H = 8 m	5 H = 0,3 m	8,5 H = 0,51 m
Longueur aval		10 H = 0,6 m	6,5 H = 0,39 m
Hauteur	16,7 H = 1 m	7,5 H = 0,45 m	7,5 H = 0,45 m
Largeur	11,7 H = 0,7 m	$\geq 2,5 H = 0,15 m$	2,5 H = 0,15 m

TABLE 2.3 – Taille de la veine expérimentale [Salizzoni *et al.* 2011], recommandations LES [Zheng *et al.* 2021] et taille du domaine choisies pour les simulations

Les conditions limites choisies sont décrites sur la Figure 2.11. En entrée, un profil logarithmique est utilisé pour la vitesse moyenne, en considérant une stabilité atmosphérique neutre et la hauteur de déplacement et vitesse de friction du Tableau 2.2, soit :

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z - d_0}{z_0}\right) \quad (2.16)$$

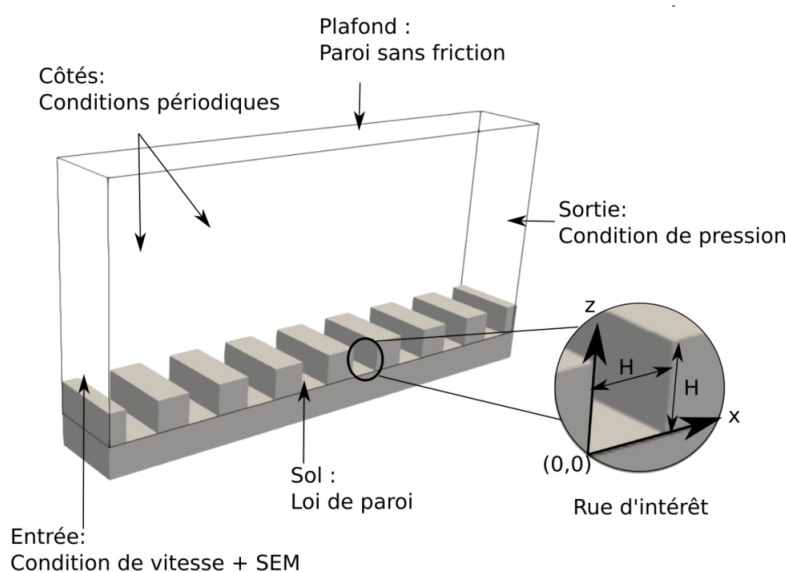


FIGURE 2.11 – Conditions limites des simulations CFD et repère dans la rue d'intérêt

Pour la turbulence, la SEM est utilisée (voir paragraphe 2.4.2), avec 65 tourbillons de longueur caractéristique 0,045 m (0,75 H). Le nombre de tourbillons n'est pas déterminant et doit simplement être suffisant pour que les tourbillons recouvrent largement le domaine d'entrée [Buffa *et al.* 2021]. En revanche, la turbulence créée augmente avec la longueur caractéristique des tourbillons, qui est donc importante. Cette grandeur est fixée en considérant que les tourbillons ont une taille inférieure à la taille des obstacles, de manière à pouvoir pénétrer dans les rues. Elle ne peut cependant pas être trop faible non plus, sous peine de ne plus être résolue par un nombre suffisant de mailles (≈ 10). Enfin, un paramètre K_{turb} représentant la valeur de turbulence souhaitée doit également être choisi. En pratique, il y a toutefois un écart

2.4. Modélisation paramétrique des vitesses proche paroi à l'aide de simulations CFD-LES

important et non linéaire entre le profil vertical de K_{turb} donné et les valeur d'énergie cinétique turbulente obtenues. Ce paramètre doit donc être ajusté en itérant.

Au niveau du sol, l'utilisation d'une loi de paroi est choisie, de manière à limiter le raffinement proche paroi nécessaire (voir paragraphe 2.4.2). Une rugosité de $H/1000$ est fixée sur les parois, de manière à reproduire la faible rugosité existant sur le modèle expérimental. Enfin, les conditions limites des parois latérales, du plafond et de la sortie correspondent à des conditions limites classiques, respectivement des conditions périodiques, de pression et de paroi sans friction.

Finalement, trois maillages ont été choisis pour en étudier l'influence. Ils sont présentés sur la Figure 2.12. Ici, la différence entre les maillages consiste en l'ajout d'un niveau supplémentaire de raffinement à chaque fois. En revanche, il n'y a pas de différence sur le maillage de fond dans les trois cas. Cela est dû au fait qu'avec la SEM, la taille du maillage du domaine d'entrée influe également sur la turbulence produite. De manière à bien étudier une sensibilité au maillage, et non pas l'effet d'une turbulence différente en entrée, il a été décidé de maintenir constant le maillage sur le plan d'entrée, et donc sur toute la zone amont et supérieure du domaine.

Convergence et durée de moyennage

ProLB est limité aux écoulements incompressibles, ce qui implique de respecter un critère sur le nombre de Mach :

$$\text{Ma} = \frac{U_{max}}{c_s} < 0,3 \quad (2.17)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} U_{max} [m/s] : \text{La vitesse maximum sur le domaine, soit } U_{max} = U_{ref} \\ c_s [m/s] : \text{La vitesse du son.} \end{cases}$$

Basé sur ce critère, le pas de temps est défini comme [Krüger *et al.* 2017] :

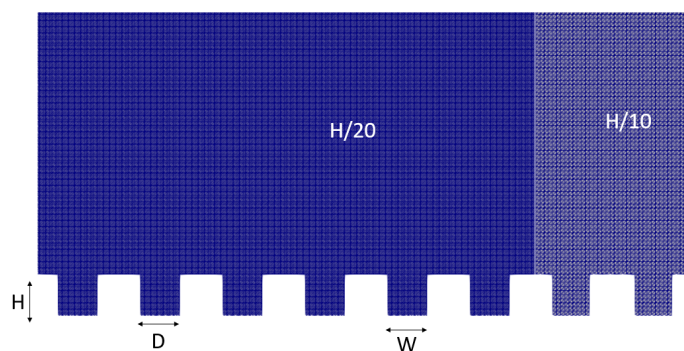
$$\Delta t = \frac{\Delta x_{max}}{c_s \sqrt{3}} \quad (2.18)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \Delta t [s] : \text{Le pas de temps} \\ \Delta x_{max} [m] : \text{Le maillage le moins raffiné.} \end{cases}$$

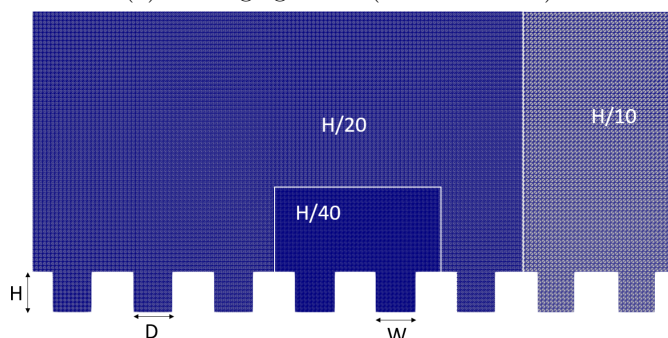
La vitesse du son utilisée dans ce cadre n'est pas la vitesse du son adiabatique égale à 340 m/s, mais une vitesse du son numérique, définie par l'utilisateur. Une vitesse du son de 40 m/s a été choisie pour ce cas d'étude, ce qui correspond à un $\text{Ma} < 0,17$ et remplit bien la condition évoquée ci-dessus. Ce choix, associé aux maillages présentés sur la Figure 2.12, induit un pas de temps de $8,7 \times 10^{-5}$ s.

Les simulations ont été effectuées sur 400 000 pas de temps, soit 35 secondes de temps physique ou 260 fois le temps de traverser le domaine à la vitesse U_{ref} . Pour étudier la convergence, les moyennes cumulées relatives de la vitesse sur cinq points dans la rue ont été tracées entre les pas de temps 200 000 et 400 000 sur la Figure 2.13, dans le cas du maillage fin.

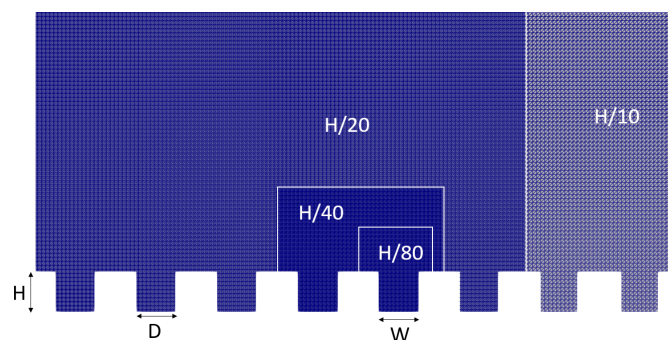
La moyenne cumulée relative est définie par :



(a) Maillage grossier (162566 nœuds)



(b) Maillage intermédiaire (267183 nœuds)



(c) Maillage fin (519381 nœuds)

FIGURE 2.12 – Maillages choisis pour les simulations dans la configuration A

$$\bar{u}(t) = \frac{\sum_{t_1}^{t_2} u(t)}{N(t)u(t_2)} \quad (2.19)$$

Avec :

- \bar{u} [m/s] : Moyenne cumulée relative de la vitesse
- t_1, t_2 [-] : Les pas de temps sur lesquels la moyenne cumulée relative est calculée ($t_1 = 200000$ et $t_2 = 400000$)
- $u(t)$ [m/s] : La vitesse instantanée
- $N(t) = t - t_1$: Le nombre de pas de temps jusqu'à l'échéance t .

2.4. Modélisation paramétrique des vitesses proche paroi à l'aide de simulations CFD-LES

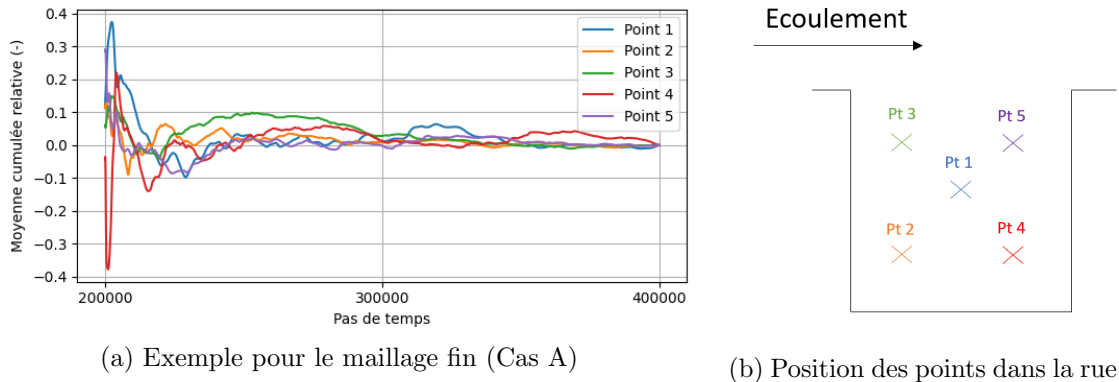


FIGURE 2.13 – Moyenne cumulée relative de la vitesse en cinq points dans la rue sur la période de moyennage

Sur cette figure, il apparaît que les valeurs oscillent autour de la moyenne (autour de 0) dès les premiers pas de temps étudiés. Cela signifie que la convergence est atteinte. Si ce n'était pas le cas, les valeurs n'oscilleraient pas autour de 0 dès les premiers pas de temps mais le rejoindraient petit à petit, selon une évolution visible.

Par ailleurs, ici, entre les pas de temps 300 000 et 400 000, les valeurs de moyennes cumulées ne s'éloignent pas de plus de 5 % de la moyenne finale. Cela permet de conclure qu'une période de moyennage de 200 000 pas de temps dans la rue est suffisante pour atteindre une convergence statistique.

Écoulement externe au dessus de la rue d'intérêt

Avant de pouvoir analyser les résultats dans la rue, il convient de s'assurer que l'écoulement externe est bien reproduit.

Le profil vertical de vitesse au-dessus de la rue d'intérêt simulé et mesuré est représenté sur la Figure 2.14. La présentation des résultats selon une échelle logarithmique (Figure 2.14a) permet d'observer un écart de la vitesse simulée au voisinage de $z = H$, avec une vitesse simulée trop faible. Cela s'explique principalement par le fait que le profil de vitesse donné en condition d'entrée (équation 2.16) demande une vitesse non nulle à $z = H$, $d_0 = 57$ mm étant légèrement inférieur à $H = 60$ mm (voir Tableau 2.2). Or, dans la simulation, la vitesse doit forcément être nulle sur le plan d'entrée à $z = H$. Ces deux contraintes n'étant pas compatibles, cela explique un léger détachement du profil de vitesse par rapport à la loi logarithmique. En revanche, la représentation en échelle linéaire 2.14b montre bien que ce décalage reste faible et donc acceptable.

L'énergie cinétique turbulente (désigné TKE pour *Turbulent Kinetic Energy*) a été mesurée dans l'écoulement l'externe et va être comparée aux résultats de la simulation. La TKE est définie par :

$$TKE = \frac{1}{2}(\langle u'^2 \rangle + \langle v'^2 \rangle + \langle w'^2 \rangle) \quad (2.20)$$

Avec u' , v' et w' les fluctuations de vitesse selon les axes x, y et z respectivement.

Avant d'analyser les résultats, notons que la turbulence au-dessus de la rue d'intérêt dépend à la fois de la modélisation de la SEM en entrée, et des interactions de

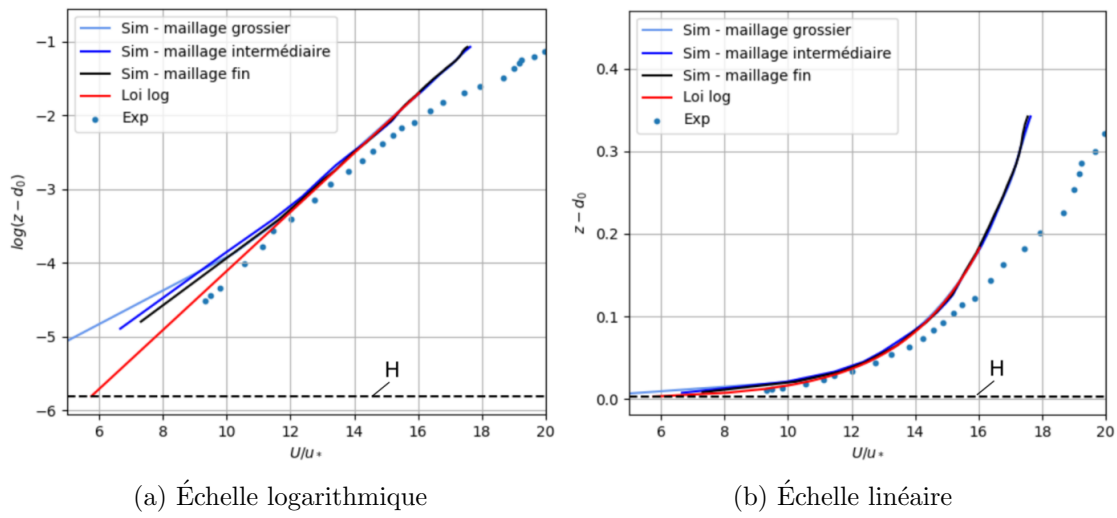
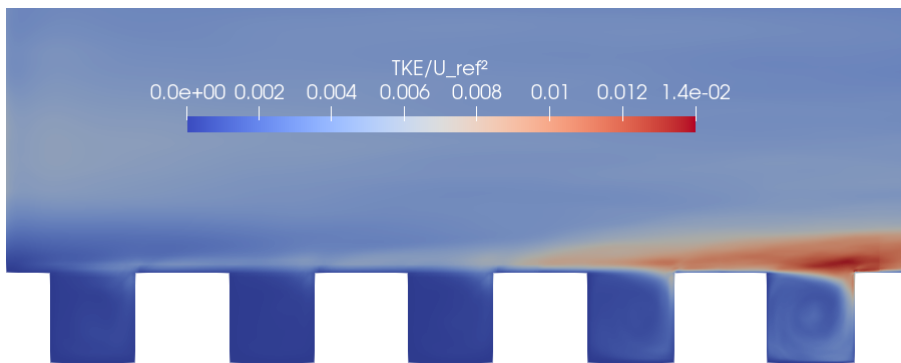
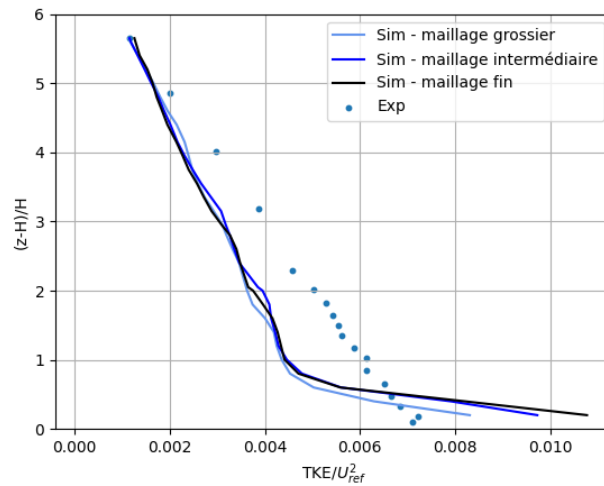


FIGURE 2.14 – Profil vertical de vitesse dans l’écoulement externe au centre de la rue d’intérêt ($x = H/2$ sur la Figure 2.11)



(a) Rues amont et rue d’intérêt (maillage fin)



(b) Profil vertical au-dessus de la rue d’intérêt

FIGURE 2.15 – Energie cinétique turbulente normalisée par U_{ref}^2

2.4. Modélisation paramétrique des vitesses proche paroi à l'aide de simulations CFD-LES

l'écoulement avec les rues du domaine amont. Pour maîtriser la turbulence incidente, il faudrait donc :

- Bien maîtriser la turbulence produite par la SEM
- Avoir un écoulement à l'équilibre avec les éléments de rugosité en amont de la rue d'intérêt, ce qui signifierait que la longueur de la zone amont n'aurait plus d'impact sur la turbulence observée.

Or, le premier point n'est pas complètement acquis : le fait de devoir itérer sur le profil vertical du paramètre K_{turb} (voir section 2.4.2) empêche de maîtriser réellement le profil de TKE en entrée, et impose une méthodologie coûteuse. Par ailleurs, le deuxième point n'est pas non plus totalement réalisé. En effet, il apparaît sur la Figure 2.15a que l'augmentation de TKE due au contact entre l'écoulement et les éléments de rugosité n'est pas encore stabilisée en arrivant à la rue d'intérêt.

La Figure 2.15b compare le profil vertical de TKE mesuré et simulé. La partie inférieure du profil (jusqu'à $(z - H)/H = 0,5$) est avant tout influencée par la friction créée au niveau du sommet des rues. Or, la TKE simulée dans cette zone est supérieure aux mesures. Cet écart ne peut donc pas être expliqué par les deux raisons précédentes, puisqu'il est indépendant de la SEM et qu'il n'aurait fait que croître si on avait étendu la zone amont. L'incertitude sur les mesures peut être une piste d'explication. L'écart observé dans la partie supérieure de la courbe (à partir de $(z - H)/H = 1$) est principalement dû à la difficulté de paramétrisation de la SEM. Toutefois, cette partie du profil de TKE n'aura que peu d'influence sur l'écoulement dans la rue.

Écoulement dans la rue

Dans la rue, l'énergie cinétique turbulente (TKE) et les vitesses moyennes horizontale (\bar{u}) et verticale (\bar{w}) sont mesurées sur les deux axes centraux de la rue. Les mesures et les simulations dans le cas des trois maillages sont représentés sur la Figure 2.16.

Pour analyser les résultats, deux indicateurs ont été choisis. Premièrement, l'erreur moyenne absolue est calculée par :

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_i^N |y_i - y'_i| \quad (2.21)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} y, y' : \text{Les valeurs correspondant à l'expérience et à la simulation pour une} \\ \text{même position (nécessité d'une interpolation si les positions ne correspondent} \\ \text{pas exactement)} \\ N : \text{Le nombre de points disponibles pour calculer l'erreur.} \end{array} \right.$$

Ensuite, l'erreur moyenne quadratique est donnée par :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N |y_i - y'_i|^2} \quad (2.22)$$

Les valeurs de ses indicateurs sont données dans le Tableau 2.4.

Tout d'abord, il apparaît que le maillage grossier n'est pas suffisant pour bien résoudre l'écoulement dans la rue. En effet, les vitesses moyennes sont loin des mesures, avec des

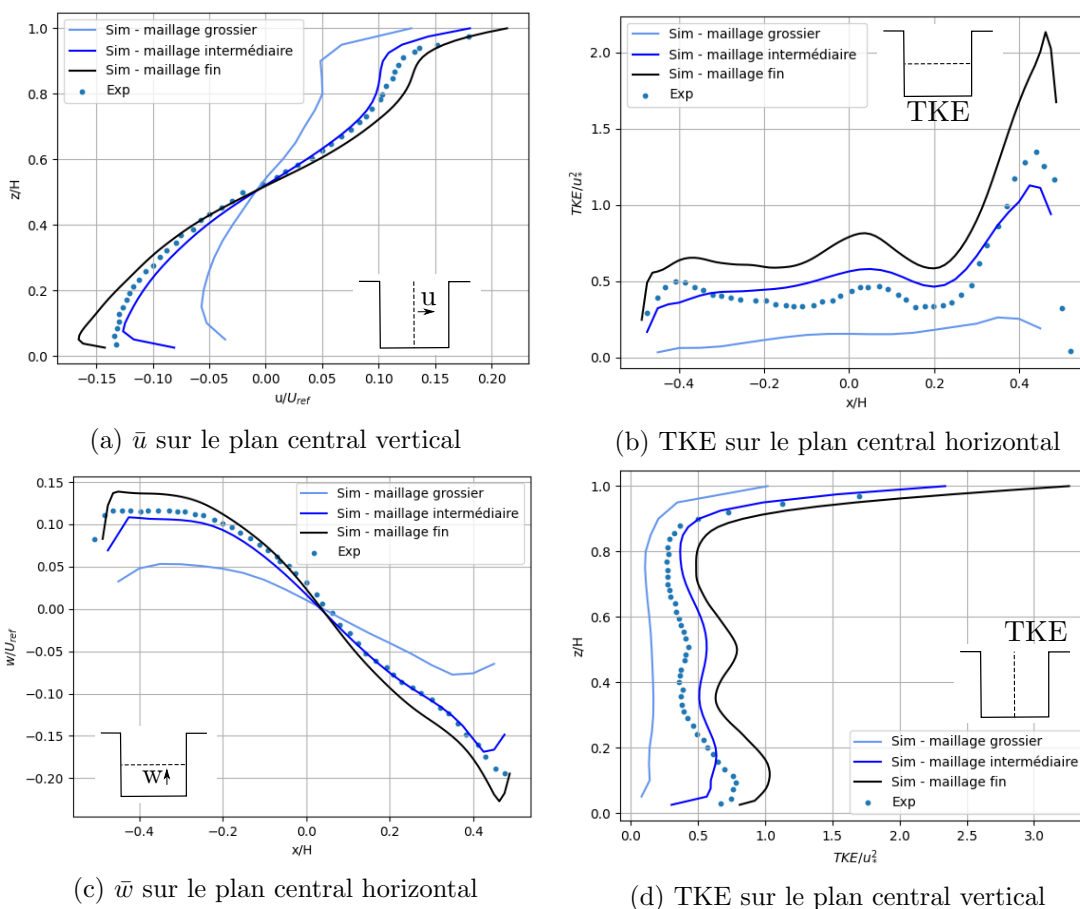


FIGURE 2.16 – Écoulement dans la rue dans la configuration A (\bar{u} [m/s] : Vitesse moyenne selon x ; \bar{w} [m/s] : Vitesse moyenne selon z)

MAE supérieurs à 15 % de l'amplitude des mesures et des RMSE supérieures à 17 %. Sur la Figure 2.16, les courbes de vitesse laissent penser que la recirculation dans la rue n'est pas assez prononcée. Cela est cohérent avec le fait que la TKE soit également trop faible (Figures 2.16b).

Pour les maillages intermédiaire et fin, les vitesses moyennes sont beaucoup plus proches des mesures, avec des MAE et RMSE inférieures à 5,5 % de l'amplitude des mesures. Au vu de cet indicateur, il semble donc que la convergence au maillage soit atteinte. Pourtant, contrairement à ce qui est attendu, les erreurs sur la TKE sont significativement plus grandes dans le cas du maillage fin par rapport au maillage intermédiaire. Pour expliquer cela, il faut rappeler que la TKE dans l'écoulement externe au voisinage du sommet des rues était également plus élevée dans les simulations que pour les mesures. Il n'est donc pas surprenant que les valeurs de TKE dans la rue tendent à être supérieures aux mesures quand on raffine le maillage.

2.4.3.3 Configuration D

Des simulations ont également été réalisées dans le cas de la configuration D. Cette configuration présente des rues de rapport d'aspect 1/3 en amont de la rue d'intérêt,

2.4. Modélisation paramétrique des vitesses proche paroi à l'aide de simulations CFD-LES

	Maillage grossier		Maillage intermédiaire		Maillage fin	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
Vitesse moyenne horizontale \bar{u} (m/s)	0,34 / 17,0 %	0,37 / 18,7 %	0,06 / 3,1 %	0,08 / 4,0 %	0,09 / 4,3 %	0,11 / 5,3 %
Vitesse moyenne verticale \bar{w} (m/s)	0,33 / 15,6 %	0,38 / 17,9 %	0,07 / 3,1 %	0,10 / 4,7 %	0,11 / 5,0 %	0,12 / 5,4 %
TKE sur l'axe horizontal (m ² /s ²)	0,04 / 26,2 %	0,05 / 31,9 %	0,01 / 7,8 %	0,01 / 8,5 %	0,03 / 22,0 %	0,04 / 25,5 %
TKE sur l'axe vertical (m ² /s ²)	0,04 / 24,6 %	0,05 / 28,9 %	0,01 / 8,5 %	0,01 / 9,2 %	0,04 / 23,2 %	0,04 / 25,4 %

TABLE 2.4 – Erreurs absolue moyenne et erreur quadratique moyenne pour la configuration A (en valeur absolue / en pourcentage par rapport à l'amplitude des mesures)

celle-ci restant de rapport d'aspect 1 (Tableau 2.2). Une grande partie de la démarche est très similaire à celle pour la configuration A, et sera donc seulement brièvement évoquée. Notamment, les dimensions du domaine, les conditions limites, la durée de simulation et période de moyennage sont les mêmes. Les maillages sont également similaires et sont donnés en Annexe B.

Les caractéristiques de l'écoulement externe au-dessus de la rue d'intérêt sont données sur la Figure 2.17.

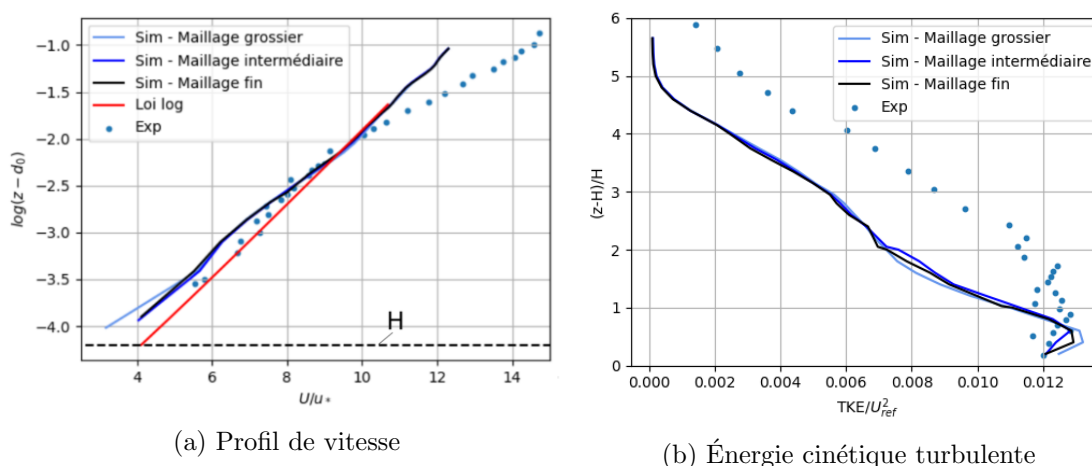


FIGURE 2.17 – Caractéristiques de l'écoulement externe au centre de la rue d'intérêt

Comme pour la configuration A (Figure 2.14), on observe une réduction de la vitesse moyenne par rapport à la loi logarithmique proche du sommet de la rue. Ici, cet écart

est plus important que pour le cas A. La hauteur de déplacement $d_0 = 46$ mm étant plus faible ici que pour le cas A, et donc la vitesse imposée par la loi logarithmique à $z = H$ plus élevée, cela implique un écart plus important entre les deux contraintes à $z = H$ et justifie donc un décalage plus important. Pour la TKE, l'écart observé en hauteur (pour $(z - H)/H > 1$) est expliqué par la difficulté d'une paramétrisation précise avec la SEM. Proche de la paroi en revanche, cette fois-ci la TKE simulée correspond bien aux mesures.

Comme pour le cas A, l'écoulement dans la rue est comparé aux mesures sur la Figure 2.18 et les erreurs associées sont données dans le Tableau 2.5.

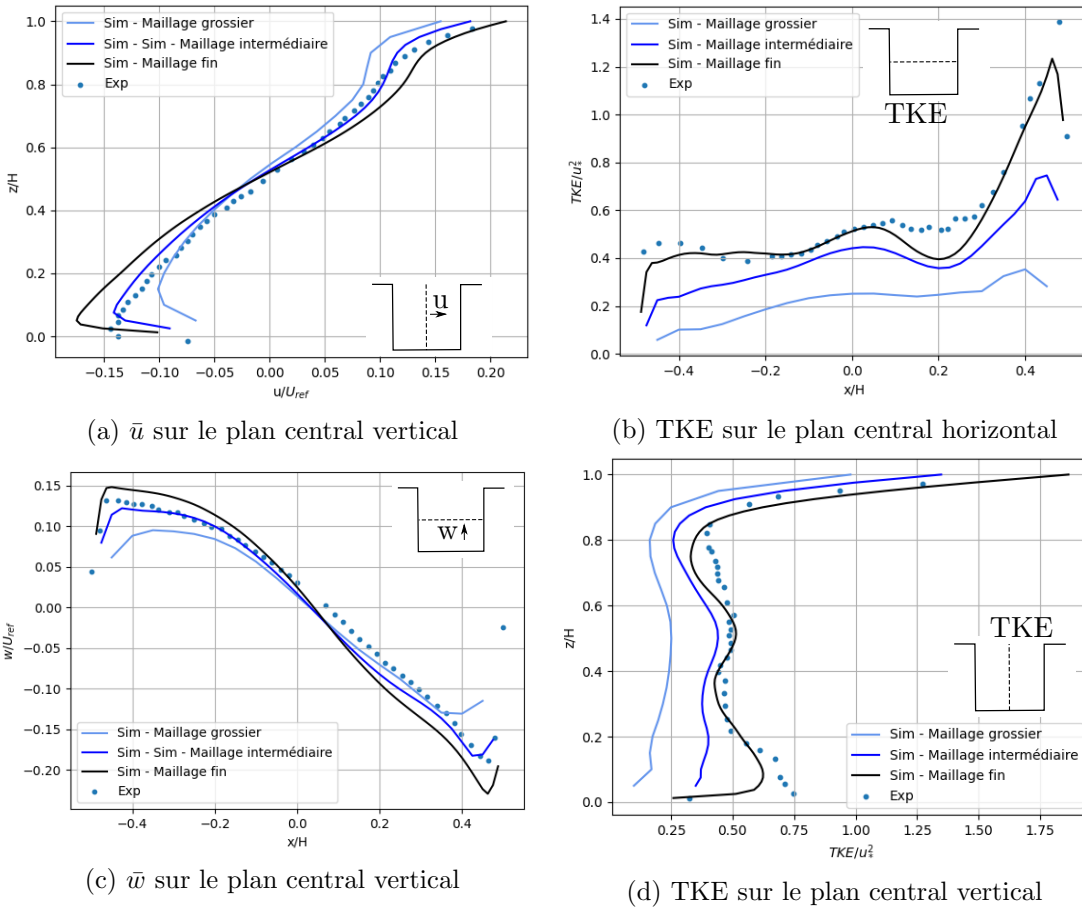


FIGURE 2.18 – Écoulement dans la rue dans la configuration D (\bar{u} [m/s] : Vitesse moyenne selon x ; \bar{w} [m/s] : Vitesse moyenne selon z)

Avec le maillage grossier, la recirculation dans la rue semble ici aussi sous-estimée. En revanche, cet effet est beaucoup moins accentué que pour la configuration A. En effet, pour les trois maillages, les MAE sur les vitesses dans la rue sont inférieures à 7 %, et les RMSE inférieures à 9 % de l'amplitude des mesures.

Pour la TKE, on observe une nette différence entre les trois maillages, avec une augmentation de la TKE simulée au fur et à mesure que le maillage est raffiné. Ici, contrairement au cas A, plus le maillage est fin et plus les valeurs se rapprochent des mesures, sans les dépasser. Les meilleurs résultats sont donc obtenus pour le maillage fin, avec une MAE inférieure à 8 % et une RMSE inférieure à 12 %. Notons qu'ici, la

2.4. Modélisation paramétrique des vitesses proche paroi à l'aide de simulations CFD-LES

	Maillage grossier		Maillage intermédiaire		Maillage fin	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
Vitesse moyenne horizontale u (m/s)	0,13 / 6,1%	0,18 / 8,4 %	0,06 / 2,9%	0,09 / 4,0 %	0,14 / 6,3 %	0,15 / 6,9 %
Vitesse moyenne verticale w (m/s)	0,15 / 6,9 %	0,19 / 8,8 %	0,07 / 3,4 %	0,09 / 4,2 %	0,15 / 6,9 %	0,17 / 8,0 %
TKE sur l'axe horizontal (m ² /s ²)	0,07 / 34,9 %	0,08 / 38,8 %	0,04 / 17,9 %	0,05 / 22,9 %	0,01 / 5,0 %	0,01 / 6,8 %
TKE sur l'axe vertical (m ² /s ²)	0,07 / 34,6 %	0,08 / 37,8 %	0,03 / 16,8 %	0,04 / 19,9 %	0,01 / 7,3 %	0,02 / 11,5 %

TABLE 2.5 – Erreurs absolue moyenne et erreur quadratique moyenne pour la configuration D (en valeur absolue / en pourcentage par rapport à l'amplitude des mesures)

TKE dans l'écoulement externe au sommet de la rue est bien reproduite par la CFD, et la TKE dans la rue simulée tend bien vers la TKE mesurée dans la rue pour le maillage fin. Cela est cohérent avec l'hypothèse selon laquelle dans la configuration A, le maillage fin simule une TKE trop élevée dans la rue car l'écoulement externe en apporte lui-même trop.

2.4.3.4 Conclusion

La confrontation des résultats modélisés avec les mesures en souffleries montre une bonne concordance, surtout concernant les vitesses moyennes, pour lesquelles l'erreur moyenne absolue ne dépasse pas 8 % de l'amplitude des mesures pour les deux configurations étudiées.

Cela autorise à utiliser l'approche de modélisation décrite pour développer une modélisation paramétrique des vitesses moyennes.

2.4.4 Modélisation paramétrique des vitesses proche paroi

Le but de cette partie est de proposer une modélisation paramétrique des vitesses proche paroi u_s, u_{m_1}, u_{m_2} à partir d'une grandeur décrivant l'écoulement externe.

2.4.4.1 Ecoulement perpendiculaire à la rue

Dans un premier temps, le cas de l'écoulement perpendiculaire à la rue est considéré, ce qui correspond aux deux configurations étudiées précédemment.

Ces deux cas sont basés sur les dimensions d'une soufflerie. Cependant, le nombre de Reynolds élevé ($Re = U_{ref}H/\nu = 2,6 \times 10^4$) permet de les utiliser directement pour étudier le comportement dans une rue de taille réelle [Shu *et al.* 2020]. En effet, selon le principe de l'indépendance de Reynolds, lorsque le nombre de Reynolds devient suffisamment grand, la forme des écoulements en devient indépendante. De même, cela autorise également à baser l'étude sur une seule vitesse U_{ref} .

Épaisseur de la couche limite dynamique

Tout d'abord, rappelons que les vitesses proche paroi sont définies comme les vitesses parallèles à la paroi au sommet de la couche limite dynamique. Une première étape est donc d'estimer l'épaisseur de la couche limite dynamique le long des parois. Pour cela, il est utile d'observer le champ de vitesse moyenne dans la rue (Figure 2.19a), ainsi que sa décomposition en vitesses verticale (Figure 2.19b) et horizontale (Figure 2.19c), ici par exemple dans le cas du maillage fin pour le cas A. Il apparaît que le tourbillon se formant dans la rue a du mal à s'insérer dans les angles : on s'attend donc à ce que la couche limite soit plus épaisse à mesure qu'on se rapproche des angles. Par ailleurs, on observe une ressemblance entre le champ des vitesses proches des trois parois, avec toutefois une légère différence pour le mur droit, pour lequel le maximum de vitesse est un peu excentré. Pour formaliser ces observations dans le cas du sol pour commencer, les

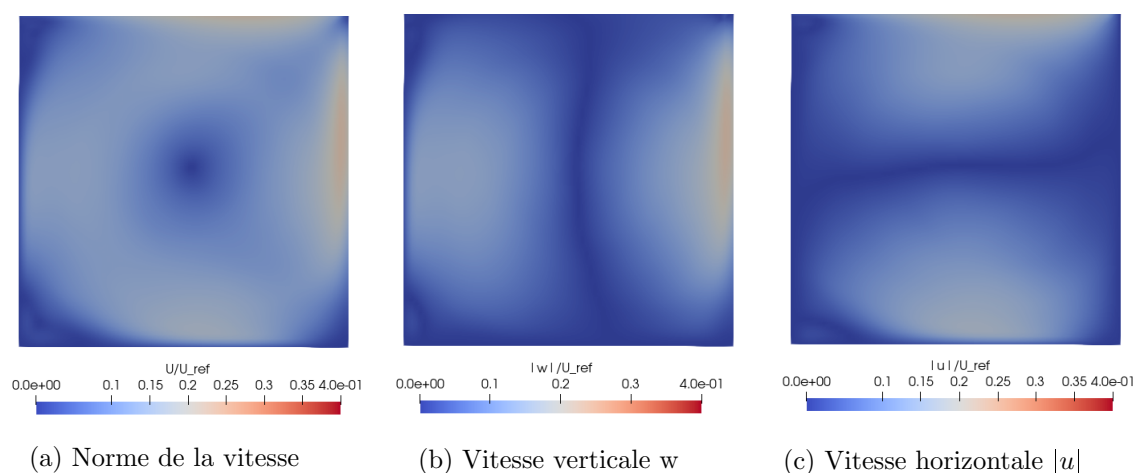


FIGURE 2.19 – Vitesses moyenne dans la rue normalisées par u_{ref} (Configuration A - maillage fin)

vitesses horizontales en trois positions x ont été tracées sur la Figure 2.20. Si on associe le sommet de la couche limite au premier maximum de vitesse en s'éloignant du sol, il apparaît bien que c'est au centre de la rue que la couche limite est la plus étroite.

De la même manière dans le cas des murs (Figure 2.21), on retrouve une couche limite étroite au centre ($z/H = 0,5$). On retrouve également l'asymétrie sur le mur aval, pour lequel la couche limite la plus fine est observée plus haut sur le mur.

Adimensionnement par rapport à l'écoulement externe

[Salizzoni *et al.* 2011] a montré que la grandeur la plus adaptée pour adimensionner l'écoulement dans la rue était la vitesse U_{ref} , soit la vitesse mesurée à $10 H$. Pourtant, les quatre configurations testées par [Salizzoni *et al.* 2011] ne font varier que la vitesse de friction, la longueur de rugosité et la hauteur de déplacement. Cette conclusion vient

2.4. Modélisation paramétrique des vitesses proche paroi à l'aide de simulations CFD-LES

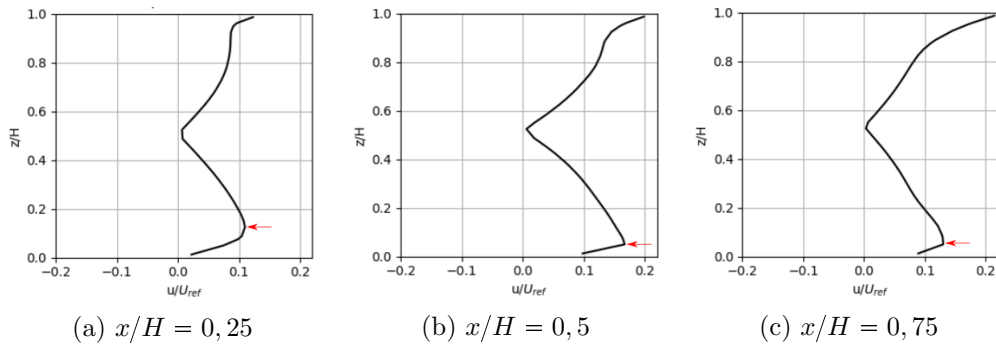


FIGURE 2.20 – Vitesse horizontale à trois positions différentes (Configuration A - maillage fin)- les flèches rouges correspondent à l'estimation du sommet de la couche limite

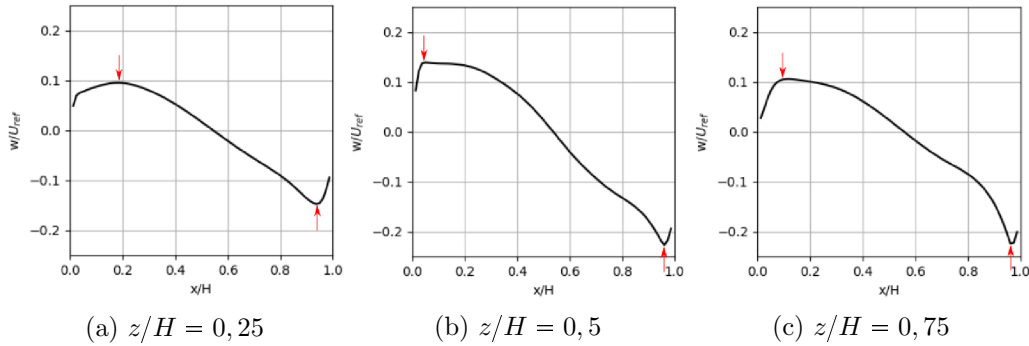


FIGURE 2.21 – Vitesse verticale à trois hauteur différentes (Configuration A - maillage fin)- les flèches rouges correspondent à l'estimation du sommet de la couche limite

donc du fait que malgré ces changements, la vitesse n'était pas modifiée dans la rue. Le seul paramètre restant invariant étant U_{ref} , on peut supposer que l'écoulement dans la rue ne dépend quasiment que de cette grandeur.

Conformément aux observations de [Salizzoni *et al.* 2011], l'écoulement dans la rue simulée est quasiment identique dans les configurations A et D. En effet, si on trace la vitesse au sommet des couches limites pour les deux murs et le sol, on observe des paraboles qui se chevauchent presque pour les cas A et D, comme le montre la Figure 2.22.

Modélisation paramétrique pour un écoulement perpendiculaire à la rue

On définit trois coefficients $C_{m_1}^\perp$, $C_{m_2}^\perp$ et C_s^\perp par :

$$u_{m_1}^\perp = C_{m_1}^\perp U_{ref}^\perp \quad (2.23)$$

$$u_{m_2}^\perp = C_{m_2}^\perp U_{ref}^\perp \quad (2.24)$$

$$u_s^\perp = C_s^\perp U_{ref}^\perp \quad (2.25)$$

Avec : $\left\{ \begin{array}{l} u_{m_1}^\perp, u_{m_2}^\perp, u_s^\perp \text{ [m/s]} : \text{ Les vitesses proche paroi dans le cas perpendiculaire} \\ U_{ref}^\perp \text{ [m/s]} : \text{ La vitesse à } 10 \text{ H dans le cas perpendiculaire.} \end{array} \right.$

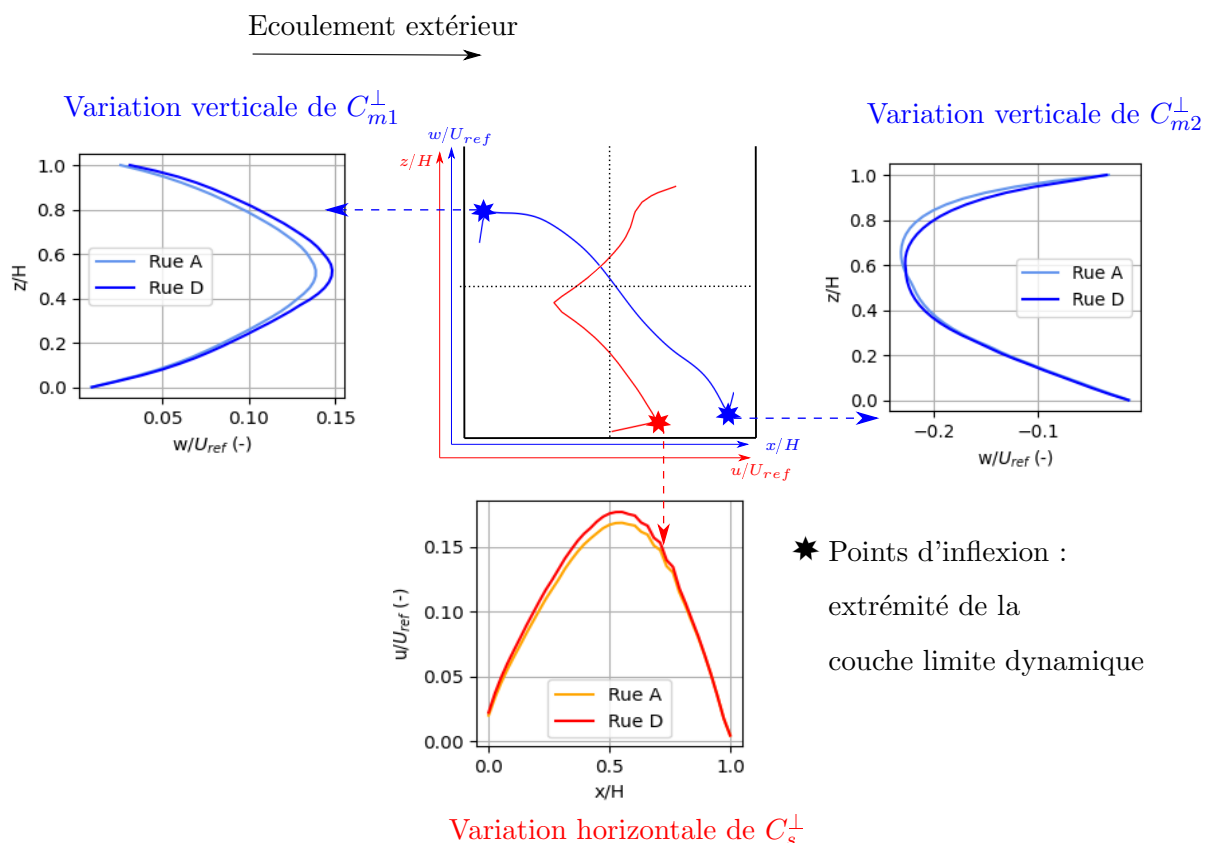


FIGURE 2.22 – Modélisation paramétrique des vitesses proche paroi

Une valeur moyenne de ces coefficients peut être déterminée pour chaque paroi, et est donnée dans le Tableau 2.6 pour les configurations A et D. Des valeurs très proches sont

	$C_{m_1}^\perp$	$C_{m_2}^\perp$	C_s^\perp
Configuration A	0,094	0,165	0,109
Configuration D	0,101	0,162	0,115
Moyenne	0,10	0,16	0,11

TABLE 2.6 – Valeurs obtenues pour les coefficients $C_{m_1}^\perp$, $C_{m_2}^\perp$ et C_s^\perp

trouvées dans les deux configurations, ce qui est cohérent avec le fait que les paraboles sur la Figure 2.22 soient quasiment superposées. Pour la modélisation paramétrique développée dans cette partie, la moyenne des valeurs trouvées dans les deux cas est choisie.

2.4.4.2 Écoulement externe de direction quelconque

Les vitesses proche paroi dans la rue peuvent être décomposées en une composante longitudinale et une composante transversale, selon :

$$u_{m_1} = \sqrt{(u_{m_1}^\perp)^2 + (u_{m_1}^\parallel)^2} \quad (2.26)$$

$$u_{m_2} = \sqrt{(u_{m_2}^\perp)^2 + (u_{m_2}^\parallel)^2} \quad (2.27)$$

$$u_s = \sqrt{(u_s^\perp)^2 + (u_s^\parallel)^2} \quad (2.28)$$

Les composantes transversales sont considérées égales à celles qu'on aurait avec un écoulement extérieur perpendiculaire à la rue, soit le cas étudié à la partie précédente.

Une première estimation pour les composantes longitudinale consiste à supposer que la vitesse longitudinale dans la rue est uniforme. Dans ce cas, il est possible de réutiliser la formulation discutée au début du chapitre, soit :

$$u_{m_1}^\parallel = u_{m_2}^\parallel = u_s^\parallel = U_{can} \quad (2.29)$$

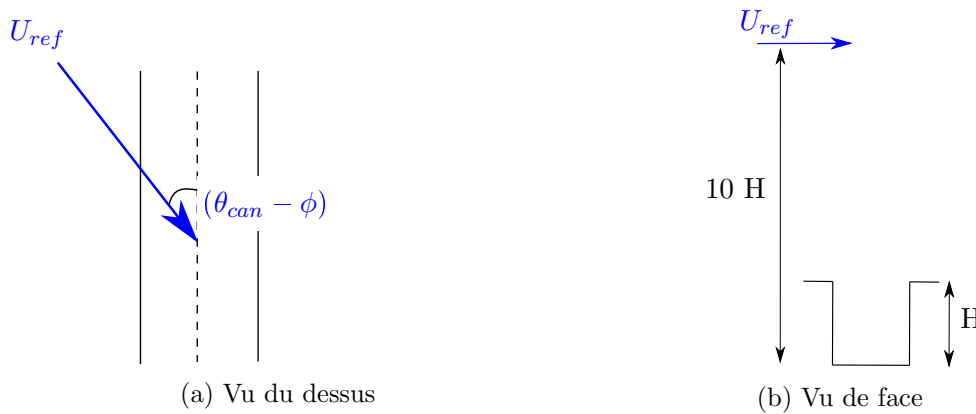


FIGURE 2.23 – Définition de la vitesse U_{ref} et de l'angle $(\theta_{can} - \phi)$

Enfin, la modélisation suivante est obtenue :

$$u_{m_1} = \sqrt{(C_{m_1}^\perp U_{ref} \sin(\theta_{can} - \phi))^2 + U_{can}^2} \quad (2.30)$$

$$u_{m_2} = \sqrt{(C_{m_2}^\perp U_{ref} \sin(\theta_{can} - \phi))^2 + U_{can}^2} \quad (2.31)$$

$$u_s = \sqrt{(C_s^\perp U_{ref} \sin(\theta_{can} - \phi))^2 + U_{can}^2} \quad (2.32)$$

Avec $(\theta_{can} - \phi)$ l'angle entre la rue et l'écoulement externe (voir Figure 2.23).

2.5 Conclusion

Les modélisations aérauliques utilisées dans les modèles de dispersion de polluants utilisant une approche en réseau de rue (SIRANE et MUNICH) ont été comparées dans ce chapitre. Cela a permis de choisir pour MATHIS une modélisation de la vitesse moyenne longitudinale (U_{can}) et de la vitesse d'échange entre la rue et la CLU (u_d). Cette dernière tient compte de l'obstruction aéraulique des arbres, considérés comme un milieu poreux à l'air et décrits par une densité de feuillage (LAI_{can}) et une hauteur maximum du houppier ($H_{a,max}$).

Les vitesses proches paroi (u_s, u_{m_1}, u_{m_2}) n'étant pas modélisées dans SIRANE et MUNICH, une modélisation paramétrique a été développée à l'aide de simulation CFD-LES, à partir de la vitesse à 10 H (U_{ref}). Dans un premier temps, la configuration

des simulations a été comparée à des mesures en soufflerie. Ensuite, l'exploitation du champ de vitesse dans la rue pour deux écoulements d'approche différents a permis de déterminer les coefficients $C_{m_1}^\perp$, $C_{m_2}^\perp$ et C_s^\perp , apparaissant dans la modélisation développée (équations 2.30, 2.31 et 2.32).

L'ensemble de la modélisation aéraulique néglige la flottabilité. Par temps calme et fortes chaleurs, cette hypothèse n'est pas adaptée. Parmi les perspectives, comparer les grandeurs modélisées à des mesures en conditions réelles serait pertinent. De même, une configuration simplifiée a été étudiée dans ce chapitre, avec notamment deux murs de même hauteur. Une autre perspective serait donc d'adapter les différentes modélisations pour différentes configurations.

Cette modélisation aéraulique sera utilisée pour déterminer les échanges convectifs dans une rue infinie (chapitre 4). Elle sera également nécessaire au calcul des écoulements et du champ de température dans un quartier représenté par un réseau de rue (chapitre 5).

Rappel des hypothèses principales du modèle aéraulique de rue

Hypothèses générales :

- La rue est une rue canyon symétrique de longueur infinie
- La flottabilité est négligée (convection forcée)
- Un régime permanent est considéré.

Hypothèse spécifique au calcul de la vitesse moyenne longitudinale U_{can} et de la vitesse d'échange verticale u_d (selon MUNICH) :

- Les arbres sont représentés par deux cylindres infinis.

Hypothèses spécifiques au calcul des vitesses proche paroi u_s, u_{m_1}, u_{m_2} :

- L'influence des arbres est négligée
- La composante longitudinale des vitesses proche paroi est U_{can}
- Les parois de la rue ont une faible rugosité ($z_0 = H/1000$).

Chapitre 3

Modélisation radiative

La modélisation radiative d'une rue infinie est développée dans ce chapitre en utilisant la méthode des radiosités. Une prise en compte des arbres est proposée. Le modèle est ensuite comparé à un modèle Monte Carlo sur une rue canyon finie sans arbres.

Sommaire

3.1	Présentation générale du modèle	67
3.2	Éclairéments primaires	72
3.2.1	Éclairéments primaires dans une rue sans arbres	72
3.2.2	Modélisation des arbres	75
3.3	Facteurs de forme	78
3.3.1	Généralités	78
3.3.2	Facteurs de forme dans une rue sans arbre	79
3.3.3	Modélisation des arbres	80
3.4	Modélisation des flux nets	87
3.4.1	Flux nets dans une rue sans arbres	87
3.4.2	Modélisation des arbres	89
3.5	Comparaison du modèle radiatif sans arbres avec la méthode de Monte Carlo	92
3.5.1	Présentation du cas d'étude et du modèle Monte Carlo	92
3.5.2	Résultats pour le flux solaire	93
3.5.3	Résultats pour le flux infrarouge	95
3.6	Conclusion	96

3.1 Présentation générale du modèle

Dans ce chapitre, un modèle radiatif est développé pour une rue canyon infinie. Deux bandes spectrales sont considérées, nommées solaire ou Courtes Longueurs d’Onde (CLO) et infrarouge ou Grandes Longueurs d’Onde (GLO), comme cela a été défini au chapitre 1, et l’air est supposé transparent au rayonnement. Sur la Figure 3.1, les données d’entrée et les résultats du modèle radiatif sont mis en évidence. Dans ce chapitre, les températures de surfaces sont prises comme des données d’entrée. Les densités de flux solaire direct ($S^{dir\downarrow}$), solaire diffus ($S^{dif\downarrow}$) et infrarouge (I^\downarrow) reçues par une surface horizontale dégagée sont également nécessaires en entrée du modèle radiatif. Le but du modèle est de calculer les densités de flux nettes solaire et infrarouge incidentes sur les différentes surfaces de la rue canyon.

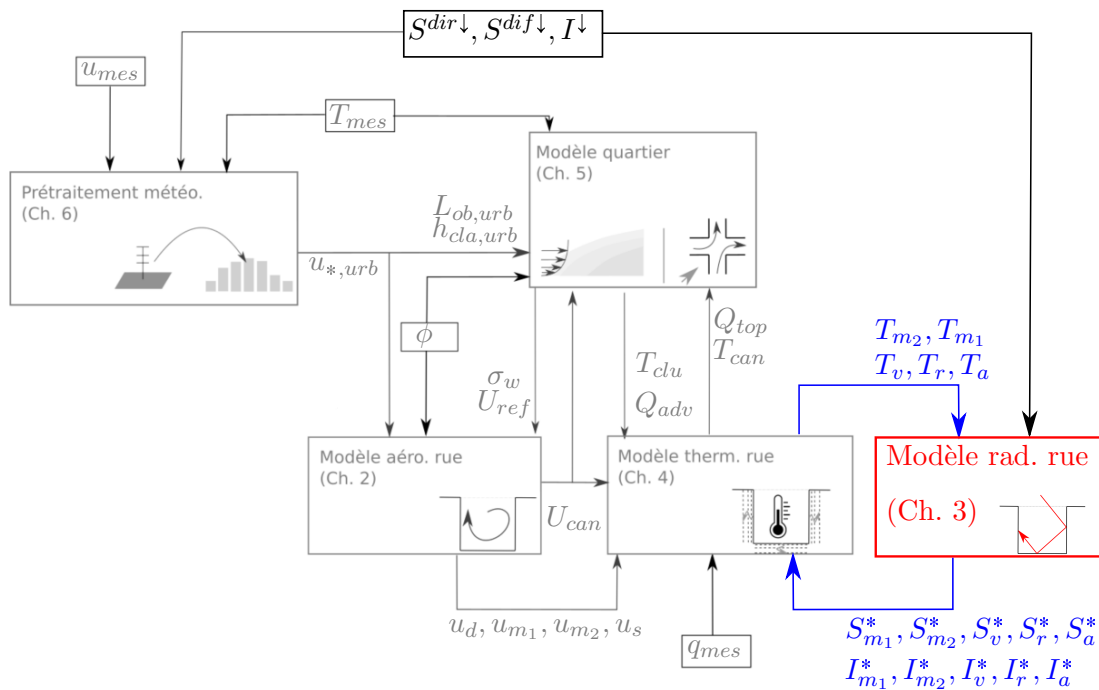


FIGURE 3.1 – Données d’entrée et résultats du modèle radiatif. ($S^{dir\downarrow}$, $S^{dif\downarrow}$, I^\downarrow [W/m^2] : densités de flux solaire direct, solaire diffus et infrarouge sur une surface horizontale ; T [K] : températures de surface ; S^* [W/m^2] : densité de flux solaire nette ; I^* [W/m^2] : densité de flux infrarouge nette. Les indices sont définis sur la Figure 3.2)

Géométrie considérée et paramètres du modèle

La géométrie considérée est représentée sur la Figure 3.2. Les grandeurs radiatives sont évaluées, sans subdivision par un maillage, sur cinq éléments : le mur 1, le mur 2 et le sol végétalisé, la route et les arbres, qui seront désignés respectivement par les indices m_1 , m_2 , v , r et a . Le sol est composé de la route et du sol végétalisé. Il est désigné par l’indice s . La surface fictive fermant la rue est désignée comme le ciel. L’impact des toits environnants est négligé.

Le sol végétalisé (ou végétation basse) est décrit par une fraction de recouvrement, notée f_v et détaillée sur la Figure 3.2. Il est donc supposé que la position précise du sol

végétalisé sur le sol de la rue ne joue aucun rôle. De la même façon, la fraction de route f_r est définie, et on a donc $f_v + f_r = 1$.

Les arbres sont considérés comme un seul élément, au sein duquel aucune subdivision n'est réalisée (ce qui correspond à l'approche *big leaf* [Lee & Park 2008]). Ils sont décrits comme un milieu semi-transparent, et sont caractérisés par :

- Une fraction horizontale de recouvrement f_a , définie sur la Figure 3.2. Ils n'ont donc aucune position horizontale précise.
- Une hauteur minimum et maximum du houppier, respectivement $H_{a,min}$ et $H_{a,max}$
- Une densité de feuillage, définie par le LAI_a (*Leaf Area Index*), qui représente la surface de feuillage par mètre carré au sol.

Enfin, sur chaque élément de la rue (chaque mur, le sol végétalisé, la route et les arbres), deux propriétés sont nécessaires :

- L'albédo (α), qui décrit la part de flux réfléchi en CLO
- L'émissivité (ϵ), qui décrit la part de flux émise en GLO.

Les murs et le sol de la rue sont considérés opaques.

Par ailleurs, la position (longitude, latitude), et la date et l'heure sont également nécessaires.

Choix de la méthode des radiosités

Les réflexions en CLO et GLO peuvent être modélisées de deux façons différentes [Howell *et al.* 2021a] :

- Par la méthode des radiosités, qui considère les réflexions et émissions diffuses, c'est-à-dire sans direction précise et suivant une répartition lambertienne (ou orthotrope)
- Par des méthodes capables de modéliser les réflexions spéculaires, comme le lancé de rayon.

Beaucoup de modèles de microclimat urbain utilisent la méthode des radiosités. C'est notamment le cas de Solene-microclimat [Bouyer 2009], et de la totalité des modèles de canopée urbaine étudiés au chapitre 1, par exemple BEP-Tree [Krayenhoff *et al.* 2014], ASLUM [Wang *et al.* 2021], UT&C [Meili *et al.* 2020], PUCM [Wang *et al.* 2013], VCWG [Moradi 2021], TEB [Redon 2017] et VUCM [Lee & Park 2008]. Le lancé de rayon est également utilisé dans certains modèles radiatifs : c'est le cas par exemple de QESRadiant [Overby *et al.* 2016] et CityComfort+ [Huang *et al.* 2014].

Le modèle développé dans ce chapitre emploie la méthode des radiosités. En effet, le nombre de surfaces considérées étant faible, elle permet un temps de calcul très réduit.

Bilans radiatifs de surface dans la rue

Tout au long de ce chapitre, le développement est présenté en deux temps : d'abord dans une rue canyon sans arbres, puis dans une rue canyon incluant une strate arborée. L'exposant 0 est ajouté pour désigner les grandeurs rapportées à la rue canyon sans arbres.

En CLO, le bilan de surface sur les murs, le sol végétalisé et la route est détaillé sur la Figure 3.3. Les différents termes du bilan sont :

- La radiosité J_i^{0clo} qui fait référence au flux quittant la surface, qui correspond en

3.1. Présentation générale du modèle

CLO au flux réfléchi

- Un flux issu des multiréflexions sur les autres surfaces, nommé S_i^{0refl}
- L'éclairement solaire diffus provenant du ciel nommé $S_i^{0dif\downarrow}$
- L'éclairement solaire direct provenant du ciel nommé $S_i^{0dir\downarrow}$.

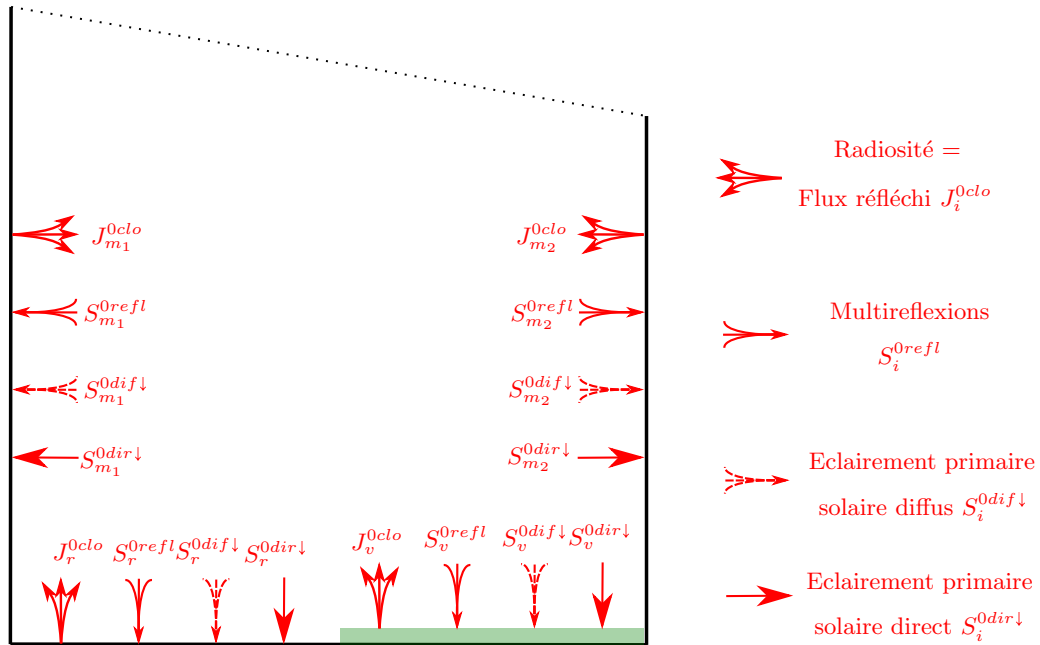


FIGURE 3.3 – Bilan des flux solaires dans une rue sans arbres

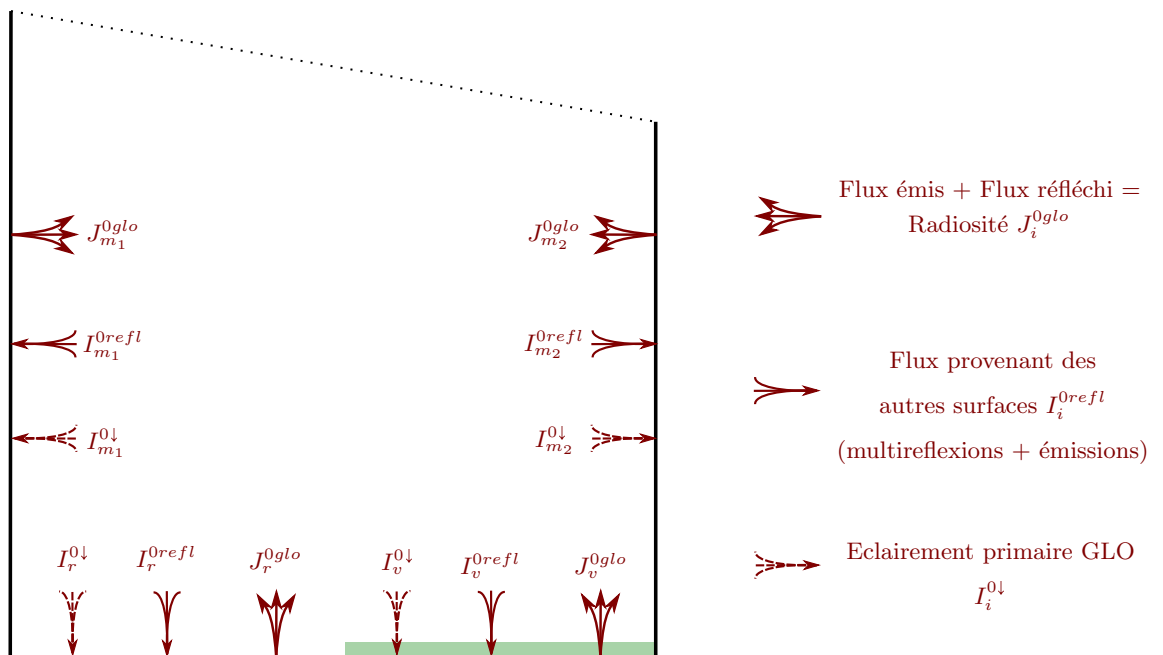
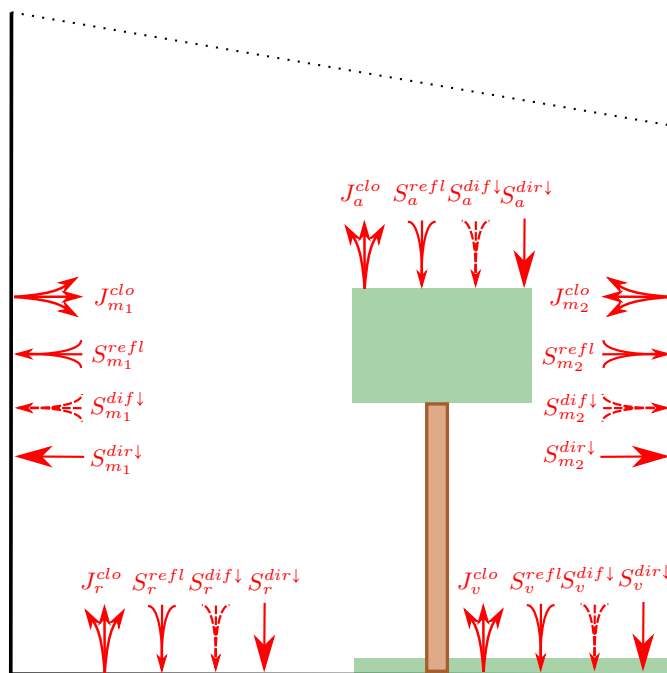
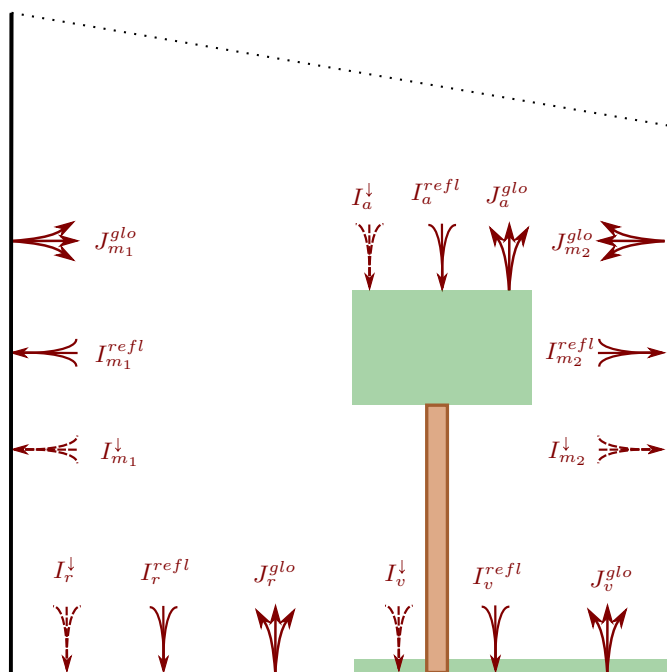


FIGURE 3.4 – Bilan des flux infrarouges dans une rue sans arbres



(a) Bande spectrale solaire



(b) Bande spectrale infrarouge

FIGURE 3.5 – Bilans de surface dans une rue intégrant des arbres

En GLO, les émissions des surfaces doivent être considérées, le bilan de surface sur les murs, le sol végétalisé et la route est donc légèrement différent. Il est représenté sur la Figure 3.4 et comprend :

- La radiosité J_i^{glo} qui fait référence au flux quittant la surface, et regroupe dans

ce cas le flux émis et réfléchi par la surface

- Un flux provenant des autres surfaces urbaines, soient des des multiréflexions et émissions, nommé I_i^{0refl}
- L'éclairement primaire infrarouge diffus provenant du ciel nommé $I_i^{0\downarrow}$.

Lorsque les arbres sont intégrés, les différents termes explicités au paragraphe précédent restent identiques. La seule différence consiste en l'ajout d'une zone de bilan supplémentaire. Les bilans de surface en CLO et GLO incluant les arbres sont représentés sur la Figure 3.5.

Dans une première partie, les éclairements primaires sont déterminés. Ensuite, les facteurs de forme sont calculés dans une deuxième partie. Enfin, les flux issus des multiréflexions sont abordés, pour finalement pouvoir exprimer les flux nets sur les surfaces. Dans chaque section, la rue sans arbres est d'abord considérée (exposant 0 utilisé pour les notations), avant de discuter l'intégration des arbres. Pour finir, une comparaison du modèle développé avec un modèle par lancé de rayons est effectuée.

3.2 Éclairements primaires

Cette première partie s'intéresse aux flux provenant directement du ciel, avant les multiréflexions, appelés éclairements primaires. L'objectif de cette partie est donc de déterminer sur chacun des éléments de la rue :

- L'éclairement primaire solaire direct sans arbres ($S_{m_1}^{0dir\downarrow}, S_{m_2}^{0dir\downarrow}, S_v^{0dir\downarrow}, S_r^{0dir\downarrow}$) et intégrant les arbres ($S_{m_1}^{dir\downarrow}, S_{m_2}^{dir\downarrow}, S_v^{dir\downarrow}, S_r^{dir\downarrow}, S_a^{dir\downarrow}$)
- L'éclairement primaire solaire diffus sans arbres ($S_{m_1}^{0dif\downarrow}, S_{m_2}^{0dif\downarrow}, S_v^{0dif\downarrow}, S_r^{0dif\downarrow}$) et intégrant les arbres ($S_{m_1}^{dif\downarrow}, S_{m_2}^{dif\downarrow}, S_v^{dif\downarrow}, S_r^{dif\downarrow}, S_a^{dif\downarrow}$)
- L'éclairement primaire infrarouge diffus sans arbres ($I_{m_1}^{0\downarrow}, I_{m_2}^{0\downarrow}, I_v^{0\downarrow}, I_r^{0\downarrow}$) et intégrant les arbres ($I_{m_1}^{\downarrow}, I_{m_2}^{\downarrow}, I_v^{\downarrow}, I_r^{\downarrow}, I_a^{\downarrow}$).

L'ensemble de ces grandeurs est exprimé en W/m^2 .

Avec la géométrie choisie, les éclairements primaires sur le sol végétalisé et la route sont strictement identiques. On a donc pour la rue sans arbres :

$$S_r^{0dir\downarrow} = S_v^{0dir\downarrow} \quad (3.1)$$

$$S_r^{0dif\downarrow} = S_v^{0dif\downarrow} \quad (3.2)$$

$$I_r^{0\downarrow} = I_v^{0\downarrow} \quad (3.3)$$

Les équations 3.1, 3.2 et 3.2 restent valables lorsque les arbres sont inclus.

3.2.1 Éclairements primaires dans une rue sans arbres

La rue canyon sans arbres est considérée dans un premier temps.

3.2.1.1 Éclairement primaire solaire direct

Pour le calcul de l'éclairement primaire solaire direct, les angles solaires sont nécessaires : l'angle azimutal (ϕ_{azi}) et l'angle zénithal (ϕ_{zen}) sont utilisés. Le calcul de ces angles ne dépend que de l'heure et du jour, ainsi que de la position (latitude,

longitude). Il n'est pas détaillé dans cette partie¹ et peut être trouvé dans [Vinet 2010].

Flux solaire direct entrant dans la rue

Tout d'abord, le flux solaire direct entrant dans la rue canyon va être déterminé. Pour cela, deux cas sont distingués selon le mur le plus haut et l'orientation du soleil par rapport à la rue (Figure 3.6). Dans le cas où le mur le plus petit est ensoleillé (Figure 3.6a), le flux total entrant est inférieur à celui que l'on aurait sur une surface plane dû à l'ombrage du mur le plus grand. Par un calcul géométrique, on obtient :

$$S_{can}^{dir\downarrow} = \max\left(0; \frac{W - |H_1 - H_2| \tan(\phi_{zen}) \sin(|\phi_{azi} - \phi_{can}|)}{W} S^{dir\downarrow}\right) \quad (3.4)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} W [m] : \text{La largeur de la rue} \\ H_1, H_2 [m] : \text{La hauteur des murs 1 et 2} \\ S_{can}^{dir\downarrow} [W/m^2] : \text{Flux incident solaire direct entrant dans la rue, ramené à la} \\ \text{surface horizontale de la rue} \\ S^{dir\downarrow} [W/m^2] : \text{Flux incident solaire direct sur une surface horizontale} \\ \phi_{zen} [rad] : \text{L'angle zénithal.} \end{cases}$$

Dans le cas où le mur le plus grand est ensoleillé (Figure 3.6b), le flux total entrant est supérieur à celui que l'on aurait sur une surface plane, dû à la partie verticale supplémentaire ensoleillée sur le mur le plus grand. Dans ce cas, l'expression suivante est utilisée :

$$S_{can}^{dir\downarrow} = S^{dir\downarrow} + \frac{|H_1 - H_2| \sin(|\phi_{azi} - \phi_{can}|) \tan(\phi_{zen})}{W} S^{dir\downarrow} \quad (3.5)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \phi_{azi} [rad] : \text{L'azimuth} \\ \phi_{can} [rad] : \text{L'orientation de l'axe de la rue par rapport au nord.} \end{cases}$$

Éclairement primaire solaire direct reçu par chaque face

Ensuite, l'éclairement primaire solaire direct sur chaque élément va être calculé géométriquement. Pour cela, le raisonnement suivant va être appliqué : pour que le sol soit éclairé, il faut que l'un des murs soit complètement ensoleillé. Si le flux total entrant dans la rue est supérieur à celui reçu par le mur ensoleillé s'il était éclairé en entier, le surplus est donc reçu par le sol.

Une première grandeur intermédiaire doit être déterminée : il s'agit de l'éclairement primaire solaire direct que recevrait un mur s'il était entièrement ensoleillé. Cette grandeur, nommée $S_{m,max}^{0dir\downarrow}$ (en W/m^2), est représentée sur la Figure 3.8a et se calcule par :

$$S_{m,max}^{0dir\downarrow} = \frac{H_i \tan(\phi_{zen}) \sin(|\phi_{azi} - \phi_{can}|)}{W} S^{dir\downarrow} \quad (3.6)$$

Dans cette équation, l'indice i correspond au mur ensoleillé, soit le mur 1 si $|\phi_{azi} - \phi_{can}| < \pi$ et le mur 2 sinon.

1. En pratique la fonction `get_position` de la librairie python `suncalc` est utilisée.

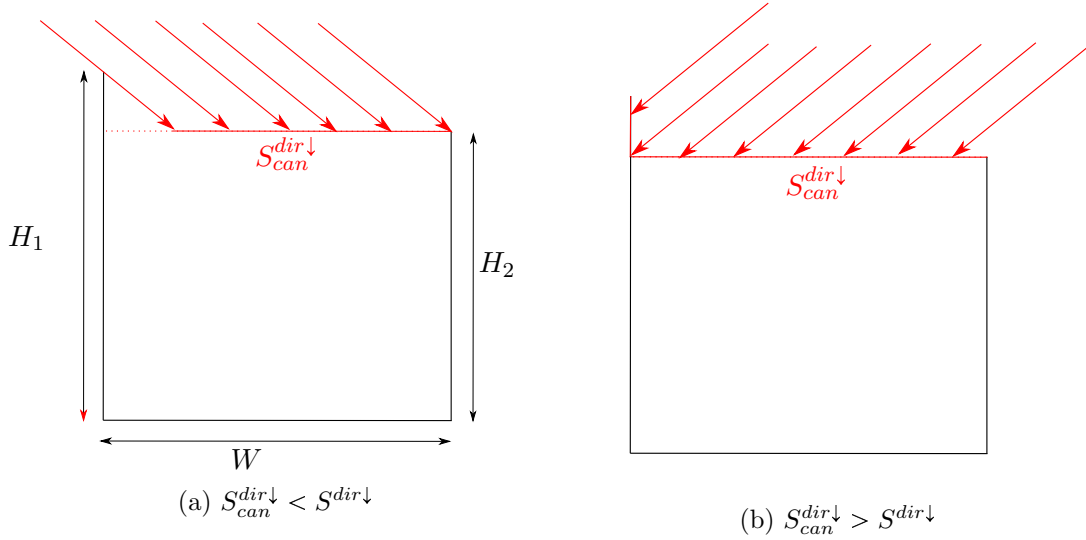


FIGURE 3.6 – Deux cas possibles pour le calcul du flux solaire direct entrant dans la rue

L'éclairement primaire solaire direct du sol est ensuite déduit de $S_{can}^{dir\downarrow}$ et de $S_{m,max}^{0dir\downarrow}$

$$S_r^{0dir\downarrow} = \max(0; S_{can}^{dir\downarrow} - S_{m,max}^{0dir\downarrow}) \quad (3.7)$$

L'éclairement primaire solaire direct des murs peut ensuite être aisément déterminé par déduction : Si $|\phi_{azi} - \phi_{can}| < \pi$:

$$S_{m_1}^{0dir\downarrow} = \frac{W(S_{can}^{dir\downarrow} - S_r^{0dir\downarrow})}{H_1} \quad \text{et} \quad S_{m_2}^{0dir\downarrow} = 0 \quad (3.8)$$

Si $|\phi_{azi} - \phi_{can}| > \pi$:

$$S_{m_2}^{0dir\downarrow} = \frac{W(S_{can}^{dir\downarrow} - S_r^{0dir\downarrow})}{H_2} \quad \text{et} \quad S_{m_1}^{0dir\downarrow} = 0 \quad (3.9)$$

3.2.1.2 Éclairéments primaires solaire diffus et infrarouge

L'hypothèse d'un ciel uniforme est choisie, ce qui permet d'utiliser les facteurs de vue du ciel pour évaluer les éclairéments primaires solaire diffus et infrarouge sur chaque face. Ainsi, les éclairéments primaires solaire diffus ($S_i^{0dif\downarrow}$ [W/m^2]) sont :

$$S_i^{0dif\downarrow} = S^{dif\downarrow} F_{i,c}^0 \quad (3.10)$$

Avec : $\begin{cases} S^{0dif\downarrow}$ [W/m^2] : Flux incident solaire diffus sur une surface horizontale \\ $F_{i,c}^0$ [-] : Les facteurs de vue du ciel dans une rue sans arbres \\ L'indice i représente le sol ou l'un des murs ($i = s, m_1$ ou m_2).

Les facteurs de vue de ciel seront calculés dans la partie 3.3.2.

De la même manière, les éclairéments primaires infrarouges ($I_i^{0\downarrow}$ [W/m^2]) sont calculés avec :

$$I_i^{0\downarrow} = I^\downarrow F_{i,c}^0 \quad (3.11)$$

Avec I^\downarrow [W/m^2] la densité de flux venant du ciel.

3.2.2 Modélisation des arbres

Une rue canyon incluant des arbres selon la géométrie de la Figure 3.2 est maintenant considérée. Avant de s'intéresser aux calculs des éclairagements primaires, l'atténuation due à un élément de feuillage est discutée.

3.2.2.1 Atténuation due à un élément de feuillage

Dans de nombreux modèles [Bouyer 2009, Redon 2017, Krayenhoff *et al.* 2014], les arbres sont considérés comme un milieu semi-transparent. Dans ce cas, le rayonnement s'atténue au sein du feuillage selon une exponentielle décroissante, dérivée de la loi de Beer-Lambert :

$$S_1 = S_0 \exp(-kdLAD_d) \quad (3.12)$$

Avec :

- S_0, S_1 [W/m^2] : Le rayonnement avant et après l'élément d'arbre, tel que représenté sur la Figure 3.7
- d [m] : L'épaisseur de feuillage traversée par les rayons
- LAD_d [m^2/m^3] : *Leaf Area Density* moyen sur l'épaisseur traversée
- k [-] : coefficient d'extinction lié à l'orientation des feuilles, pris égal à 0,5 pour une orientation aléatoire.

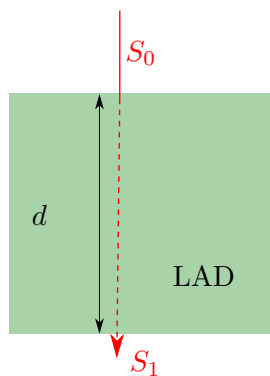


FIGURE 3.7 – Atténuation du rayonnement par un élément de feuillage

La densité du feuillage peut ainsi être caractérisée par un paramètre appelé *Leaf Area Density*, qui représente la surface cumulée des feuilles contenues dans $1 m^3$ de feuillage (d'un seul côté). Dans le modèle radiatif développé dans ce chapitre, le feuillage n'est pas discrétisé. Les arbres sont donc décrits par un autre paramètre, le *Leaf Area Index*, qui est défini comme la surface totale de feuilles pour $1 m^2$ au sol. Le lien entre ces deux paramètres est donné par :

$$LAI = \int_{H_{a,min}}^{H_{a,max}} LAD(z) dz \quad (3.13)$$

Avec $H_{a,min}$ et $H_{a,max}$ les hauteurs minimum et maximum du houppier. Pour une densité de feuillage uniforme, on obtient donc :

$$LAI = LAD(H_{a,max} - H_{a,min}) \quad (3.14)$$

3.2.2.2 Éclairement primaire solaire direct

Une partie du flux solaire entrant dans la rue est interceptée par le feuillage, diminuant ici les éclairements primaires solaire direct des murs et du sol. Dans cette partie, le rayonnement intercepté par les arbres est d'abord calculé. Il sera ensuite soustrait des éclairement primaires solaire direct sans arbres déjà calculés.

Une deuxième grandeur intermédiaire est calculée : il s'agit de l'éclairement primaire solaire direct que recevrait la partie du mur au dessus des arbres, si elle était totalement ensoleillée (schématisée Figure 3.8b). Elle est déterminée par :

$$S_{m,top,max}^{dir\downarrow} = \frac{(H_i - H_{a,moy}) \tan(\phi_{zen}) \sin(|\phi_{azi} - \phi_{can}|)}{W} S^{dir\downarrow} \quad (3.15)$$

Avec :

$$\begin{cases} H_i [m] : \text{La hauteur du mur 1 ou 2, selon le mur qui est éclairé} \\ H_{a,moy} [m] : \text{La hauteur moyenne du houppier des arbres.} \end{cases}$$

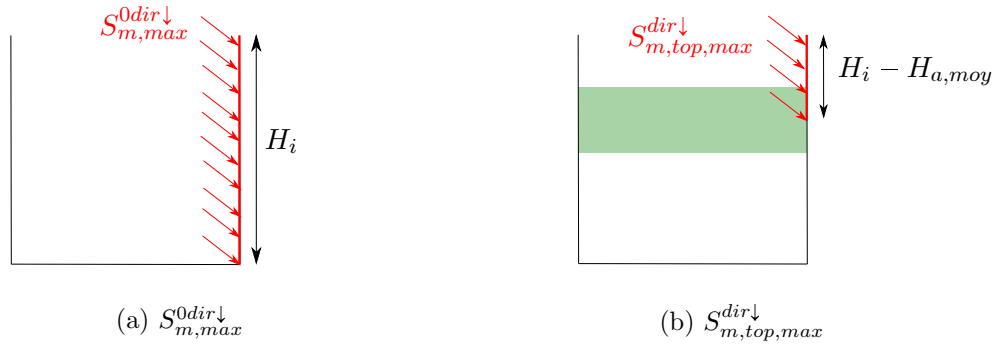


FIGURE 3.8 – Définitions des grandeurs intermédiaires utilisées pour déterminer le flux solaire direct sur les arbres et le sol

Le rayonnement solaire direct intercepté par les arbres est ensuite calculé par l'équation suivante, inspirée du modèle TEB [Redon 2017] :

$$S_a^{dir\downarrow} = \frac{W f_a}{A_a^{rad}} (1 - \exp(-k LAI_a)) \max(0; S_{can}^{dir\downarrow} - S_{m,top,max}^{dir\downarrow}) \quad (3.16)$$

Avec :

$$\begin{cases} S_a^{dir\downarrow} [W/m^2] : \text{L'éclairement primaire solaire direct des arbres (après} \\ \text{transmission), égal au rayonnement solaire direct intercepté par les arbres} \\ \text{avant multiréflexions} \\ f_a [-] : \text{La fraction horizontale de recouvrement des arbres dans la rue} \\ A_a^{rad} [m] : \text{La longueur associée aux arbres, qui sera déterminée avec les} \\ \text{facteurs de forme (équation 3.35).} \end{cases}$$

Dans cette équation, un coefficient $(1 - \exp(-kLAI_a))$ est ajouté pour tenir compte de la partie transmise à travers le feuillage. Ce coefficient se base sur une atténuation du rayonnement par le feuillage selon une exponentielle décroissante, décrit par l'équation 3.12. Le terme $dLAD_d$ dans l'exponentielle de l'équation 3.12 est donc ici supposé égal au LAI_a , l'épaisseur de feuillage traversée est donc $d = H_{a,max} - H_{a,min}$. Cela implique un volume de feuillage traversé par le rayonnement représenté sur la Figure 3.9b. Ce volume n'est pas réparti de la même façon que le volume effectivement traversé par les rayons, tracé sur la Figure 3.9a. Les deux volumes sont toutefois égaux.



(a) Feuillage traversé par les rayons (b) Hypothèse utilisée dans l'équation 3.16

FIGURE 3.9 – Hypothèse pour la prise en compte du rayonnement solaire direct transmis par le feuillage

Enfin, les éclairements primaires sur les murs et le sol peuvent être déduits en soustrayant de l'éclaircement primaire sans arbres le rayonnement intercepté par les arbres. Ainsi, l'éclaircement primaire du sol s'écrit :

$$S_r^{dir\downarrow} = \max(0; S_{can}^{dir\downarrow} - S_{m,max}^{0dir\downarrow} - \frac{A_a^{rad}}{W} S_a^{dir\downarrow}) \quad (3.17)$$

Cette équation suppose que lorsque le sol est ensoleillé, l'ombre des arbres n'est que sur le sol, puisque la grandeur intermédiaire $S_{m,max}^{0dir\downarrow}$ (Figure 3.8a) ne tient pas compte des arbres. Cette hypothèse est inspirée du modèle TEB [Redon 2017].

Les éclairements primaires solaires directs des murs sont ensuite déterminés par déduction : Si $|\phi_{azi} - \phi_{can}| < \pi$:

$$S_{m_1}^{dir\downarrow} = \frac{W(S_{can}^{dir\downarrow} - S_r^{dir\downarrow}) - A_a^{rad} S_a^{dir\downarrow}}{H_1} \quad \text{et } S_{m_2}^{dir\downarrow} = 0 \quad (3.18)$$

Si $|\phi_{azi} - \phi_{can}| > \pi$:

$$S_{m_2}^{dir\downarrow} = \frac{W(S_{can}^{dir\downarrow} - S_r^{dir\downarrow}) - A_a^{rad} S_a^{dir\downarrow}}{H_2} \quad \text{et } S_{m_1}^{dir\downarrow} = 0 \quad (3.19)$$

Ces équations reviennent à dire que le rayonnement solaire entrant dans la rue qui n'est reçu ni par les arbres, ni par le sol, est reçu par le mur ensoleillé.

3.2.2.3 Éclairements primaires solaires diffus et infrarouge

L'impact des arbres sur le flux solaire diffus et le flux infrarouge est pris en compte dans les facteurs de vue de ciel $F_{i,c}$, qui tiennent compte des arbres. Ces derniers seront calculés dans la partie suivante. L'équation permettant de calculer les éclairements

primaires solaires diffus ($S_i^{dif\downarrow}$ [W/m^2]) reste donc :

$$S_i^{dif\downarrow} = S^{dif\downarrow} F_{i,c} \quad (3.20)$$

Où l'indice i fait référence au sol, aux murs ou aux arbres.

De même, les éclairements primaires infrarouges (I_i^\downarrow [W/m^2]) sont :

$$I_i^\downarrow = I^\downarrow F_{i,c} \quad (3.21)$$

Les facteurs de forme incluant les arbres jouent donc ici un rôle important et seront détaillés dans la section suivante.

3.3 Facteurs de forme

Le calcul des facteurs de forme est un point crucial du modèle radiatif. Notamment, les arbres étant considérés comme un milieu semi-transparent, leur prise en compte est délicate. Après avoir rappelé quelques généralités, nous nous intéresserons d'abord aux facteurs de forme dans une rue sans arbres, avant d'aborder la prise en compte des arbres.

3.3.1 Généralités

On définit le facteur de forme F_{ij} comme la fraction d'un flux quittant la surface i de façon diffuse qui atteint la surface j [Howell *et al.* 2021a] :

$$\Phi_{ij} = \Phi_i F_{ij} \quad (3.22)$$

Avec : $\begin{cases} \Phi_i [W] : \text{Le flux radiatif quittant la surface } i \text{ de façon diffuse} \\ \Phi_{ij} [W] : \text{Le flux radiatif quittant la surface } i \text{ de façon diffuse et reçu par la} \\ \text{surface } j \end{cases}$

Si les surfaces i et j sont considérées infinitésimales et que le rayonnement est diffus, il est possible d'exprimer le facteur de forme en faisant intervenir les angles formés par ces surfaces avec leurs normales θ_i et θ_j respectivement (Figure 3.10) :

$$dF_{ij} = \frac{\cos(\theta_i) \cos(\theta_j)}{\pi d^2} dA_j \quad (3.23)$$

Avec : $\begin{cases} \theta_i, \theta_j [rad] : \text{Les angles tels que définis sur la Figure 3.10} \\ dA_j [m^2] : \text{L'aire de la surface } j \end{cases}$

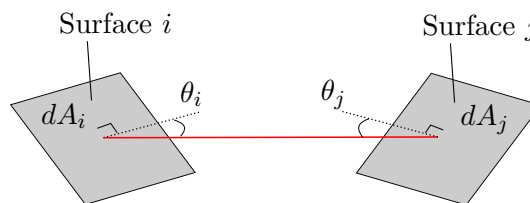


FIGURE 3.10 – Définition des facteurs de forme entre deux surfaces infinitésimales

En observant la symétrie entre i et j dans l'équation 3.23, on arrive au principe de réciprocité, qui s'écrit :

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji} \quad (3.24)$$

Avec A_i et A_j [m^2] l'aire des surfaces i et j .

Par ailleurs, selon le principe de complémentarité, dans une enceinte fermée, la somme de tous les facteurs de forme caractérisant un flux quittant une même surface i vaut 1, soit :

$$\sum_j^N F_{ij} = 1 \quad (3.25)$$

Où les surfaces j sont les autres surfaces de l'enceinte fermée.

3.3.2 Facteurs de forme dans une rue sans arbre

Le but de cette partie est de déterminer les facteurs de forme définis sur la Figure 3.11. La route et le sol végétalisé ne sont pas distingués ici, et l'indice s est utilisé pour le sol. Le ciel est considéré comme une surface fictive, le problème correspond donc à une enceinte fermée, ce qui permet d'appliquer la complémentarité.

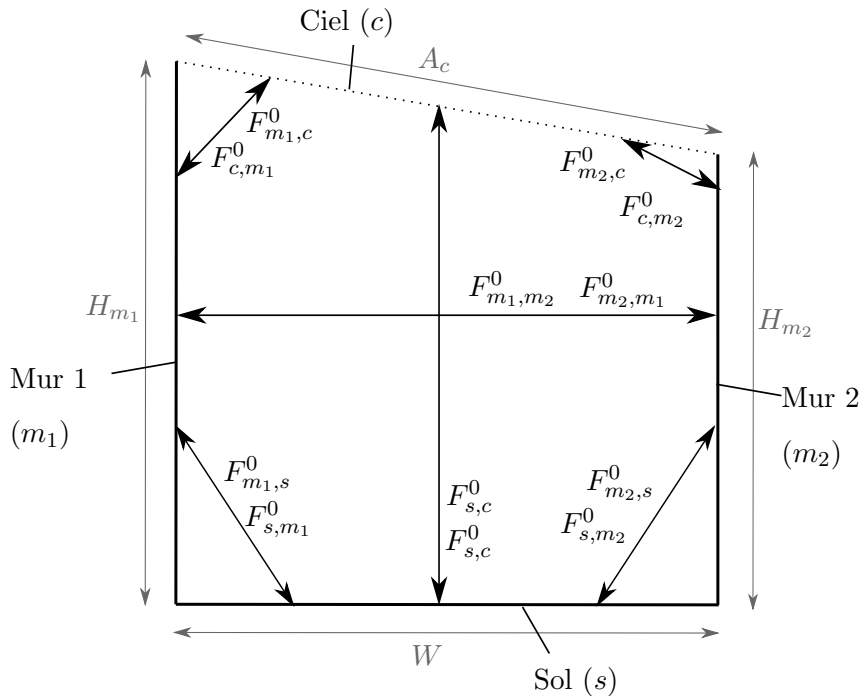


FIGURE 3.11 – Définition des facteurs de formes dans la rue sans arbres

Dans ce cas d'étude, des solutions analytiques existent [Howell *et al.* 2021b]. Ainsi, entre les deux murs, qui sont deux rectangles semi-infinis parallèles de hauteur H_1 et H_2

distants de W et infinis dans la longueur, le facteur de forme est :

$$F_{m_i, m_j}^0 = \frac{1}{2H_i} \left[\sqrt{(H_i)^2 + W^2} + \sqrt{(H_j)^2 + W^2} - \sqrt{(H_j - H_i)^2 + W^2} - W \right] \quad (3.26)$$

De la même manière, entre le sol et un mur, qui sont deux rectangles semi-infinis perpendiculaires de largeur W et H_i infinis dans la longueur, une solution analytique existe :

$$F_{s, m_i}^0 = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{H_i}{W} - \sqrt{1 + \left(\frac{H_i}{W} \right)^2} \right] \quad (3.27)$$

L'application de la réciprocité et la complémentarité permet ensuite de déterminer les facteurs de forme décrivant les flux quittant les murs et le sol :

$$\begin{aligned} F_{m_i, s}^0 &= \frac{W}{H_i} F_{s, m_i}^0 \\ F_{m_i, c}^0 &= 1 - F_{m_i, m_j}^0 - F_{m_i, s}^0 \\ F_{s, c}^0 &= 1 - F_{r, m_1}^0 - F_{r, m_2}^0 \end{aligned} \quad (3.28)$$

Ensuite, la réciprocité permet de calculer les facteurs de forme manquant :

$$\begin{aligned} F_{c, m_i}^0 &= \frac{H_i}{A_c} F_{m_i, c}^0 \\ F_{c, s}^0 &= \frac{W}{A_c} F_{r, c}^0 \end{aligned} \quad (3.29)$$

Avec $A_c = \sqrt{W^2 + (H_1 - H_2)^2}$ [m] la longueur qui ferme le sommet de la rue.

3.3.3 Modélisation des arbres

Le fait d'intégrer les arbres comme un nouvel élément nécessite de faire appel à un autre ensemble de facteurs de forme, définis sur la Figure 3.12. Pour cela, une première section est consacrée à l'état de l'art. Les facteurs de forme sont ensuite calculés à l'aide de transmittances, qui sont finalement déterminées dans la dernière section.

3.3.3.1 Etat de l'art

De nombreux modèles de climat urbain utilisent la méthode des radiosités, et doivent donc déterminer des facteurs de forme en incluant des arbres. Notamment, de nombreux modèles de canopée urbaine font intervenir des facteurs de forme similaires à ceux définis sur la Figure 3.12, tels BEP-Tree [Krayenhoff *et al.* 2014], ASLUM [Wang *et al.* 2021], UT&C [Meili *et al.* 2020], PUCM [Wang *et al.* 2013], VCWG [Moradi 2021], TEB [Redon 2017] et VUCM [Lee & Park 2008]. Le Tableau 3.1 résume les méthodes de calcul et géométries choisies pour les différents modèles.

Une première alternative est de modéliser des transmittances τ permettant d'exprimer les facteurs de forme en incluant les arbres :

$$F_{i, j} = \tau_{i, j} F_{i, j}^0 \quad (3.30)$$

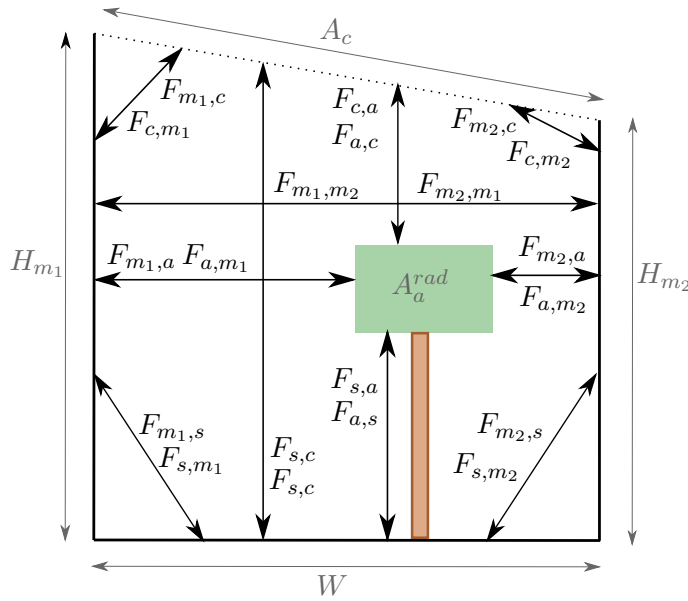


FIGURE 3.12 – Définition des facteurs de formes dans la rue

Avec : $\begin{cases} F_{i,j} [-] : \text{Le facteur de forme entre } i \text{ et } j, \text{ incluant l'effet des arbres} \\ F_{i,j}^0 [-] : \text{Le facteur de forme qu'on aurait en l'absence d'arbres} \\ i \text{ et } j \text{ font référence à n'importe quelle surface (hormis les arbres).} \end{cases}$

Les modèles TEB [Redon 2017] et VUCM [Lee & Park 2008] ont fait ce choix. Dans ces deux modèles quatre transmittances sont calculées (avec les deux murs de même hauteur), en considérant que les arbres n'ont pas de position horizontale précise mais une fraction de recouvrement horizontale (Géométrie A sur la Figure 3.13).

Une deuxième option est de calculer directement les facteurs de forme de la scène incluant les arbres, ce qui oblige à définir une forme précise pour les arbres. Par exemple, dans les modèles VCWG [Moradi 2021], PUCM [Wang *et al.* 2013], ASLUM [Wang *et al.* 2021] et UT&C [Meili *et al.* 2020], la géométrie B de la Figure 3.13 a été choisie.

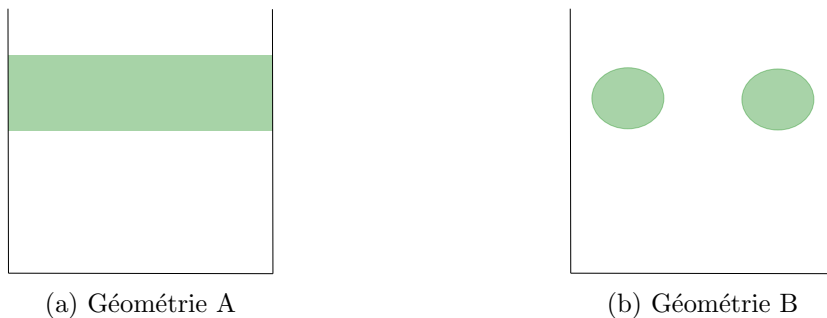


FIGURE 3.13 – Géométries utilisées dans les différents modèles pour représenter les arbres

Du lancé de rayons est utilisé dans PUCM et VCWG pour développer une modélisation paramétrique des facteurs de forme. En revanche, le nombre de

paramètres variables est dans ce cas limité : ainsi, la position de la couronne est fixée et les arbres sont considérés opaques. Au contraire, dans plusieurs modèles tels ASLUM, UT&C et BEP-tree [Krayenhoff *et al.* 2014], le lancé de rayons est inclus au code, ce qui permet de calculer les facteurs de forme quelle que soit la configuration.

Comme dans TEB et VUCM, des transmittances sont utilisées dans MATHIS, associées à la géométrie A de la Figure 3.13.

	Méthode de calcul	Géométrie des arbres	Exemples de modèles
	Formules analytiques simplifiées pour les transmittances	Géométrie A Paramètres : - Géométrie de la rue - Fraction de recouvrement horizontale - Hauteur du houppier - LAD	TEB, VUCM
Niveau de détail croissant ↓	Prétraitement par lancé de rayons	Géométrie B Paramètres : - Géométrie de la rue - Taille de la couronne	PUCM, VCWG
	Lancé de rayons inclus dans le code	Géométrie B Paramètres : - Géométrie de la rue - Taille de la couronne - Position de la couronne - LAD (sauf UT&C)	ASLUM, UT&C
		Géométrie et LAD modulaires	BEP-tree

TABLE 3.1 – Modélisation des facteurs de forme incluant les arbres (TEB : [Redon 2017]; VUCM : [Lee & Park 2008]; PUCM : [Wang *et al.* 2013]; VCWG : [Moradi 2021]; ASLUM : [Wang *et al.* 2021]; UT&C : [Meili *et al.* 2020]; BEP-Tree : [Krayenhoff *et al.* 2014])

3.3.3.2 Modélisation des facteurs de forme à partir de transmittances

Autant de transmittances τ sont définies que de facteurs de forme dans la rue sans arbres (Figure 3.11), caractérisant l’interception du feuillage dans chaque cas. Ces transmittances seront déterminées dans la partie suivante.

Selon l’équation 3.30, certains facteurs de forme peuvent être directement obtenus à

partir des transmittances :

$$\begin{aligned}
 F_{m_i, m_j} &= \tau_{m_i, m_j} F_{m_i, m_j}^0 \\
 F_{m_i, s} &= \tau_{m_i, s} F_{m_i, s}^0 \\
 F_{s, m_i} &= \tau_{m_i, s} F_{s, m_i}^0 \\
 F_{m_i, c} &= \tau_{m_i, c} F_{m_i, c}^0 \\
 F_{c, m_i} &= \tau_{m_i, c} F_{c, m_i}^0 \\
 F_{c, s} &= \tau_{c, s} F_{c, s}^0 \\
 F_{s, c} &= \tau_{c, s} F_{s, c}^0
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

Contrairement aux facteurs de forme, les transmittances n'ont pas de direction et $\tau_{i,j} = \tau_{j,i}$. Les facteurs de forme impliquant les arbres sont ensuite déterminés par complémentarité :

$$\begin{aligned}
 F_{m_i, a} &= 1 - F_{m_i, m_j} - F_{m_i, s} - F_{m_i, c} \\
 F_{s, a} &= 1 - F_{s, m_1} - F_{s, m_2} - F_{s, c} \\
 F_{c, a} &= F_{c, m_1} - F_{c, m_2} - F_{c, s}
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

Enfin, la complémentarité est également utilisée vis-à-vis du rayonnement quittant les arbres, soit :

$$F_{a, m_1} + F_{a, m_2} + F_{a, s} + F_{a, c} = 1 \tag{3.33}$$

Chacun des termes de cette équation est ensuite exprimé par réciprocity selon :

$$\begin{aligned}
 F_{a, m_1} &= \frac{H_1}{A_a^{rad}} F_{m_1, a} \\
 F_{a, m_2} &= \frac{H_2}{A_a^{rad}} F_{m_2, a} \\
 F_{a, s} &= \frac{W}{A_a^{rad}} F_{s, a} \\
 F_{a, c} &= \frac{A_c}{A_a^{rad}} F_{c, a}
 \end{aligned} \tag{3.34}$$

Dans ces équations, la longueur associée aux arbres A_a^{rad} intervient pour la première fois. En remplaçant par les équations 3.34 les termes de l'équation 3.33, il est possible d'isoler ce terme :

$$A_a^{rad} = H_1 F_{m_1, a} + H_2 F_{m_2, a} + A_c F_{c, a} + W F_{s, a} \tag{3.35}$$

La longueur associée aux arbres A_a^{rad} est déterminée par l'équation 3.35, elle est donc fictive, et ne correspond ni à une tranche dans le feuillage ($2W$), ni au périmètre du feuillage ($2W(H_{a, max} - H_{a, min})$), mais se situe entre les deux.

Finalement on obtient les facteurs de forme caractérisant le rayonnement quittant les arbres :

$$\begin{aligned}
 F_{a, c} &= \frac{A_c}{A_a^{rad}} F_{c, a} \\
 F_{a, s} &= \frac{W}{A_a^{rad}} F_{s, a} \\
 F_{a, m_i} &= \frac{H_i}{A_a^{rad}} F_{m_i, a}
 \end{aligned} \tag{3.36}$$

3.3.3.3 Calcul des transmittances

Configurations étudiées

Il a été choisi d'utiliser du lancé de rayons pour le calcul des transmittances, mais sans l'intégrer directement à MATHIS, de manière à limiter le temps de calcul. Une base de données est donc construite, depuis laquelle les valeurs seront interpolées.

De manière à limiter la taille de cette base de données, trois cas seulement sont retenus pour le lancé de rayons, représentés sur la Figure 3.14. Cela revient à ne pas considérer deux tailles de murs différentes pour τ_{m_1, m_2} , soit :

$$\tau_{m_1, m_2} = \tau_{m_2, m_1} = \tau_{mm} \quad (3.37)$$

De même, τ_{sc} est calculé avec deux murs de même taille, selon la configuration de la Figure 3.14c. En revanche, τ_{m_1s} et τ_{m_2s} d'une part, et τ_{m_1c} et τ_{m_2c} d'autre part n'ont pas besoin d'être identiques. En effet, la conservation de l'énergie dans la rue est déjà assurée par la complémentarité (équations 3.32).

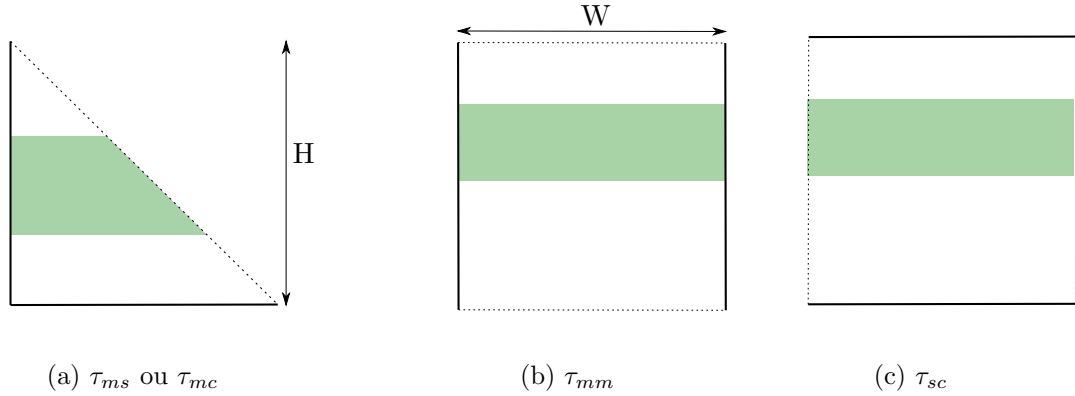


FIGURE 3.14 – Configurations utilisées pour le calcul des transmittances par lancé de rayons

L'atténuation par les arbres est modélisée par une exponentielle décroissante dépendant de l'épaisseur de feuillage traversé, de la façon décrite à la partie 3.2.2.1. Seuls les paramètres influençant les termes à l'intérieur de l'exponentielle doivent être considérés variables. La fraction de recouvrement horizontale f_a est dissociée des autres facteurs, et peut être facilement ajoutée par la suite, selon :

$$\tau_{i,j} = 1 - f_a(1 - \tau_{i,j}|_{f_a=1}) \quad (3.38)$$

Avec : $\begin{cases} \tau_{i,j} [-] : \text{La transmittance entre deux surfaces } i \text{ et } j \\ \tau_{i,j}|_{f_a=1} [-] : \text{La transmittance entre deux surfaces } i \text{ et } j \text{ avec } f_a = 1. \end{cases}$

Cinq paramètres sont considérés variables pour le calcul de la base de données :

- La hauteur des murs H , prise entre 5m et 50m
- La largeur de la rue W , prise entre 5m et 50m
- Le LAD (considéré uniforme sur le feuillage, soit $LAD = LAI / (H_{a,max} - H_{a,min})$), pris entre 0,1 et 5
- La hauteur minimum du houppier $H_{a,min}$, prise entre 0 et 5m

- La hauteur maximum du houppier $H_{a,max}$, prise entre 1 et 20m, et toujours supérieure à $H_{a,min}$.

Pour constituer la base de données, 500 000 rayons ont été lancés pour déterminer les transmittances dans chaque cas. Neuf variations entre les bornes de chacun des cinq paramètres ont été prises, soit onze valeurs possibles en comptant les bornes. Le nombre total de configurations présentes dans la base de données est donc de $11^5 = 161051$.

Exemple du calcul de τ_{ms} ou τ_{mc}

Le détail du raisonnement est donné dans le cas mur-sol ou mur-ciel, présenté sur la Figure 3.15. Bien que la rue soit considérée infinie, il n'est pas possible de se limiter à deux dimensions. Il faut au contraire définir une longueur L suffisamment grande pour correspondre à l'hypothèse de rue infinie, choisie ici à 100 m. Le facteur de forme est d'abord calculé sans arbres (F^0), puis en incluant les arbres (F), et la transmittance est ensuite déterminée par :

$$\tau = \frac{F}{F^0} \quad (3.39)$$

Le facteur de forme sans arbres sert également à confronter la méthode à la solution analytique (équation 3.27). Cela permet de valider le choix du nombre de rayons lancés ainsi que la longueur de la rue L pour obtenir des résultats satisfaisants.

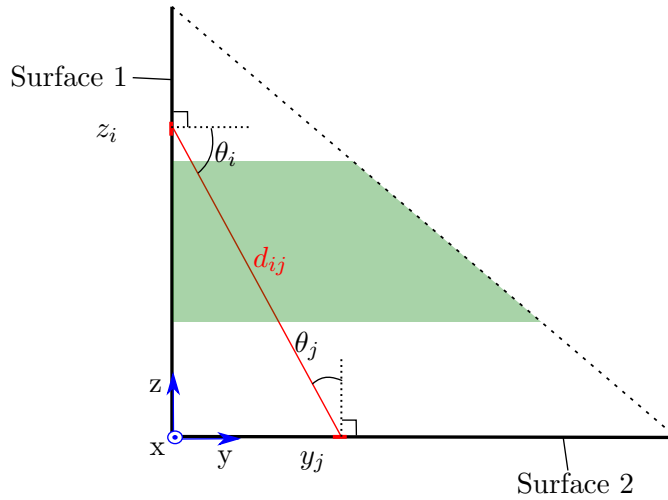


FIGURE 3.15 – Détail du lancé de rayons pour un rayon mur-sol

Tout d'abord, deux points sont tirés au sort : l'un appartenant à la surface 1 (Figure 3.15), de coordonnées $(x_i; y = 0; z_i)$ et l'autre appartenant à la surface 2, de coordonnées $(x_j; y_j; z = 0)$. La définition des facteurs de forme infinitésimaux (équation 3.23) est ensuite utilisée. Pour cela, les angles θ_i , θ_j et la longueur d_{ij} , définis sur la Figure 3.15 sont déterminés en fonction des coordonnées, selon :

$$\begin{aligned} \cos(\theta_i) &= \frac{y_j}{d_{ij}} \\ \cos(\theta_j) &= \frac{z_i}{d_{ij}} \\ d_{ij} &= \sqrt{y_j^2 + z_i^2 + (x_i - x_j)^2} \end{aligned} \quad (3.40)$$

En remplaçant les différents termes dans l'équation 3.23 et en transformant l'intégrale continue en une somme discrète, le facteur de forme entre les surfaces 1 et 2 sans arbres est :

$$F_{1,2}^0 = \frac{LH}{N} \sum_1^N \frac{z_i y_j}{\pi d_{ij}^4} \quad (3.41)$$

Avec :

- H [m] : La hauteur du mur
- L [m] : La longueur de la rue, supposée infinie, donc en pratique suffisamment grande
- N [-] : Le nombre de rayons lancés
- d_{ij} [m] : La distance entre les deux points tirés aux sort sur chaque surface, donnée par : $d_{ij} = \sqrt{y_j^2 + z_i^2 + (x_i - x_j)^2}$
- x_i, z_i, x_j, y_j [m] : Les points des surfaces 1 et 2 respectivement, tirés au sort à chaque rayon.

Ensuite, le facteur de forme incluant les arbres avec $f_a = 1$ est calculé sur le même cas d'étude, en décrivant l'absorption des arbres par l'équation 3.12 :

$$F_{1,2}|_{f_a=1} = \frac{LH}{N} \sum_1^N \frac{z_i y_j}{\pi d_{ij}^4} \exp\left(-k \int_{d_{ij}} LAD(l) dl\right) \quad (3.42)$$

Equations pour le calcul de $\tau_{m,m}$ et $\tau_{s,c}$

Le raisonnement suivi pour les transmittances mur-mur et sol-ciel est très similaire et n'est pas détaillé. On obtient un facteur de forme pour le cas mur-mur avec une fraction d'arbres de 1 par :

$$F_{m,m}|_{f_a=1} = \frac{LH}{N} \sum_1^N \frac{W^2}{\pi d_{ij}^4} \exp\left(-k \int_{d_{ij}} LAD(l) dl\right) \quad (3.43)$$

Avec :

- W [m] : La largeur de la rue
- d_{ij} : La longueur du rayon.

De même, pour le cas sol-ciel, le facteur de forme avec $f_a = 1$ est calculé par :

$$F_{s,c}|_{f_a=1} = \frac{LW}{N} \sum_1^N \frac{H^2}{\pi d_{ij}^4} \exp\left(-k \int_{d_{ij}} LAD(l) dl\right) \quad (3.44)$$

Erreurs d'interpolation

Pour évaluer si la finesse de la base de données est acceptable, 100 points ont été tirés au sort dans l'espace des paramètres. Pour chacun d'eux, l'erreur due à une interpolation multilinéaire en cinq dimensions dans la base de données [Beveridge 2013] a été calculée

	τ_{mm}	$\tau_{m;s}$ OU $\tau_{m;c}$	τ_{sc}
Erreur moyenne	0,009	0,01	0,01
Erreur maximum	0,09	0,07	0,13
Ecart-type	0,02	0,01	0,02

TABLE 3.2 – Erreurs dues à l’interpolation dans la base de données pour les 3 configurations différentes, déterminées sur 100 points tirés au sort dans l’espace des paramètres comparés à du lancé de rayons avec 2 000 000 rayons

en comparant avec du lancé de rayons avec un grand nombre de rayons (2 000 000), et est présentée sur le Tableau 3.2. Le détail des 100 points aléatoires et des erreurs obtenues dans chaque cas est donné en Annexe C.

Si sur quelques cas, l’erreur peut être relativement importante - 0,13 est en effet important pour un paramètre variant entre 0 et 1 -, en moyenne, l’erreur due à l’interpolation est tout à fait satisfaisante. Les écart-types des erreurs étant ne dépassant pas 0,02, soit 2% de l’amplitude des variations possibles, la finesse de la base de donnée est considérée acceptable.

3.4 Modélisation des flux nets

L’objectif de cette partie est de déterminer les flux nets absorbés par chaque élément en CLO et GLO. Plus précisément, deux flux supplémentaires sont nécessaires pour compléter le bilan de surface :

- La densité de flux quittant la surface ou radiosité (J_i^{0clo} / J_i^{clo} en CLO, J_i^{0glo} / J_i^{glo} en GLO)
- La densité de flux arrivant à la surface issue des autres surfaces urbaines (multiréflexions et émissions) (S_i^{0refl} / S_i^{refl} en CLO, I_i^{0refl} / I_i^{refl} en GLO)

Les flux nets seront ensuite directement déduits de ces grandeurs.

3.4.1 Flux nets dans une rue sans arbres

3.4.1.1 Courtes longueurs d’ondes

Tout d’abord, le flux issu des multiréflexions est exprimé à l’aide des facteurs de formes déterminés à la partie précédente :

$$\begin{aligned}
 S_{m_1}^{0refl} &= F_{m_1,m_2}^0 J_{m_2}^{0clo} + F_{m_1,s}^0 (f_v J_v^{0clo} + f_r J_r^{0clo}) \\
 S_{m_2}^{0refl} &= F_{m_2,m_1}^0 J_{m_1}^{0clo} + F_{m_2,s}^0 (f_v J_v^{0clo} + f_r J_r^{0clo}) \\
 S_r^{0refl} &= F_{s,m_1}^0 J_{m_1}^{0clo} + F_{s,m_2}^0 J_{m_2}^{0clo} \\
 S_v^{0refl} &= S_r^{0refl}
 \end{aligned} \tag{3.45}$$

Dans ces équations, aucune longueur n’intervient. Cela s’explique par l’utilisation de la réciprocité des facteurs de forme, qui permet de simplifier les longueurs. Un système de quatre équations peut ensuite être écrit, en exprimant les radiosités sur chaque face

comme le flux réfléchi :

$$\begin{aligned}
 J_{m_1}^{0clo} &= \alpha_{m_1} [S_{m_1}^{0refl} + S_{m_1}^{0dir\downarrow} + S_{m_1}^{0dif\downarrow}] \\
 J_{m_2}^{0clo} &= \alpha_{m_2} [S_{m_2}^{0refl} + S_{m_2}^{0dir\downarrow} + S_{m_2}^{0dif\downarrow}] \\
 J_r^{0clo} &= \alpha_r [S_r^{0refl} + S_r^{0dir\downarrow} + S_r^{0dif\downarrow}] \\
 J_v^{0clo} &= \alpha_v [S_v^{0refl} + S_v^{0dir\downarrow} + S_v^{0dif\downarrow}]
 \end{aligned} \tag{3.46}$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} J^{0clo} [W/m^2] : \text{La radiosité en CLO (sans arbres)} \\ \alpha [-] : \text{L'albédo de la surface.} \end{cases}$$

Les radiosités sont les inconnues de ce système, et sont obtenues en le résolvant par une méthode itérative. Tous les termes des bilans de surfaces détaillés sur la Figure 3.3 sont maintenant connus, et les densités de flux solaire nettes incidentes (S_i^{0*} [W/m²]) peuvent donc être obtenues :

$$\begin{aligned}
 S_{m_1}^{0*} &= S_{m_1}^{0dir\downarrow} + S_{m_1}^{0dif\downarrow} + S_{m_1}^{0refl} - J_{m_1}^{0clo} \\
 S_{m_2}^{0*} &= S_{m_2}^{0dir\downarrow} + S_{m_2}^{0dif\downarrow} + S_{m_2}^{0refl} - J_{m_2}^{0clo} \\
 S_r^{0*} &= S_r^{0dir\downarrow} + S_r^{0dif\downarrow} + S_r^{0refl} - J_r^{0clo} \\
 S_v^{0*} &= S_v^{0dir\downarrow} + S_v^{0dif\downarrow} + S_r^{0refl} - J_v^{0clo}
 \end{aligned} \tag{3.47}$$

3.4.1.2 Grandes longueurs d'ondes

Tout d'abord, les densités de flux issues des multiréflexions ($I_{m_1}^{0refl}$ [W/m²]) sont calculées de la même façon qu'en CLO :

$$\begin{aligned}
 I_{m_1}^{0refl} &= F_{m_1,m_2}^0 J_{m_2}^{0glo} + F_{m_1,s}^0 (f_v J_v^{0glo} + f_r J_r^{0glo}) \\
 I_{m_2}^{0refl} &= F_{m_2,m_1}^0 J_{m_1}^{0glo} + F_{m_2,s}^0 (f_v J_v^{0glo} + f_r J_r^{0glo}) \\
 I_r^{0refl} &= F_{s,m_1}^0 J_{m_1}^{0glo} + F_{s,m_2}^0 J_{m_2}^{0glo} \\
 I_v^{0refl} &= I_r^{0refl}
 \end{aligned} \tag{3.48}$$

Dans l'infrarouge, les densité de flux émises (J_i^{emis} [W/m²]) par les surfaces doivent être déterminés. Elles s'écrivent :

$$\begin{aligned}
 J_{m_1}^{emis} &= \epsilon_{m_1} \sigma T_{m_1}^4 \\
 J_{m_2}^{emis} &= \epsilon_{m_2} \sigma T_{m_2}^4 \\
 J_r^{emis} &= \epsilon_r \sigma T_r^4 \\
 J_v^{emis} &= \epsilon_v \sigma T_v^4
 \end{aligned} \tag{3.49}$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} J_i^{emis} [W/m^2] : \text{La densité de flux infrarouge émise} \\ \epsilon [-] : \text{L'émissivité infrarouge de la surface} \\ T [K] : \text{La température de surface (donnée d'entrée)} \\ \sigma = 5,6710^{-8} Wm^{-2}K^{-4} : \text{Constante de Stefan-Boltzmann.} \end{cases}$$

Les températures de surfaces sont des données d'entrées du modèle radiatif, et seront déterminées dans le chapitre 4.

La radiosité (J_i^{0glo} [W/m²]) s'exprime comme la somme du rayonnement réfléchi et émis. Un système de quatre équations est écrit :

$$\begin{aligned}
 J_{m_1}^{0glo} &= (1 - \epsilon_{m_1})[I_{m_1}^{0refl} + I_{m_1}^{0\downarrow}] + J_{m_1}^{emis} \\
 J_{m_2}^{0glo} &= (1 - \epsilon_{m_2})[I_{m_2}^{0refl} + I_{m_2}^{0\downarrow}] + J_{m_2}^{emis} \\
 J_r^{0glo} &= (1 - \epsilon_r)[I_r^{0refl} + I_r^{0\downarrow}] + J_r^{emis} \\
 J_v^{0glo} &= (1 - \epsilon_v)[I_v^{0refl} + I_v^{0\downarrow}] + J_v^{emis}
 \end{aligned}
 \tag{3.50}$$

La résolution du système permet d'obtenir les radiosités, et d'exprimer finalement les densités de flux nettes incidentes sur chaque surface, en sommant les termes représentés sur la Figure 3.4 :

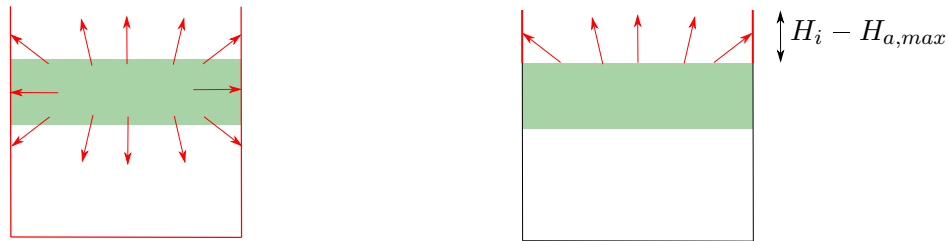
$$\begin{aligned}
 I_{m_1}^{0*} &= I_{m_1}^{0\downarrow} + I_{m_1}^{0refl} - J_{m_1}^{0glo} \\
 I_{m_2}^{0*} &= I_{m_2}^{0\downarrow} + I_{m_2}^{0refl} - J_{m_2}^{0glo} \\
 I_r^{0*} &= I_r^{0\downarrow} + I_r^{0refl} - J_r^{0glo} \\
 I_v^{0*} &= I_v^{0\downarrow} + I_v^{0refl} - J_v^{0glo}
 \end{aligned}
 \tag{3.51}$$

3.4.2 Modélisation des arbres

Dans cette dernière partie de description du modèle, les densités de flux nettes incidentes sur les murs, le sol végétalisé, la route et les arbres en CLO et GLO sont déterminées (S_i^* et I_i^*).

3.4.2.1 Courtes longueurs d'onde

Pour le traitement des multiréflexions du rayonnement solaire dans une rue arborée, les hypothèses de réflexion diffuses et d'absence de discrétisation verticale atteignent leurs limites. En effet, le rayonnement solaire frappant les arbres principalement par en haut, on peut s'attendre à ce qu'il soit réfléchi avant tout au-dessus des arbres. Pourtant, dans le modèle, en appliquant strictement la méthode des radiosités, le flux solaire frappant les arbres serait réfléchi dans toutes les directions avec les facteurs de forme, donc autant vers le sol que les murs ou le ciel, comme représenté sur la Figure 3.16a. Pour résoudre



(a) Avec les facteurs de formes

(b) Option retenue

FIGURE 3.16 – Modélisation des réflexions solaires des arbres

ce problème, l'hypothèse est faite que toutes les réflexions des arbres ne se font que vers la fraction des murs au dessus du feuillage et vers le ciel (Figure 3.16b). Des coefficients c_{a,m_1} et c_{a,m_2} sont définis d'après l'expression analytique d'un facteur de forme entre

deux rectangles semi-infinis perpendiculaires de largeur W et $(H - H_{a,max})$ infinis dans la longueur [Howell *et al.* 2021b] :

$$c_{a,m_i} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{(H_i - H_{a,max})}{W} - \sqrt{1 + \left(\frac{(H_i - H_{a,max})}{W} \right)^2} \right] \quad (3.52)$$

Cette méthode est inspirée du modèle radiatif de TEB [Redon 2017], tout en différenciant dans l'expression du coefficient c_{a,m_i} . Les densités de flux issues des multiflexions sur les murs ($S_{m_1}^{refl}, S_{m_2}^{refl}$ [W/m²]) peuvent être écrites selon cette hypothèse :

$$S_{m_1}^{refl} = F_{m_1,m_2} J_{m_2}^{clo} + F_{m_1,s} (f_v J_v^{clo} + f_r J_r^{clo}) + c_{a,m_1} \frac{A_a^{rad}}{H_1} J_a^{clo} \quad (3.53)$$

$$S_{m_2}^{refl} = F_{m_2,m_1} J_{m_1}^{clo} + F_{m_2,s} (f_v J_v^{clo} + f_r J_r^{clo}) + c_{a,m_2} \frac{A_a^{rad}}{H_2} J_a^{clo} \quad (3.54)$$

Dans ces équations, $A_a^{rad} J_a^{clo}$ correspond au flux réfléchi par les arbres, en W/m. La densité de flux J_a^{clo} (en W/m²) est en effet exprimée sur la longueur A_a^{rad} pour préserver un formalisme cohérent dans le système d'équations. Toutefois, le flux réfléchi par les arbres est supposé concentré sur la longueur W , comme présenté sur la Figure 3.16b. Cela permet d'utiliser les coefficients c_{a,m_1} et c_{a,m_2} à la place des facteurs de forme F_{a,m_1} et F_{a,m_2} . Par ailleurs, utiliser la réciprocité avec les coefficients c_{a,m_1} et c_{a,m_2} ne permettrait pas de simplifier les équations 3.53 et 3.54 par H_1 ou H_2 , car la surface de réception du rayonnement allant des arbres vers les murs est $(H_1 - H_{a,max})$ ou $(H_2 - H_{a,max})$. Les termes $c_{a,m_1} \frac{A_a^{rad}}{H_1}$ et $c_{a,m_2} \frac{A_a^{rad}}{H_2}$ apparaissent donc dans les équations 3.53 et 3.54.

La route et le sol végétalisé ne reçoivent aucun rayonnement provenant des arbres. Les densités de flux issues des multiréflexions (S_r^{refl}, S_v^{refl} [W/m²]) sur ces surfaces sont donc :

$$S_r^{refl} = F_{s,m_1} J_{m_1}^{clo} + F_{s,m_2} J_{m_2}^{clo} \quad (3.55)$$

$$S_v^{refl} = S_r^{refl} \quad (3.56)$$

Aucune hypothèse spécifique n'est en revanche utilisée pour le flux quittant les murs et le sol. Les facteurs de forme sont donc utilisés, et la densité de flux issue des multiréflexions arrivant sur les arbres (S_a^{refl} [W/m²]) s'écrit :

$$S_a^{refl} = F_{a,m_1} J_{m_1}^{clo} + F_{a,m_2} J_{m_2}^{clo} + F_{a,s} (f_v J_v^{clo} + f_r J_r^{clo}) \quad (3.57)$$

Ensuite, un système de cinq équations à cinq inconnues est résolu par une méthode itérative :

$$\begin{aligned} J_{m_1}^{clo} &= \alpha_{m_1} [S_{m_1}^{refl} + S_{m_1}^{dir\downarrow} + S_{m_1}^{dif\downarrow}] \\ J_{m_2}^{clo} &= \alpha_{m_2} [S_{m_2}^{refl} + S_{m_2}^{dir\downarrow} + S_{m_2}^{dif\downarrow}] \\ J_r^{clo} &= \alpha_r [S_r^{refl} + S_r^{dir\downarrow} + S_r^{dif\downarrow}] \\ J_v^{clo} &= \alpha_v [S_v^{refl} + S_v^{dir\downarrow} + S_v^{dif\downarrow}] \\ J_a^{clo} &= \alpha_a [S_a^{refl} + S_a^{dir\downarrow} + S_a^{dif\downarrow}] \end{aligned} \quad (3.58)$$

Finalement, les densité de flux nettes solaires sont calculées :

$$\begin{aligned}
 S_{m_1}^* &= S_{m_1}^{dir\downarrow} + S_{m_1}^{dif\downarrow} + S_{m_1}^{refl} - J_{m_1}^{clo} \\
 S_{m_2}^* &= S_{m_2}^{dir\downarrow} + S_{m_2}^{dif\downarrow} + S_{m_2}^{refl} - J_{m_2}^{clo} \\
 S_r^* &= S_r^{dir\downarrow} + S_r^{dif\downarrow} + S_r^{refl} - J_r^{clo} \\
 S_v^* &= S_v^{dir\downarrow} + S_v^{dif\downarrow} + S_r^{refl} - J_v^{clo} \\
 S_a^* &= S_a^{dir\downarrow} + S_a^{dif\downarrow} + S_a^{refl} - J_a^{clo}
 \end{aligned} \tag{3.59}$$

3.4.2.2 Grandes longueurs d'onde

En grandes longueurs d'ondes, le rayonnement arrivant sur les arbres ne provient pas seulement du ciel, mais en grande partie également des murs et du sol, ces derniers émettant dans l'infrarouge. Le problème de répartition du flux incident décrit pour le rayonnement solaire ne se pose donc pas pour l'infrarouge. Les arbres peuvent ainsi être traités de la même façon que les murs et le sol, et ajoutent simplement une équation au système.

Comme partie 3.4.1.2, les densité de flux issues des multiréflexions sur chaque surface (I_i^{refl} [W/m²]) sont :

$$\begin{aligned}
 I_{m_1}^{refl} &= F_{m_1,m_2} J_{m_2}^{glo} + F_{m_1,s}(f_v J_v^{glo} + f_r J_r^{glo}) + F_{m_1,a} J_a^{glo} \\
 I_{m_2}^{refl} &= F_{m_2,m_1} J_{m_1}^{glo} + F_{m_2,s}(f_v J_v^{glo} + f_r J_r^{glo}) + F_{m_2,a} J_a^{glo} \\
 I_r^{refl} &= F_{s,m_1} J_{m_1}^{glo} + F_{s,m_2} J_{m_2}^{glo} + F_{r,a} J_a^{glo} \\
 I_v^{refl} &= I_r^{refl} \\
 I_a^{refl} &= F_{a,m_1} J_{m_1}^{glo} + F_{a,m_2} J_{m_2}^{glo} + F_{a,s}(f_r J_r^{glo} + f_v J_v^{glo})
 \end{aligned} \tag{3.60}$$

De la même manière que pour les autres surfaces (équation 3.49, l'émission des arbres (J_a^{emis} [W/m²]) est obtenue par :

$$J_a^{emis} = \epsilon_a \sigma T_a^4 \tag{3.61}$$

Enfin, un système de cinq équations linéaires donne les radiosités :

$$\begin{aligned}
 J_{m_1}^{glo} &= (1 - \epsilon_{m_1})[I_{m_1}^{refl} + I_{m_1}^\downarrow] + J_{m_1}^{emis} \\
 J_{m_2}^{glo} &= (1 - \epsilon_{m_2})[I_{m_2}^{refl} + I_{m_2}^\downarrow] + J_{m_2}^{emis} \\
 J_r^{glo} &= (1 - \epsilon_r)[I_r^{refl} + I_r^\downarrow] + J_r^{emis} \\
 J_v^{glo} &= (1 - \epsilon_v)[I_v^{refl} + I_v^\downarrow] + J_v^{emis} \\
 J_a^{glo} &= (1 - \epsilon_a)[I_a^{refl} + I_a^\downarrow] + J_a^{emis}
 \end{aligned} \tag{3.62}$$

Finalement, les densités de flux infrarouge nettes incidentes (I_i^* [W/m²]) sur chacune des zones de bilan sont :

$$\begin{aligned}
 I_{m_1}^* &= I_{m_1}^\downarrow + I_{m_1}^{refl} - J_{m_1}^{glo} \\
 I_{m_2}^* &= I_{m_2}^\downarrow + I_{m_2}^{refl} - J_{m_2}^{glo} \\
 I_r^* &= I_r^\downarrow + I_r^{refl} - J_r^{glo} \\
 I_v^* &= I_v^\downarrow + I_v^{refl} - J_v^{glo} \\
 I_a^* &= I_a^\downarrow + I_a^{refl} - J_a^{glo}
 \end{aligned} \tag{3.63}$$

3.5. Comparaison du modèle radiatif sans arbres avec la méthode de Monte Carlo

Ces équations concluent la présentation du modèle radiatif développée dans ce chapitre. De nombreuses hypothèses ont été nécessaires à cette modélisation, qui devra être validée. Pour cela, une première comparaison des flux radiatifs avec un modèle plus détaillé dans une rue sans arbres est effectuée dans la partie suivante. Par ailleurs, au chapitre 4, le modèle thermo-énergétique complet sera confronté à des mesures sur une rue arborée expérimentale, et donc des flux radiatifs incluant les arbres seront analysés.

3.5 Comparaison du modèle radiatif sans arbres avec la méthode de Monte Carlo

Dans cette partie, le modèle radiatif est confronté à un modèle utilisant la méthode de Monte Carlo sur une rue canyon sans végétation. Un premier but est de vérifier la cohérence des équations du modèle radiatif ainsi que leur implémentation. Un deuxième objectif est d'étudier l'erreur commise avec l'hypothèse de rue infinie.

3.5.1 Présentation du cas d'étude et du modèle Monte Carlo

Cas d'étude

Une rue isolée sur un sol dégagé, d'orientation Est-Ouest et de rapport d'aspect 1 est choisie. Les dimensions sont présentées sur la Figure 3.17. Une longueur de 70 m est prise, soit 7 fois la largeur de la rue, de manière à se placer dans un cas où l'hypothèse de rue infinie n'est pas trop éloignée de la réalité. La hauteur des murs est de 10 m. Dans une variante, le mur A ou le mur B sera pris égal à 13 m.

L'albédo des murs est pris égal à 0,4, celui du sol (rue et extérieur au canyon) à 0,15 et celui des toits à 0,2. L'émissivité en infrarouge de toutes les surfaces est de 0,9. Pour pouvoir tester ici uniquement le modèle radiatif, les températures de surfaces sont fixées : 17°C pour le sol et 25°C pour les murs.

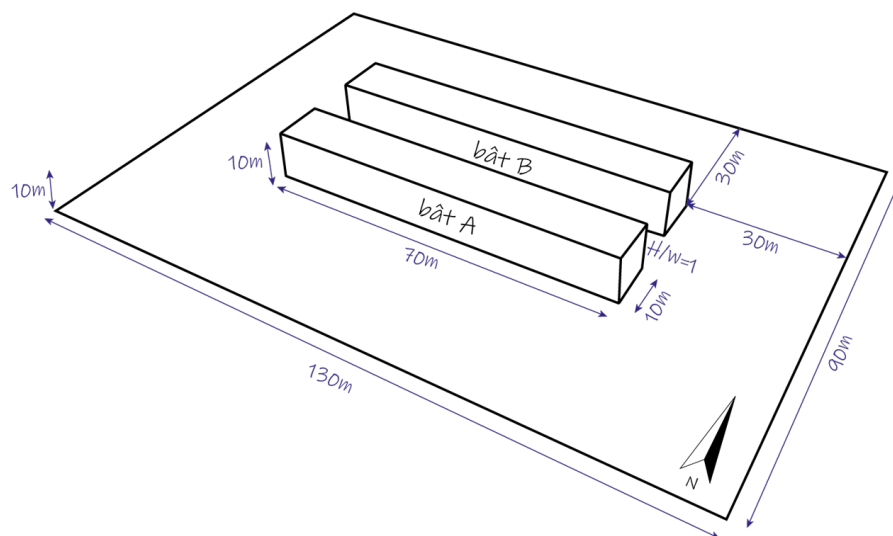


FIGURE 3.17 – Schéma du cas d'étude

Les flux incidents solaire direct, solaire diffus et infrarouge sont pris à Dijon le 18/07/2022. La latitude et longitude sont également prises à Dijon. Pour évaluer le modèle solaire, trois instants sont choisis, de façon à avoir différents angles solaires, soit 6h30, 12h30 et 17h30 en heures UTC. Pour l'infrarouge, seul le cas de 12h30 est analysé, les angles solaires n'ayant pas d'impact sur cette bande spectrale avec le modèle de ciel isotrope.

Modèle Monte Carlo

Le modèle détaillé qui sert de référence est un modèle de Monte Carlo développé au laboratoire CETHIL et ayant déjà servi à d'autres cas de validations, par exemple [Galtier *et al.* 2022]. Ce modèle suppose l'atmosphère transparente et des réflexions diffuses. La discrétisation spatiale des surfaces est basée sur des mailles de $0,25 \text{ m}^2$, soit 400 mailles pour le sol de la rue et les murs dans le cas de base. L'écart-type des résultats est toujours inférieur à 2 %.

3.5.2 Résultats pour le flux solaire

3.5.2.1 Analyse à trois heures différentes

Afin de dissocier le plus possible l'erreur due à l'hypothèse de rue infinie des autres sources potentielles d'erreur, les résultats du modèle détaillé sont dissociés en deux valeurs : l'une sur les 10 m centraux de la rue, l'autre sur la rue entière. La densité de flux incidente après multiréflexions est représentée pour les différents modèles et les trois heures choisies sur la Figure 3.18.

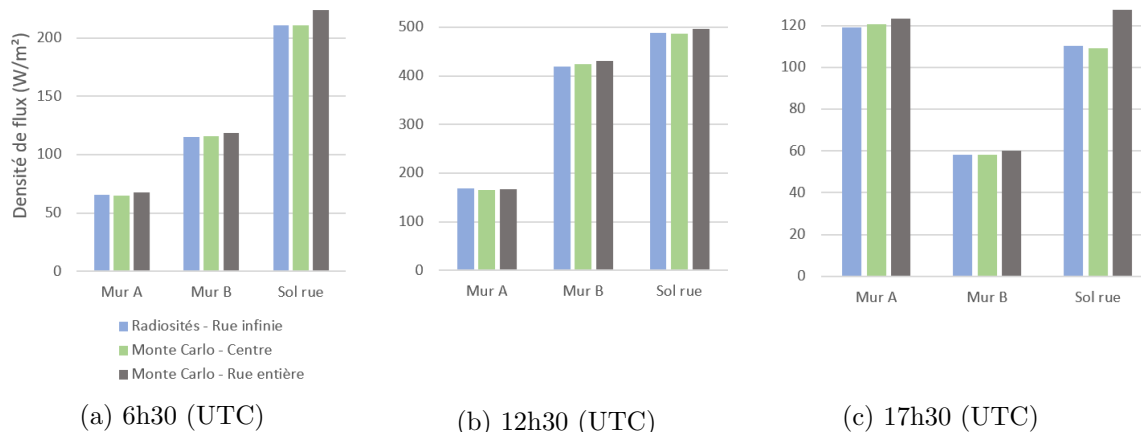


FIGURE 3.18 – Densité de flux incidente totale sur les deux murs et le sol à trois heures différentes

Tout d'abord, les résultats du modèle radiatif développé dans ce chapitre sont très proches du modèle détaillé sur la partie centrale de la rue, avec un écart inférieur à 2 % pour les trois instants choisis. Cet écart étant du même ordre de grandeur que les écart-types des résultats obtenus avec la méthode de Monte Carlo, ces résultats sont satisfaisants.

Ensuite, il apparaît clairement que l'hypothèse de rue infinie n'a pas les mêmes conséquences selon l'heure de la journée. Lorsque le soleil est haut dans le ciel (12h30),

3.5. Comparaison du modèle radiatif sans arbres avec la méthode de Monte Carlo

l'erreur commise est de 3 %, donc faible. En revanche, lorsque l'angle d'incidence est plus rasant, et que les rayons du soleil forment un angle proche de l'axe de la rue ($|\phi_{azi} - \theta_{can}| \rightarrow 0^\circ$), l'erreur augmente. C'est le cas à 17h30, avec une erreur de 14% pour le sol de la rue, due à une élévation solaire faible ($\approx 18^\circ$) et un azimuth proche de l'axe de la rue ($|\phi_{azi} - \theta_{can}| \approx 12^\circ$). A 6h30, bien qu'on ait $|\phi_{azi} - \theta_{can}| \approx 7^\circ$, l'erreur est un peu plus faible que pour 17h30 et vaut au 6 % pour le sol, car l'élévation est un peu plus importante et atteint 23° .

L'erreur sur le flux solaire peut donc être significative pour une rue Est-Ouest, notamment en début de matinée et fin d'après-midi. Toutefois, cette conclusion doit être nuancée. Premièrement, les intensités des flux solaires du début de matinée et de fin d'après-midi sont les plus faibles de la journée. Même si l'erreur est plus importante sur ces deux périodes, cela est négligeable devant le flux radiatif cumulé reçu par les surfaces tout au long de la journée. Par ailleurs, l'orientation de la rue choisie ici est la plus défavorable. Pour une rue Nord-Sud, le phénomène observé ici aurait été inexistant, puisque on aurait $|\phi_{azi} - \theta_{can}| \rightarrow 0^\circ$ aux alentours de midi, c'est-à-dire au moment où l'élévation est à son maximum.

3.5.2.2 Analyse pour des murs de tailles différentes

Deux variantes avec un mur plus haut, puis l'autre, sont étudiées dans cette partie. L'heure de 12h30 UTC a été choisie pour cette comparaison. La densité de flux incidente après multiréflexions pour le cas de base et les deux variantes est représenté sur la Figure 3.19. Les conséquences de l'hypothèse de rue infinie ayant déjà été discutées juste avant, les résultats du modèle détaillé seront ici présentés uniquement pour la zone centrale de la rue.

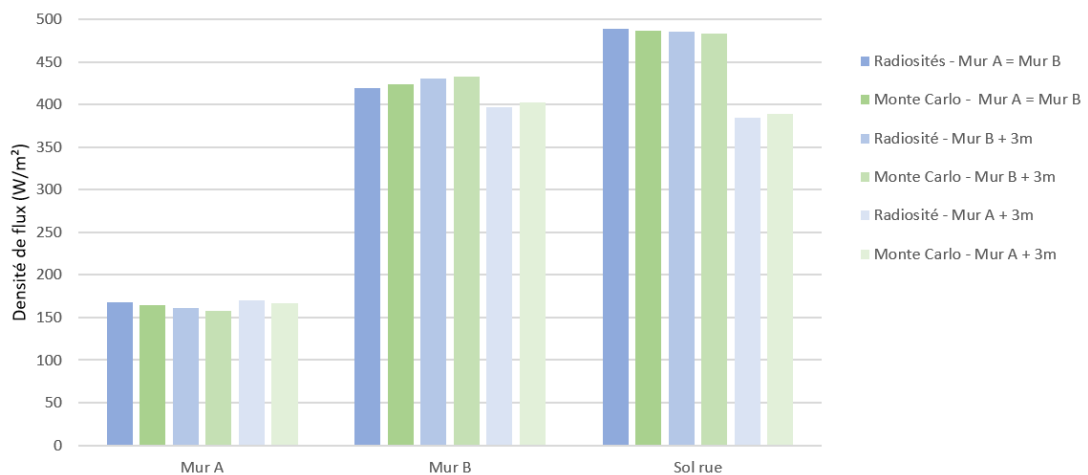


FIGURE 3.19 – Densité de flux incidente totale sur les deux murs et le sol à 12h30 UTC pour le cas de deux murs de même taille, d'un mur plus grand de 3 m et de l'autre

Dans le cas du mur B plus haut, la densité de flux solaire direct n'est pas changée par rapport au cas de base car le mur B est le mur ensoleillé, il ne cause donc aucun ombrage. En revanche, une légère différence est tout de même observée due au flux diffus. Ce dernier est supérieur de 20% au cas de base pour le mur B, et inférieur de 30 % au cas de base pour le mur A avec MATHIS. Dans le cas présent, l'hypothèse d'enceinte fermée effectuée dans MATHIS n'est plus totalement valide. En effet, certaines réflexions du

toit du bâtiment A vont pouvoir impacter le mur B. Cependant, l'erreur sur la densité de flux incidente totale sur les murs ne dépasse pas 3 % malgré tout.

Si le mur A est plus haut, un impact sur l'ombrage est observable. A 12h30, c'est en effet le mur A qui est responsable de l'ombrage sur le sol de la rue. S'il est plus grand, la route recevra donc moins de rayonnement solaire direct. Cet effet apparaît nettement sur la Figure 3.19. Sur ce cas, les écarts avec le modèle Monte Carlo ne dépassent pas 2 %.

Pour conclure, le modèle reproduit bien les effets d'ombrages et les multiréflexions. En revanche, plus l'écart entre la taille des murs est important, plus l'influence des toits sera importante sur les réflexions diffuses. Ce raisonnement est également valable en infrarouge, particulièrement en journée lorsque la température des toits est très élevée. Dans l'ensemble, le modèle radiatif est donc adapté pour deux murs de tailles différentes si l'écart est du même ordre de grandeur que celui étudié ici, soit 30 %.

3.5.3 Résultats pour le flux infrarouge

Pour finir, le flux infrarouge est analysé dans cette partie, pour des températures de surface fixées. La position du soleil n'ayant plus d'influence, seul les résultats à 12h30 sont analysés.

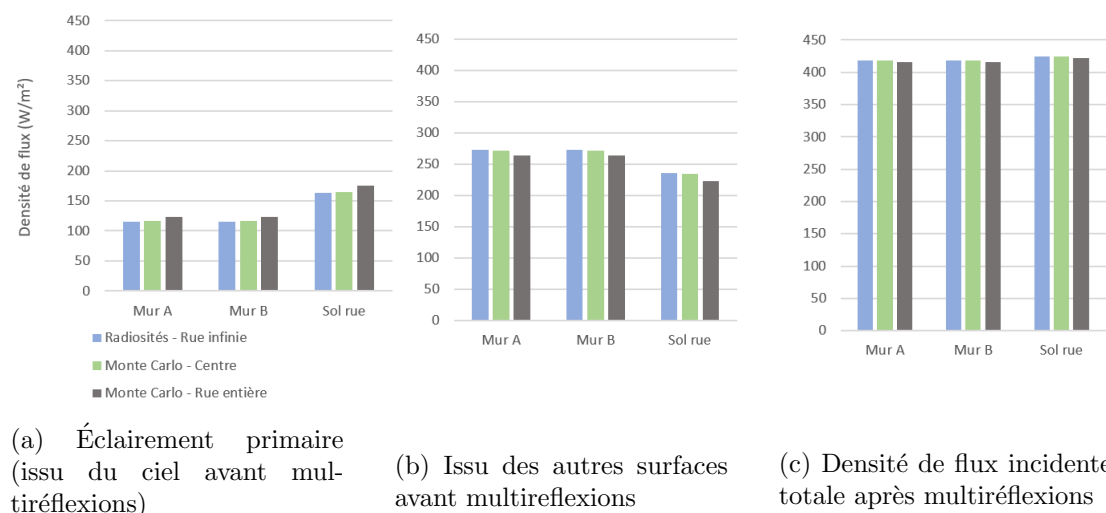


FIGURE 3.20 – Comparaison des différentes densités de flux à 12h30

Trois densités de flux sont distinguées dans les résultats (Figure 3.20) :

- L'éclairement primaire (densité de flux incidente provenant du ciel avant multiréflexions)
- La densité de flux incidente provenant des autres surfaces urbaines avant multiréflexions
- La densité de flux incidente totale après multiréflexions.

Il est important de distinguer ces trois grandeurs car l'hypothèse de rue infinie induit deux erreurs qui se compensent et qui sont donc discutées dans cette partie.

Tout d'abord, si l'on considère uniquement le centre de la rue pour le modèle détaillé, l'écart entre les deux modèles ne dépasse pas 1 %. Les équations étant les mêmes qu'en CLO, cette conclusion était attendue.

Par rapport à la rue entière en revanche, le flux provenant du ciel est plus important jusqu'à 7 % avec le modèle détaillé. Cela s'explique par les extrémités de la rue, qui voient plus de ciel. Au contraire, le phénomène inverse est observé pour le flux provenant des surfaces urbaines : avec l'hypothèse de rue infinie, ce flux est supérieur. Pour ce cas d'étude, les deux effets se compensent quasiment, avec une erreur sur les densités de flux après multiréflexions inférieure à 1 %. Cependant, rappelons qu'ici la température des murs est fixée à 25°C et celle du sol à 17°C. Or, en pleine journée, les surfaces urbaines peuvent facilement atteindre 40°C, ce qui empêcherait les deux erreurs de se compenser en totalité. Toutefois, la rue se trouve ici sur un sol dégagé. En ville, même en extrémité de rue, on peut supposer que les murs et le sol ne verraient pas tant de ciel que sur ce cas d'étude.

Dans l'ensemble, les erreurs restent faibles et les résultats du modèle radiatif infrarouge sont satisfaisants.

3.6 Conclusion

Un modèle radiatif a été développé, représentant une rue infinie arborée et basé sur la méthode des radiosités. Les facteurs de forme sont calculés avec les formules analytiques, et les arbres sont considérés comme un milieu semi-transparent et inclus à l'aide de transmittances interpolées dans une base de données calculée par lancé de rayons.

Les résultats du modèle ont ensuite été comparés à un ceux d'un modèle Monte Carlo sur une rue canyon sans arbres sept fois plus longue que large, de rapport d'aspect 1 et avec un écart de hauteur des deux murs allant jusqu'à 30 %. Une bonne correspondance a été obtenue, les écarts sur le flux net ne dépassant pas 14 %. Une perspective est d'effectuer la même comparaison en incluant une bande semi-transparente représentant des arbres au modèle de Monte Carlo. Cela permettrait une validation des hypothèses numériques uniquement, ce qu'une comparaison avec des mesures expérimentales n'autorise pas.

Les flux radiatifs calculés par ce modèle sont une composante des bilans énergétiques aux surfaces qui seront effectués dans le modèle thermo-énergétique de rue, présenté au chapitre 4.

Rappel des hypothèses du modèle radiatif

Hypothèses générales :

- La rue est une rue canyon assymétrique de longueur infinie
- L'air est transparent au rayonnement
- Le rayonnement solaire diffus et infrarouge provenant du ciel est isotrope
- Toutes les réflexions et émissions sont diffuses
- Tous les corps sont gris par bandes, avec deux bandes spectrales (solaire et infrarouge)
- L'influence des toits est négligée
- Les arbres sont considérés comme un milieu semi-transparent de hauteur minimum et maximum fixée mais sans position horizontale définie
- Les arbres ne peuvent dépasser la hauteur moyenne des murs
- La position exacte de la route et du sol végétalisé ne sont pas définies
- Lorsque le sol est ensoleillé (éclairage primaire solaire direct non nul), l'ombrage des arbres n'est que sur le sol
- Les réflexions solaires quittant les arbres n'atteignent que la partie supérieure des murs.

Hypothèse spécifique au calcul des transmittances sol-ciel τ_{sc} et mur-mur τ_{mm} :

- Les deux murs sont de même hauteur.

Chapitre 4

Modélisation thermo-énergétique

La modélisation thermo-énergétique d'une rue canyon intégrant de la végétation haute et basse est présentée dans ce chapitre. Elle est ensuite confronté à des mesures sur une rue expérimentale sans arbres, puis sur une rue expérimentale arborée. Cette modélisation fait intervenir les grandeurs aéraulique et radiative calculées dans les chapitres 2 et 3, et constituera le modèle de sous-maille du réseau de rue (chapitre 5).

Sommaire

4.1	Description générale du modèle	99
4.1.1	Géométrie considérée et propriétés nécessaires	100
4.1.2	Expression des bilans énergétiques sur chaque élément	100
4.2	Modélisation des flux convectifs	104
4.2.1	Parois de la rue	104
4.2.2	Arbres	105
4.3	Modélisation transferts conductifs dans les solides	105
4.3.1	Méthodes existantes	105
4.3.2	Discrétisation de l'équation de la chaleur	106
4.4	Modélisation de l'évapotranspiration	108
4.4.1	Végétation basse	109
4.4.2	Arbres	109
4.4.3	Résistance aérodynamique	110
4.4.4	Résistance stomatique	111
4.5	Validation avec des mesures expérimentales dans une rue sans végétation	113
4.5.1	Présentation du cas d'étude et mise en données	113
4.5.2	Résultats	115
4.6	Validation avec des mesures expérimentales dans une rue arborée	118
4.6.1	Présentation du cas d'étude	118
4.6.2	Mise en données	119
4.6.3	Résultats	123
4.7	Conclusion	128

4.1 Description générale du modèle

Le modèle thermo-énergétique de rue présenté dans ce chapitre utilise les grandeurs aérauliques et radiatives obtenues dans les chapitres 2 et 3, et fait le lien avec le modèle de quartier, présenté au chapitre 5.

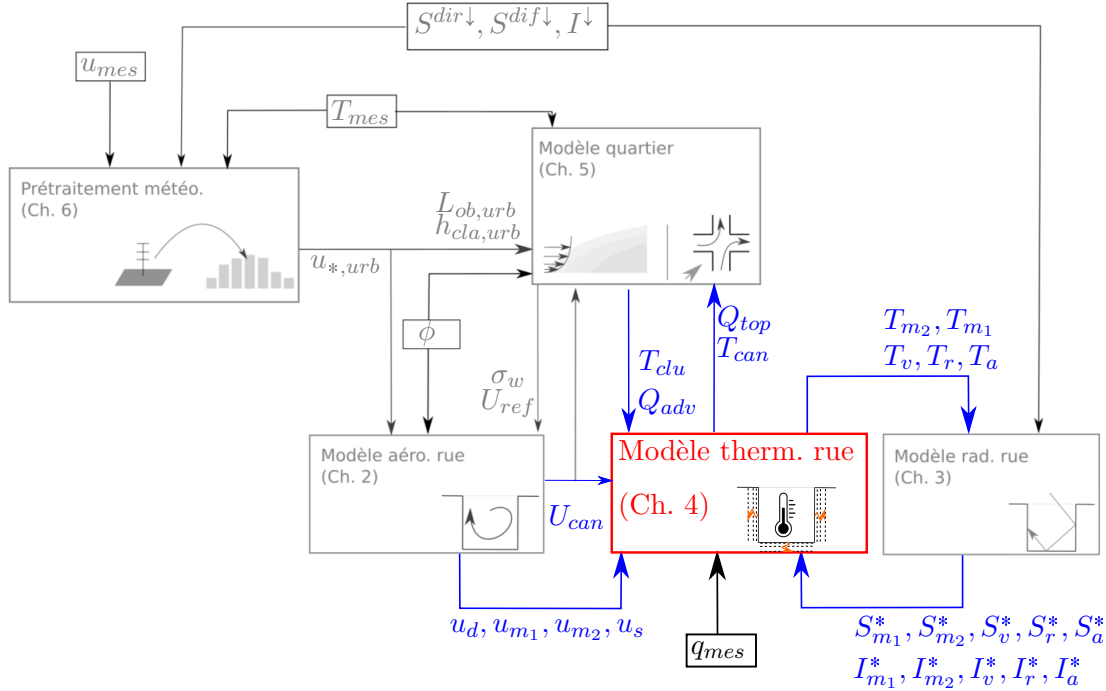


FIGURE 4.1 – Données d'entrée et résultats du modèle thermo-énergétique de rue (U_{can} [m/s] : vitesse moyenne longitudinale ; u_d [m/s] : vitesse d'échange rue/clu ; u_{m_1} , u_{m_2} , u_s [m/s] : vitesses proche paroi ; S_i^* , I_i [W/m^2] : densités de flux solaire et infrarouge nettes ; T_i [K] : températures ; Q_{top} , Q_{adv} [W/m^2] : échanges de chaleur vertical et horizontal aux limites de la rue ; q_{mes} [kg/kg] : humidité absolue mesurée à la station météorologique).

Ces liens avec trois autres chapitres donnent au modèle thermo-énergétique une place centrale dans MATHIS (voir Figure 4.1), et implique qu'il prenne en entrée un certain nombre de grandeurs :

- Les grandeurs issues du modèle aéraulique (chapitre 2), soient les vitesses proches paroi (u_{m_1} , u_{m_2} , u_s [m/s]), la vitesse d'échange entre la rue et la CLU (u_d [m/s]) et la vitesse moyenne longitudinale dans la rue (U_{can} [m/s])
- Les grandeurs issues du modèle radiatif (chapitre 3), soient les densité de flux infrarouge nettes incidentes (I_{m_1} , I_{m_1} , I_v , I_r , I_a [W/m^2]) et les densités de flux solaire nettes incidentes ($S_{m_1}^*$, $S_{m_1}^*$, S_v^* , S_r^* , S_a^* [W/m^2])
- Des conditions limites, qui seront fournies par le modèle de quartier (chapitre 5), soient la température au dessus de la rue (T_{clu} [K]) et le flux de chaleur advecté longitudinalement (Q_{adv} [W/m^2]) qui représente l'impact de la température d'air des rues amont, et est exprimé par mètre carré au sol de la rue d'intérêt
- L'humidité absolue mesurée à la station météorologique (q_{mes} [kg/kg]), qui est considérée uniforme sur le domaine simulé.

A l'aide de bilans énergétiques aux surfaces et dans le volume d'air de la rue, le

modèle détermine :

- Les températures de surface ($T_{m_1}, T_{m_2}, T_v, T_r, T_a$ [K])
- La température d'air dans la rue (T_{can} [K]) et le flux de chaleur vertical entre la rue et la CLU (Q_{top} [W/m²])

4.1.1 Géométrie considérée et propriétés nécessaires

Une rue canyon asymétrique est considérée, représentée sur la Figure 4.2. Cette rue canyon n'est plus rigoureusement supposée infinie dans ce chapitre, contrairement aux chapitres 2 et 3. En effet, le fait de considérer un flux de chaleur advecté horizontalement dans la rue (Q_{adv}) suppose une rue canyon finie. La hauteur des deux murs est supposée différente a priori, comme pour le modèle radiatif développé au chapitre précédent. En revanche, pour la modélisation aéroulque (chapitre 2), les deux murs étaient supposés de même hauteur. Pour pouvoir l'appliquer, une hauteur moyenne de la rue $H = (H_1 + H_2)/2$ est considérée pour le calcul des vitesses.

La géométrie choisie pour la végétation est similaire à celle décrite au chapitre précédent. Certaines propriétés supplémentaires sont toutefois nécessaires pour modéliser les échanges convectif et latent. La végétation est décrite par :

- Une fraction horizontale de recouvrement pour les arbres (f_a) et le sol végétalisé (f_v), définies sur la Figure 4.2.
- Une densité définie par le *Leaf Area Index* pour les arbres (LAI_a) et le sol végétalisé (LAI_v), qui représente la surface de feuilles par mètre carré au sol.
- Une résistance stomatique minimum pour les arbres ($r_{s,min,a}$ [s/m]) et le sol végétalisé ($r_{s,min,v}$ [s/m]), qui décrit l'ouverture maximum des stomates et varie d'une plante à l'autre.

Pour tenir compte de la disponibilité en eau, un paramètre (F_2) doit également être fixé entre 0 et 1 et permet de moduler la résistance stomatique des arbres et de la végétation basse (partie 4.4).

Enfin, chacun des murs, le sol végétalisé et la route sont discrétisés dans la profondeur en trois couches, pour lesquelles sont nécessaires :

- L'épaisseur (d [m])
- La masse volumique (ρ [kg/m³])
- La capacité thermique massique (c_p [J/Kkg])
- La conductivité thermique (λ [W/mK])

4.1.2 Expression des bilans énergétiques sur chaque élément

De façon similaire à un modèle de canopée urbaine à une couche, un bilan de chaleur est réalisé sur chacun des éléments suivants :

- Les deux murs - séparément, où le flux latent est négligé
- La route, où le flux latent est également négligé
- Le sol végétalisé (aussi appelé végétation basse)
- Les arbres, où le flux conductif est négligé.

Les différents flux entrant en jeu sont représentés sur la Figure 4.3. La température de surface est déterminée comme celle vérifiant le bilan de chaleur. Le détail des bilans sur chaque zone est donné dans les paragraphes suivants.

Couche Limite Urbaine

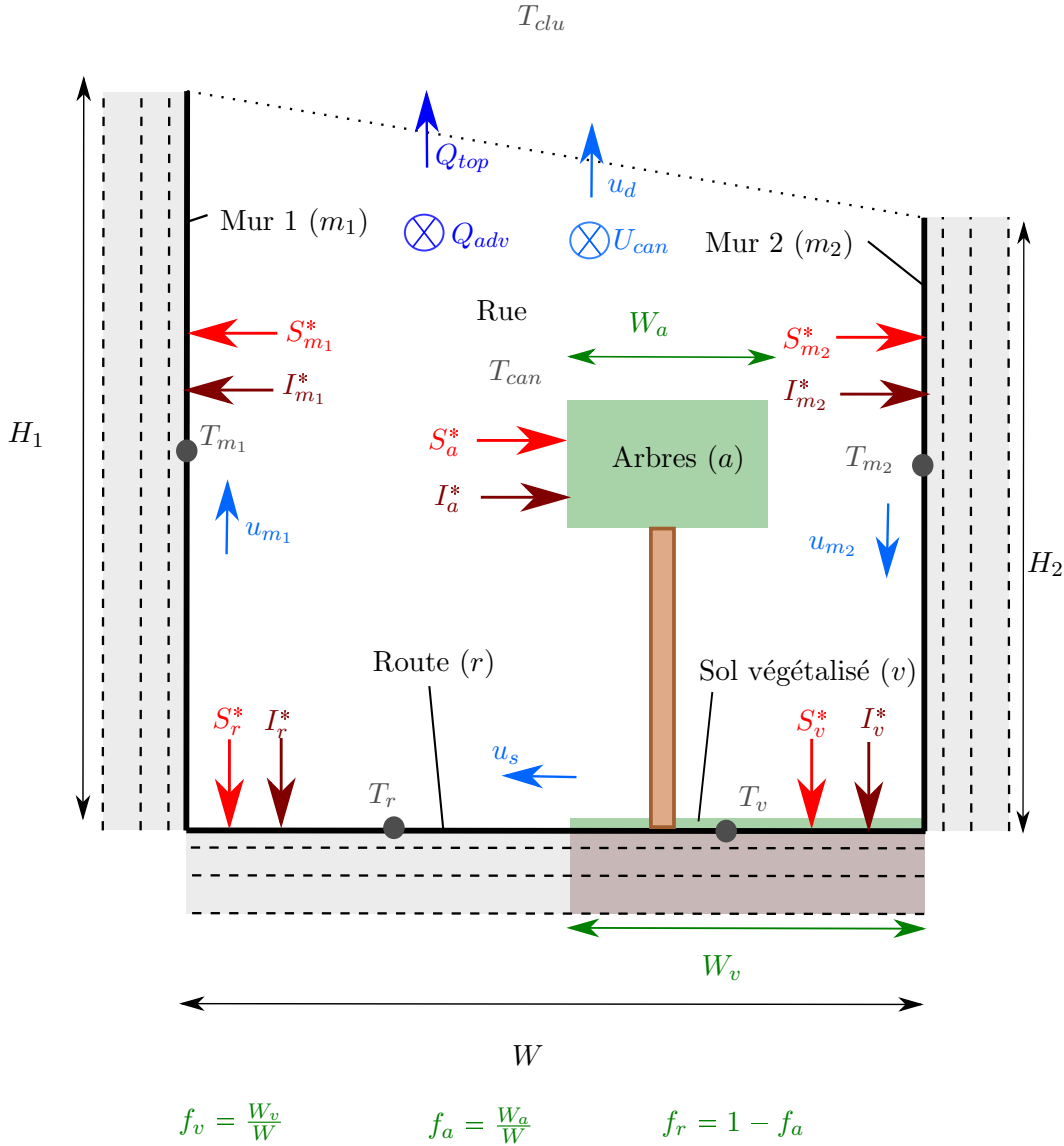


FIGURE 4.2 – Représentation schématique du modèle de rue, avec les données d'entrée, les résultats et les caractéristiques géométriques (U_{can} [m/s] : vitesse moyenne longitudinale; u_d [m/s] : vitesse d'échange rue/clu; u_{m1}, u_{m2}, u_s [m/s] : vitesses proche paroi; S_i^*, I_i [W/m²] : densités de flux solaire et infrarouge nettes; T_i [K] : températures; Q_{top}, Q_{adv} [W/m²] : échanges de chaleur vertical et horizontal aux limites de la rue; q_{mes} [kg/kg] : humidité absolue mesurée à la station météorologique)

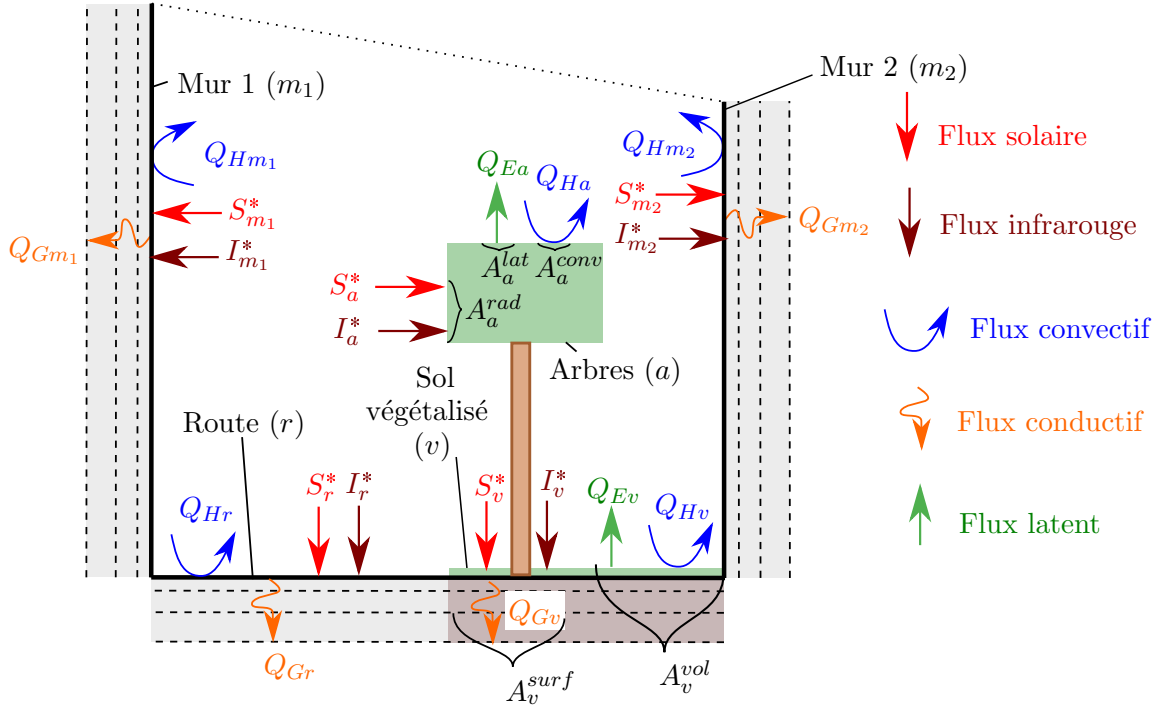


FIGURE 4.3 – Bilan de surface sur chaque zone et longueurs considérées (S_i^* , I_i^* [W/m^2] : densités de flux solaire et infrarouge nettes; Q_{Hi} [W/m^2] : densité de flux convectif; Q_{Gi} [W/m^2] : densité de flux conduit; Q_{Ei} [W/m^2] : densité de flux latent; A_v^{surf} [m] : longueur considérée pour les flux radiatif et conductifs du sol végétalisé; A_v^{vol} [m] : longueur considérée pour les flux convectif et latent du sol végétalisé; A_a^{rad} , A_a^{lat} , A_a^{conv} [m] : longueurs considérées pour les flux radiatifs, convectif et latent pour les arbres).

Faces

Le bilan énergétique de chacun des murs, de la route et du sol végétalisé s'écrit :

$$S_i^* + I_i^* = Q_{Hi} + Q_{Gi} \quad (4.1)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} S^* [\text{W}/\text{m}^2] : \text{La densité de flux solaire nette incidente} \\ I^* [\text{W}/\text{m}^2] : \text{La densité de flux infrarouge nette incidente} \\ Q_H [\text{W}/\text{m}^2] : \text{La densité de flux convectif nette quittant la surface} \\ Q_G [\text{W}/\text{m}^2] : \text{La densité de flux conduit} \\ i : \text{Mur 1 } (m_1), \text{ mur 2 } (m_2), \text{ route } (r) \text{ et le sol végétalisé } (v). \end{cases}$$

Sol végétalisé

L'équation 4.1 implique implicitement que la même surface est pertinente pour les différents flux, c'est pourquoi elle n'est pas appliquée à l'identique pour les arbres et la végétation basse. En effet, pour la végétation, l'air s'engouffre dans le volume, venant au contact de chaque tige ou feuille. Le rayonnement échangé entre la plante et l'extérieur, au contraire, va surtout être émis, absorbé ou réfléchi sur la surface extérieure et non pas au sein du feuillage. Pour la végétation basse, deux surfaces différentes sont choisies,

l'une pour les échanges en surface (le rayonnement) et l'autre pour les échanges dans le volume (convection et latent). Le flux stocké dans les feuilles étant négligé, c'est la surface au sol qui intervient pour le flux conductif, ce qui donne :

$$S_v^* + I_v^* = (Q_{Hv} + Q_{Ev}) \frac{A_v^{vol}}{A_v^{surf}} + Q_{Gv} \quad (4.2)$$

$$\text{Avec : } \left\{ \begin{array}{l} S_v^*, I_v^*, Q_{Hv}, Q_{Ev}, Q_{Gv} [W/m^2] : \text{La densité de flux solaire, infrarouge,} \\ \text{convectif, latent et conductif nette} \\ \frac{A_v^{vol}}{A_v^{surf}} [-] : \text{Le rapport entre la surface en contact avec de l'air (tiges, feuilles)} \\ \text{et la surface au sol.} \end{array} \right.$$

Pour l'instant, le rapport $\frac{A_v^{vol}}{A_v^{surf}}$ est pris égal au LAI_v . Mais selon le type de végétation basse, il pourrait aussi être pertinent de choisir $2LAI_v$, pour prendre en compte les deux côtés des feuilles. Si des buissons ou arbustes sont considérés, il serait même envisageable de distinguer une surface différente pour l'évaporation et la convection, comme cela est fait pour les arbres.

Arbres

Pour la végétation haute, des surfaces différentes sont donc choisies pour chaque flux :

- Pour la convection : l'air rentre en contact avec l'intégralité des feuilles, de chaque côté, soit $A_a^{conv} = 2Wf_aLAI_a$ [m], W étant la largeur de la rue
- Pour l'évaporation : la majorité des arbres appartiennent à la catégorie des hypostomatiques [Drake *et al.* 2019], ce qui signifie que leurs stomates ne se trouvent que sur le dessous de la feuille. En faisant cette hypothèse, la dimension considérée pour l'évaporation est $A_a^{lat} = Wf_aLAI_a$ [m]
- Pour le radiatif : A_a^{rad} [m] a été détaillé au chapitre précédent (équation 3.35).

Au final, le bilan sur les arbres est :

$$A_a^{rad}(S_a^* + I_a^*) = A_a^{conv}Q_{Ha} + A_a^{lat}Q_{Ea} \quad (4.3)$$

$$\text{Avec : } \left\{ \begin{array}{l} S_a^*, I_a^*, Q_{Ha}, Q_{Ea} [W/m^2] : \text{La densité de flux solaire, infrarouge, convectif et} \\ \text{latent des arbres.} \end{array} \right.$$

Cette équation est résolue sans itération, contrairement aux autres éléments dans la rue (équations 4.1 et 4.2), en se basant sur les hypothèses suivantes :

- La conduction dans le tronc, les branches et les feuilles est négligée.
- La température de surface intervenant dans le flux infrarouge I_a^* est prise égale à la température d'air. Cette hypothèse est justifiée par le fait que la température du feuillage s'éloigne assez peu de la température d'air, contrairement aux autres facettes urbaines. Cela a notamment été mis en évidence par des mesures de température de surface par caméra infrarouge le 20 avril 2009 à Berlin, où l'écart entre les températures de feuille et la température d'air était de l'ordre de 2°C la journée et 1°C la nuit [Christen *et al.* 2012].
- La simplification de Penman-Monteith est utilisée pour déterminer l'évaporation (voir partie 4.4.2).

Volume d'air dans la rue

Une seule température d'air est calculée pour la rue, déterminée par un bilan de chaleur sur le volume d'air, négligeant le stockage. Tout d'abord, la densité de flux vertical échangé entre la rue et la CLU est calculée :

$$Q_{top} = \rho c_p u_d (T_{can} - T_{clu}) \quad (4.4)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} u_d [m/s] : \text{La vitesse de mélange verticale (voir chapitre 2)} \\ T_{can} [K] : \text{La température de l'air dans la rue} \\ T_{clu} [K] : \text{La température de l'air au-dessus de la rue.} \end{cases}$$

Rappelons que u_d est calculée au chapitre 2 en supposant deux murs de même hauteur. Lorsque la rue s'éloigne de cette configuration, le flux vertical risque donc d'être sous-estimé.

La température d'air T_{can} [K] est celle qui vérifie le bilan :

$$W(Q_{top} + Q_{adv}) = W(f_r Q_{Hr} + f_v \frac{A_v^{vol}}{A_v^{surf}} Q_{Hv}) + H_1 Q_{Hm_1} + H_2 Q_{Hm_2} + A_a^{conv} Q_{Ha} \quad (4.5)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} Q_{adv} [m] : \text{Le flux de chaleur advecté longitudinalement, par mètre carré de surface au sol (donnée d'entrée)} \\ f_r, f_v [-] : \text{Les fractions de route et de végétation } (f_v + f_r = 1). \end{cases}$$

Dans les sections suivantes, la modélisation des flux convectifs, conductifs et latents sera décrite.

4.2 Modélisation des flux convectifs

4.2.1 Parois de la rue

Des coefficients de transfert thermique convectifs sont utilisés pour déterminer le flux sensible des murs, du sol végétalisé et de la route selon :

$$Q_{Hi} = h_i (T_i - T_{can}) \quad (4.6)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} h [W/(m^2K)] : \text{Le coefficient de transfert thermique} \\ T_i [K] : \text{Les températures de surface} \\ T_{can} [K] : \text{La température d'air.} \end{cases}$$

La comparaison des différentes corrélations existantes de [Mirsadeghi *et al.* 2013] recommande pour les bâtiments assez grands (6-8 étages) les modèles de [Ito *et al.* 1972] et de [Loveday & Taki 1996]. Parmi ces deux options, la formulation de [Loveday & Taki 1996] a été choisie, car elle a été développée à partir de mesures de vitesse à 1 m du mur contre 30 cm pour [Ito *et al.* 1972], ce qui semblait une distance plus raisonnable pour supposer être hors de la couche limite aérodynamique. La

corrélation choisie est la corrélation moyenne proposée par [Loveday & Taki 1996] qui combine les corrélations sur les murs amont et aval par rapport au sens du vent :

$$h_i = 16,21u_i^{0,452} \quad (4.7)$$

Avec u_i [m/s] la vitesse proche des parois, telle que définie au chapitre 2, et $i \in \{m_1, m_2, s\}$. Une valeur minimum de 3 W/(m²K) est choisie pour h_i de manière à éviter que h_i ne tende vers zéro en cas de vent calme. Cette valeur correspond approximativement à une différence de température entre la surface et l'air de 5°C [Cengel 2003], ce qui est un ordre de grandeur des observations dans une rue [Oke *et al.* 2017] (p 203).

4.2.2 Arbres

Pour les arbres, le flux convectif est calculé par déduction, de manière à équilibrer le bilan énergétique :

$$A_a^{conv} Q_{Ha} = A_a^{rad} (S_a^* + I_a^*) - A_a^{lat} Q_{Ea} \quad (4.8)$$

Ainsi, l'estimation d'un coefficient convectif et d'une température de surface ne sont pas nécessaires pour évaluer le flux convectif.

4.3 Modélisation transferts conductifs dans les solides

Le flux de chaleur conduit dans les murs et le sol est considéré perpendiculaire à la surface, c'est-à-dire se propageant sur une dimension. Cela conduit à négliger les ponts thermiques.

La conduction thermique dans les solides est décrite par l'équation de la chaleur 1D (selon l'axe x) :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial Q_G}{\partial x} \quad (4.9)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \rho \text{ [kg/m}^3\text{]} : \text{ La masse volumique du solide} \\ c_p \text{ [J/kgK]} : \text{ La capacité thermique massique du solide} \\ T \text{ [K]} : \text{ La température.} \end{cases}$$

Le densité de flux de chaleur Q_G [W/m²] s'exprime grâce à la loi de Fourier :

$$Q_G = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.10)$$

Avec λ [W/mK] la conductivité thermique.

4.3.1 Méthodes existantes

Les équations rappelées ci-dessus peuvent être résolues ou modélisées par plusieurs méthodes, plus ou moins précises. Le Tableau 4.1 propose une classification des différentes méthodes et des modèles qui les utilisent.

La méthode *Force restore* est la moins coûteuse numériquement ; elle est utilisée dans le modèle ISBA [Noilhan & Planton 1989]. Cette méthode modélise la température en

4.3. Modélisation transferts conductifs dans les solides

Méthode	Exemples de modèles
<i>Force restore</i>	ISBA
Facteurs de réponse	EnviBatE
Equation de la chaleur Discrétisation	TEB VUCM BEP-Tree
Equation de la chaleur Solution analytique	ASLUM PUCM

TABLE 4.1 – Modélisation thermique des solides (ISBA : [Noilhan & Planton 1989]; EnviBatE : [Gros 2013]; TEB : [Masson 2000]; VUCM : [Lee & Park 2008]; BEP-tree : [Krayenhoff *et al.* 2014]; ASLUM : [Wang *et al.* 2021]; PUCM : [Wang *et al.* 2013])

surface comme une variation périodique sinusoïdale autour d'une d'une température en profondeur, considérée stable.

Ensuite, la méthode des facteurs de réponse consiste à pré-calculer la réponse au cours du temps des températures de surface pour une sollicitation unitaire. A chaque pas de temps, l'évolution des températures est donc calculée en sommant l'impact des sollicitations thermiques au cours des heures précédentes. Cette méthode est utilisée dans EnviBatE [Gros 2013].

Enfin, l'équation de la chaleur peut être résolue numériquement en discrétisant l'espace. C'est cette méthode qui est utilisée dans le modèle de rue décrit dans ce chapitre. Elle sera donc détaillée dans la section 4.3.2. Quelques modèles (voir Tableau 4.1) utilisent une solution analytique, qui minimise l'erreur mais est plus coûteuse en temps de calcul.

4.3.2 Discrétisation de l'équation de la chaleur

Une discrétisation de l'équation de la chaleur est utilisée afin d'évaluer les températures de surface et dans l'épaisseur des parois à partir du flux conduit en surface.

Les murs et le sol sont discrétisés en trois couches superposées représentées sur la Figure 4.4, d'épaisseur modulable. Le nombre restreint de couches a été choisi pour ne pas alourdir le modèle, sachant qu'il a vocation à être appliqué sur chaque rue d'un quartier. A titre de comparaison, un nombre de couches similaire est utilisé dans les modèles Solene-microclimat [Bouyer 2009] et dans la version originale de TEB [Masson 2000].

Pour les murs, la condition limite est une température de surface intérieure fixe. Cette condition est dictée par l'absence de modèle de bâtiment dans la version actuelle de MATHIS. Son impact sur les résultats est très dépendant du niveau d'isolation thermique des bâtiments : plus les murs sont isolés et moins cette condition limite aura d'impact. Pour le sol, une condition de flux nulle est choisie. Cette condition suppose de modéliser une profondeur de sol suffisante, afin de pouvoir représenter correctement au moins les variations journalières de température dans le sol. D'après [Florides & Kalogirou 2005], cette profondeur affectée par les variations journalières correspond approximativement à 50 cm.

En discrétisant l'équation 4.9 dans l'espace avec un modèle d'ordre 1 et dans le temps

avec la méthode d'Euler implicite, on obtient pour la première couche :

$$\rho_1 c_{p1} d_1 \frac{T_1^{t+1} - T_1^t}{\Delta t} = Q_{G,surf} - \frac{T_1^{t+1} - T_2^{t+1}}{R_{1,2}} \quad (4.11)$$

Avec :

- d_i [m] : L'épaisseur de la couche i (voir Figure 4.4)
- ρ_i [kg/m³] : La masse volumique de la couche i
- c_{pi} [J/kgK] : La capacité thermique massique de la couche i
- $Q_{G,surf}$ [W/m²] : La densité de flux en surface ($surf = r, v, m_1$ ou m_2)
- T [K] : Les températures telles que représentées sur la Figure 4.4, les exposants t et $t + 1$ se réfèrent au pas de temps
- $R_{1,2}$ [K/Wm²] : La résistance thermique entre T_1 et T_2 .

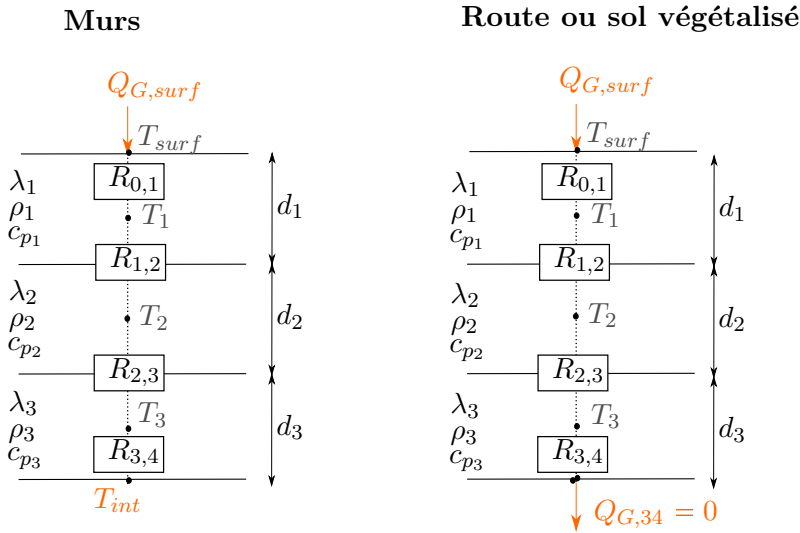


FIGURE 4.4 – Schématisation du modèle de conduction dans les parois

De même, pour les couches suivantes :

$$\rho_2 c_{p2} d_2 \frac{T_2^{t+1} - T_2^t}{\Delta t} = \frac{T_1^{t+1} - T_2^{t+1}}{R_{1,2}} - \frac{T_2^{t+1} - T_3^{t+1}}{R_{2,3}} \quad (4.12)$$

$$\rho_3 c_{p3} d_3 \frac{T_3^{t+1} - T_3^t}{\Delta t} = \frac{T_2^{t+1} - T_3^{t+1}}{R_{2,3}} - Q_{G,34} \quad (4.13)$$

Avec $Q_{G,34} = \frac{T_3^{t+1} - T_{int}}{R_{3,4}}$ si la condition limite est une température fixe, et $Q_{G,34} = 0$ si c'est un flux nul.

Les résistances thermiques sont calculées par :

$$R_{1,2} = \frac{d_1}{2\lambda_1} + \frac{d_2}{2\lambda_2} \quad (4.14)$$

$$R_{2,3} = \frac{d_2}{2\lambda_2} + \frac{d_3}{2\lambda_3} \quad (4.15)$$

4.4. Modélisation de l'évapotranspiration

$$R_{3,4} = \frac{d_3}{2\lambda_3} \quad (4.16)$$

En réorganisant ces équations, on obtient un système d'équations linéaires, qui peut être mis sous forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} \frac{d_1\rho_1c_{p1}}{\Delta t} + \frac{1}{R_{1,2}} & -\frac{1}{R_{1,2}} & 0 \\ -\frac{1}{R_{1,2}} & \frac{d_2\rho_2c_{p2}}{\Delta t} + \frac{1}{R_{1,2}} + \frac{1}{R_{2,3}} & -\frac{1}{R_{2,3}} \\ 0 & -\frac{1}{R_{2,3}} & \frac{d_3\rho_3c_{p3}}{\Delta t} + \frac{1}{R_{2,3}} + X_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1^{t+1} \\ T_2^{t+1} \\ T_3^{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{G,surf} + T_1^t \frac{d_1\rho_1c_{p1}}{\Delta t} \\ T_2^t \frac{d_2\rho_2c_{p2}}{\Delta t} \\ T_3^t \frac{d_3\rho_3c_{p3}}{\Delta t} + X_2 \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Avec :

$$X_1 = \begin{cases} \frac{1}{R_{34}} & \text{si condition de température fixe} \\ 0 & \text{si condition de flux nul} \end{cases} \quad (4.18)$$

$$X_2 = \begin{cases} \frac{T_{int}}{R_{34}} & \text{si condition de température fixe} \\ 0 & \text{si condition de flux nul} \end{cases} \quad (4.19)$$

Une fois le système résolu par itérations, la température du noeud 1 (voir Figure 4.4) est connue. On peut alors déterminer la température de surface en partant de l'expression du flux :

$$Q_{G,surf} = \frac{T_{surf}^{t+1} - T_1^{t+1}}{R_{01}} \quad (4.20)$$

$$\Leftrightarrow T_{surf}^{t+1} = Q_{G,surf} R_{0,1} + T_1^{t+1} \quad (4.21)$$

Avec :

$$R_{0,1} = \frac{d_1}{2\lambda_1}$$

Plusieurs pas de temps ont été testés, de manière à limiter le temps de calcul tout en gardant une erreur acceptable. Finalement, un pas de temps par défaut d'une heure est fixé.

4.4 Modélisation de l'évapotranspiration

En cas de forte chaleur et s'ils disposent de suffisamment d'eau, les végétaux régulent leur température par la transpiration : ce phénomène est appelé évapotranspiration. Cela permet de dissiper une partie du rayonnement entrant dans la rue grâce au changement de phase endothermique de l'eau.

D'une manière générale, l'évaporation peut être représentée par un déficit d'humidité absolue sur une résistance, de la même manière qu'un flux de chaleur sensible est représenté par un déficit de température sur une résistance. Lorsqu'on parle d'évapotranspiration, il est d'usage de distinguer deux résistances :

- La résistance aérodynamique, qui représente la résistance qu'on aurait sur une surface inerte (non vivante)
- La résistance stomatique, qui représente la régulation des arbres à travers l'ouverture de leurs stomates.

4.4.1 Végétation basse

Pour la végétation basse, le déficit d'humidité absolue est directement utilisé, soit :

$$Q_{Ev} = \lambda_{vap} \rho \frac{q_v^* - q_{can}}{r_{a,v} + r_{s,v}} \quad (4.22)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda_{vap} [J/kg] : \text{La chaleur latente de vaporisation de l'eau} \\ \rho [kg/m^3] : \text{La masse volumique de l'air} \\ q_v^* [kg/kg] : \text{L'humidité absolue à saturation à la température de surface} \\ q_{can} [kg/kg] : \text{L'humidité absolue dans la rue} \\ r_{a,v} [s/m] : \text{La résistance aérodynamique de la végétation basse} \\ r_{s,v} [s/m] : \text{La résistance stomatique de la végétation basse.} \end{array} \right.$$

L'humidité absolue à saturation à la température de surface intervient dans l'expression ci-dessus : en effet, localement, très proche de la surface, le changement de phase implique une saturation de l'air. L'humidité absolue dans la rue q_{can} apparaît également. Cette grandeur n'est pas modélisée actuellement, et on suppose donc :

$$q_{can} = q_{mes} \quad (4.23)$$

Avec q_{mes} [kg/kg] l'humidité absolue mesurée à la station météorologique, prise en entrée du modèle.

4.4.2 Arbres

La simplification de Penman-Monteith est utilisée pour les arbres et permet d'exprimer le flux latent sans faire apparaître la température de surface. Cela permet d'éviter d'avoir à itérer pour déterminer les flux de chaleur échangés avec les arbres.

Pour pouvoir appliquer cette équation, les hypothèses suivantes sont faites :

- On suppose que la pente de la courbe de pression de vapeur saturante Δ [Pa/K] est constante entre la température d'air T_{can} [K] et la température de feuille T_a [K], soit :

$$T_a - T_{can} \approx \frac{e^*(T_a) - e^*(T_{can})}{\Delta} \quad (4.24)$$

Avec $e^*(T)$ [Pa] la pression de vapeur à saturation à la température T

- L'humidité absolue est approximée par :

$$q \approx \frac{c_p}{\gamma \lambda_{vap}} e \quad (4.25)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma \approx 67 Pa/K : \text{La constante psychrométrique} \\ c_p [J/kgK] : \text{La capacité thermique massique de l'air} \\ e [Pa] : \text{La pression de vapeur de l'eau.} \end{array} \right.$$

4.4. Modélisation de l'évapotranspiration

Le raisonnement menant à l'équation de Penman-Monteith peut être trouvé dans [Allen 2016]. Il sera tout de même développé ci-dessous de manière à mettre évidence l'impact du choix des différentes longueurs associées aux arbres (A_a^{rad} , A_a^{lat} , A_a^{conv}), ce qui n'est pas abordé dans [Allen 2016], où il est supposé $A_a^{rad} = A_a^{lat} = A_a^{conv}$. Le point de départ est l'équation de bilan des arbres (équation 4.3), ainsi que l'expression du flux latent déjà donnée pour la végétation basse (équation 4.22).

La densité de flux sensible est exprimée avec le déficit de pression de vapeur à saturation selon l'équation 4.24, ce qui donne :

$$Q_{Ha} = \rho c_p \frac{e^*(T_a) - e^*(T_{can})}{\Delta r_{a,a}} \quad (4.26)$$

De même, en utilisant l'approximation de l'équation 4.25, la densité de flux latent s'écrit :

$$Q_{Ea} \approx \rho c_p \frac{e^*(T_a) - e_{can}}{\gamma(r_{a,a} + r_{s,a})} \quad (4.27)$$

En remplaçant ce terme dans l'équation de bilan des arbres (équation 4.3), on obtient :

$$A_a^{rad}(S_a^* + I_a^*) = A_a^{conv} \rho c_p \frac{e^*(T_a) - e^*(T_{can})}{\Delta r_{a,a}} + A_a^{lat} Q_{Ea} \quad (4.28)$$

On ajoute et soustrait la pression de vapeur de l'air e_{can} [Pa] au premier terme à droite de l'équation :

$$A_a^{rad}(S_a^* + I_a^*) = -A_a^{conv} \rho c_p \frac{e^*(T_{can}) - e_{can}}{\Delta r_{a,a}} + A_a^{conv} \rho c_p \frac{e^*(T_a) - e_{can}}{\Delta r_{a,a}} + A_a^{lat} Q_{Ea} \quad (4.29)$$

On factorise les deux derniers termes par $A_a^{lat} Q_{Ea}$:

$$A_a^{rad}(S_a^* + I_a^*) = -A_a^{conv} \rho c_p \frac{e^*(T_{can}) - e_{can}}{\Delta r_{a,a}} + A_a^{lat} Q_{Ea} \left(A_a^{conv} \rho c_p \frac{e^*(T_a) - e_{can}}{A_a^{lat} Q_{Ea} \Delta r_{a,a}} + 1 \right) \quad (4.30)$$

Puis en remplaçant Q_{Ea} au dénominateur par son expression (équation 4.27), il vient :

$$A_a^{rad}(S_a^* + I_a^*) = -A_a^{conv} \rho c_p \frac{e^*(T_{can}) - e_{can}}{\Delta r_{a,a}} + A_a^{lat} Q_{Ea} \left(A_a^{conv} \rho c_p \frac{(e^*(T_a) - e_{can}) \gamma(r_{a,a} + r_{s,a})}{A_a^{lat} \rho c_p (e^*(T_a) - e_{can}) \Delta r_{a,a}} + 1 \right) \quad (4.31)$$

Il apparait dans cette équation que l'expression $(e^*(T_a) - e_{can})$ faisant intervenir la température de surface des arbres se simplifie dans le dernier terme. En réorganisant et simplifiant, on obtient finalement :

$$A_a^{lat} Q_{Ea} = \frac{A_a^{rad} Q_a^* + A_a^{conv} \rho c_p \frac{e^*(T_{can}) - e_{can}}{\Delta r_{a,a}}}{1 + \frac{A_a^{conv} \gamma(r_{a,a} + r_{s,a})}{A_a^{lat} \Delta r_{a,a}}} \quad (4.32)$$

4.4.3 Résistance aérodynamique

Dans le cas de la végétation basse, la résistance aérodynamique correspond à celle déterminée pour le flux sensible, soit : $r_{a,v} = \rho c_p / h_v$.

A l'aide de mesures sur des feuilles provenant de différentes espèces d'arbres, [Knoerr & Gay 1965] ont mis en évidence que les corrélations établies pour de petites plaques planes horizontales pouvaient être appliquées à des feuilles d'arbres. Selon ces corrélations, la résistance aérodynamique évolue selon $u^{-1/2}$ (u étant une vitesse caractéristique) en convection forcée. [Knoerr & Gay 1965] montrent également qu'une taille de feuille caractéristique intervient, qui dépend de chaque arbre. Cette taille de feuille caractéristique n'est pas aisée à déterminer a priori. Pour ne pas multiplier le nombre de paramètres à entrer par l'utilisateur, la formulation de [Lee & Park 2008] est choisie, qui exprime la taille caractéristique en fonction du LAI . La résistance aérodynamique des arbres s'écrit [Lee & Park 2008] :

$$r_{a,a} = \frac{30(1 + 0,55LAI_a)}{\sqrt{|u_a|}} \quad (4.33)$$

Cette équation n'est valable qu'en convection forcée (avec une vitesse supérieur à 0,25 m/s selon [Lee & Park 2008]). La vitesse caractéristique intervenant dans cette équation u_a n'a pas été modélisée dans le chapitre 2 dédié à l'aéraulique. En effet, l'absence de position définie des arbres rend sa définition précise très difficile. Dans cette équation, il est supposée que u_a est égale à la vitesse moyenne longitudinale U_{can} . Il est possible que cette hypothèse s'éloigne d'autant plus de la réalité que la vitesse moyenne longitudinale se rapproche de zéro. Pour éviter des résultats aberrant quand U_{can} tend vers zéro, il a donc été choisi de fixer une valeur maximum de 300 s/m pour $r_{a,a}$. Cela correspond à la valeur calculée par l'équation 4.33 avec la vitesse minimum 0,25 m/s selon [Lee & Park 2008] et le LAI_a maximum pour une canopée forestière d'arbres feuillus en climat tempéré, supposé égal à 7 [Bréda 2008].

4.4.4 Résistance stomatique

Les plantes régulent leur transpiration en contrôlant l'ouverture de leurs stomates. Il s'agit d'un phénomène complexe qui varie d'une plante à l'autre, même d'une même espèce. Par exemple, entre deux arbres de même espèce placés dans une même rue, une différence de transpiration de 30% a été observée sur une journée ensoleillée [Mballo *et al.* 2021]. Pour modéliser ce phénomène, la résistance stomatique est utilisée. Elle est décrite par la formule de [Jarvis 1976] :

$$r_{si} = \frac{r_{smin}}{F_1 F_2 F_3 F_4} \quad (4.34)$$

Avec :

- r_{si} [s/m] : La résistance stomatique de la végétation basse ($r_{s,v}$) ou des arbres ($r_{s,a}$)
- r_{smin} [s/m] : La résistance stomatique minimum
- F_1, F_2, F_3, F_4 [-] : Facteurs modulant la résistance minimum et détaillés ci-dessous.

Cette représentation considère que chaque plante dispose d'une résistance stomatique minimum qui lui est propre, mais qui sera ensuite modulée de la même manière en fonction des conditions environnementales. Une étude bibliographique dans [Garratt 1999]

4.4. Modélisation de l'évapotranspiration

(p 134) donne des valeurs de résistance stomatique minimum entre 40 et 60 s/m pour des arbres.

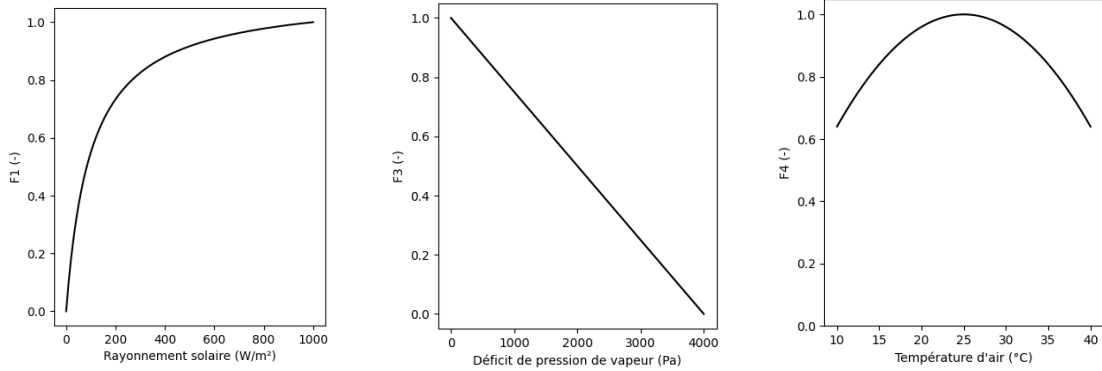
Le premier facteur F_1 représente l'influence du rayonnement solaire sur l'ouverture des pores, et peut être modélisé par [Stewart 1988] :

$$F_1 = \frac{K_1 S'_i}{S'_i + K_2} \quad (4.35)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} S'_i [W/m^2] : \text{Le rayonnement solaire net pour la végétation haute ou basse} \\ \text{par mètre carré de surface au sol, soit } S'_v = S_v^* \text{ et } S'_a = S_a^* \frac{A_a^{rad}}{f_a W} \\ K_1 = (1000 + K_2)/1000 \\ K_2 \approx 100 \end{array} \right.$$

En l'absence de rayonnement solaire, l'évapotranspiration est nulle, comme le montre la forme de la courbe correspondant à l'équation 4.35, tracée sur la Figure 4.5a.



(a) F_1 : influence du rayonnement solaire

(b) F_3 : influence du déficit de pression de vapeur

(c) F_4 : influence de la température d'air

FIGURE 4.5 – Évolution schématique des paramètres F_1 , F_2 et F_3 pour la modélisation de la résistance stomatique

La disponibilité de l'eau dans le sol est modélisée par le facteur F_2 . On a donc $F_2 \rightarrow 0$ pour un sol sec et $F_2 = 1$ pour un sol parfaitement irrigué. Aucun modèle hydrologique n'étant pour l'instant développé, F_2 doit être fixé.

F_3 correspond à l'influence du déficit de pression de vapeur. En effet, plus l'air est sec et plus la plante ferme ses stomates, pour éviter la déshydratation. F_3 diminue donc quand le déficit de pression de vapeur augmente (Figure 4.5b). Ce paramètre est modélisé par [Noilhan & Planton 1989] :

$$F_3 = 1 - 0,25(e^*(T_i) - e_{can}) \quad (4.36)$$

Pour les arbres l'hypothèse est faite que $T_a \approx T_{can}$. Enfin, F_4 représente l'influence de la température d'air, selon [Noilhan & Planton 1989] :

$$F_4 = 1 - 0,0016(298 - T_{can})^2 \quad (4.37)$$

Ce dernier facteur traduit le fait que la plante n'aura pas besoin de transpirer pour réguler sa température lorsque la température d'air est faible, et qu'à l'inverse elle stoppera sa

transpiration lorsque celle-ci est trop élevée pour ne pas se déshydrater. Sur Figure 4.5c, on voit un optimum de transpiration se dessiner autour d'une température d'air de 25°C.

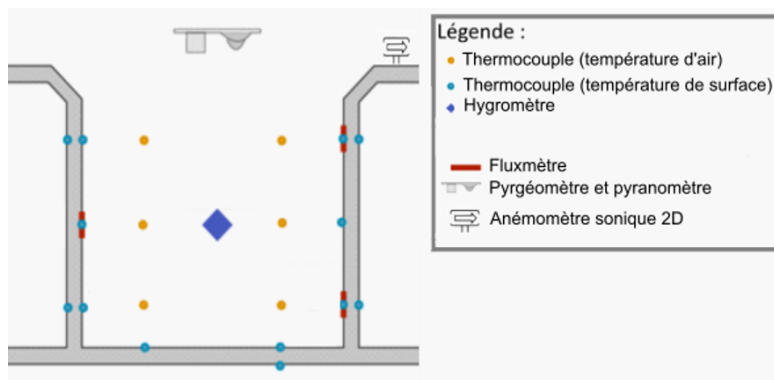
4.5 Validation avec des mesures expérimentales dans une rue sans végétation

Dans cette partie, des simulations effectuées avec le modèle de rue développé sont confrontées à des mesures expérimentales sur une rue sans végétation sur une période d'une semaine. Pour cela, les flux conduits aux murs, le flux solaire quittant la rue et la température du sol sont analysés.

4.5.1 Présentation du cas d'étude et mise en données

Présentation du cas d'étude

L'expérimentation ClimaBat [Djedjig *et al.* 2015] est constituée de quatre rues canyon échelle 1/10, d'une hauteur et largeur de 1,3 m et 1,12 m respectivement, soit un rapport d'aspect $H/W = 1,16$. Les rues sont orientées Nord Sud, situées sur le campus universitaire de La Rochelle. Ici, une rue canyon sans végétation est utilisée pour la comparaison.



(a) Mesures dans une rue expérimentale



(b) Photo du dispositif expérimental

FIGURE 4.6 – Description du banc expérimental Climabat

L'instrumentation dans la rue canyon expérimentale est représentée sur la Figure 4.6.

4.5. Validation avec des mesures expérimentales dans une rue sans végétation

Des thermocouples mesurent les températures de surface des murs et du sol en deux ou trois points chacun, les températures sur les surfaces internes des murs sont également mesurées en deux points. Sur les murs un ou deux fluxmètres mesurent le flux conduit. Juste au-dessus de la rue, un pyranomètre et un pyrgeomètre mesurent le flux solaire et infrarouge entrant et sortant. Enfin, la vitesse au dessus des toits est mesurée par un anémomètre et la température et l'humidité de l'air sont mesurées dans la rue.

La période d'intérêt est constituée de six jours, du 20 au 26 août 2012 inclus. Les conditions météorologiques mesurées sur cette période sont représentées sur la Figure 4.7. Il s'agit d'une semaine plutôt chaude, sans pluie. En fin de semaine, la température d'air se rafraichit légèrement, avec un ciel plus ombragé et une augmentation du vent. Les vents dominants sont du sud et sud-sud-ouest.

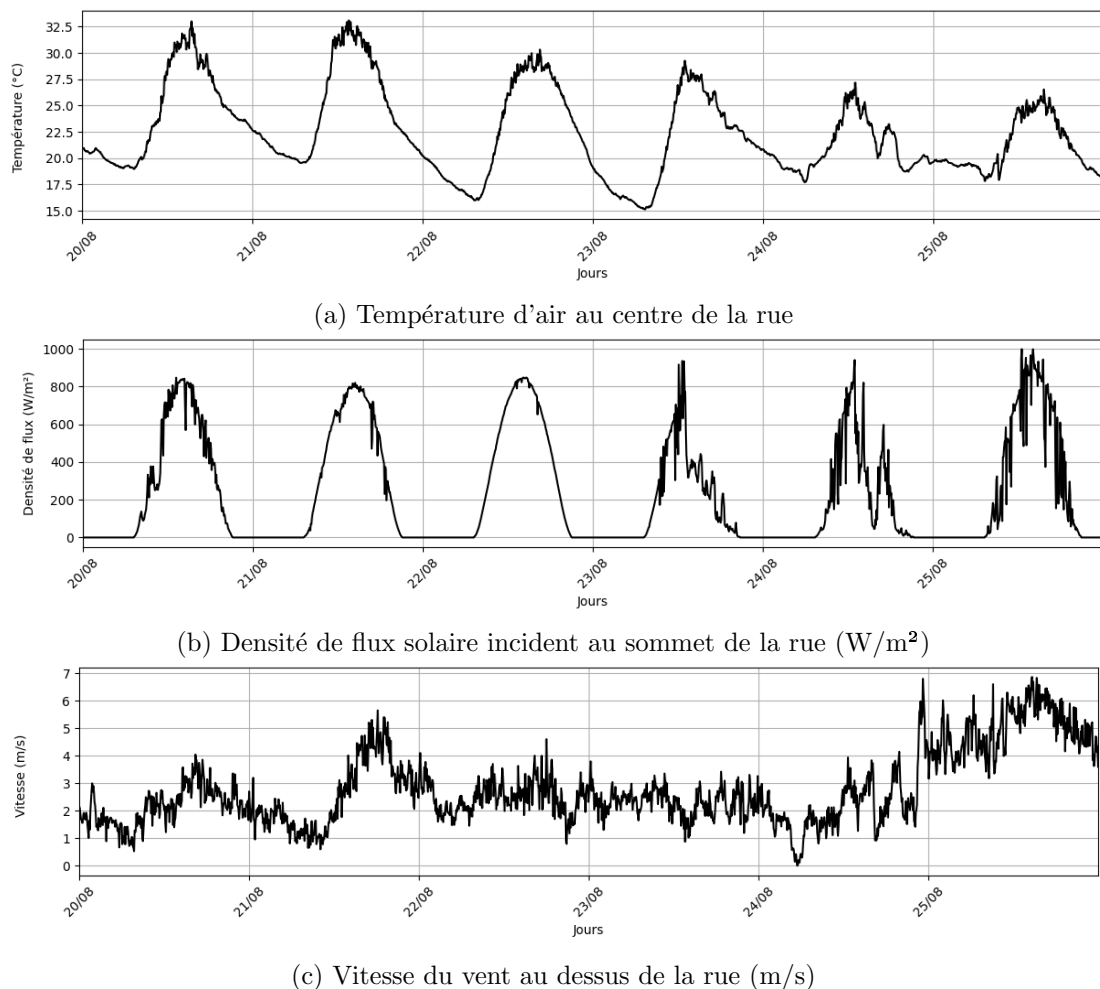


FIGURE 4.7 – Conditions météorologiques sur la période d'intérêt

Mise en données

Les propriétés de surface du sol et des murs ont été mesurées [Djedjig *et al.* 2015] et sont donc connues (Tableau 4.2). De même, les propriétés thermiques des matériaux sont connues et sont répertoriées dans le Tableau 4.3. Pour le sol, les propriétés du sable et des graviers en profondeur ont été estimées à partir de la littérature [Santa *et al.* 2020]. L'humidité du sol n'étant pas connue, une moyenne entre les propriétés d'un sol sec et

d'un sol humide a été choisie.

	Albédo	Emissivité
Murs	0,64	0,9
Sol	0,36	0,9

TABLE 4.2 – Propriétés de surface choisies pour la simulation sur le cas d'étude ClimaBat

	Matériau	Epaisseur [m]	Masse volumique [kg/m ³]	Capacité thermique massique [J/(kgK)]	Conductivité [W/(mK)]
Murs	Béton	0,05	2150	914	2,36
	Dalles gravillonnées	0,04	2290	926	3,58
Sol	Sable	0,4	2050	960	1,15
	Gravier	0,4	2000	1700	1

TABLE 4.3 – Propriétés des matériaux pour la simulation sur le cas d'étude ClimaBat

Les flux mesurés au sommet de la rue en CLO (Figure 4.7b) et GLO (non montré) sont pris en entrée du modèle. De même, la température d'air prise en entrée du modèle est la température mesurée dans la rue (Figure 4.7a). Le fait de forcer la température dans la rue empêche de valider la modélisation de l'échange rue / CLU, et est justifié par l'absence de mesures de température au dessus des rues expérimentales. Par ailleurs, le profil vertical de vitesse au dessus de la rue est décrit par :

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z - d_0 + z_0}{z_0}\right) \quad (4.38)$$

Avec la longueur de rugosité aérodynamique z_0 de 0,13 m et une hauteur de déplacement d_0 de 0,91 m, soient 0,1 H et 0,7 H, avec H la hauteur de la rue, selon les recommandations de [Oke *et al.* 2017]. Par ailleurs, l'advection longitudinale de chaleur dans la rue a été négligée. Enfin, les simulations ont été initialisées en appliquant les conditions météorologiques du 20/08/2012 en boucle pendant cinq jours.

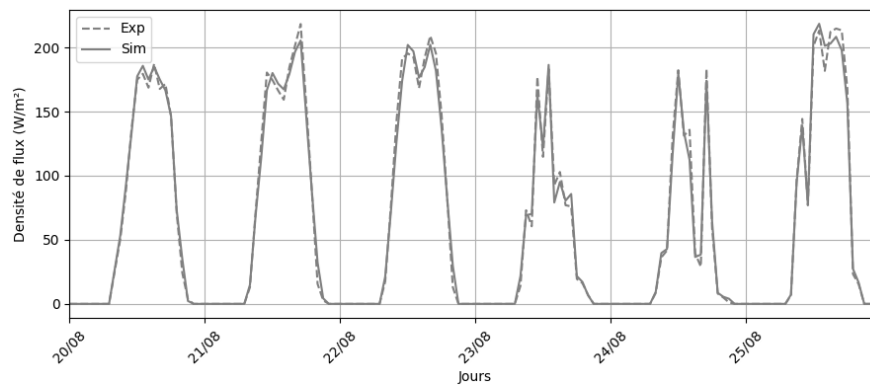
4.5.2 Résultats

Quatre grandeurs ont été comparées : les flux conduits sur les deux murs, la température de surface du sol et le flux solaire sortant de la rue. Pour chacune d'elle, l'erreur moyenne absolue (MAE), définie par l'équation 2.21 et l'erreur quadratique moyenne (RMSE), définie par l'équation 2.22, ont été calculées. Les erreurs obtenues sont répertoriées dans le Tableau 4.4. L'ensemble des grandeurs mesurées et simulées sont également comparées graphiquement sur les Figures 4.6, 4.9 et 4.10.

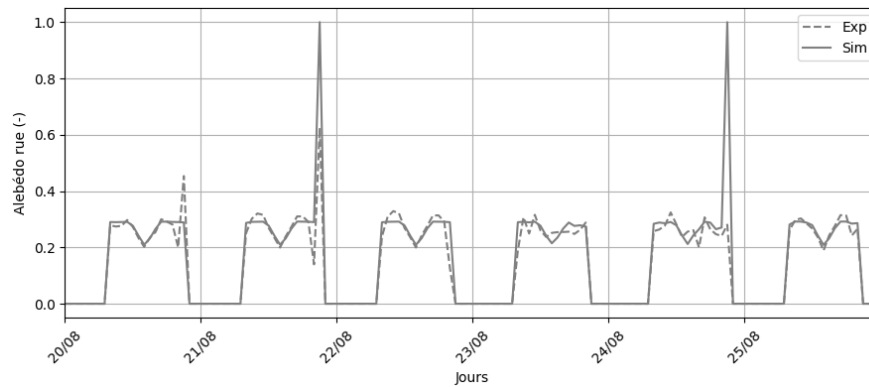
4.5. Validation avec des mesures expérimentales dans une rue sans végétation

	Flux solaire quittant la rue (W/m^2)		Température du sol (K)		Flux conduit mur ouest (W/m^2)		Flux conduit mur est (W/m^2)	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
Valeur absolue	3,6	6,2	1,3	1,5	20,2	27,3	20,6	24,5
Pourcentage de l'amplitude journalière	2 %	3 %	7 %	8 %	14%	18 %	14 %	17 %

TABLE 4.4 – Erreur moyenne absolue (MAE) et erreur quadratique moyenne (RMSE) des grandeurs comparées



(a) Flux solaire entrant et sortant de la rue



(b) Albédo

FIGURE 4.8 – Analyse du flux solaire piégé dans la rue

On observe un comportement satisfaisant du modèle radiatif CLO sans végétation, avec des MAE et RMSE inférieures à 3 % de l'amplitude journalière sur le flux sortant. Le fait que les deux indicateurs soient proches signifie que l'erreur est plutôt homogène dans le temps. Les flux sont représentés sur la Figure 4.8. Étant donné que les équations pour les GLO sont très similaires à celles pour les CLO, ces résultats confirment la fiabilité du modèle radiatif complet sans végétation.

Ensuite, il apparaît sur la Figure 4.9 que la température de sol simulée est très proche des mesures en journée, mais qu'un écart est présent la nuit. Cet écart peut être lié aux hypothèses du modèle de conduction (trois couches, des pas de temps d'une heure avec une formulation implicite), au choix des propriétés du sable et du gravier ou à une surestimation du flux convectif, qui induirait un rafraîchissement du sol trop important. Les MAE et RMSE sur la température du sol sont toutefois relativement faibles, ne dépassant pas 8 % de l'amplitude moyenne journalière. Cela est donc satisfaisant, surtout en considérant que la température est simulée sur la moyenne de la surface, alors qu'elle est mesurée en deux points.

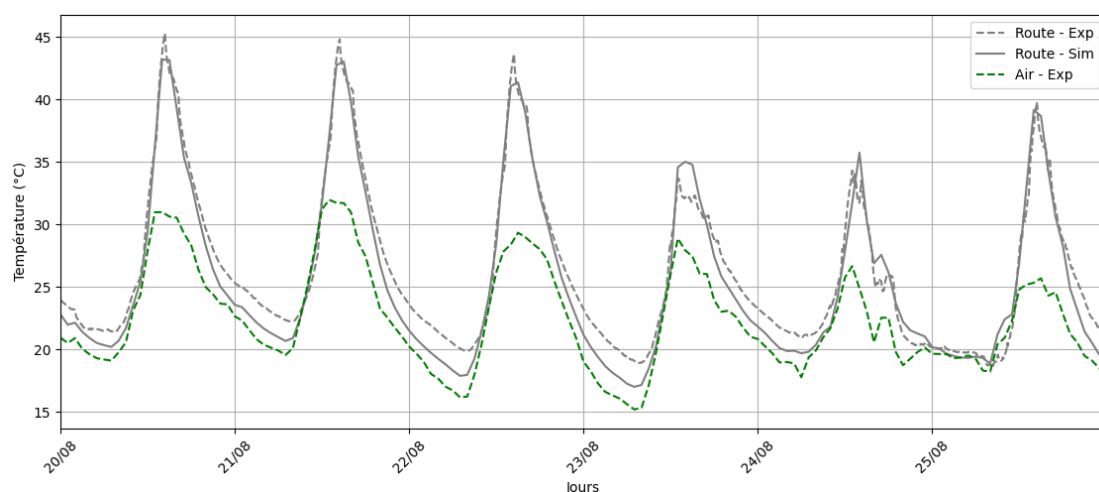


FIGURE 4.9 – Mesures et simulation de la température de la route et température d'air mesurée

Enfin, ce sont sur les flux conduits que les erreurs sont les plus importantes, avec cette fois des RMSE légèrement plus importantes que les MAE, et allant jusqu'à 18 % de l'amplitude moyenne journalière. Cet écart est bien visible sur la Figure 4.10, où les flux sont représentés. Plusieurs explications peuvent être avancées. D'une part, les mesures sont faites en un point à mi-hauteur sur le mur ouest, et en deux points sur le mur est. Il est donc normal d'observer des différences par rapport au flux simulé, qui est le flux moyen sur chaque mur. Par ailleurs, le flux conductif est calculé dans la simulation comme le résiduel des flux radiatif et convectif, tout en étant souvent le plus faible. Cela implique donc que l'erreur sur le flux conductif cumule celle sur les flux radiatif et convectif, tout en étant la plus grande des trois en relatif. Par ailleurs, une surestimation du flux convectif nocturne expliquerait à la fois les écarts nocturnes sur la température de sol et les flux conduits au parois.

Dans l'ensemble, le modèle reproduit bien la dynamique et les ordres de grandeurs des différents flux et des températures de surface, avec une erreur quadratique moyenne toujours inférieure à 20 % de l'amplitude moyenne journalière, ce qui permet de valider la description des phénomènes thermiques dans une rue sans végétation. Enfin, le temps de calcul pour les simulations présentées est inférieur à 10 secondes avec un ordinateur portable équipé d'un processeur Intel Core i7-10850H (6 coeurs, 12 Mo de mémoire cache, 2,7 GHz) et de 32 Go de mémoire RAM.

4.6. Validation avec des mesures expérimentales dans une rue arborée

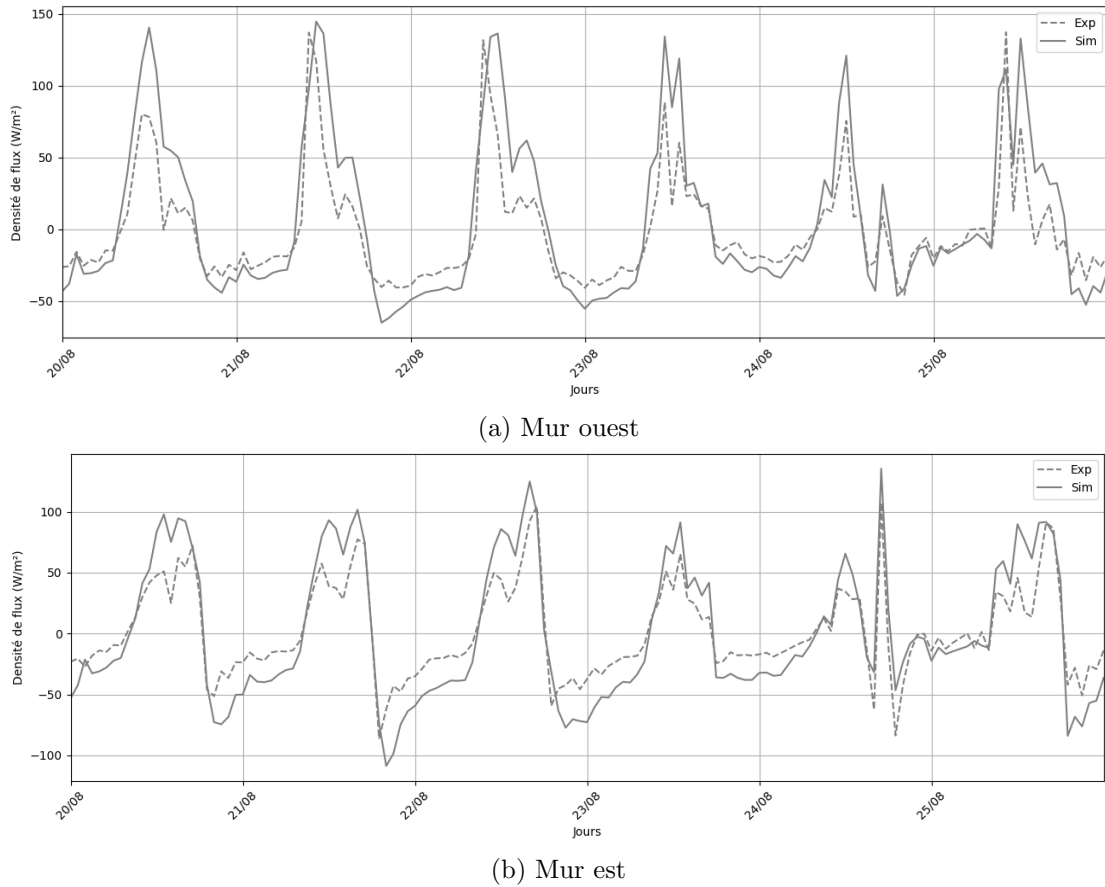


FIGURE 4.10 – Mesures et simulation de la densité de flux conduit

4.6 Validation avec des mesures expérimentales dans une rue arborée

Dans cette partie, des simulations effectuées avec le modèle de rue sont confrontés à des mesures sur une rue arborée expérimentale pendant 24h. L'influence des arbres sur flux radiatifs quittant la rue, les températures de surfaces et le flux latent est étudiée. L'objectif est de procéder à une première évaluation du modèle d'arbres.

4.6.1 Présentation du cas d'étude

Le cas d'étude correspond à une rue arborée expérimentale située à Angers. Les données ont été numérisées depuis [Mballo *et al.* 2021].

Le dispositif expérimental est visible sur la Figure 4.11. Il s'agit d'une rue canyon échelle 1/5, orientée Nord Sud et de rapport d'aspect 1. Une partie de la rue accueille des arbres et une autre est laissée nue. Des mesures ont été faites dans les deux parties (voir Figure 4.12). Le flux radiatif entrant et sortant est mesuré au sommet de la rue. Les températures de surface et les flux conductifs sont mesurés par des fluxmètres à mi-hauteur des murs. La température du sol est également mesurée. Pour évaluer l'évapotranspiration, l'humidité dans les bacs contenant les arbres a été mesurée, ainsi que l'eau apportée pour l'irrigation. L'évaporation a donc pu être estimée par un bilan



FIGURE 4.11 – Rue expérimentale à Angers [Mballo *et al.* 2021]

de masse d'eau. La période étudiée est de 24h et correspond au 29/07/2020.

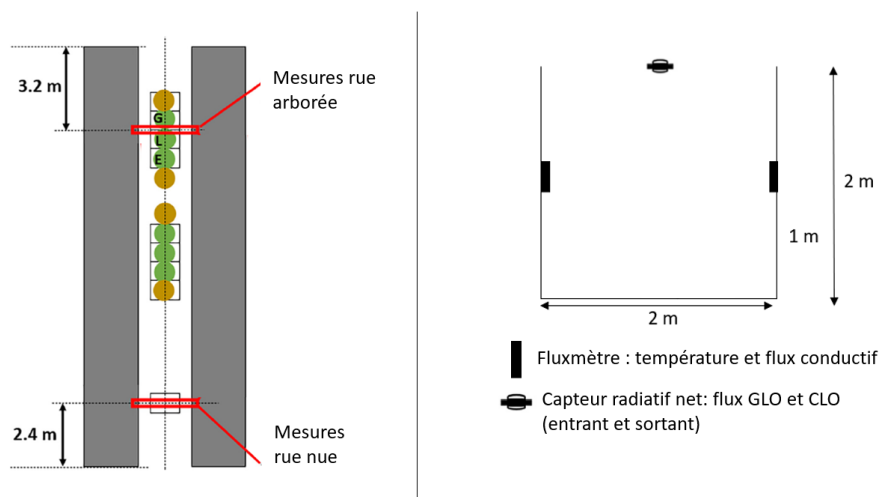


FIGURE 4.12 – Instrumentation dans la rue expérimentale à Angers

4.6.2 Mise en données

4.6.2.1 Données météorologiques et initialisation

Les données météorologiques sont représentées sur la Figure 4.13. La température et l'humidité proviennent d'un mat en amont de la rue, les flux incidents solaire et infrarouge ont été mesurés au sommet de la rue (Figure 4.12) et l'orientation et la vitesse du vent sont celles de la station météorologiques Angers-Beaucouzé. Le profil vertical de vitesse au dessus de la rue est supposé être le même que celui se trouvant à la station météo Angers-Beaucouzé. En effet, comme le montre la Figure 4.14, le dispositif expérimental se trouve en périphérie de la ville, et très proche de la station météo. Enfin, la température en amont de la rue au niveau du sol n'est pas connue, et l'advection longitudinale de chaleur dans la rue est donc négligée.

Par ailleurs, l'initialisation du modèle a été réalisée en supposant que les 5 jours précédent avaient les mêmes conditions météorologiques que le 29/07.

4.6. Validation avec des mesures expérimentales dans une rue arborée

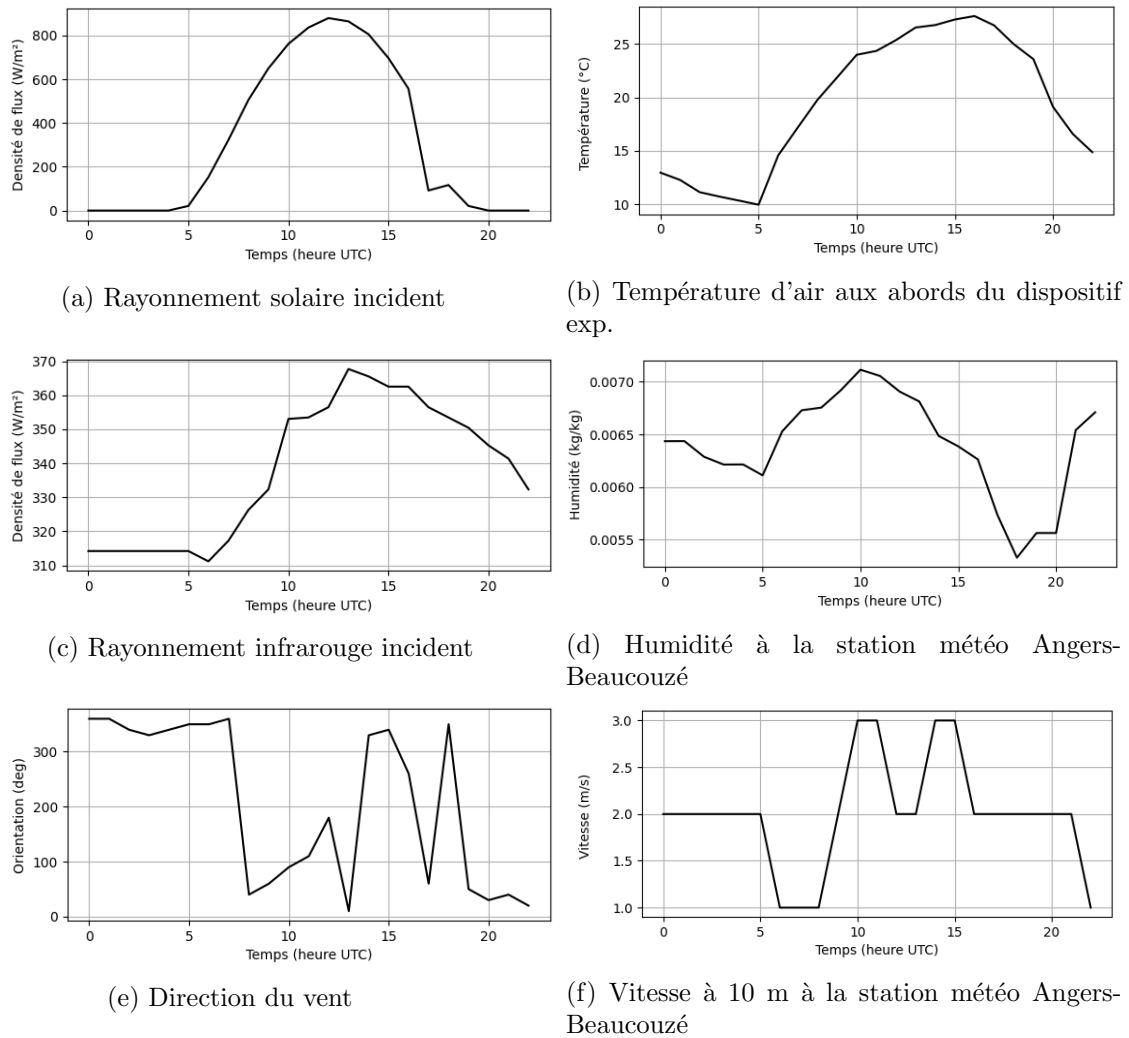


FIGURE 4.13 – Données météo utilisées en entrée du modèle

4.6.2.2 Propriétés des arbres

Les propriétés choisies pour les arbres sont rassemblées dans le Tableau 7.5. Le *Leaf Area Index* des arbres a été mesuré dans [Mballo *et al.* 2021] et est de $2,49 \text{ m}^2/\text{m}^2$. De même, la fraction de recouvrement horizontale est de 0,6 et la hauteur du houppier est comprise entre 0,6 m et 1,7 m.

L'albédo des arbres n'est pas connu et a été pris à 0,23, ce qui correspond approximativement à un arbre de 1,7 m d'après [Oke 1978] (p 132). L'émissivité infrarouge des arbres a été prise à 0,98 : il s'agit de la valeur moyenne mesurée pour des feuilles de différentes cultures horticoles [Molina-aiz & Valera 2012]. La résistance stomatique minimum est difficile à évaluer. Selon une étude bibliographique dans [Garratt 1999], elle se situe entre 40 et 60 s/m pour des arbres. Une valeur de référence de 50 s/m est donc choisie, et la sensibilité à cette valeur sera étudiée. Enfin, les arbres étant supposés bien irrigués, la disponibilité en eau est considérée maximale, avec un facteur F_2 de 1.



FIGURE 4.14 – Localisation du dispositif expérimental et de la station météo Angers-Beaucouzé

Fraction arborée	0,6
Densité de feuillage LAI_a	2,49 m ² /m ²
Hauteur inférieure du feuillage $H_{a,min}$	0,6
Hauteur supérieure du feuillage $H_{a,max}$	1.7
Albédo α_a	0,23
Emissivité ϵ_a	0,98
Résistance stomatique minimum r_{smin}	50 s/m
Disponibilité en eau F_2	1

TABLE 4.5 – Paramètres choisis pour modéliser les arbres sur le cas d'étude d'Angers

4.6.2.3 Propriétés des matériaux

Les noms et l'épaisseur des matériaux sont donnés dans [Mballo *et al.* 2021], mais non les propriétés exactes. Dans cette partie, les propriétés des matériaux sont ajustées en comparant les résultats de simulations aux mesures sur le cas sans végétation. Pour cela, les propriétés des matériaux ont été ajustées par itérations successives, les modifications à chaque itération étant guidées par une analyse qualitative des écarts.

L'albédo n'étant pas dépendant des températures de surface, il est le paramètre le plus facile à ajuster. Pour les émissivités en GLO, l'ajustement est moins évident : une valeur type de 0,9 a été prise et semble bien correspondre. Les émissivités GLO et les albédos choisis ont été répertoriés dans le Tableau 4.6. Notons qu'ici les murs sont très réfléchissants, avec un albédo estimé à 0,7. Ces propriétés permettent d'obtenir des flux radiatifs quittant la rue correspondant aux mesures, présentés sur la Figure 4.15.

Ensuite, les propriétés des matériaux ont été ajustées grâce aux températures de surfaces (Figure 4.16) et aux flux conductifs des murs (Figure 4.17). La température d'air moyenne dans la rue simulée a également été représentée sur la Figure 4.16 à titre

4.6. Validation avec des mesures expérimentales dans une rue arborée

	Description publication	Albédo	Emissivité
Murs	Peinture blanche	0,7	0,9
Sol	Asphalte	0,15	0,9

TABLE 4.6 – Propriétés de surface choisies pour la simulation

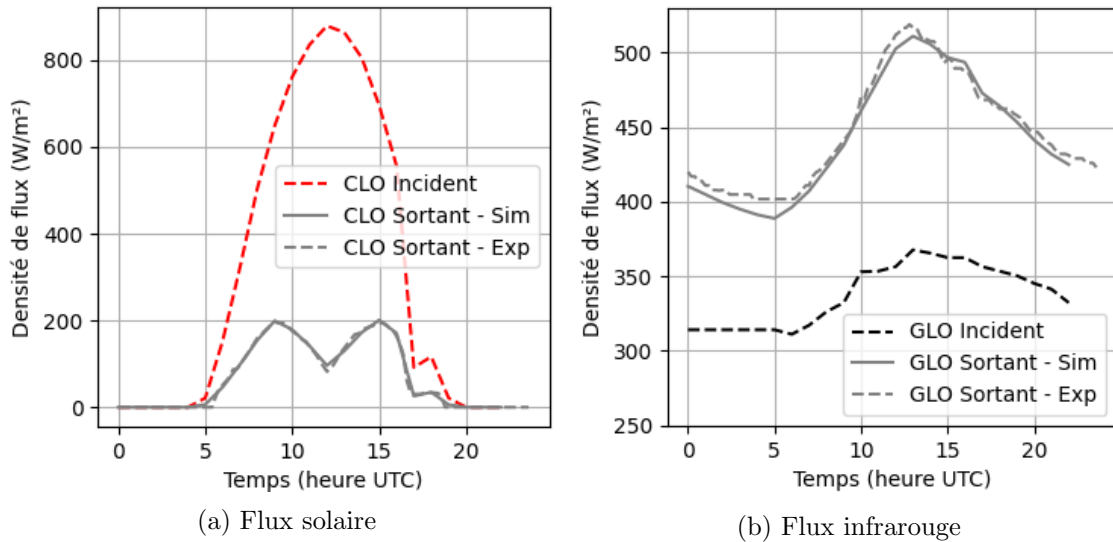


FIGURE 4.15 – Flux radiatif entrant et sortant dans la rue sans végétation

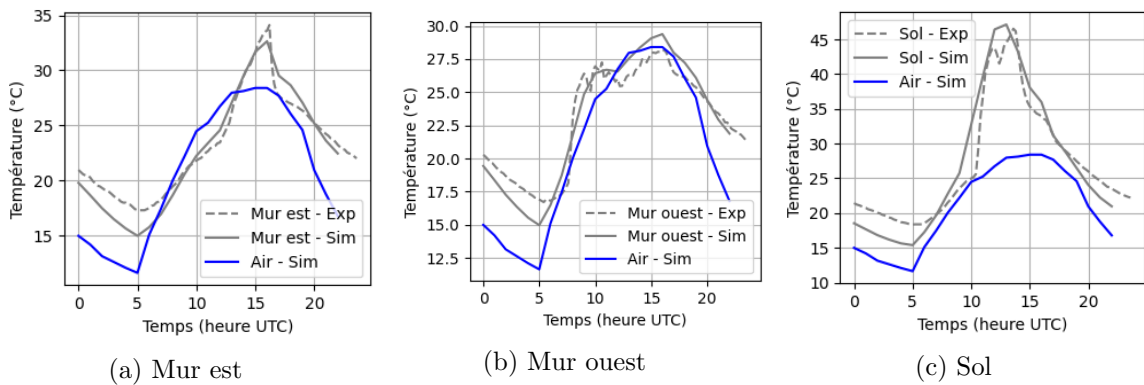


FIGURE 4.16 – Températures de surface dans la rue sans végétation

de comparaison.

Finalement, les propriétés choisies sont présentées Tableau 4.7. Les valeurs correspondent à peu près à celles trouvées dans la littérature pour ce type de matériaux. Le seul écart notable est pour l'asphalte du sol, qui est ici plus conductive et plus dense que dans la littérature [Oke *et al.* 2017].

Ces propriétés permettent d'obtenir des températures de surface et des flux conductifs sur les murs assez proches des mesures, même si des écarts subsistent. Ces écarts peuvent s'expliquer en partie par le fait que le modèle ne simule qu'une moyenne sur les murs ou le sol, et non une valeur en un point précis en milieu de surface. Par ailleurs, la

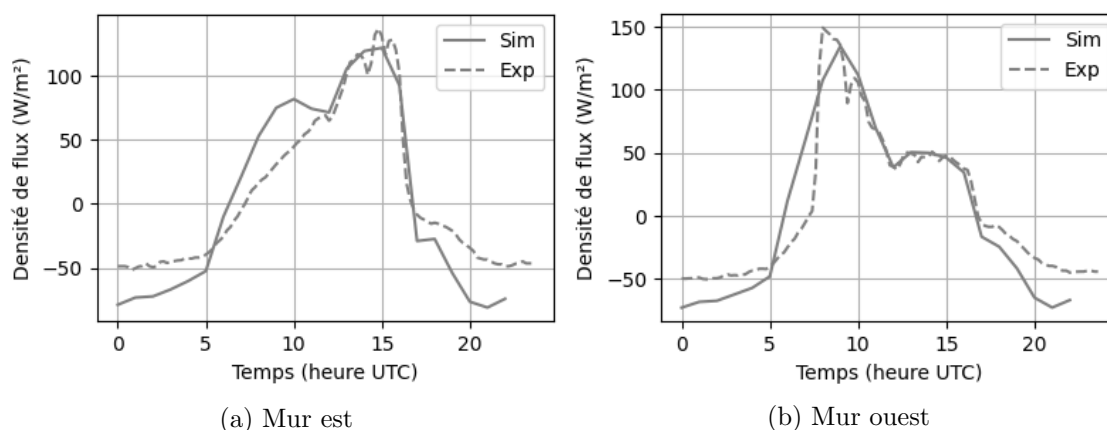


FIGURE 4.17 – Flux conduit aux murs dans la rue sans végétation

	Description publication	Conductivité [W/(mK)]	Capacité thermique volumique [MJ/(m ³ K)]
Murs	Béton (0,1m)	1,7	2,1
	Polystyrène expansé (0,12 m)	0,03	0,06
Sol	Asphalte (0,04 m)	1,5	2,4
	Gravier (0,25 m)	1	3,4
	Terre	0,5	1,5

TABLE 4.7 – Propriétés des matériaux choisies pour la simulation sur le cas d'étude d'Angers

En nuit, la température des murs simulée est plus faible que la mesure, et le flux conduit également : ces deux éléments seraient cohérent avec un flux convectif surestimé dans la simulation. Cela pourrait s'expliquer par l'encaissement du dispositif expérimental (voir Figure 4.14) entre une haie et des bâtiments probablement plus hauts, qui réduirait la vitesse de l'écoulement par rapport à la station météo Angers-Beaucouzé. Les hypothèses de modélisation, par exemple le pas de temps ou le choix de la corrélation pour le flux convectifs peuvent également expliquer une partie des écarts. Par ailleurs, la méthode itérative employée reste incertaine, les propriétés étant couplées (excepté l'albédo). Une incertitude subsiste donc sur les propriétés des matériaux estimées.

4.6.3 Résultats

Les propriétés de surfaces et des matériaux décrites dans la partie précédente sont réutilisées afin de paramétrer les simulations. L'objectif de cette partie est de comparer l'impact des arbres dans le modèle et les mesures. Dans un premier temps, l'impact des arbres sur les flux radiatifs et les températures de surface est évalué. Ensuite, le flux latent simulé est comparé aux mesures.

Flux radiatifs

Les flux radiatifs quittant la rue sont présentés Figure 4.18.

Le flux solaire mesuré est quasiment identique avec ou sans arbres. Dans la simulation, un flux solaire sortant un peu plus faible est obtenu le matin et l'après-midi, et il est au contraire un peu plus élevé en milieu de journée. Ces observations seraient cohérentes avec un ombrage des arbres un peu plus important dans la simulation. En effet, dans le contexte de murs très réfléchissants, si les murs sont plus ombragés dans la simulation, leur albédo très élevé sera moins exploité, et celui plus faible des arbres impliquera un flux CLO absorbé plus important. En revanche, en milieu de journée, quand le soleil est plus haut, l'effet inverse se produit avec la route, qui, elle, a un albédo inférieur à celui des arbres.

Le flux infrarouge quittant la rue mesuré est plus faible en présence d'arbres sur les 24h étudiées : cela provient de l'interception du flux par les arbres. Le modèle reproduit bien ce phénomène, avec une interception du flux GLO du même ordre de grandeur. En journée toutefois, le flux simulé sortant de la rue est un peu plus faible. Cela pourrait s'expliquer de la même façon que l'écart en CLO. La journée, l'interception par les arbres du flux infrarouge émis par les parois, qui sont alors beaucoup plus chaudes que les feuilles, serait légèrement surestimée.

Si les arbres interceptent une part légèrement trop importante du rayonnement qui les traverse (CLO et GLO), cela pourrait être expliqué notamment le choix de la géométrie simulée. En effet, la forme des arbres de l'expérience correspond à peu près à une boule au centre de la rue d'après la photographie de la Figure 4.11. Dans la simulation au contraire, les arbres n'ont pas de position horizontale définie et sont donc répartis uniformément sur toute la largeur de la rue.

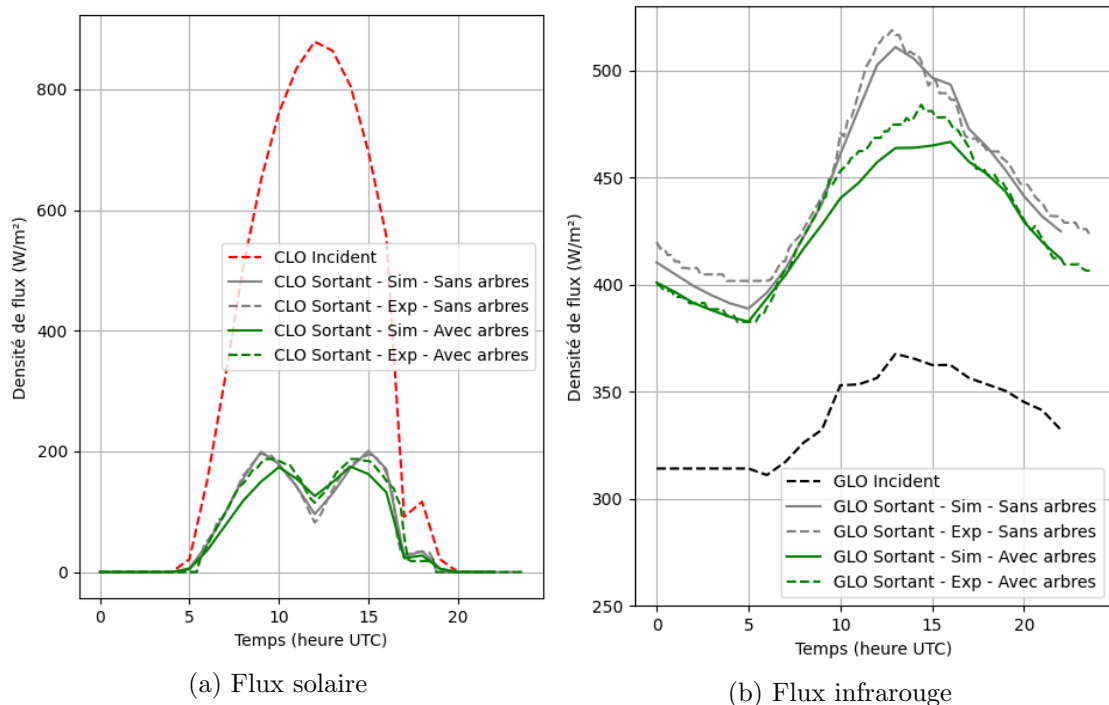


FIGURE 4.18 – Influence des arbres sur les flux radiatif entrant et sortant de la rue

Températures de surfaces et flux conductifs

Les températures de surface mesurées et simulées sont représentées sur la Figure 4.19.

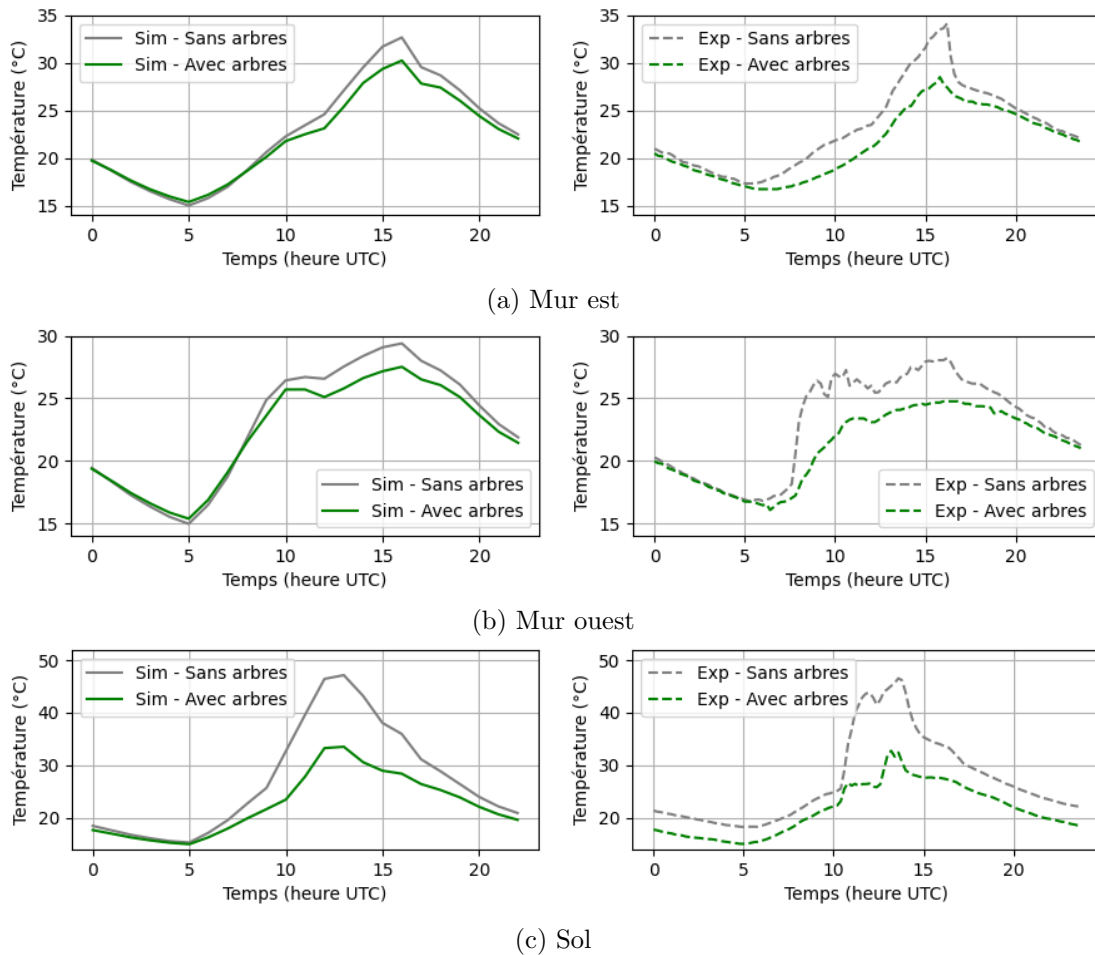


FIGURE 4.19 – Influence des arbres sur les températures de surface

Pour les deux murs, en journée, le rafraîchissement dû aux arbres simulé est légèrement plus faible que celui mesuré. Pour expliquer ces résultats, rappelons que la température des murs est mesurée au milieu du mur. Or, probablement que la partie haute du mur, n'étant pas ombragée, est plus chaude. Il est donc cohérent qu'une température moyenne simulée sur le mur soit plus élevée qu'une température en milieu de mur. La nuit en revanche, l'impact des arbres semble négligeable pour les mesures comme pour la simulation.

Les flux conductifs aux murs sont représentés sur la Figure 4.20. Pour la simulation comme pour les mesures, l'effet dynamique des arbres est ici bien visible : l'ombrage en journée diminue le flux stocké, qui sera ensuite plus faiblement déstocké également la nuit. Toutefois, cet effet semble relativement faible sur ce cas d'étude.

Pour le sol, le rafraîchissement dû aux arbres en journée est proche pour la simulation et les mesures : à 13h par exemple, le rafraîchissement simulé est de 13°C et celui mesuré est de 12°C. Cette différence par rapport aux murs pourrait s'expliquer par une plus grande homogénéité de la température de surface du sol. L'ombrage étant plus important sur le sol que sur les murs, l'effet dynamique est plus important et la température

4.6. Validation avec des mesures expérimentales dans une rue arborée

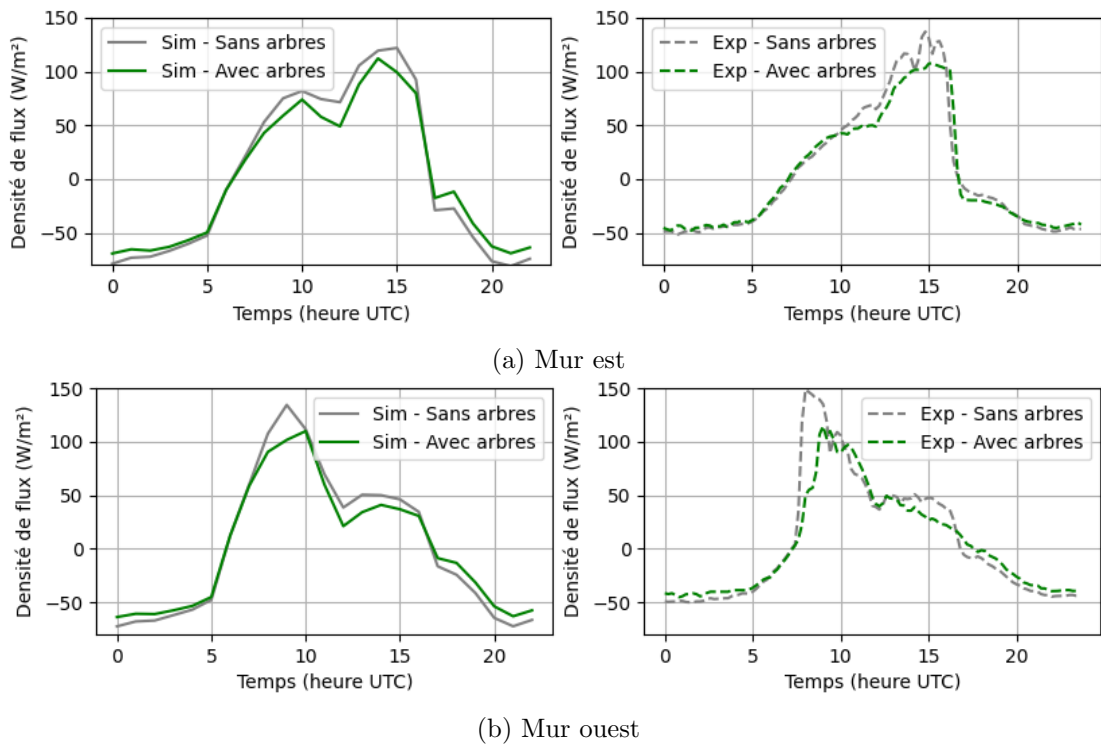


FIGURE 4.20 – Influence des arbres sur le flux conduit aux murs

de surface nocturne est également plus faible en présence d'arbre. Ce rafraîchissement nocturne du sol est bien visible également dans la simulation, même s'il est sous-estimé par rapport aux mesures.

Pour conclure, rappelons les principaux mode d'action des arbres sur la température de surface :

- L'ombrage diminue l'apport solaire et diminue la température de surface en journée.
- Le piégeage radiatif diminue le refroidissement des parois par grandes longueurs d'onde, ce qui augmente la température de surface.
- Les arbres freinent l'écoulement, ce qui diminue l'échange convectif et peut soit réchauffer soit rafraîchir la paroi selon le sens du flux.
- Les trois phénomènes cités modifient le flux stocké et donc l'effet dynamique (moins de flux nocturne déstocké notamment).

Les effets des arbres étant nombreux et se compensant partiellement les uns les autres, il est difficile de les évaluer précisément sans pouvoir les isoler les uns des autres. Les résultats obtenus dans cette partie sont donc satisfaisants étant donné les limites citées.

Evaporation

Les résultats concernant le flux latent des arbres sont présentés sur la Figure 4.21, pour trois résistances stomatiques minimums différentes (r_{smin}).

Sur la première colonne, la résistance stomatique minimum est prise à 50 s/m, ce qui correspond à la littérature [Garratt 1999]. Dans ce cas, les résistances stomatique et aérodynamique sont du même ordre de grandeur, et le flux sensible des arbres vaut approximativement un tiers du flux latent. Toutefois, avec cette paramétrisation, le flux

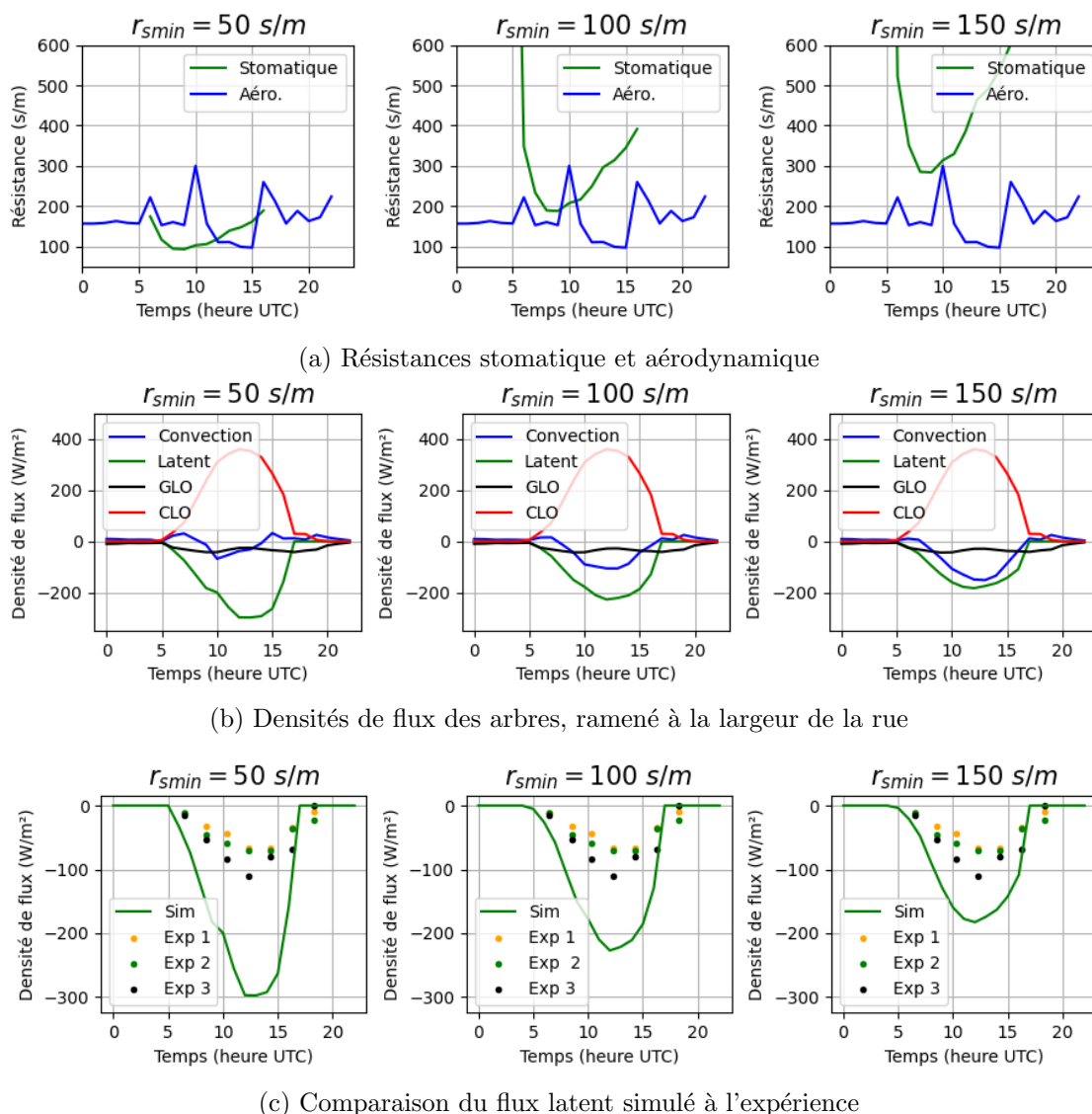


FIGURE 4.21 – Analyse du flux latent des arbres simulé et mesuré (Exp 1, Exp 2 et Exp 3 correspondent aux trois arbres différents)

latent simulé est environ trois fois plus important que le flux mesuré. Afin d'étudier l'importance de la paramétrisation de la résistance stomatique minimum, deux autres valeurs de 100 s/m et 150 s/m ont été testées. On remarque ainsi qu'en augmentant la résistance stomatique minimum, la résistance stomatique devient de plus en plus grande devant la résistance aérodynamique. La part du flux solaire évacuée par l'évaporation diminue également, au profit du flux convectif. Avec la plus grande valeur de résistance stomatique minimum ($r_{smin} = 150 \text{ s/m}$), le flux latent commence à se rapprocher du flux mesuré, un écart autour de 70 W/m^2 en milieu de journée subsistant toutefois.

Pour mettre en perspective ces résultats, notons que dans [Mballo *et al.* 2021], il est évoqué que l'évaporation mesurée est environ inférieure d'un facteur 3 à l'évaporation prévue par la méthode FAO, cette méthode proposant des estimations d'évaporation pour des conditions types en fonction des variétés. La simulation tendrait donc à être

en adéquation avec la méthode FAO. Peut être, dans ce cas, que les mesures ont sous-estimé l'évapotranspiration. Il se peut également, comme évoqué dans [Mballo *et al.* 2021], que les pommiers étant jeunes, ils ne transpirent pas autant que des arbres adultes.

Bilan

Pour conclure, ce cas d'étude est une première étape pour valider la modélisation des arbres. Il a permis de mettre en évidence la cohérence de la modélisation radiative des arbres, pour laquelle une analyse qualitative s'est révélée satisfaisante.

En revanche, un écart important a été observé pour l'évaporation, dont l'origine reste incertaine. Cela permet de toucher du doigt la complexité du phénomène d'évapotranspiration, à la croisée de la biologie et des transferts thermiques. Pour mieux cerner cet écart, il serait intéressant de comparer les mesures sur une période plus longue, de connaître les propriétés des matériaux, et, idéalement, de comparer les résistances stomatiques calculées à des mesures. Enfin, il serait également pertinent de confronter le modèle à un autre cas d'étude arboré. En effet, cela permettrait d'observer les résultats dans d'autres configurations et avec des arbres différents (espèce, âge).

Pour finir, un temps de calcul satisfaisant a été observé pour les simulations présentées : ce dernier est en effet inférieur à 5 secondes avec un ordinateur portable équipé d'un processeur Intel Core i7-10850H (6 coeurs, 12 Mo de mémoire cache, 2,7 GHz) et de 32 Go de mémoire RAM.

4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, la modélisation thermo-énergétique d'une rue a été présentée. Un bilan énergétique est réalisé pour chacune des cinq zones suivantes : les deux murs, la route, le sol végétalisé et les arbres. La température d'air est ensuite déterminée par un bilan énergétique sur l'air de la rue, à l'aide d'une vitesse d'échange entre la rue et la couche limite urbaine. Le modèle a été comparé à des mesures sur le dispositif expérimental ClimaBat, qui correspond à une rue sans végétation. Les résultats ont montré dans l'ensemble une bonne adéquation avec les mesures, avec une erreur quadratique moyenne inférieure à 20 % de l'amplitude moyenne journalière. L'impact des arbres a ensuite été comparé à celui mesuré dans une rue expérimentale à Angers. La prise en compte radiative des arbres a montré les bonnes tendances et les bons ordres de grandeurs de résultats. En revanche, l'évaporation modélisée était significativement plus importante que les mesures, et nécessiterait une évaluation plus approfondie, notamment en confrontant le modèle à d'autres cas d'études arborés.

Tout au long du développement du modèle de rue présenté dans cette première partie de la thèse, une attention particulière a été apportée au faible coût de calcul. Le modèle présenté permet ainsi des simulations sur une rue canyon pendant plusieurs jours en quelques secondes. Cela est conforme aux attentes et permet d'envisager l'application de ce modèle sur chaque rue d'un quartier. La température d'air la rue (T_{can}) et le flux de chaleur vertical entre la rue et la CLU (Q_{top}), obtenues avec le modèle, seront ainsi nécessaires au modèle de quartier présenté dans le chapitre suivant.

Rappel des hypothèses principales du modèle thermo-énergétique

Hypothèses générales :

- La rue est une rue canyon asymétrique de longueur finie
- La température de chaque mur, de la route, du sol végétalisé, des arbres et de l'air dans la rue est considérée uniforme
- Le stockage de chaleur dans l'air est négligé
- Un pas de temps d'une heure est choisi
- La conduction dans les parois est uniquement selon la direction normale à la paroi (ponts thermiques négligés)
- La condition limite de température de surface pour les murs est une condition de température fixe
- La condition limite pour le sol est un flux nul
- Le flux latent des murs et de la route est négligé
- L'humidité du sol est fixée (à travers le paramètre F_2).

Hypothèses spécifiques aux arbres :

- La surface d'échange choisie pour la convection correspond à toute la surface des feuilles, des deux côtés
- La surface d'échange choisie pour l'évaporation correspond à toute la surface des feuilles d'un seul côté (stomates uniquement sur les faces inférieures des feuilles)
- La conduction dans les arbres est négligée.
- L'émission infrarouge des arbres est supposée égale à celle d'un corps gris à la température de l'air.

Deuxième partie

Modélisation d'un quartier

Chapitre 5

Développement d'une approche de modélisation du climat urbain à l'échelle du quartier

Dans ce chapitre, le modèle de rue développé dans la partie 1 est utilisé comme brique élémentaire pour construire un modèle de quartier, dont la structure est basée sur le modèle de dispersion de polluants SIRANE. Pour cela, les intersections, les toits et les places sont modélisées. De même, un modèle aéraulique et thermique de la couche limite urbaine est intégrée. Des panaches gaussiens sont notamment utilisés pour la dispersion de chaleur, à l'image des polluants dans SIRANE.

Sommaire

5.1	Description générale du modèle	132
5.2	Modélisation des intersections	134
5.3	Modélisation des toits et places	136
5.4	Modélisation aéraulique de la couche limite urbaine	138
5.4.1	Modélisation de la vitesse moyenne	139
5.4.2	Modélisation des écart-types de la vitesse	140
5.5	Dispersion de la chaleur dans la couche limite urbaine	142
5.5.1	Principe du modèle de panache gaussien	143
5.5.2	Paramètres du panache	145
5.5.3	Sensibilité de l'étalement du panache	147
5.6	Conclusion	151

5.1 Description générale du modèle

Dans ce chapitre, une approche de modélisation du climat urbain en réseau de rues est développée. Cette approche a été initialement proposée dans le modèle de dispersion de polluants SIRANE [Soulhac *et al.* 2011], décrit au chapitre 1 (partie 1.4.2). Elle permet d'exploiter la morphologie type qu'est la rue canyon asymétrique afin de modéliser une zone étendue à faible coût de calcul, en tirant parti des modélisations paramétriques existant pour cette géométrie. Le modèle de rue canyon développé dans la partie 1 de la thèse est donc le modèle de sous-maille du modèle de quartier.

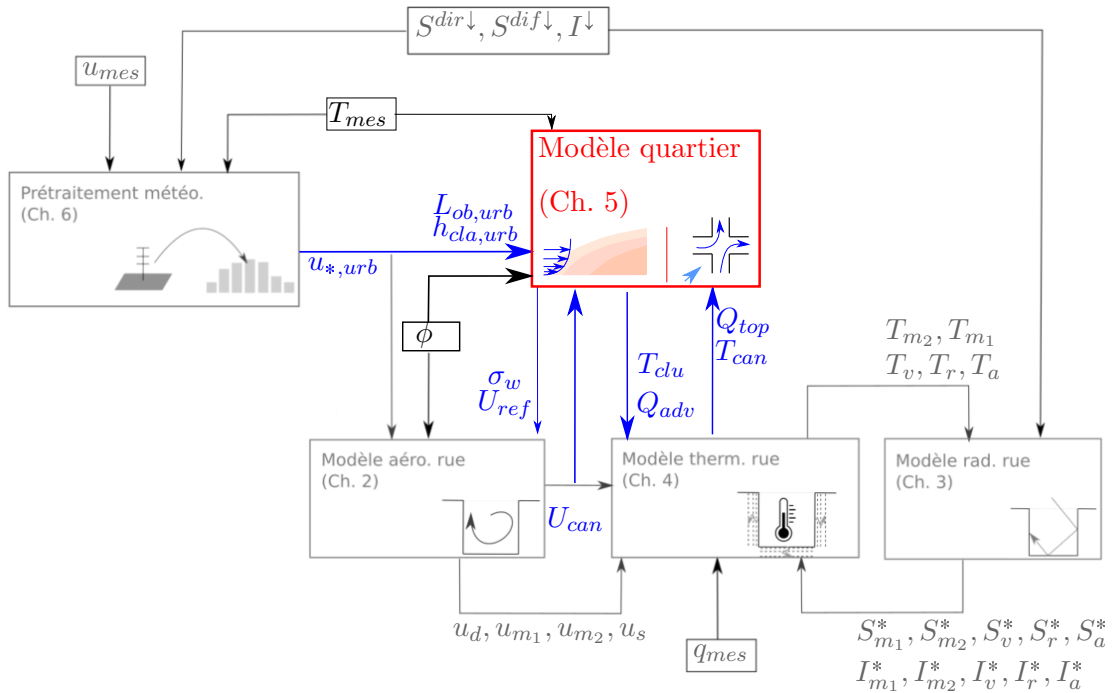


FIGURE 5.1 – Données d'entrée et résultats attendus du modèle de quartier ($L_{ob,urb}$ [m] : longueur d'Obukhov, $h_{cla,urb}$ [m] : hauteur de la CLU, $u_{*,urb}$ [m/s] : vitesse de friction, Q_{top} [W/m²] : densité de flux vertical entre chaque rue et la CLU, T_{can} [K] : température d'air dans chaque rue, T_{clu} [K] : champ de température dans la CLU, Q_{adv} [W/m²] : densité de flux advecté longitudinalement dans les rues, σ_w [m/s] : écart-type de la vitesse verticale au sommet des rues, U_{ref} [m/s] : vitesse à 10 H, U_{can} [m/s] : vitesse longitudinale dans chaque rue, ϕ [rad] : direction du vent, T_{mes} [K] : température d'air mesurée à la station météorologique).

Trois des données d'entrée sont obtenues par le modèle de rue (voir Figure 5.1) :

- La température d'air dans chaque rue (T_{can})
- Le flux de chaleur vertical entre chaque rue et la CLU (Q_{top})
- La vitesse moyenne longitudinale dans chaque rue (U_{can})

Les autres données d'entrée qui apparaissent sur la Figure 5.1 représentent les conditions limites de la CLU :

- La température d'air mesurée à la station météorologique T_{mes}
- La direction du vent, qui est considérée uniforme sur la CLU et est mesurée à la station météorologique (ϕ)

Chapitre 5. Développement d'une approche de modélisation du climat urbain à l'échelle du quartier

- La vitesse de friction ($u_{*,urb}$), la longueur d'Obukhov ($L_{ob,urb}$) et la hauteur de la couche limite urbaine ($h_{cla,urb}$) sont modélisées par le prétraitement météorologique, qui sera décrit au chapitre 6.

Le modèle de quartier développé dans ce chapitre a trois objectifs. Premièrement, les rues doivent être reliées entre elles par les intersections, ce qui permettra de déterminer le flux de chaleur advecté longitudinalement dans chaque rue (Q_{adv}). Ensuite, les profils verticaux de vitesse moyenne et de turbulence dans la CLU doivent être déterminés. Ces profils sont notamment utilisés pour fournir au modèle aérodynamique de rue la vitesse à 10 H (U_{ref}), avec H la hauteur moyenne de la rue et l'écart-type de la vitesse verticale au sommet de la rue (σ_w). Enfin, le dernier objectif est de modéliser le champ de température dans la CLU ($T_{clu}(x, y, z)$).

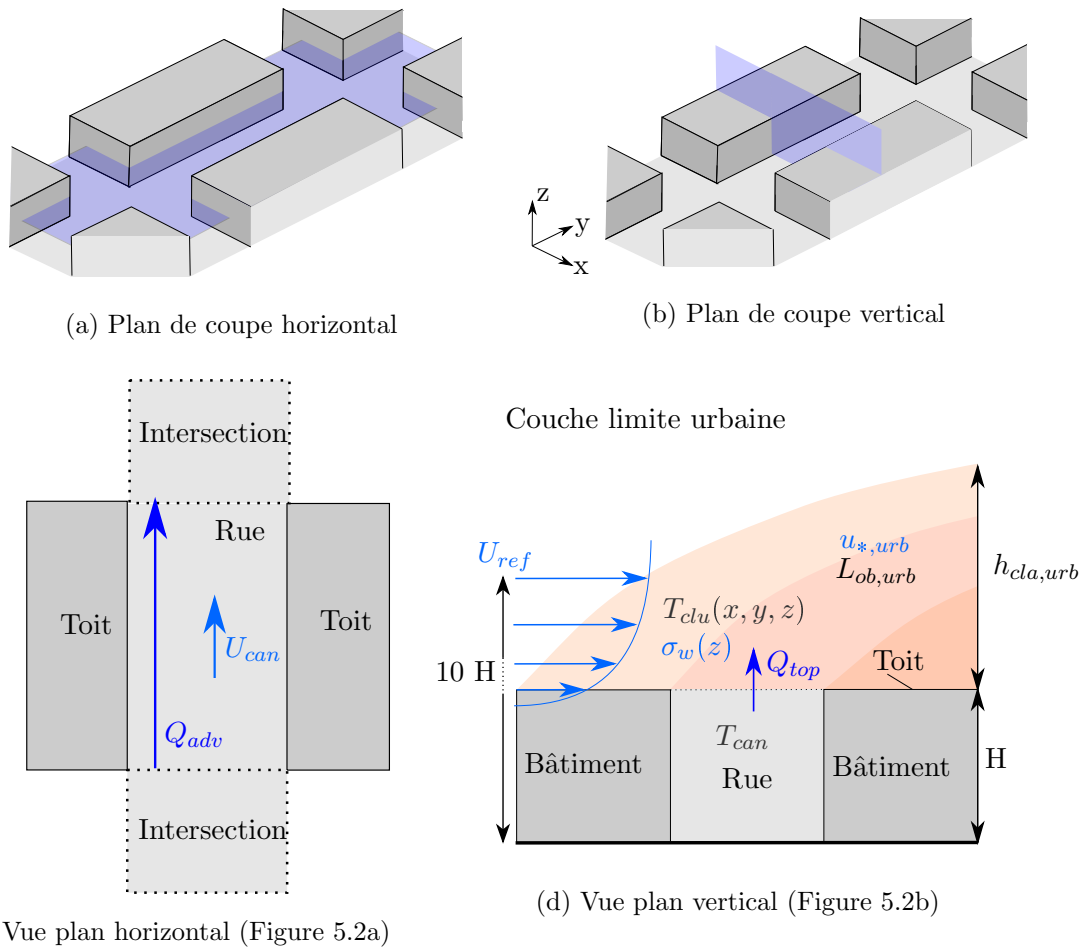


FIGURE 5.2 – Représentation des données d'entrée et des résultats du modèle de quartier ($L_{ob,urb}$ [m] : longueur d'Obukhov, $h_{cla,urb}$ [m] : hauteur de la CLU, $u_{*,urb}$ [m/s] : vitesse de friction, Q_{top} [W/m²] : densité de flux vertical entre chaque rue et la CLU, T_{can} [K] : température dans chaque rue, T_{clu} [K] : champ de température dans la CLU, Q_{adv} [W/m²] : densité de flux advecté longitudinalement dans les rues, σ_w [m/s] : écart-type de la vitesse verticale au sommet des rues, U_{ref} [m/s] : vitesse à 10 H, U_{can} [m/s] : vitesse longitudinale dans chaque rue)

Sur la Figure 5.2, les données d'entrée et de sortie du modèle sont représentées sur

une rue. Cependant, notons que les grandeurs qui sont propres à une rue ($T_{can}, U_{can}, Q_{adv}, Q_{top}, U_{ref}$) adoptent une valeur différente pour chacune des rues du quartier.

Dans un premier temps, la modélisation des intersections est décrite. Cette modélisation ne constitue pas un apport de la thèse, mais reprend celle du modèle SIRANE. Ensuite, la modélisation thermo-radiative des places et des toits est discutée. Finalement, la modélisation aéraulique puis thermique de la CLU est abordée. Cette partie reprend également la modélisation de SIRANE, bien que quelques adaptations soient apportées.

5.2 Modélisation des intersections

Le but du modèle d'intersection est de calculer, pour chaque rue du quartier, les conditions limites nécessaires au modèle thermo-énergétique de rue (chapitre 4), c'est-à-dire le flux de chaleur advecté longitudinalement Q_{adv} (Figure 5.2c). La vitesse dans chaque rue attenante à l'intersection (U_{can}) est une donnée d'entrée de ce modèle. Le modèle d'intersection de SIRANE [Soulhac *et al.* 2011] est utilisé sans modification. Ce modèle néglige l'impact du sol de l'intersection, sur lequel aucun bilan de chaleur

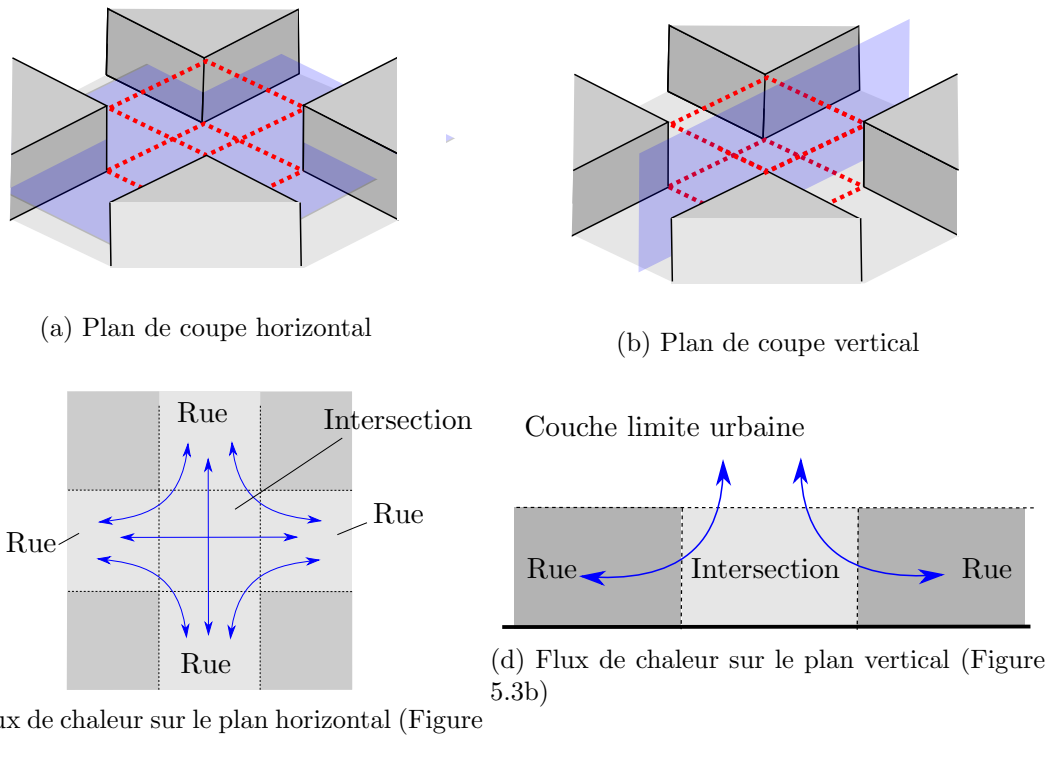


FIGURE 5.3 – Description des flux de chaleur considérés dans le modèle d'intersection n'est réalisé. De même, seule l'advection est considérée, la diffusion est donc négligée.

Définition des flux de chaleur traversant l'intersection

Ce modèle se base sur l'hypothèse que les lignes de courants ne se croisent pas aux

Chapitre 5. Développement d'une approche de modélisation du climat urbain à l'échelle du quartier

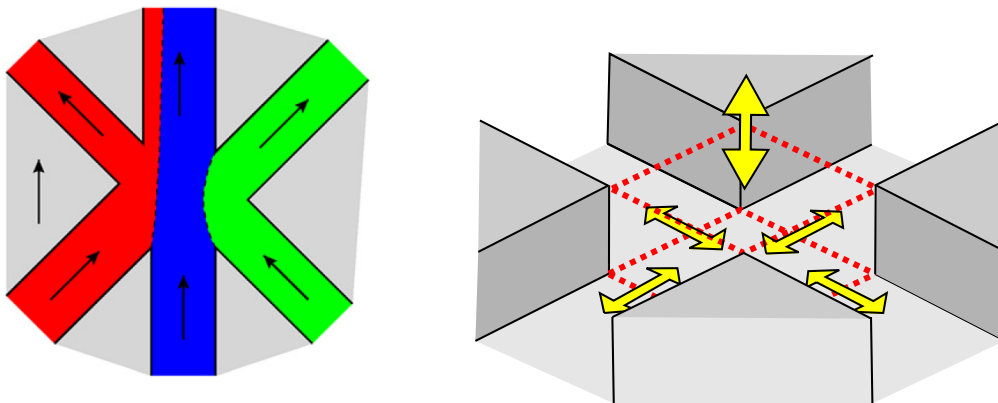
intersections, ce qui correspond aux observations de [Soulhac *et al.* 2009]. Ainsi, aucun noeud de température n'est défini aux intersections, et des flux de chaleur sont donc directement évalués entre les zones adjacentes à l'intersection.

Deux types de flux de chaleur sont considérés :

- Les flux de chaleur transitant d'une rue à l'autre (Figure 5.3c)
- Les flux de chaleur entre une rue et la CLU transitant par l'intersection (Figure 5.3d).

Les intersections ne constituent donc pas des zones de bilan énergétique, mais répartissent simplement les flux de chaleur provenant des zones amont vers les zones aval.

Calcul des débits d'air intervenant dans les flux de chaleur définis



(a) Débits d'air horizontaux avec l'hypothèse de non croisement des lignes de courants [Soulhac *et al.* 2011] (b) Débit d'air vertical avec un bilan de matière

FIGURE 5.4 – Méthodes utilisées pour déterminer les débits d'air verticaux et horizontaux aux intersections

Les débits d'air associés aux flux de chaleur définis sur la Figure 5.3 sont déterminés en deux étapes.

Tout d'abord, les débits d'air provenant des rues amont dans le sens du vent sont répartis dans les rues aval, en supposant que les lignes de courant ne se croisent pas, comme représenté sur la Figure 5.4a.

Ensuite, un bilan matière est réalisé dans l'intersection, représenté sur la Figure 5.4b. Dans le cas où le bilan est équilibré, les débits entre les rues et la CLU (Figure 5.3d) sont nuls. Sinon, ces débits sont déterminés de façon à équilibrer le bilan matière.

Lien avec Q_{adv}

Finalement, le flux de chaleur advecté longitudinalement (Q_{adv} [W/m²]) dans chaque rue est obtenu par :

$$Q_{adv} = \rho c_p U_{can} \frac{HW}{LW} (T_{amont,eq} - T_{can}) \quad (5.1)$$

Avec :

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_{adv} [m] : \text{Le flux de chaleur advecté longitudinalement, par mètre carré de surface au sol} \\ \rho [kg/m^3] : \text{Masse volumique de l'air} \\ c_p [J/kg/K] : \text{Capacité thermique massique de l'air} \\ U_{can} [m/s] : \text{Vitesse moyenne longitudinale dans la rue} \\ H, W, L [m] : \text{Hauteur, largeur, longueur moyennes de le rue} \\ T_{can} [K] : \text{Température de l'air moyenne dans la rue} \\ T_{amont,eq} [K] : \text{Température moyenne des zones amont, pondérées par les débits d'air respectifs.} \end{array} \right.$$

Dans cette équation, une température moyenne équivalente des zones amont est introduite, afin de représenter simplement l'influence des différentes contributions sur le flux advecté (différentes flèches bleues sur la Figure 5.3).

Cas des intersections en bord de domaine

Si une intersection se situe en bord de domaine et que l'écoulement extérieur y pénètre (cas représenté sur la Figure 5.5), la température considérée en amont est la température d'air mesurée à la station météorologique T_{mes} .

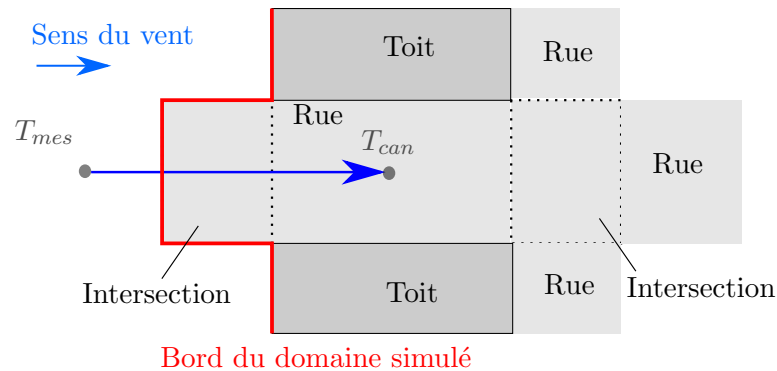


FIGURE 5.5 – Traitement des intersections en bord de domaine lorsqu'elles se trouvent en amont de la rue dans le sens du vent, vue sur une coupe horizontale

Cette hypothèse implique une surestimation du flux advecté longitudinalement dans les rues en bord de domaine (Q_{adv}). L'une des perspectives, sur laquelle nous reviendrons ultérieurement dans le chapitre 7, consiste en une meilleure évaluation de cette condition limite.

5.3 Modélisation des toits et places

Les zones dégagées dont le rapport d'aspect est supérieur à $H/W \approx 1/3$ ne sont plus considérées comme des intersections, et sont classées parmi les places [Soulhac *et al.* 2011]. Dans ce cas, un bilan de chaleur est effectué sur le sol.

Chapitre 5. Développement d'une approche de modélisation du climat urbain à l'échelle du quartier

De même, un bilan de chaleur est également réalisé sur les toits. Ces deux bilans étant très similaires, ils sont présentés ensemble dans cette partie. Leurs objectifs sont de déterminer les densités de flux convectif du sol des places et des toits, qui sont à l'origine d'un panache de chaleur dans la CLU.

Pour les places et les toits, le bilan d'énergie est effectué selon l'équation :

$$S_i^* + I_i^* = Q_{Hi} + Q_{Gi} \quad (5.2)$$

$$\text{Avec : } \left\{ \begin{array}{l} S^* [W/m^2] : \text{La densité de flux solaire incidente} \\ I^* [W/m^2] : \text{La densité de flux infrarouge incidente} \\ Q_H [W/m^2] : \text{La densité de flux convectif quittant la surface} \\ Q_G [W/m^2] : \text{La densité conduit dans la paroi} \\ i : \text{Les toits ou les sols des places.} \end{array} \right.$$

Le flux latent est négligé pour l'instant. Une perspective d'amélioration du modèle serait d'inclure une modélisation du flux latent.

Radiatif

Les multiréflexions avec les autres surfaces urbaines sont négligées pour le rayonnement solaire comme le rayonnement infrarouge, ce qui permet d'écrire :

$$S_i^* = (1 - \alpha_i)(f_{sol}S^{dir\downarrow} + F_{i,c}S^{dif\downarrow}) \quad (5.3)$$

$$I_i^* = \epsilon_i(F_{i,c}I^\downarrow - \sigma T_i^4) \quad (5.4)$$

$$\text{Avec : } \left\{ \begin{array}{l} f_{sol} [-] : \text{La fraction ensoleillée de la surface} \\ S^{dir\downarrow}, S^{dif\downarrow}, I^\downarrow [W/m^2] : \text{La densité de flux incident solaire direct, solaire} \\ \text{diffus et infrarouge} \\ F_{i,c} [-] : \text{Le facteur de vue du ciel} \\ \alpha, \epsilon [-] : \text{L'albédo et l'émissivité.} \end{array} \right.$$

L'ombrage sur les toits et les places (f_{sol}) est pris en compte par une méthode géométrique qui consiste à étirer les polygones formés par les bâtiments dans le sens des rayons du soleil. Cette méthode a l'avantage d'être rapide d'utilisation et de considérer le domaine simulé dans son ensemble. En revanche, elle n'est pas adaptée (pour l'instant) à l'inclusion de matériaux semi-transparents comme les arbres.

Les facteurs de vue du ciel ne sont pas calculés précisément afin de limiter le temps de calcul. En effet, les toits et les places étant des zones plutôt dégagées, l'hypothèse est faite d'un facteur de vue du ciel de 1.

Convection

Le flux convectif est calculé à l'aide de coefficients convectifs. Les vitesses et températures d'air utilisées sont déterminées à l'aide des modèles de la CLU, décrits

5.4. Modélisation aéraulique de la couche limite urbaine

dans les parties suivantes. Pour les toits, une corrélation développée par [Kobayashi & Morikawa 2000] est utilisée :

$$h_{toit} = 7,4 + u_{toit} \quad (5.5)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} h_{toit} [W/m^2K] : \text{ Le coefficient d'échange convectif du toit} \\ u_{toit} [m/s] : \text{ La vitesse de l'air à 1,5 m du toit, ce qui correspond} \\ \text{ au dispositif de mesures dans [Kobayashi \& Morikawa 2000].} \end{cases}$$

Pour les places, le coefficient de transfert thermique est estimé par la même corrélation que pour les parois des rues (équation 4.7), issue de [Loveday & Taki 1996] :

$$h_{place} = 16,21u_{place}^{0,452} \quad (5.6)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} h_{place} [W/m^2K] : \text{ Le coefficient d'échange convectif du sol de la place} \\ u_{place} [m/s] : \text{ La vitesse de l'air à 1 m du toit, ce qui correspond} \\ \text{ au dispositif de mesures dans [Loveday \& Taki 1996].} \end{cases}$$

L'utilisation d'une corrélation différente pour les toits est justifiée par les recirculations spécifiques à cet endroit [Oke *et al.* 2017]. La température d'air utilisée pour le calcul du flux à partir de ces coefficients convectifs est prise à la même distance de la paroi que la vitesse.

Flux conductif

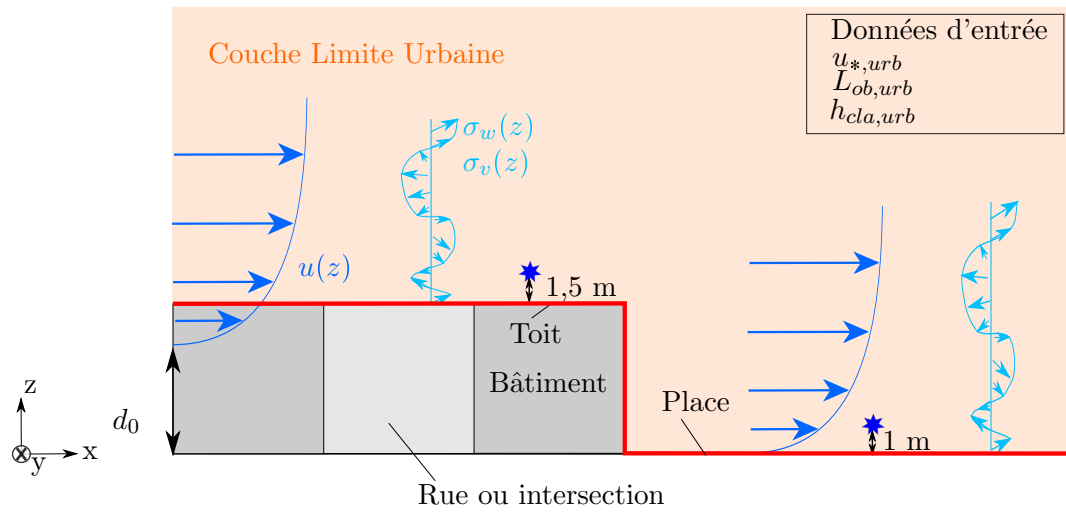
Pour finir, le flux conductif des toits et des places ($Q_{G,toit}, Q_{G,place}$) est calculé avec la même méthode que pour les parois des rues, c'est-à-dire avec l'équation de la chaleur résolue par différences finies, discrétisée sur trois couches (voir partie 4.3.2). Pour les toits, la conditions limite est une température de surface fixe (comme pour les murs) et pour le sol des places, il s'agit d'un flux nul.

5.4 Modélisation aéraulique de la couche limite urbaine

L'objectif de cette partie est de déterminer des profils verticaux de vitesse moyenne et de turbulence dans la couche limite urbaine. Pour cela, il est supposé que la direction du vent est uniforme dans la CLU sur le domaine simulé, et égale à celle mesurée à la station météorologique. La direction x est définie parallèle au sens du vent (Figure 5.6). Une seule composante de la vitesse moyenne, selon x , doit donc être déterminée, nommée $u(z)$. La turbulence est représentée par les écarts-types de la vitesse transversale et verticale, respectivement $\sigma_v(z)$ et $\sigma_w(z)$. L'écart-type longitudinal n'est pas considéré car son impact est supposé négligeable par rapport à l'advection.

Afin de déterminer ces profils, la vitesse de friction ($u_{*,urb}$ [m/s]), la longueur d'Obukhov ($L_{ob,urb}$ [m]) et la hauteur de la CLU ($h_{cla,urb}$ [m]) sont nécessaires. Ces grandeurs sont prises comme des données d'entrée dans cette partie, et seront déterminées au chapitre 6 par un prétraitement des données météorologiques.

Ces profils verticaux sont nécessaires à la modélisation de la dispersion de chaleur dans la CLU, décrite dans la partie suivante. Ils sont également utilisés pour calculer les



★ Vitesse utilisée pour les coefficients de transferts convectifs

FIGURE 5.6 – Description du modèle aéraulique de CLU ($L_{ob,urb}$ [m] : longueur d'Obukhov, $h_{cla,urb}$ [m] : hauteur de la CLU, $u_{*,urb}$ [m/s] : vitesse de friction, $\sigma_w(z), \sigma_v(z)$ [m/s] : profils verticaux de l'écart-type de la vitesse verticale et transversale, $u(z)$ [m/s] : profil vertical de vitesse moyenne)

données d'entrée du modèle aéraulique de rue, soient la vitesse U_{ref} à 10 H et l'écart-type de la vitesse verticale au sommet des rues σ_w .

5.4.1 Modélisation de la vitesse moyenne

Le profil vertical de vitesse dans la couche limite urbaine suit la théorie des similarités de Monin-Obukhov [Monin & Obukhov 1954], selon :

$$u(z) = \frac{u_{*urb}}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z - d_0 + z_0}{z_0}\right) - \Psi_m\left(\frac{z - d_0 + z_0}{L_{ob,urb}}\right) + \Psi_m\left(\frac{z_0}{L_{ob,urb}}\right) \right] \quad (5.7)$$

Avec :

- d_0 [m] : La hauteur de déplacement du quartier
- z_0 [m] : La longueur de rugosité aérodynamique du quartier
- $L_{ob,urb}$ [m] : La longueur de Monin-Obukhov
- u_{*urb} [m/s] : La vitesse de friction
- Ψ_m : La fonction universelle aérodynamique de [J. A. Businger 1971].

Ce choix permet de prendre en compte l'impact de la stabilité atmosphérique. La théorie des similarités de Monin-Obukhov sera détaillée au chapitre 6, et n'est donc pas approfondie ici. La modélisation de la hauteur de déplacement et de la longueur de rugosité aérodynamique y seront également abordées.

Pour les places, le profil vertical est supposé commencer au niveau du sol (Figure 5.6). Un d_0 nul est donc pris localement.

5.4.2 Modélisation des écart-types de la vitesse

Modélisation pour une couche limite atmosphérique classique

Tout d'abord, les modélisations existantes pour une couche limite non urbaine sont présentées (les indices *urb* pour h_{cla} , u_* et L_{ob} sont donc supprimés).

Le comportement de la CLA est très différent selon la stabilité, ce qui implique que différentes équations soient utilisées. Notamment en condition instable, la flottabilité joue un rôle important. On définit alors une échelle de vitesse convective w_* [m/s] :

$$w_* = u_* \left(\frac{h_{cla}}{\kappa L_{ob}} \right)^{1/3} \quad (5.8)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} h_{cla} [m] : \text{La hauteur de la couche limite atmosphérique} \\ L_{ob} [m] : \text{La longueur d'Obukhov} \\ u_* [m/s] : \text{La vitesse de friction} \\ \kappa [-] : \text{La constante de Von Karman.} \end{cases}$$

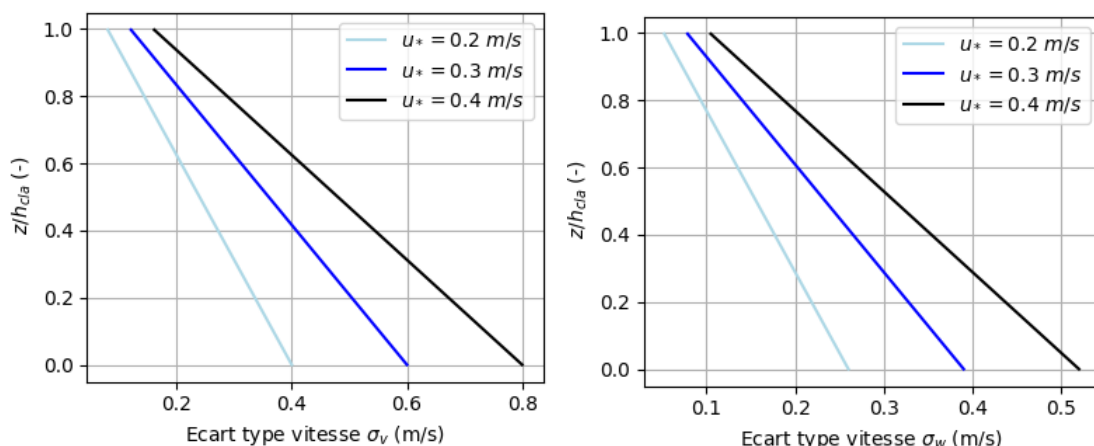
Des profils empiriques, soutenus par des arguments théoriques, ont été établis pour la couche limite atmosphérique [Hunt *et al.* 1988]. Ils sont donnés ci-dessous :

$$\begin{cases} \sigma_w(z) = \sqrt{\left[\sqrt{0,4w_*^2, 1(z/h_{cla})^{1/3}(1 - 0,8z/h_{cla})} \right]^2 + \left[1,3u_*(1 - 0,8z/h_{cla}) \right]^2} & \text{si } L_{ob} < 0 \\ \sigma_w(z) = 1,3u_*(1 - 0,8z/h_{cla}) & \text{si } L_{ob} \rightarrow \infty \\ \sigma_w(z) = 1,3u_*(1 - 0,5z/h_{cla})^{3/4} & \text{si } L_{ob} > 0 \end{cases} \quad (5.9)$$

$$\begin{cases} \sigma_v(z) = \sqrt{0,3w_*^2 + \left[2u_*(1 - 0,8z/h_{cla}) \right]^2} & \text{si } L_{ob} < 0 \\ \sigma_v(z) = 2u_*(1 - 0,8z/h_{cla}) & \text{si } L_{ob} \rightarrow \infty \\ \sigma_v(z) = 2u_*(1 - 0,5z/h_{cla})^{3/4} & \text{si } L_{ob} > 0 \end{cases} \quad (5.10)$$

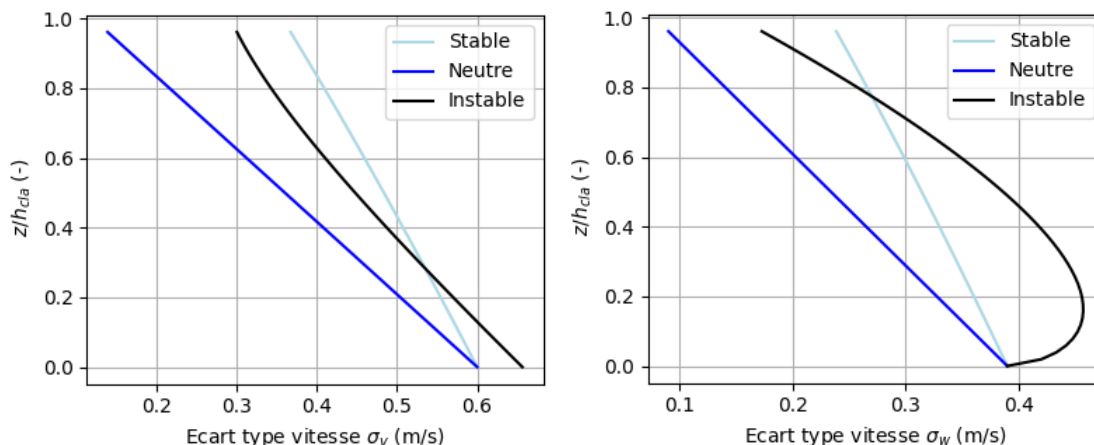
Sur la Figure 5.7, les profils verticaux sont tracés pour différentes vitesses de friction et pour une stabilité atmosphérique neutre. Ainsi, selon cette modélisation, la turbulence croit avec la vitesse de friction. On note également que pour une même stabilité atmosphérique et vitesse de friction, la turbulence dans la direction transversale est plus importante que la turbulence verticale, ce qui est cohérent avec les observations [Stull 1988].

L'influence de la stabilité atmosphérique sur les profils verticaux de turbulence est plus délicate. Les profils verticaux des écart-types ont été tracés sur la Figure 5.8, pour trois valeurs de longueur d'Obukhov $L_{ob} = 30$ (stable), $L_{ob} = -10000$ (neutre) et $L_{ob} = -30$ (instable), pour une vitesse de friction fixée à 0,3 m/s. Pour les cas neutre et stable, une droite décrit l'évolution verticale de la turbulence, qu'il s'agisse de σ_v ou σ_w . Pour les deux directions, la turbulence décroît moins vite avec l'altitude dans le cas stable que dans le cas neutre. Une explication est la propagation d'ondes de gravité dans le cas stable [Hunt *et al.* 1988]. Pour le cas instable dans la direction horizontale, il est



(a) Écart-type de la vitesse horizontale $\sigma_v(z)$ (b) Écart-type de la vitesse verticale σ_w
 FIGURE 5.7 – Sensibilité des écart-types de la vitesse à la vitesse de friction pour une atmosphère neutre

considéré que les deux formes de turbulence que sont le cisaillement et la flottabilité agissent indépendamment l'une de l'autre [Hunt *et al.* 1988]. Cela explique le décalage quasi constant, du moins pour les faibles z/h_{cla} , pour σ_v entre les cas neutre et instable. Enfin, le profil vertical de σ_w dans le cas instable est le seul à ne pas être monotone, présentant un maximum de turbulence autour de $0,2z/h_{cla}$. La croissance de la turbulence entre le sol et le maximum s'explique par l'accélération due aux panaches d'air montant (*thermals*). Puis, la diminution pour les altitudes supérieures est causée par la dilution des panaches verticaux, par la friction et par la stabilisation de l'environnement proche du sommet de la CLA [Stull 1988].



(a) Écart-type de la vitesse horizontale $\sigma_v(z)$ (b) Écart-type de la vitesse verticale $\sigma_w(z)$

FIGURE 5.8 – Sensibilité des fluctuations de vitesses à la stabilité atmosphérique pour une vitesse de friction de 0,3 m/s et $L_{ob} = 30$ (stable), $L_{ob} = -10000$ (neutre) et $L_{ob} = -30$ (instable)

Adaptation à une couche limite urbaine

Les profils verticaux de turbulence décrits précédemment ont été développés pour une CLA classique, c'est-à-dire plutôt instable en journée et stable la nuit. En ville, des

5.5. Dispersion de la chaleur dans la couche limite urbaine

différences surviennent pour la situation nocturne, comme expliqué au chapitre 1 (Figure 1.10).

En effet, la nuit, l'atmosphère urbaine est constituée souvent d'une première couche légèrement instable, due à la chaleur dégagée par la ville, recouverte d'une couche provenant de l'environnement rural, souvent stable. Aucune des équations citées n'est prévue pour ce cas de figure. Toutefois, faute de modélisations développées spécialement pour le milieu urbain nocturne, il a été choisi d'utiliser dans ce cas l'équation correspondant à l'atmosphère instable. En revanche, une modification a été effectuée en prenant une valeur minimum pour les écart-types de $\sigma_{v,min} = \sigma_{w,min} = 0,2 \text{ m/s}$. La valeur minimum de $0,2 \text{ m/s}$ est inspirée du modèle ADMS [CERC 2020], un modèle de dispersion de polluants qui calcule des profils verticaux de vitesse et de turbulence similaires à ceux présentés dans cette partie. Cette valeur de $0,2 \text{ m/s}$ est justifiée par le fait qu'une certaine turbulence est toujours présente sur les zones urbaines due à la topographie locale.

5.5 Dispersion de la chaleur dans la couche limite urbaine

Dans cette dernière partie, le champ de température dans la CLU ($T_{clu}(x, y, z)$) est déterminé à l'aide d'un modèle de panaches gaussiens, sur le même principe que le champ de concentration en polluants dans le modèle SIRANE [Soulhac *et al.* 2011], et illustré sur la Figure 5.9 .

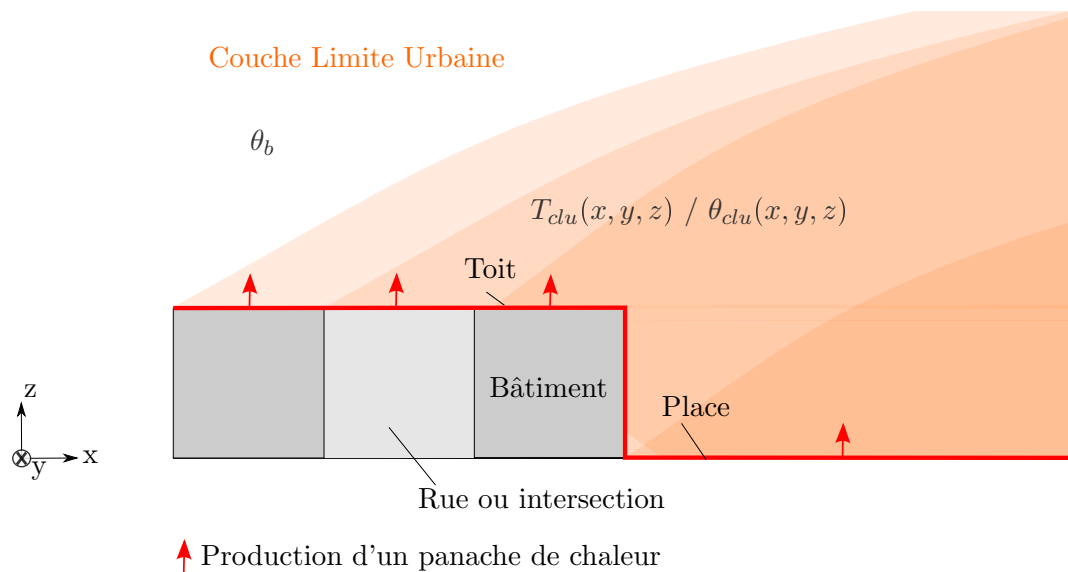


FIGURE 5.9 – Description du modèle thermique de CLU ($T_{clu}(x, y, z), \theta_{clu}(x, y, z)$ [K] : champ de température et de température potentielle dans la CLU, θ_b [K] : condition limite de température potentielle)

Pour pouvoir considérer la température comme un scalaire passif, l'influence des changements de pression due à l'altitude doit être isolée de la dispersion de chaleur. Pour cela, dans cette partie, les températures potentielles sont utilisées, notées θ . Elles correspondent à la température qu'aurait une parcelle d'air ramenée adiabatiquement au niveau du sol. Le lien entre température et température potentielle dépend donc de

Chapitre 5. Développement d'une approche de modélisation du climat urbain à l'échelle du quartier

l'altitude z [Stull 1988] :

$$\theta(z) = T \left(\frac{P_0}{P(z)} \right)^{0,286} \quad (5.11)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \theta [K] : \text{Température potentielle} \\ T [K] : \text{Température} \\ P_0 [Pa] : \text{Une pression de référence, souvent prise à 100 kPa} \\ P [Pa] : \text{La pression atmosphérique.} \end{cases}$$

Par ailleurs, la condition limite de température d'air est supposée être un profil uniforme de température potentielle, nommé θ_b (b pour *background*) et donnée par :

$$\theta_b = T_{mes} \left(\frac{P_0}{P(z_{mes})} \right)^{0,286} \quad (5.12)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} T_{mes} [K] : \text{La température mesurée à la station météorologique} \\ z_{mes} [m] : \text{La hauteur à laquelle } T_{mes} \text{ est mesurée.} \end{cases}$$

Afin de déterminer le champ de température d'air, deux type de données d'entrée sont utilisés :

- Le flux de chaleur émis par chaque élément du domaine (rues, intersections, toits, places) et produisant un panache, représentés sur la Figure 5.9
- Les profils verticaux de vitesse et de turbulence déterminés dans la partie précédente ($u(z), \sigma_w(z), \sigma_v(z)$)
- La hauteur de couche limite atmosphérique, la vitesse de friction et la longueur d'Obukhov sont également nécessaires. L'indice *urb* pour h_{cla} , u_* et L_{ob} n'est pas utilisé dans cette partie, les équations présentées étant générales.

Dans la suite de cette partie, le principe du modèle de panache gaussien est détaillé. Ensuite, la modélisation des paramètres modulant l'étalement du panache est abordée. Enfin, nous analyserons la sensibilité de l'étalement du panache à ces paramètres.

5.5.1 Principe du modèle de panache gaussien

Le modèle de panache Gaussien est originellement un modèle de dispersion de polluants, il est ici extrapolé à l'advection/diffusion de la chaleur.

Le point de départ est l'équation d'advection diffusion avec une seule source ponctuelle :

$$U \frac{\partial \theta}{\partial x} = K_y \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2} + S \quad (5.13)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} U [m/s] : \text{La vitesse moyenne sur le domaine où le panache se développe} \\ K_y, K_z [m^2/s] : \text{La diffusivité thermique turbulente dans les directions } y \text{ et } z \\ \text{(repère défini sur la Figure 5.10)} \\ \theta [K] : \text{La température potentielle} \\ S [K/s] : \text{La source.} \end{cases}$$

Cette équation revient à effectuer les hypothèses suivantes :

5.5. Dispersion de la chaleur dans la couche limite urbaine

- Un régime stationnaire est considéré
- La vitesse est uniforme sur le domaine où le panache se développe U
- La vitesse moyenne est uniquement selon x
- La diffusion due à la conduction thermique est négligée devant la diffusion turbulente
- Dans l'axe du vent, l'advection est largement prédominante par rapport à la diffusion, qui est négligée.

L'équation 5.13 a une solution analytique, qui s'écrit :

$$\theta(x, y, z) = \frac{A}{x} \exp\left(-\frac{U}{4x} \left(\frac{(y - y_s)^2}{K_y} + \frac{(z - z_s)^2}{K_z}\right)\right) + \theta_b \quad (5.14)$$

Avec :

$$\begin{cases} y_s, z_s [m] : \text{La position de la source} \\ \theta_b [K] : \text{La température potentielle en amont de la source} \\ A [mK] : \text{La constante d'intégration.} \end{cases}$$

En utilisant la conservation du flux de chaleur émis par la source ponctuelle, on peut écrire :

$$Q = \int \int \rho c_p U \theta dy dz \quad (5.15)$$

Avec $Q [W]$ le flux de chaleur émis par la source ponctuelle. En remplaçant l'expression de θ dans l'équation 5.15, et en utilisant la définition de l'intégrale de Gauss, on obtient :

$$A = \frac{Q}{4\rho c_p \pi \sqrt{K_y} \sqrt{K_z}} \quad (5.16)$$

On définit alors les écart-types du panache dans les directions y ($\sigma_y [m]$) et z ($\sigma_z [m]$) par (Figure 5.10 a et b) :

$$\begin{aligned} \sigma_y(x) &= \sqrt{\frac{2K_y x}{U}} \\ \sigma_z(x) &= \sqrt{\frac{2K_z x}{U}} \end{aligned} \quad (5.17)$$

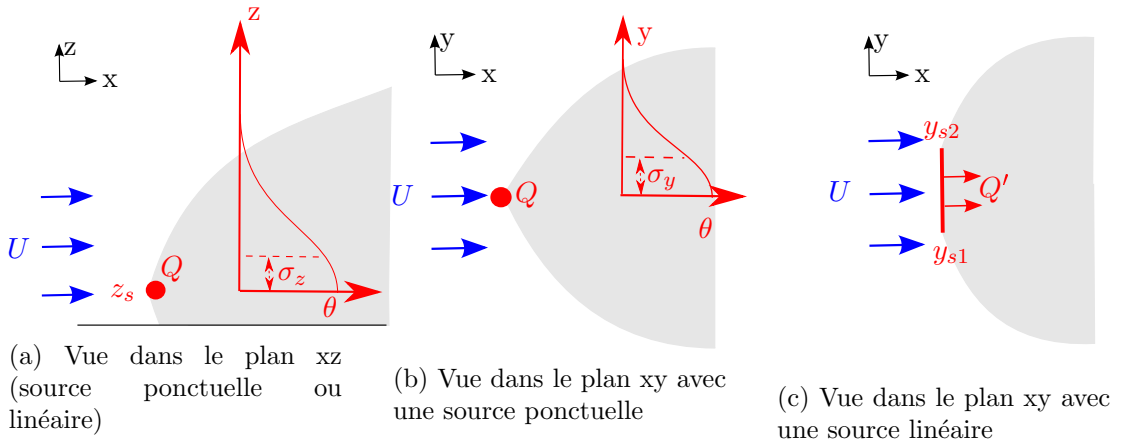


FIGURE 5.10 – Principe du modèle de panache Gaussien

Chapitre 5. Développement d'une approche de modélisation du climat urbain à l'échelle du quartier

Ce qui donne l'équation pour la température suivante, dans le cas d'une source ponctuelle :

$$\theta(x, y, z) = \frac{Q}{2\rho c_p \pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(y - y_s)^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z - z_s)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \theta_b \quad (5.18)$$

Si on considère maintenant une source linéaire selon l'axe y , qui s'étend entre y_{s1} et y_{s2} (Figure 5.10c) la température potentielle résultant de cette source est obtenue par intégration de l'équation 5.18 :

$$\theta(x, y, z) = \int_{y_{s1}}^{y_{s2}} \frac{Q'}{2\rho c_p \pi U \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{(y - y_s)^2}{2\sigma_y^2} + \frac{(z - z_s)^2}{2\sigma_z^2}\right) dy + \theta_b \quad (5.19)$$

Où Q' [W/m] est cette fois-ci la densité de flux de chaleur émis par la source linéaire sur un mètre de ligne. L'équation 5.19 a une solution analytique faisant intervenir la fonction erf :

$$\theta(x, y, z) = \frac{Q}{2\sqrt{2}\rho c_p \pi U \sigma_z} \exp\left(-\frac{(z - z_s)^2}{2\sigma_z^2}\right) \left[\operatorname{erf}\left(\frac{y - y_{s1}}{\sqrt{2}\sigma_y}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{y - y_{s2}}{\sqrt{2}\sigma_y}\right) \right] + \theta_b \quad (5.20)$$

Pour prendre en compte la présence du sol (Figure 5.10a), il est possible de considérer une deuxième source fictive pour chaque source réelle, qui aurait une hauteur $z_s = -z_s$ pour représenter la réflexion sur le sol. Par ailleurs, les sources de chaleur ne sont en réalité ni ponctuelles ni linéaires, mais surfaciques. Pour pouvoir utiliser les solutions analytiques présentées dans cette partie, les sources surfaciques sont décomposées en plusieurs lignes perpendiculaires au vent, dont les solutions sont sommées. Ces éléments sont décrits plus en détail dans [Soulhac *et al.* 2011].

Pour calculer le champ de température potentielle dans la CLU (équation 5.20), les grandeurs suivantes sont donc nécessaires, en plus des flux de chaleur et de leur position :

- La vitesse U supposée uniforme dans le modèle de panache gaussien. Or, le modèle aéroulque de CLU ne considère pas une vitesse uniforme mais un profil vertical. La vitesse moyenne sur la hauteur du panache u_M est donc calculée et il est supposé que $U = u_M$.
- Les écart-types du panache σ_y et σ_z [m].

5.5.2 Paramètres du panache

Les écart-types du panache (σ_y, σ_z [m]) et la vitesse moyenne sur la hauteur du panache (u_M [m/s]) sont déterminées dans cette partie. Les équations sont basées sur le modèle SIRANE [Soulhac *et al.* 2011].

Les données d'entrée incluent celles déjà utilisées pour la modélisation aéroulque de la CLU (Figure 5.6), soient la vitesse de friction ($u_{*,urb}$ [m/s]), la longueur d'Obukhov ($L_{ob,urb}$ [m]) et la hauteur de la CLU ($h_{cla,urb}$ [m]); ainsi que les écart-types de vitesses verticales et transversales (σ_w, σ_v [m/s]) déterminées dans la partie 5.4.2.

Écart-types

L'effet d'une source sur le champ de température dépend des écart-types du panaches σ_y et σ_z , qui apparaissent dans l'équation 5.20. Ces derniers augmentent au fur et à

5.5. Dispersion de la chaleur dans la couche limite urbaine

mesure que l'on s'éloigne de la source et donc que le panache s'étale. Les modélisations de SIRANE sont reprises [Soulhac *et al.* 2011], soit pour l'écart type transversal :

$$\sigma_z(\Delta x) = \sqrt{(\sigma_{y,s}(\Delta x))^2 + \left(\frac{\sigma_v \Delta x}{u_M}\right)^2} \quad (5.21)$$

Le dernier terme de cette équation correspond aux variations de la direction du vent. $\sigma_{y,s}(\Delta x)$ est déterminé par :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{y,s}(\Delta x) = \sqrt{\sigma_{y,c}^2 + \sigma_{y,n}^2} \text{ avec } \begin{cases} \sigma_{y,c} = \sqrt{0,3} \frac{w_* \Delta x}{u_M \sqrt{1+0,75^{1/3} \frac{w_* \Delta x}{u_M h_{cla}}}} \\ \sigma_{y,n} = 2(1-0,8 \frac{z_M}{h_{cla}}) \frac{u_* \Delta x}{u_M \sqrt{1+2,5 \frac{u_* \Delta x}{u_M h_{cla}}}} \end{cases} & \text{si } L_{ob} < 0 \\ \sigma_{y,s}(\Delta x) = \frac{\sigma_v \Delta x}{u_M \sqrt{1+2,5 \frac{u_* \Delta x}{u_M h_{cla}}}} & \text{si } L_{ob} \rightarrow \infty \\ \sigma_{y,s}(\Delta x) = \frac{\sigma_v \Delta x}{u_M \sqrt{1+2,5 \frac{u_* \Delta x L_{ob}}{v} h_{cla}}} & \text{si } L_{ob} > 0 \end{array} \right. \quad (5.22)$$

Avec : $\left\{ \begin{array}{l} \Delta x = x - x_s [m] : \text{La distance depuis la source dans le sens du vent} \\ u_M [m/s] : \text{La vitesse moyenne du panache à la position } x \\ z_M [m] : \text{La hauteur moyenne du panache à la position } x . \end{array} \right.$

De même, l'écart-type relatif a l'étalement vertical est :

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_z(\Delta x) = \frac{\sigma_w \Delta x}{u_M (1 + \frac{\Delta x}{2u_M T_L})} \quad \text{si } L_{ob} < 0 \\ \sigma_z(\Delta x) = 0,4 \sigma_w \frac{\Delta x}{u_M} \quad \text{si } L_{ob} \rightarrow \infty \\ \sigma_z(\Delta x) = \frac{\sigma_w \Delta x}{u_M (6,25 + \frac{N^2 (\Delta x / u_M)^2}{1+2N(\Delta x / u_M)})} \quad \text{si } L_{ob} > 0 \end{array} \right. \quad (5.23)$$

Avec : $\left\{ \begin{array}{l} N [s^{-1}] : \text{La fréquence de Brunt-Väisälä, définie dans [Soulhac } et al. 2011] \\ T_L [s] : \text{Le temps Lagrangien.} \end{array} \right.$

Le temps Lagrangien représente le temps d'auto-corrélation des fluctuations, c'est-à-dire le temps au bout duquel ces dernières ne sont plus du tout impactées par la structure de l'écoulement à un instant t (temps de mémoire). Il est modélisé par :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_L = \frac{\frac{h_{cla} + \frac{1}{3}}{L} + \frac{1}{3}}{\frac{h_{cla} + 1}{L}} \frac{\left[\frac{0,6}{z_M + z_0} + \frac{\partial u}{\partial z} \frac{1}{\sigma_w} + \frac{2}{h_{cla} + \frac{1}{z_u}} \right]^{-1}}{\sigma_w} \quad \text{si } L_{ob} < 0 \\ T_L = \frac{1}{1,3 \sigma_w} \left[\frac{2,5}{z_M + z_0} + \frac{N}{\sigma_w} + \frac{4}{h_{cla}} + \frac{1}{z_u} \right]^{-1} \quad \text{si } L_{ob} > 0 \\ \text{Avec } z_u = \max(h_{cla} - z_M; \frac{\sigma_w}{N}) \end{array} \right. \quad (5.24)$$

Hauteur de vitesse moyenne du panache

En admettant que le profil vertical de vitesse suit l'équation 5.7, on peut montrer que la hauteur moyenne du panache est :

$$z_M - z_s = 0,8 \sigma_z \quad (5.25)$$

Chapitre 5. Développement d'une approche de modélisation du climat urbain à l'échelle du quartier

La vitesse moyenne du panache est ensuite exprimée comme :

$$u_M = u(z_M) \quad (5.26)$$

Il faut donc itérer pour déterminer σ_z et z_M , qui sont interdépendants.

5.5.3 Sensibilité de l'étalement du panache

Les deux parties précédentes présentent les équations de manière théorique. Cependant, pour mieux les appréhender, il est intéressant d'observer les résultats d'abord sur un cas d'étude idéal.

Description du cas d'étude

Dans cette partie, le cas de sources ponctuelles réparties sur l'axe x à intervalles régulier sera étudié. Ce cas est représenté sur la Figure 5.11.

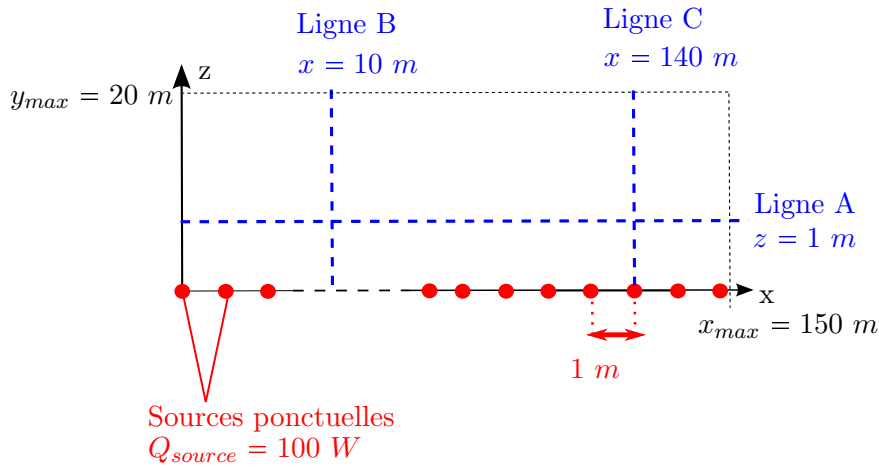


FIGURE 5.11 – Cas étudié : sources ponctuelles régulièrement espacées au sol

Paramètres	Cas de référence	Variantes
Longueur de rugosité aérodynamique z_0	0,1 m	/
Hauteur de déplacement d_0	0 m	/
Longueur d'Obukhov L_{ob}	- 30 m	/
Hauteur de la CLU $h_{cla,urb}$	200 m	20 m ; 2000 m
Vitesse de friction $u_{*,urb}$	0,3 m/s	0,2 m/s ; 0,4 m/s
Flux de chaleur d'une source Q_{source}	100 W	/

TABLE 5.1 – Paramètres du cas d'étude idéal pour la sensibilité de l'étalement du panache

Le profil vertical de vitesse est décrit par les similarités de Monin-Obukhov (équation 5.7), et les écart-types de vitesses verticale et transversale sont calculées avec

les équations présentées dans la partie 5.4.2. Les paramètres d'entrée choisis sont donnés dans le Tableau 5.1.

La valeur de la longueur d'Obukhov, fixée à -30 m, est typique de conditions urbaines. Il s'agit de la moyenne des valeurs de la campagne de mesures BUBBLE [Rotach *et al.* 2005], sur le mois de juin 2002. La sensibilité à ce paramètre n'est pas étudiée car son impact est important surtout lorsque l'on compare un cas stable et un cas instable. Dans le cas où la plage de variation entière est instable, ce qui est généralement le cas en ville [Oke *et al.* 2017], son effet est beaucoup plus faible que les deux paramètres étudiés dans cette partie, à savoir la vitesse de friction et la hauteur de couche limite atmosphérique.

Enfin, chaque source ponctuelle émet 100 W. Cette valeur n'a aucun impact sur l'interprétation des résultats. Les valeurs de température relevées n'ont en effet aucun intérêt en absolu, mais sont parlantes en relatif pour observer la formation du panache et les différences entre les cas étudiés.

La sensibilité à la vitesse de friction et à la hauteur de CLU sont étudiées dans cette parties : deux variantes sont donc considérées pour ces paramètres dans le Tableau 5.1. L'ordre de grandeur des hauteurs de CLA choisies correspond schématiquement à un cas de jour ($h_{cla} = 2000m$) et deux valeurs pouvant être assimilées à des cas de nuit ($h_{cla} = 20m$ et $h_{cla} = 200m$) [Oke *et al.* 2017]. Les valeurs de vitesse de friction choisies sont inspirées des mesures en juin 2002 à Bâle lors de la campagne BUBBLE [Rotach *et al.* 2005], sans recherche de précision.

Influence de la vitesse de friction

L'impact de trois vitesses de friction différentes sur l'échauffement dans le domaine est comparé visuellement sur la Figure 5.12. L'évolution de la température sur les lignes A, B et C définies sur la Figure 5.11 est tracée sur la Figure 5.13.

Sur la Figure 5.12, le développement d'un panache de chaleur au contact du sol est visible pour les trois cas. Une analyse visuelle montre un échauffement plus important quand la vitesse de friction est plus faible, donc une moins bonne évacuation de la chaleur. Ce résultat correspond aux attentes.

Sur la ligne A, la température augmente avec x (Figure 5.13a). Plus la vitesse de friction est faible et plus l'échauffement est important, conformément à l'analyse visuelle des panaches. Sur ces courbes, la température augmente indéfiniment et n'atteint pas d'équilibre. Cela est cohérent avec le développement d'une couche limite, dans la mesure où le flux de surface reste toujours positif. Si on considère les sources ponctuelles comme les éléments d'une ville, cela signifie donc que la température à un endroit donné sera affectée par toute la zone urbaine balayée par le vent en amont. Ce comportement est cohérent avec l'observation selon laquelle l'ICU augmente avec la taille de la ville [Oke *et al.* 2017] : il y a donc bien un effet d'accumulation. En revanche, dans certains cas, la présence d'écoulements ascendants (*thermals*) peut avoir un impact important [Oke *et al.* 2017], qui n'est pas pris en compte avec le modèle de panache Gaussiens. Par ailleurs, cet effet d'accumulation va rendre à la fois crucial et compliqué le choix des conditions limites de température en amont du quartier étudié. En effet, il n'est pas possible de déterminer une longueur suffisante à simuler en amont pour initialiser l'écoulement, puisque l'équilibre n'est jamais atteint avec ce modèle.

Sur la Figure 5.13b, l'échauffement le long des lignes verticales B et C montre

Chapitre 5. Développement d'une approche de modélisation du climat urbain à l'échelle du quartier

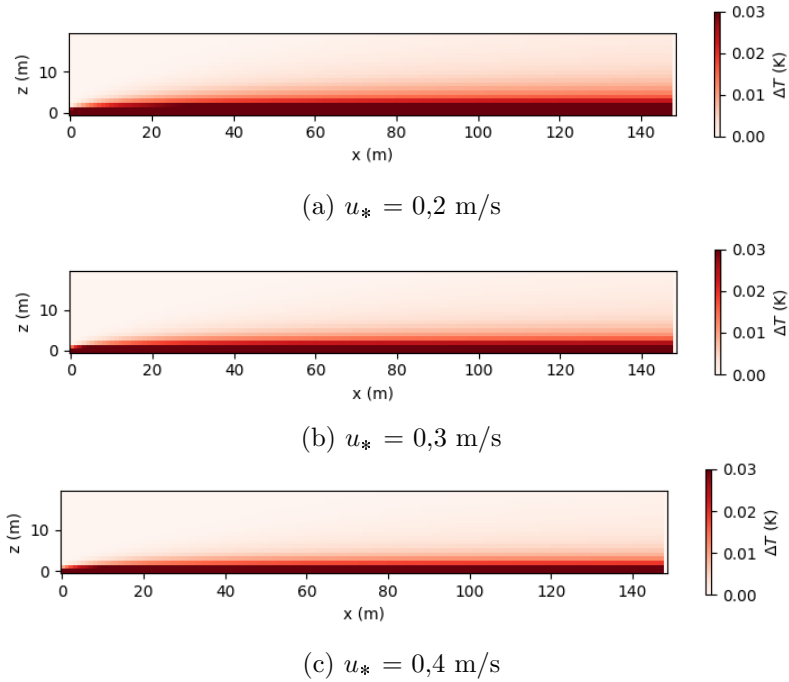


FIGURE 5.12 – Sensibilité à la vitesse de friction du cas d'étude présenté Figure 5.11, pour $h_{cla} = 200m$

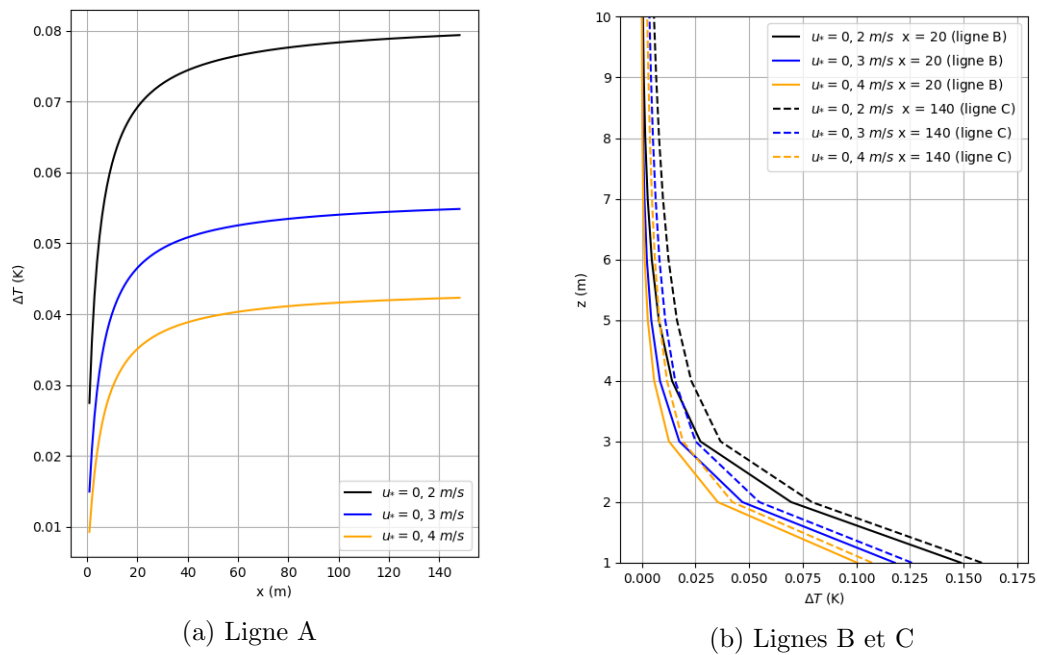


FIGURE 5.13 – Profils verticaux et horizontaux de l'échauffement sur le domaine présenté sur la Figure 5.11 avec différents u_* , pour $h_{cla} = 200m$

l'établissement d'un équilibre atmosphérique instable, dû au flux de chaleur fourni par le sol. Entre les lignes B et C, la couche limite s'est développée, avec un échauffement plus important sur la hauteur de la couche limite pour les lignes C.

Influence de la hauteur de couche limite atmosphérique

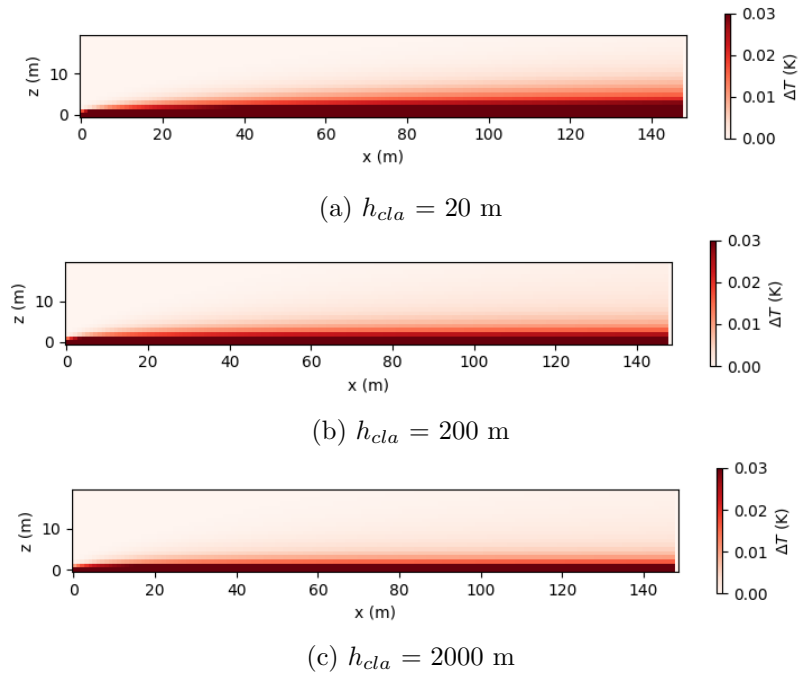


FIGURE 5.14 – Sensibilité à hauteur de couche limite atmosphérique du cas d'étude présenté Figure 5.11, pour $u_* = 0,3m/s$

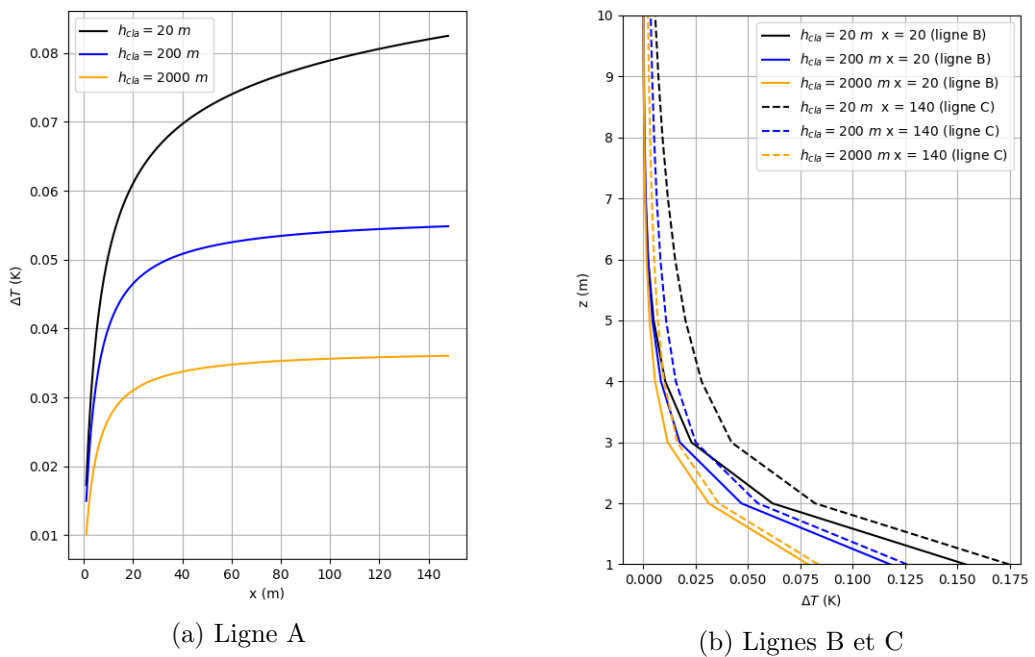


FIGURE 5.15 – Profils verticaux et horizontaux de l'échauffement sur le domaine présenté sur la Figure 5.11 avec différents h_{cla} , pour $u_* = 0,2m/s$

Chapitre 5. Développement d'une approche de modélisation du climat urbain à l'échelle du quartier

Le champ de température est donné sur la Figure 5.14, et l'échauffement sur les lignes A, B et C est représenté sur la Figure 5.15 pour différentes valeurs de hauteur de CLA h_{cla} .

Ces graphiques mettent en évidence l'influence de la hauteur de couche limite urbaine. Plus ce paramètre augmente et moins l'échauffement au niveau du sol est important. Pour $h_{cla} = 20 m$, la forme de la courbe de l'échauffement en fonction de x est perturbée (Figure 5.15a) : dans ce cas, la pente reste plus importante plus longtemps. Cela est également visible sur la Figure 5.15b, la différence de température entre les lignes B et C pour le cas $h_{cla} = 20 m$ étant la plus importante.

Différences jour/nuit dans l'étalement du panache

Les résultats présentés ci-dessus sont cohérents avec un étalement du panache plus important en journée. En effet, cette période cumule à la fois des vitesses de friction et une hauteur de couche limite plus importantes. Cela est donc compatible avec la difficulté de dissipation de la chaleur la nuit en zone urbaine.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, une approche en réseau de rue, basée sur le modèle de dispersion de polluants SIRANE, est utilisée pour développer un modèle de quartier. Pour cela, un modèle d'intersections est intégré. De même, des bilan énergétiques surfaciques sont effectués sur les toits et les sols des places. Une modélisation aérodynamique et thermique de la CLU a également été présentée. Notamment, la théorie des similarités de Monin-Obukhov permet de déterminer le profil vertical de vitesse dans la CLU, et des panaches gaussiens de chaleur sont utilisés pour décrire la dispersion de chaleur dans la CLU.

Ce modèle de quartier utilise comme modèle de sous-maille les modèles aérodynamique, radiatif et thermo-énergétique développés dans la partie 1 de la thèse. Il prend également en données d'entrée trois paramètres décrivant la CLU à plus grande échelle : la vitesse de friction, la longueur d'Obukhov et la hauteur de CLU.

Le chapitre suivant sera consacré à la modélisation de ces trois paramètres. Le modèle complet sera ensuite appliqué sur un cas d'étude correspondant à un quartier de Lyon dans le dernier chapitre. Les conséquences des choix de modélisations effectués (condition limite de température d'air, méthode des panaches gaussiens, modèle d'intersections) sur les résultats des simulations pourront ainsi être analysés dans un contexte réaliste.

Rappel des hypothèses principales du modèle de quartier

- L'influence du sol des intersections et des cours sur les phénomènes thermiques est négligée
- Aux intersections, les lignes de courants ne se croisent pas et la diffusion est négligée.
- Aucune végétation n'est prise en compte sur les places et les toits
- Le facteur vue du ciel des places et des toits est supposé égal à 1
- La direction du vent dans la couche limite urbaine est considérée uniforme et égale à celle de la station météorologique
- Dans la CLU, la diffusion dans le sens de l'écoulement est négligé.
- Le profil de vitesse dans la CLU est homogène horizontalement
- La condition limite de température d'air amont est un profil vertical neutre de température potentielle égale à celle mesurée à la station météorologique.
- La convection forcée est dominante (formation de panaches de chaleur)
- Les écart-types des vitesses verticale et transversale sont toujours supérieurs à 0,2 m/s
- Un régime permanent est considéré .

Chapitre 6

Intégration des effets méso-échelle

L'intégration des effets méso-échelle au modèle de quartier est décrite dans ce chapitre. Pour cela, un prétraitement météorologique est développé puis confronté à la campagne de mesures BUBBLE.

Sommaire

6.1	Problématique	154
6.2	Notions de météorologie de la couche limite atmosphérique	155
6.2.1	Théorie des similarités de Monin-Obukhov	157
6.2.2	Théorie des similarités du nombre de Rossby	158
6.2.3	Loi de traînée géostrophique	159
6.3	Intégration des effets méso-échelle dans les modèles de climat urbain	160
6.3.1	Différents types d'approches	160
6.3.2	Modélisation paramétrique des conditions limites	162
6.4	Développement d'un prétraitement des données météorologiques	164
6.4.1	Principe du modèle	164
6.4.2	Caractéristiques des surfaces urbaine et rurale	166
6.4.3	Bilan de surface	167
6.4.4	Hauteur de la couche limite atmosphérique	170
6.4.5	Bilan	171
6.5	Validation du prétraitement des données météorologiques avec la campagne de mesures BUBBLE	171
6.5.1	Présentation du cas d'étude et mise en données	171
6.5.2	Jour moyen	173
6.5.3	Période du 25/06 au 07/07	175
6.5.4	Écarts sur la période complète	176
6.6	Conclusion	177

6.1 Problématique

L'une des difficultés dans la modélisation du climat urbain est l'interdépendance de phénomènes agissant à des échelles très différentes. Par exemple, le flux sensible émis par une rue va jouer un rôle dans la stabilité atmosphérique de toute la zone, et donc sur la température d'air arrivant sur cette même rue.

Dans l'approche de modélisation en réseau de rues développée dans cette thèse, l'impact des phénomènes à l'échelle de la ville est pris en compte à travers quatre grandeurs (voir Figure 6.1) :

- La longueur d'Obukhov $L_{ob,urb}$
- La vitesse de friction u_{*urb}
- La hauteur de CLU $h_{abl,urb}$
- Une température potentielle d'air θ_b en condition limite amont.

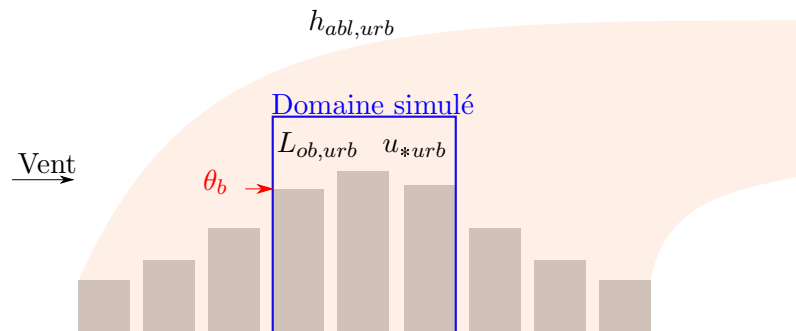


FIGURE 6.1 – Intégration des effets méso-échelle sur le domaine simulé à travers quatre paramètres : la longueur d'Obukhov $L_{ob,urb}$, la vitesse de friction u_{*urb} , la hauteur de CLU $h_{abl,urb}$ et la température potentielle amont θ_b (non traitée pour l'instant)

Le but de ce chapitre est d'évaluer trois de ces quatre grandeurs : la longueur d'Obukhov, la vitesse de friction et la hauteur de CLU, représentées sur la Figure 6.2. Pour cela, un prétraitement des données météorologique mesurées à une station rurale ou péri-urbaine est développé dans ce chapitre. Il est basé sur deux hypothèses simplificatrices :

- Le prétraitement météorologique est indépendant du modèle de quartier, il n'y a donc pas de rétroaction du modèle de quartier vers le prétraitement.
- Une uniformité horizontale est supposée en ville comme à la station météorologique pour la vitesse d'air : seules les variations de vitesse d'air selon la dimension verticale sont donc considérées dans les deux milieux.

La température potentielle en amont du domaine simulé θ_b n'est pas étudiée dans cette thèse. En effet, contrairement aux autres grandeurs, elle dépend avant tout de la surface urbaine qui a été balayée par le vent en amont du quartier d'intérêt. L'hypothèse d'homogénéité horizontale n'est donc plus possible. Pour évaluer une température, voire un profil de température vertical en amont du domaine, il faudrait idéalement un modèle de ville dégradé autour du quartier d'intérêt et allant jusqu'à la station météorologique. Cela n'étant pas encore développé, la température potentielle θ_b est pour l'instant prise égale à la température potentielle à la station météorologique, déjà décrite au chapitre précédent (équation 5.12). Cela empêche donc de s'intéresser à l'îlot de chaleur urbain généré par la ville entière, mais autorise à étudier celui créé par le domaine simulé isolé.

Dans un premier temps, quelques notions de météorologie de la couche limite atmosphérique sont présentées, notamment concernant les lois d'échelle (*scaling laws*).

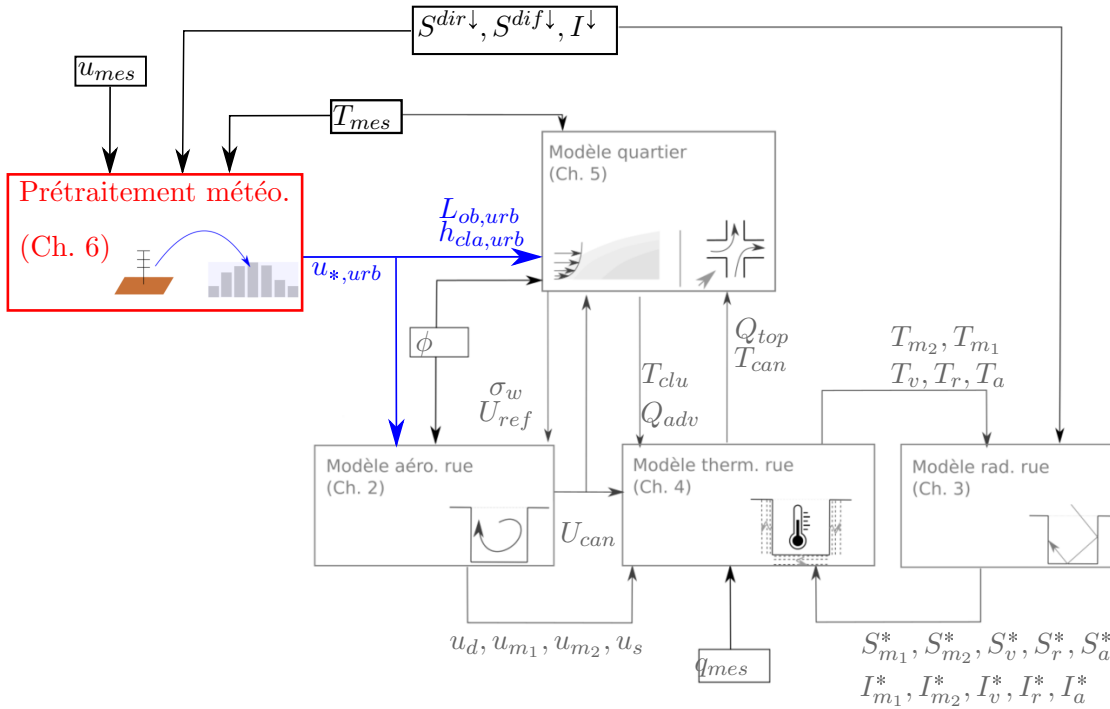


FIGURE 6.2 – Données d’entrée et résultats attendus du prétraitement météorologique (u_{mes} [m/s] : vitesse mesurée, T_{mes} [K] : température mesurée, $S^{dir\downarrow}, S^{diff\downarrow}, I^\downarrow$ [W/m^2] : densités de flux solaire direct, solaire diffus et infrarouge sur une surface horizontale, $u_{*,urb}$ [m/s] : vitesse de friction, $L_{ob,urb}$ [m] : longueur d’Obukhov, $h_{cla,urb}$ [m] : hauteur de la CLU)

Dans un second temps, un état de l’art sur l’intégration des effets méso-échelle dans les modèles de climat urbain sera effectué. Ensuite, le prétraitement météorologique développé est décrit. Pour finir, ce dernier est confronté à des mesures de la campagne BUBBLE à Bâle.

6.2 Notions de météorologie de la couche limite atmosphérique

Dans cette partie, des notions de météorologie utiles à la compréhension de l’état de l’art puis du prétraitement des données météorologiques de MATHIS sont détaillées.

La Couche Limite Atmosphérique (CLA) est définie comme la couche inférieure de l’atmosphère terrestre, dans laquelle l’influence de la surface terrestre se fait sentir sur des échelles de temps inférieures à un jour. Au sein de la CLA, on distingue la couche de surface et la couche d’Ekman (Figure 6.3). Au-dessus de la CLA, l’atmosphère est nommée atmosphère libre.

Dans l’atmosphère libre, l’équilibre géostrophique est une bonne approximation. Cela signifie que la vitesse horizontale moyenne ne résulte que du gradient de pression horizontal et de la force de Coriolis (Figure 6.4a). Dans la CLA en revanche, l’influence de la force de friction doit être également considérée (Figure 6.4b). Dans la CLA, le

présentées. Premièrement, la théorie des similarités de Monin-Obukhov, qui s'applique dans la sous-couche inertielle de la couche de surface est abordée. Ensuite, la théorie des similarités du nombre de Rossby, adaptée à la couche d'Ekman, est présentée, ainsi que son lien avec la loi de traînée géostrophique.

6.2.1 Théorie des similarités de Monin-Obukhov

La théorie des similarités de Monin-Obukhov se base sur trois hypothèses [Monin & Obukhov 1954] :

- Le terrain est homogène horizontalement
- La force de Coriolis est négligeable
- Les flux de quantité de mouvement et de chaleur sont uniformes verticalement.

Deux échelles deux longueurs sont choisies (l'altitude z et la longueur d'Obukhov L_{ob}), ainsi qu'une échelle de vitesse (la vitesse de friction u_*) et une échelle de température (la température de friction θ_*). La longueur d'Obukhov est définie par :

$$L_{ob} = \frac{-\rho c_p u_*^3 \theta_{ref}}{\kappa g Q_H} \quad (6.1)$$

$$\text{Avec : } \left\{ \begin{array}{l} \rho [kg/m^3] : \text{ la masse volumique de l'air} \\ c_p [J/(Kkg)] : \text{ La capacité thermique massique de l'air} \\ Q_H [W/m^2] : \text{ La densité de flux convectif de la surface} \\ u_* [m/s] : \text{ La vitesse de friction} \\ \theta_{ref} [K] : \text{ La température potentielle moyenne de la couche de surface (qui} \\ \quad \text{sert de référence dans le terme de flottabilité [Monin \& Obukhov 1954])} \\ \kappa \approx 0,4 [-] : \text{ La constante de Von Karman.} \end{array} \right.$$

Le flux de chaleur vertical s'exprime en fonction de la vitesse de friction u_* et de la température de friction θ_* selon :

$$Q_H = -\rho c_p \theta_* u_* \quad (6.2)$$

Finalement, la théorie des similarités de Monin Obukhov permet d'exprimer un profil vertical de vitesse et de température potentielle qui ne dépendent que de fonctions universelles Ψ_m et Ψ_h :

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z - d_0 + z_0}{z_0} \right) - \Psi_m \left(\frac{z - d_0 + z_0}{L_{ob}} \right) + \Psi_m \left(\frac{z_0}{L_{ob}} \right) \right] \quad (6.3)$$

$$\theta(z) - \theta_0 = \frac{\theta_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z - d_t + z_t}{z_t} \right) - \Psi_h \left(\frac{z - d_t + z_t}{L_{ob}} \right) + \Psi_h \left(\frac{z_t}{L_{ob}} \right) \right] \quad (6.4)$$

$$\text{Avec : } \left\{ \begin{array}{l} d_0, d_t [m] : \text{ La hauteur de déplacement aérodynamique et thermique} \\ z_0, z_t [m] : \text{ La longueur de rugosité aérodynamique et thermique} \\ \theta_0 [K] : \text{ La température potentielle à } z = d_t \\ \Psi_m, \Psi_h [-] : \text{ Les fonctions universelles aérodynamique et thermique.} \end{array} \right.$$

6.2. Notions de météorologie de la couche limite atmosphérique

Les expressions des fonctions universelles ne sont pas données par la théorie, elles doivent donc être déterminées à partir de mesures. Les expressions proposées par Businger, à partir de mesures effectuées au Kansas à l'été 1968, sont utilisées [J. A. Businger 1971] :

$$\begin{aligned} \Psi_m(\zeta) &= 2 \ln\left[\frac{1+x}{2}\right] + \ln\left[\frac{1+x^2}{2}\right] - 2 \arctan(x) + \frac{\pi}{2} && \text{si } L_{ob} < 0 \\ \text{Avec } x &= (1 - 16\zeta)^{1/4} \\ \Psi_m(\zeta) &= 0 && \text{si } L_{ob} \rightarrow \infty \\ \Psi_m(\zeta) &= -5\zeta && \text{si } L_{ob} > 0 \end{aligned} \tag{6.5}$$

$$\begin{aligned} \Psi_h(\zeta) &= 2 \ln\left[\frac{1+x}{2}\right] && \text{si } L_{ob} < 0 \\ \text{Avec } x &= (1 - 16\zeta)^{1/2} \\ \Psi_h(\zeta) &= 0 && \text{si } L_{ob} \rightarrow \infty \\ \Psi_h(\zeta) &= -5\zeta && \text{si } L_{ob} > 0 \end{aligned} \tag{6.6}$$

A travers l'expression du profil vertical de température potentielle, l'importance du signe de la température de friction apparait. Elle donne le signe de la pente du profil vertical de température potentielle, et détermine donc la stabilité atmosphérique. Si la température de friction est positive, la température potentielle sera plus élevée avec l'altitude. Ainsi, l'atmosphère sera stable, avec une longueur d'Obukhov positive et un flux de chaleur sensible négatif (sol plus frais que l'air). Si au contraire la température de friction est négative, la température potentielle diminuera avec l'altitude, induisant une atmosphère instable, une longueur d'Obukhov négative et un flux de chaleur sensible positif (sol plus chaud que l'air). Le Tableau 6.1 récapitule le signe des différentes grandeurs selon la stabilité.

	Stable	Neutre	Instable
Flux sensible	$Q_H < 0$	$Q_H = 0$	$Q_H > 0$
Température de friction	$\theta_* > 0$	$\theta_* = 0$	$\theta_* < 0$
Longueur d'Obukhov	$L_{ob} > 0$	$L_{ob} \rightarrow \infty$	$L_{ob} < 0$

TABLE 6.1 – Stabilité atmosphérique

Généralement, une atmosphère instable est observée en journée et stable pendant la nuit. Cependant, en ville, de par l'îlot de chaleur urbain, la surface reste souvent plus chaude que l'air même de nuit. Ainsi, durant la campagne de mesures BUBBLE à Bâle, l'atmosphère était instable la nuit dans 72,5 % des cas [Oke *et al.* 2017]. Ce phénomène a déjà été évoqué dans le chapitre 1, notamment sur la Figure 1.10.

6.2.2 Théorie des similarités du nombre de Rossby

Dans la couche d'Ekman, la force de Coriolis devient significative. Le nombre de Rossby, qui représente le rapport entre les forces d'inertie et la force due à la rotation de la terre, devient pertinent. Il s'écrit :

$$Ro = \frac{u_*}{|f|z} \tag{6.7}$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} f [s^{-1}] : \text{Le paramètre de Coriolis} \\ z [m] : \text{La hauteur depuis le sol.} \end{cases}$$

De manière similaire à Monin-Obukhov dans la couche de surface, la théorie des similarités peut également être appliquée dans la couche d'Ekman. Ainsi, une échelle de longueur \hat{h} et deux échelles de vitesse \hat{u} et \hat{v} adaptées permettent de définir les profils de vitesse dans la couche d'Ekman [Stull 1988] :

$$\begin{aligned} \frac{u - \hat{u}}{u_*} &= F_x \left(\frac{z}{\hat{h}}, \frac{\hat{h}}{L_{ob}} \right) \\ \frac{v - \hat{v}}{u_*} &= F_y \left(\frac{z}{\hat{h}}, \frac{\hat{h}}{L_{ob}} \right) \end{aligned} \quad (6.8)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} F_x, F_y [-] : \text{Des fonctions à définir, sur le même principe que les fonctions} \\ \text{universelles } \Psi_h \text{ et } \Psi_m \\ u, v [m/s] : \text{Les composantes x et y de la vitesse, dans un repère où la vitesse} \\ \text{au niveau du sol est selon l'axe x} \end{cases}$$

En conditions neutres, le groupe adimensionné $\frac{\hat{h}}{L_{ob}}$ de l'équation 6.8 n'est plus impactant et disparaît de l'équation. Dans ce cas, les fonctions F_x et F_y peuvent s'écrire [Garratt 1999] :

$$F_x(\xi) = \frac{1}{\kappa} (\ln(\xi) + A) \quad (6.9)$$

$$F_y(\xi) = \frac{B}{\kappa} \quad (6.10)$$

Avec A et B des constantes sans dimension.

Notons ici que même si la vitesse au niveau du sol est selon l'axe x ($v = 0$), dans la couche d'Ekman, v est non nulle et croît progressivement avec l'altitude. Au fur et à mesure que l'altitude augmente, la vitesse augmente donc tout en changeant d'orientation, ce qui forme une spirale dans le plan xy si l'on trace les vecteurs vitesses pour différents z . Ce phénomène est appelé la spirale d'Ekman.

Les échelles de vitesse les plus adaptées sont les composantes du vent géostrophique $\hat{u} = u_G$ et $\hat{v} = v_G$ [Stull 1988]. Ainsi, les composantes du vent agéostrophique apparaissent dans les équations 6.8. Pour l'échelle de longueur en revanche, une première option est de prendre $\hat{h} = \frac{u_*}{|f|}$ [Garratt 1999], qui revient à $\frac{z}{\hat{h}} = \frac{1}{Ro}$. Toutefois, selon [Stull 1988], l'échelle de longueur la plus adaptée est la hauteur de la couche limite atmosphérique $\hat{h} = h_{cla}$. C'est ce deuxième choix qui est effectué ici.

6.2.3 Loi de traînée géostrophique

La loi de traînée géostrophique est obtenue en exprimant la continuité des profils de vitesse entre la couche de surface et la couche d'Ekman en condition neutre. Le système d'équation est donné sur la Figure 6.5. Les composantes du vent géostrophique en condition neutre exprimées en résolvant ce système d'équation sont :

6.3. Intégration des effets méso-échelle dans les modèles de climat urbain

$$G = \sqrt{u_G^2 + v_G^2} = \frac{u_*}{\kappa} \sqrt{\left(\ln\left(\frac{h_{cla}}{z_0}\right) - A\right)^2 + B^2} \quad (6.11)$$

Atmosphère libre

Couche d'Ekman	Similarités de Rossby neutre : $u - u_G = \frac{u_*}{\kappa} (\ln(\frac{z}{h_{cla}}) + A)$ $v - v_G = \frac{u_*}{\kappa} B$	
Couche de surface	Equations neutre $u = \frac{u_*}{\kappa} \ln(\frac{z}{z_0})$ $v = 0$	→ $\left\{ \begin{array}{l} u_G = \frac{u_*}{\kappa} (\ln(\frac{h_{cla}}{z_0}) + A) \\ v_G = -\frac{u_*}{\kappa} B \end{array} \right.$

FIGURE 6.5 – Équations régissant les profils de vitesse dans la CLA en condition neutre (A et B : constantes). Adapté de [Garratt 1999]

L'équation 6.11 est appelée loi de traînée géostrophique. Dans le cas de conditions non neutres, l'équation 6.11 n'a plus de fondement théorique mais continue en pratique de bien fonctionner [Beljaars 1992]. Les constantes A et B nécessitent toutefois d'être ajustées en fonction du paramètre de stabilité $\frac{h_{cla}}{L_{ob}}$ [Yamada 1975] :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Si } \frac{h_{cla}}{L_{ob}} < 0 & \begin{array}{l} A = 10 - 8,145(1 - 0,008376 \frac{h_{cla}}{L_{ob}})^{-1/3} \\ B = 3,02(1 - 3,29 \frac{h_{cla}}{L_{ob}})^{-1/3} \end{array} \\ \text{Si } 0 < \frac{h_{cla}}{L_{ob}} \leq 35 & \begin{array}{l} A = 1,855 - 0,38 \frac{h_{cla}}{L_{ob}} \\ B = 3,02 + 0,3 \frac{h_{cla}}{L_{ob}} \end{array} \\ \text{Si } 35 < \frac{h_{cla}}{L_{ob}} & \begin{array}{l} A = -2,94(\frac{h_{cla}}{L_{ob}} - 19,94)^{1/2} \\ B = 2,85(\frac{h_{cla}}{L_{ob}} - 12,47)^{1/2} \end{array} \end{array} \right. \quad (6.12)$$

La loi de traînée géostrophique permet donc un lien direct entre les grandeurs de la couche de surface (u_* , L_{ob}) et le vent géostrophique.

6.3 Intégration des effets méso-échelle dans les modèles de climat urbain

Dans cette partie, une étude bibliographique sur le traitement des phénomènes à grande échelle dans les différents modèles de microclimat urbain est effectuée.

6.3.1 Différents types d'approches

Les effets méso-échelle sont généralement pris en compte à travers le choix des conditions limites dans les modèles de microclimat urbain. A travers une étude bibliographique, une classification de quatre types d'approches est proposé (voir Tableau 6.2) :

Chapitre 6. Intégration des effets méso-échelle

- Les effets méso-échelles ne sont pas inclus au modèle et c’est l’utilisateur qui entre les conditions limites en bord de domaine. Cette approche est souvent utilisée pour les modèles détaillés, qui s’intéressent à une zone de taille réduite [Bouyer 2009, Bruse 1999]. L’inconvénient est qu’en l’absence de mesures sur site, l’utilisateur risque de choisir des conditions limites très approximatives.
- Une approche consiste à représenter le microclimat urbain directement avec un modèle CFD méso-échelle, la descente d’échelle étant opérée par des maillages imbriqués [Nagel *et al.* 2022].
- Le modèle de surface est couplé avec un modèle méso-échelle. C’est le cas de certains modèles de canopée urbaine, qui ont justement été développés originellement dans ce but. Par exemple, le couplage de TEB avec Meso-NH [Schoetter *et al.* 2020] ou de BEP avec WRF [Ribeiro *et al.* 2021] peuvent être cités.
- Les conditions limites peuvent également être modélisées, ce qui est moins précis que le couplage au modèle méso-échelle, mais a l’avantage d’être plus souple [Moradi 2021, Bueno *et al.* 2013, Duan *et al.* 2019, Tang *et al.* 2021].
- Enfin, certains modèles peu détaillés sont capables de modéliser le climat urbain de manière spatialisée sur une ville entière, ce qui permet de prendre directement les mesures d’une station météo en conditions limite [Le Bras & Masson 2015, Yao *et al.* 2015]. Dans ce cas, les effets méso-échelle sont inclus dans la fenêtre d’échelles modélisées.

Type d’approche	Exemples de modèles
Non inclus (conditions limites choisies par l’utilisateur)	Envi-met [Bruse 1999], Solene-microclimat [Bouyer 2009], EnviBatE [Gros 2013]
Descente d’échelle par maillages imbriqués (CFD)	Meso-NH [Nagel <i>et al.</i> 2022]
Couplage modèle méso	TEB avec Meso-NH [Schoetter <i>et al.</i> 2020], BEP avec WRF [Ribeiro <i>et al.</i> 2021]
Modélisation paramétrique des conditions limites	VCWG [Moradi 2021], UGW [Bueno <i>et al.</i> 2013], [Duan <i>et al.</i> 2019], SUEWS-RSL [Tang <i>et al.</i> 2021]
Modélisation de la ville entière et mesures station météo	SUWG [Le Bras & Masson 2015], UMsim [Yao <i>et al.</i> 2015]

TABLE 6.2 – Prise en compte des effets méso-échelle dans les modèles de climat urbain

Parmi ces quatre approches, la modélisation paramétrique des conditions limites est assez proche du prétraitement météorologique développé dans ce chapitre. Une focalisation va donc être effectuée sur les différents modèles qui utilisent cette approche.

6.3.2 Modélisation paramétrique des conditions limites

Quatre modèles utilisant une modélisation paramétrique de leurs conditions limites ont été répertoriés : SUEWS-RSL [Tang *et al.* 2021], VCWG [Moradi 2021], UWG [Bueno *et al.* 2013] et [Duan *et al.* 2019]. Parmi ces modèles, [Duan *et al.* 2019] utilise les mêmes équations que UWG [Bueno *et al.* 2013], excepté pour le modèle de surface urbaine, les deux modèles ne seront donc pas distingués. Dans tous les modèles, on retrouve un mécanisme analogue en cinq sous-modèles (Figure 6.6 et Tableau 6.3). A partir d'un bilan de surface à la station météorologique, un profil est extrapolé dans la couche limite atmosphérique. A partir des grandeurs calculées, un forçage est effectué au sommet de la couche limite urbaine. Un profil dans la couche limite urbaine et un bilan de surface sur la ville sont ensuite utilisés. Les paragraphes suivant comparent les approches pour le forçage, les modèles de couche limite rurale et urbaine et les modèles de surface rurale et urbaine.

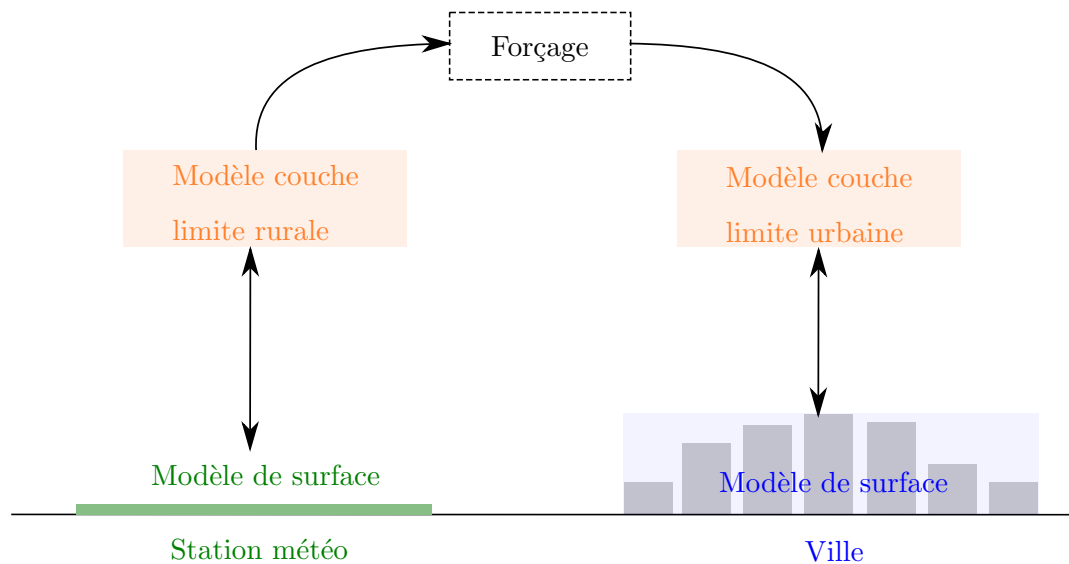


FIGURE 6.6 – Principe de la paramétrisation des conditions limites

Les modèles de surface

Les modèles de surface sont similaires à des modèles type dalle, ou de type canopée urbaine en ville, décrits au chapitre 1. En ville, pour UWG et VCWG, un modèle de canopée urbaine à une couche est choisi, alors que SUEWS-RSL et [Duan *et al.* 2019] utilisent un modèle de type dalle. Dans tous les cas, les modèles de surface urbaine et rurale sont couplés au modèle de couche limite atmosphérique rurale ou urbaine.

Les modèles de couche limite rurale et urbaine

La théorie des similarités de Monin-Obukhov peut être utilisée pour décrire les profils verticaux de vitesse, température et humidité en tenant compte de la stabilité atmosphérique. VCWG et SUEWS-RSL adoptent cette approche pour la couche limite rurale. Dans SUEWS-RSL, les similarités de Monin-Obukhov sont également utilisés en ville, avec une correction des profils pour pouvoir les appliquer dans la sous-couche rugueuse.

Chapitre 6. Intégration des effets méso-échelle

Une deuxième approche consiste à utiliser une équation de diffusion. Elle est adoptée dans VCWG en ville, ainsi que pour la température dans UWG à la station météorologique.

Dans UWG, un profil logarithmique neutre est utilisé pour la vitesse en ville comme à la station météorologique, et une température uniforme est considérée en ville.

		Vitesse	Température	Humidité
SUEWS -RSL	Forçage	Egale pour la station météo et la ville à $z = 3z_H$ où z_H est la hauteur moyenne des bâtiments		
	Couche limite rurale	Similarités de Monin-Obukhov		
	Couche limite urbaine	Similarités de Monin-Obukhov avec correction pour la sous-couche rugueuse		
VCWG	Forçage	Egale pour la station météo et la ville à la hauteur choisie		
	Couche limite rurale	Similarités de Monin-Obukhov		
	Couche limite urbaine	Equation de diffusion (<i>K-theory</i>)		
UWG	Forçage	Egale à une hauteur de choisie par l'utilisateur (dans le cas « panache urbain »)	Bilan de chaleur dans la CLU : - Advection horizontale - Flux sensible de la canopée urbaine	Absent
	Couche limite rurale	Profil logarithmique (neutre)	Equation de diffusion	
	Couche limite urbaine	Profil logarithmique (neutre)	Température uniforme	

TABLE 6.3 – Comparaisons des différents modèles utilisant une paramétrisation des conditions limites. CL-surf : conditions limites du modèle de surface urbain (SUEWS-RSL : [Tang *et al.* 2021], VCWG : [Moradi 2021], UWG : [Bueno *et al.* 2013])

Le forçage

La méthode la plus simple pour forcer les grandeurs en altitude consiste à supposer qu'à une certaine hauteur, les grandeurs sont uniformes, donc égales au dessus de la ville et de la station météorologique. Cette hypothèse est choisie dans VCWG, SUEWS-RSL et pour la vitesse dans UWG. La question du choix de cette hauteur de forçage devient alors centrale. En effet, si elle est prise trop haute, les équations du modèle de couche limite rurale ne seront plus valables. Si elle est prise trop faible au contraire, l'effet de la surface sera encore prépondérant et l'hypothèse sera éloignée de la réalité. En réalité, par définition, les grandeurs sont dépendantes de l'état de la surface dans toute la couche

6.4. Développement d'un prétraitement des données météorologiques

de surface. Or, la théorie des similarités de Monin-Obukhov n'est valable que dans la couche de surface, la force de Coriolis n'étant plus négligeable au-dessus. Pour que les deux conditions soient respectées en même temps, il faut donc se placer exactement au sommet de la couche de surface. Notons également que la ville étant plus rugueuse et chaude que le milieu rural, le sommet de la couche de surface devrait en théorie être plus élevé au dessus de celle-ci. Il est donc délicat d'estimer la hauteur de forçage avec cette hypothèse.

Une autre méthode est utilisée pour la température dans UWG. Un bilan de chaleur est effectué sur la CLU, prenant en compte l'advection horizontale et le flux de chaleur émis par la ville, ainsi que plus récemment le rayonnement [Bueno *et al.* 2014]. Contrairement à la précédente, cette méthode a l'avantage de prendre en compte l'impact de la ville sur la CLU. En revanche, le modèle nécessite en entrée une hauteur de CLU, qui a un impact important sur les résultats, puisqu'elle détermine le volume sur lequel le bilan d'énergie sera effectué. La nuit notamment, la hauteur de CLU étant plus faible (voir chapitre 1), ce paramètre d'entrée prend plus d'importance. L'influence de la hauteur de CLU nocturne a notamment été mise en évidence par [Toesca *et al.* 2022].

Bilan

Pour conclure, les quatre modèles répertoriés qui utilisent une modélisation paramétrique des conditions limites thermiques et aérauliques fonctionnent donc sur le principe d'un forçage en altitude, considérant une homogénéité horizontale en ville et à la station météorologique. Pour VCWG, SUEWS-RSL et la vitesse dans UWG, les grandeurs sont supposées égales au-dessus de la ville et de la station météo à une certaine hauteur, dont le choix est délicat. Pour la température potentielle dans UWG, un bilan de chaleur est réalisé sur la CLU, dont la température potentielle est considérée uniforme. Le choix de la hauteur de CLU est cependant laissé à l'utilisateur et impacte les résultats, surtout de nuit.

6.4 Développement d'un prétraitement des données météorologiques

Dans cette partie, un prétraitement des données météorologique est développé. Il est basé sur le prétraitement météorologique du modèle SIRANE, en incluant une représentation différentes des phénomènes urbains.

6.4.1 Principe du modèle

Le principe général du modèle développé est donné sur la Figure 6.7. Il est basé sur l'hypothèse que la ville et la station météo étant suffisamment proches, la vitesse géostrophique est la même en ces deux endroits. Or, la vitesse dans l'atmosphère libre étant proche de la vitesse géostrophique, cela revient donc à réaliser un forçage en altitude; contrairement aux modèles présentés précédemment, le forçage est ici réalisé au sommet de la CLA.

Le détail des données d'entrée, des variables intermédiaires, des résultats et des sous-modèles utilisés est donné en zone rurale et urbaine sur la Figure 6.8. La vitesse

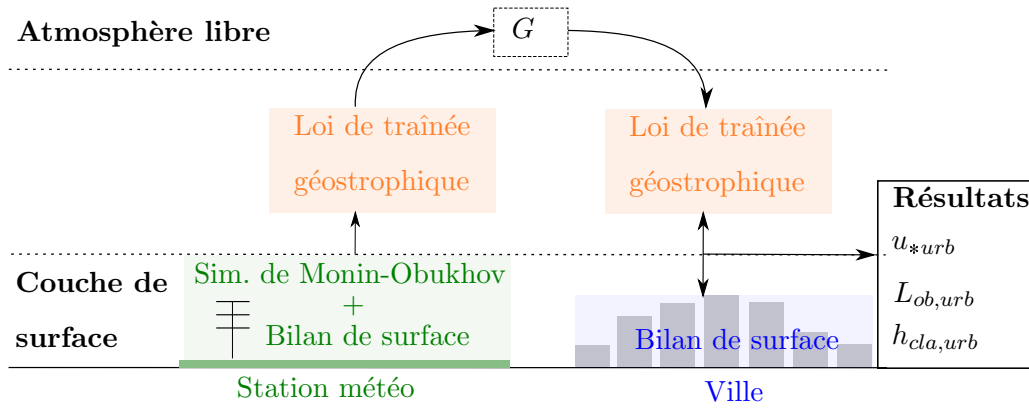


FIGURE 6.7 – Principe du prétraitement météorologique (u_* : vitesse de friction, L_{ob} : longueur d’Obukhov, h_{cla} : hauteur de la CLA, G : vitesse géostrophique)

géostrophique est le résultat du modèle rural (Figure 6.8a), et est nécessaire en entrée du modèle urbain (Figure 6.8b). Le modèle rural (Figure 6.8a) est inspiré du prétraitement du modèle SIRANE [Soulhac *et al.* 2011]. Le modèle urbain (Figure 6.8b) a en revanche été développé lors de la thèse. Un pas de temps d’une heure est choisi pour ces modèles.

Dans un premier temps, à partir de la vitesse et de la température mesurées à la station météorologique, la théorie des similarités de Monin-Obukhov est utilisée pour déterminer la vitesse de friction ($u_{*,met}$) et la longueur d’Obukhov ($L_{ob,met}$) (Figure 6.8a). Cependant, la température de sol (θ_0 dans l’équation 6.4) étant également inconnue, un bilan de surface doit être associé afin de contraindre suffisamment le système. Dans un deuxième temps, la loi de traînée géostrophique (équation 6.11) est utilisée pour déterminer le vent géostrophique. Enfin, une loi paramétrique est utilisée pour évaluer la hauteur de CLA rurale.

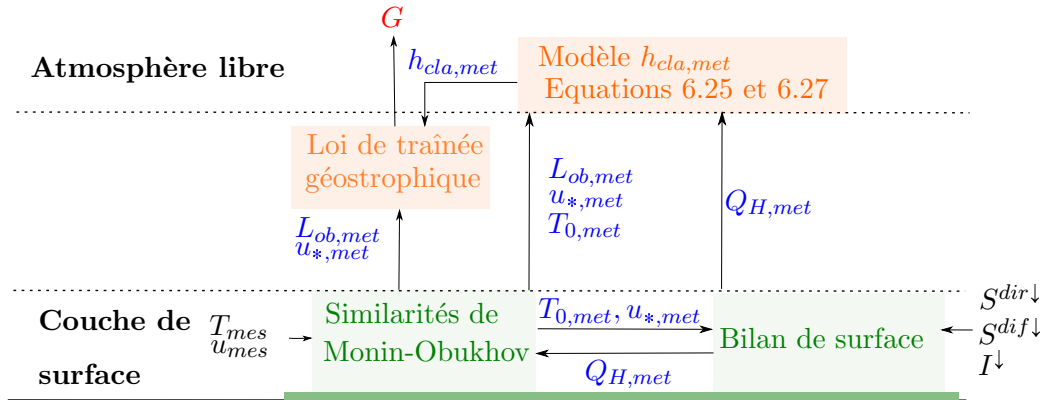
Enfin, la loi de traînée géostrophique, un bilan de surface ainsi qu’une modélisation de la hauteur de CLA urbaine sont associés pour calculer la vitesse de friction ($u_{*,urb}$) et la longueur d’Obukhov ($L_{ob,urb}$) urbaines (Figure 6.8b). Une température de surface $T_{0,urb}$ est nécessaire en entrée du modèle urbain pour le calcul des flux infrarouge et latent. Elle est supposée égale à la température rurale :

$$T_{0,urb} = T_{0,met} \quad (6.13)$$

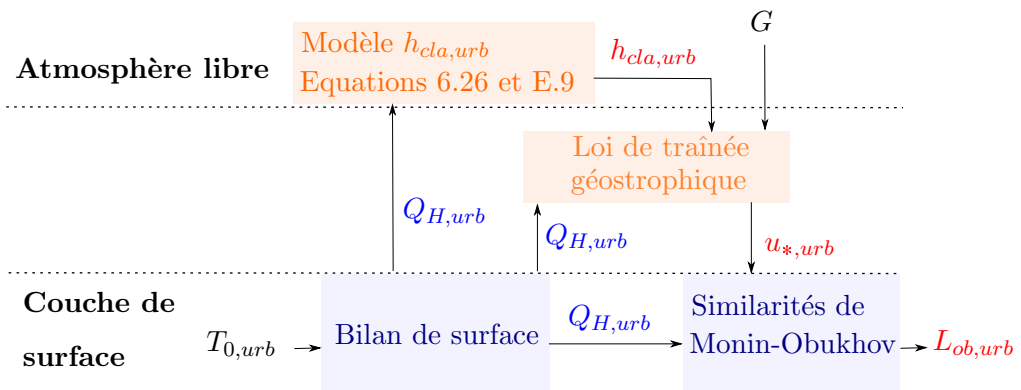
Cette hypothèse est adoptée dans la mesure où d’autres paramètres viendront moduler les valeurs des flux des bilans de surface rurale et urbaine, et les températures de surface $T_{0,urb}$ et $T_{0,met}$ correspondent à un ordre de grandeur.

Dans la suite de cette partie, le modèle est décrit plus en détail. Tout d’abord, la paramétrisation des caractéristiques de surface urbaine et rurale est discutée. Ensuite, les bilans de surface urbain et rural sont présentés. Pour finir, la modélisation de la hauteur de CLA urbaine et rurale est également décrite. La théorie des similarités de Monin-Obukhov et la loi de traînée géostrophique ayant déjà été présentées de façon générale dans la section 2 de ce chapitre, les équations ne seront pas données à nouveau dans cette partie afin de ne pas l’allourdir. Dans la suite de cette partie les indices *met* et *urb* seront utilisés pour désigner respectivement la station météorologique et le site urbain.

6.4. Développement d'un prétraitement des données météorologiques



(a) Détail du modèle rural, inspiré du prétraitement météorologique de SIRANE (u_{mes} : vitesse mesurée, T_{mes} : température mesurée, $S^{dir\downarrow}, S^{dif\downarrow}, I^{\downarrow}$: densités de flux solaire direct, solaire diffus et infrarouge sur une surface horizontale, $u_{*,met}$: vitesse de friction, $L_{ob,met}$: longueur d'Obukhov, $T_{0,met}$: température de surface, $Q_{H,met}$: densité de flux convectif, $h_{cla,met}$: hauteur de la CLA, G : vitesse géostrophique)



(b) Détail du modèle urbain, développé dans la thèse ($T_{0,urb}$: température de surface, G : vitesse géostrophique, $Q_{H,urb}$: densité de flux convectif, $u_{*,urb}$: vitesse de friction, $L_{ob,urb}$: longueur d'Obukhov, $h_{cla,urb}$: hauteur de la CLU)

FIGURE 6.8 – Détail des modèles rural et urbain du prétraitement météorologique. Les données d'entrée sont en noir, les variables intermédiaires en bleu et les résultats en rouge.

6.4.2 Caractéristiques des surfaces urbaine et rurale

Dans le but de faciliter la mise en données du prétraitement météorologique, seuls deux éléments sont nécessaires à la paramétrisation des surfaces urbaine et rurale :

- La hauteur des éléments de rugosité z_r (en m)
- La catégorie de *Local Climate Zone* (LCZ).

La hauteur des éléments de rugosité permet d'estimer la hauteur de déplacement aérodynamique $d_0 = 0,7 z_r$ [m] et la longueur de rugosité aérodynamique $z_0 = 0,1 z_r$

[m] de la surface [Oke *et al.* 2017]. Il s'agit d'une première approximation, qui pourra être à terme affinée notamment avec la prise en compte la densité de bâtiments en plus de leur hauteur. De même, on estime la hauteur de déplacement thermique comme égale à la hauteur de déplacement aérodynamique $d_t = d_0$ [m]. Enfin, la longueur de rugosité thermique z_t [m] est estimée par [Kanda *et al.* 2007] :

$$z_t = \exp(-10)z_r \quad (6.14)$$

Une autre possibilité serait de faire dépendre z_t du nombre de Reynolds. Toutefois, les résultats répertoriés dans [Kanda *et al.* 2007] sont très dispersés et s'éloignent parfois beaucoup de la valeur estimée par la formule dépendant du Reynolds. Cette option n'est donc pas choisie.

Ensuite, la LCZ choisie pour décrire la surface va déterminer les quatre paramètres utiles au bilan de surface, soit :

- L'albédo équivalent (α)
- L'émissivité équivalente (ϵ)
- Le coefficient de stockage (C_{jour} ou C_{nuit}) qui représente la fraction du flux radiatif stocké le jour et la nuit
- La fraction de végétation (f_v) .

Un tableau de correspondances fait le lien entre les LCZs et les valeurs de ces quatre paramètres, établi à partir de la littérature et donné en Annexe D.

6.4.3 Bilan de surface

Un bilan énergétique est appliqué au site rural comme au site urbain, avec toutefois certaines différences entre les deux sites, qui seront détaillées dans cette partie. Il consiste à considérer le site rural et le site urbain comme des surfaces planes, avec comme caractéristiques les paramètres définis dans la partie précédente.

Ce bilan de surface permet d'obtenir les flux de chaleur sensible $Q_{H,met}$ et $Q_{H,urb}$. Pour cela, grandeurs suivantes sont nécessaires :

- Les caractéristiques des surfaces urbaine et rurale décrites à la partie précédente.
- Les densité de flux solaire direct ($S^{dir\downarrow}$ [W/m²]), solaire diffus ($S^{dif\downarrow}$ [W/m²]) et infrarouge (I [W/m²]) incidents sur une surface horizontale, et la vitesse (u_{mes} [m/s]) et la température (T_{mes} [K]) mesurées à la station météorologique.
- Les grandeurs décrivant de la couche de surface : la vitesse de friction u_* et la température de la surface T_0 .

Le cas du jour et de la nuit sont considérés séparément et vont être détaillés dans cette partie.

6.4.3.1 Modèle diurne

En journée, les phénomènes en ville et en milieu rural sont similaires, avec une intensité différente. Les mêmes équations sont donc utilisées au site rural et en ville : seuls les paramètres de la surface sont différents.

Le flux sensible est déterminé par déduction à partir du bilan énergétique :

$$Q_{Hi}^{jour} = Q_i^{*jour} - Q_{Gi}^{jour} - Q_{Ei}^{jour} \quad (6.15)$$

6.4. Développement d'un prétraitement des données météorologiques

$$\text{Avec : } \begin{cases} i [-] : \textit{met} \text{ ou } \textit{urb} \text{ pour la site rural ou la ville} \\ Q_{Hi}^{jour} [W/m^2] : \text{Le flux sensible diurne quittant la surface} \\ Q_i^{*jour} [W/m^2] : \text{Le flux radiatif diurne net incident} \\ Q_{Ei}^{jour} [W/m^2] : \text{Le flux latent diurne quittant la surface} \\ Q_{Gi}^{jour} [W/m^2] : \text{Le flux diurne conduit dans la surface.} \end{cases}$$

Le flux net radiatif est évalué par :

$$Q_i^{*jour} = (1 - \alpha_i)(S^{dir\downarrow} + S^{dif\downarrow}) + \epsilon_i(I^\downarrow - \sigma T_{0i}^4) \quad (6.16)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} i [-] : \textit{met} \text{ ou } \textit{urb} \text{ pour la site rural ou la ville} \\ \sigma = 5,6710^{-8} Wm^{-2}K^{-4} : \text{Constante de Stefan-Boltzmann} \\ T_0 [K] : \text{La température au niveau du sol.} \end{cases}$$

Au site rural, la température au niveau du sol est déterminée par le bilan de surface décrit dans cette partie associé aux équations de Monin-Obukhov, à partir des mesures de la station météorologique. En ville, en revanche, l'hypothèse est faite que $T_{0,urb} = T_{0,met}$. En effet, les différents flux des bilans de surface sont déjà influencés par les cinq paramètres basés sur la LCZ (α , ϵ , C_{jour} , C_{nuit} , f_v) décrits partie 6.4.2, cette température n'a donc pas besoin d'être connue précisément.

Ensuite, le flux conduit est calculé par :

$$Q_{Gi}^{jour} = C_{i,jour} Q_i^{*jour,t+1} \quad (6.17)$$

Avec C_{jour} est un coefficient défini en fonction de la LCZ (partie 6.4.2). Ici le flux conduit dépend du flux radiatif net de l'instant suivant, de manière à modéliser le déphasage entre les flux conduit et solaire.

Enfin, le flux latent est estimé avec la paramétrisation de [Holtslag & Van Ulden 1983], en prenant le coefficient de Priestley-Taylor égal à la fraction de végétation :

$$Q_{Ei}^{jour} = \frac{f_{vi}}{1 + \frac{1}{\exp(0,055(T_{0i} - 279))}} (Q_i^{*jour} - Q_{Gi}^{jour}) + 20f_{vi} \quad (6.18)$$

6.4.3.2 Modèle nocturne

La nuit, au contraire, des équations différentes sont utilisées en ville et à la station météorologique. En effet, au site rural, une paramétrisation en fonction de la couverture nuageuse est utilisée. Cependant, elle impose une atmosphère stable, elle ne peut donc pas être réutilisée en ville.

Site rural

Au site rural, aucun bilan énergétique n'est réalisé, mais la température de friction est modélisée. Le flux de chaleur sensible est ensuite déterminé par la théorie des similarités de Monin-Obukhov :

$$Q_{H,met}^{nuit} = -\rho c_p \theta_{*met} u_{*met} \quad (6.19)$$

Pour calculer la température de friction, la modélisation empirique issue de [Holtslag & Van Ulden 1982] est utilisée :

$$\theta_{*met} = \min\left(0,09(1 - 0,5Cl d^2); \frac{0,9\kappa u_{met}^2 \theta_{met}}{20 \ln\left(\frac{z_u - d_{0,met} + z_{0,met}}{z_{0,met}}\right)(z_u - d_{0,met})g}\right) \quad (6.20)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} Cl d [-] : \text{La nébulosité, prise entre 0 et 1} \\ \theta_{mes} [K] : \text{La température potentielle correspondant à la température} \\ \text{mesurée à la station météorologique } T_{mes}, \text{ obtenue avec l'équation 5.12} \\ \text{(et donc égale à } \theta_b \text{).} \end{cases}$$

Le terme à droite dans la parenthèse borne θ_{*met} par la valeur maximale qui autorise une solution de l'équation de Monin-Obukhov pour la vitesse de friction en condition stable, 0,9 étant un facteur de sécurité.

Site urbain

En ville, le même principe qu'en journée est utilisé, avec une modélisation paramétrique des différents flux. Le flux de chaleur sensible est calculé par :

$$Q_{H,urb}^{nuit} = Q_{urb}^{*nuit} - Q_{G,urb}^{nuit} \quad (6.21)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} Q_{H,urb}^{nuit} [W/m^2] : \text{Le flux sensible nocturne quittant la surface} \\ Q_{urb}^{*nuit} [W/m^2] : \text{Le flux radiatif nocturne net incident} \\ Q_{G,urb}^{nuit} [W/m^2] : \text{Le flux nocturne conduit dans la surface.} \end{cases}$$

Le flux radiatif net est calculé par :

$$Q_{urb}^{*nuit} = \epsilon_{urb}(I^\downarrow - \sigma T_{0,urb}^4) \quad (6.22)$$

Ici, comme expliqué dans la partie précédente, $T_{0,urb}$ est supposée égale à $T_{0,met}$. Ensuite, le flux conduit est défini avec :

$$Q_{G,urb}^{nuit} = C_{urb,nuit} Q_{urb}^{*nuit} \quad (6.23)$$

Le coefficient $C_{urb,nuit}$ est supérieur à 1 pour les zones urbaines (voir Annexe D), ce qui revient à fixer une atmosphère légèrement instable, à travers un flux sensible légèrement négatif.

6.4.3.3 Traitement de la transition jour/nuit

Finalement, le flux de chaleur sensible émis par la surface urbaine ou rurale est :

$$\begin{cases} Q_{H,i} = Q_{H,i}^{nuit} & \text{si } \phi_{zen} > \pi/2 \\ Q_{H,i} = \max(Q_{H,i}^{nuit}, Q_{H,i}^{jour}) & \text{si } \phi_{zen} < \pi/2 \end{cases} \quad (6.24)$$

ϕ_{zen} [rad] étant l'angle zénithal. L'équation 6.24 revient à utiliser la modélisation nocturne de $Q_{H,i}$ lorsque le flux solaire est très faible, soit juste après le lever du jour et juste avant la tombée de la nuit. Cela évite d'avoir un flux sensible quasiment nul lorsque le flux radiatif s'annule à la transition jour/nuit.

6.4.4 Hauteur de la couche limite atmosphérique

Enfin, cette dernière partie consacrée à la modélisation s'intéressera à la hauteur de la couche limite atmosphérique rurale et urbaine.

6.4.4.1 Jour

Le jour, l'atmosphère est instable au site rural comme au site urbain. Au site rural, l'équation de [Soulhac *et al.* 2011] est reprise et $h_{cla,met}$ est obtenue résolvant :

$$\Delta t = \frac{\xi^2}{2a_1} \left[\left(\frac{h_{cla,met}}{\xi} - 1 \right)^2 - \left(\frac{h_{cla,met}^{t-1}}{\xi} - 1 \right)^2 + 2 \ln \left(\frac{h_{cla,met} + \xi}{h_{cla,met}^{t-1} + \xi} \right) \right] \quad (6.25)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \xi = \frac{a_2}{a_1} \\ a_1 = \frac{1,4Q_{H,met}}{\rho c_p \gamma_{\theta}^{ext}} \\ a_2 = \frac{5u_{*,met}^3 T_{0,met}}{g \gamma_{\theta}^{ext}} \\ g = 9,81 m/s^2 [-] : \text{L'accélération de la pesanteur} \\ \gamma_{\theta}^{ext} = 0,003261 K/m : \text{Le gradient de température potentielle dans} \\ \text{l'atmosphère libre.} \end{cases}$$

La hauteur de couche limite au site météo a un instant $h_{cla,met}$ dépend donc de celle à l'instant précédent $h_{cla,met}^{t-1}$, ce qui correspond à une croissance de la CLA au fur et à mesure de la journée.

En ville en revanche, la hauteur de couche limite n'est pas calculée à nouveau, mais simplement estimée comme :

$$h_{cla,urb} = 1,15 h_{cla,met} \quad (6.26)$$

L'équation 6.26 impose une couche limite atmosphérique légèrement plus haute en ville la journée. Le coefficient 1,15, qui est arbitraire, a été inspiré par [Oke *et al.* 2017], où la CLA urbaine est décrite comme pouvant atteindre 20 % de plus que la CLA rurale.

6.4.4.2 Nuit

Contrairement à la journée, les phénomènes urbains et ruraux sont très différents la nuit. En effet, en zone rurale, l'atmosphère devient stable et une couche limite stable s'installe. En ville, la chaleur rendue par les bâtiments empêche l'atmosphère de devenir stable, et maintient une couche légèrement instable ou neutre tout au long de la nuit [Oke *et al.* 2017].

Site rural

Au site rural, la paramétrisation choisie dans [Soulhac *et al.* 2011] est reprise.

$$h_{cla,met} = \frac{L_{met}}{3,8} \left(\sqrt{1 + 2,28 \frac{u_{*,met}}{f L_{met}}} - 1 \right) \quad (6.27)$$

Avec f est le paramètre de Coriolis.

Site urbain

Au site urbain, une couche limite instable naît à l'orée de la ville et grossit à mesure que le vent balaye les surfaces chaudes, jusqu'à être maximale à l'extrémité de la ville. Bien sûr, il s'agit d'une représentation idéalisée. Toutefois, elle permet de se rendre compte que la hauteur de la CLU doit dépendre de la surface urbaine balayée par le vent avant d'atteindre le quartier urbain d'intérêt. Notons que si cette distance est facile à estimer pour un quartier situé au centre d'une ville de forme circulaire, elle va dépendre du sens du vent pour toute autre configuration. Pour l'instant, une valeur par défaut de surface urbaine balayée de $\Delta x = 5 \text{ km}$ est choisie, ce qui revient à considérer un quartier au centre d'une ville de 10 km de diamètre. Cette distance arbitraire et devra être modifiée selon le cas d'étude et pour prendre en compte l'orientation du vent.

[Summers 1964] propose une paramétrisation très simplifiée de la hauteur de CLU nocturne, en supposant un écoulement uniforme verticalement et non modifié par la ville, ainsi qu'une CLU parfaitement mélangée et un profil vertical de température potentielle rurale linéaire. En supposant un flux de chaleur uniforme sur la surface de la ville, la hauteur de CLU est calculée par :

$$h_{cla,urb} = \sqrt{\frac{2Q_{H,urb}\Delta x}{u_{met} \frac{\partial \theta_{met}}{\partial z} \rho c_p}} \quad (6.28)$$

Le raisonnement conduisant à cette équation est donné en Annexe E.

6.4.5 Bilan

Le prétraitement développé dans cette partie nécessite donc seulement deux paramètres pour décrire les surfaces urbaines et rurales : la hauteur moyenne des éléments de rugosités (z_r) et la LCZ. De plus, une estimation de la distance de ville en amont du quartier d'intérêt (Δx) est nécessaire.

Il permet donc une mise en données simple, adaptée au niveau de détail faible choisi, afin d'estimer les conditions limites du modèle de quartier à partir des données météorologiques.

6.5 Validation du prétraitement des données météorologiques avec la campagne de mesures BUBBLE

Dans cette partie, le prétraitement développé va être confronté à la campagne de mesures BUBBLE à Bâle.

6.5.1 Présentation du cas d'étude et mise en données

Présentation du cas d'étude

BUBBLE est une campagne de mesure de grande ampleur, qui s'est déroulée à Bâle en 2002, et qui avait pour but d'étudier la couche limite urbaine [Rotach *et al.* 2005].

6.5. Validation du prétraitement des données météorologiques avec la campagne de mesures BUBBLE

Certains résultats sont accessibles en ligne, et vont être confrontés au prétraitement météorologique développé.

Lors de cette campagne, des bilans d'énergie sur huit sites différents ont été effectués, dans Bâle et autour, sur la période d'opérations intensives, du 10 juin au 9 juillet 2002. Sur ces sites, un anémomètre et un thermomètre ultrasonique 3D a notamment été positionné, permettant de mesurer le flux de chaleur par la méthode de la covariance des turbulences (*eddy covariance*) et la vitesse de friction. Les quatre composantes du bilan radiatif (CLO et GLO, arrivant et partant) ont également été mesurées explicitement.

Sur l'un de ces sites, qui correspond à une rue de 14,6 m de hauteur en centre ville (Sperstrasse), le dispositif de mesures a été intensifié. Notamment, un mat de 32 m a été utilisé pour les mesures avec l'anémomètre et le thermomètre ultrasonique 3D, ce qui permet de se situer largement au dessus de la hauteur des bâtiments et ainsi de disposer de mesures pour lesquelles l'effet local est minimisé.

Mise en données

Parmi ces différents sites de mesures, deux ont été choisis pour être comparés aux résultats des simulations (Figure 6.9) :

- Un site rural : Village Neuf, au nord ouest de Bâle , pour lequel une LCZ D et des éléments de rugosité de 0,5 m ont été définis.
- Un site urbain : Sperstrasse, en plein coeur de la ville, pour lequel une LCZ 2 et des éléments de rugosité de 14,6 m ont été définis. Ce site se trouvant au centre de la ville, une distance amont du vent de $\Delta x = 5km$ est fixée.

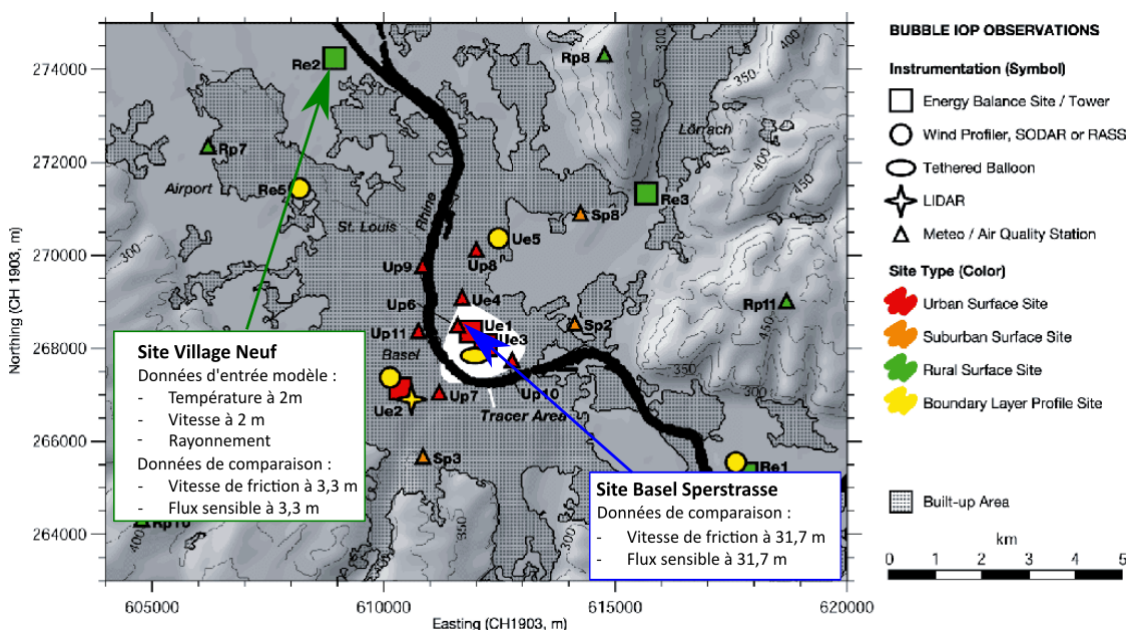


FIGURE 6.9 – Sites rural et urbain de la campagne de mesure BUBBLE choisis pour la comparaison et données d'entrée et de comparaison du modèle (Adapté de [Rotach *et al.* 2005])

Au site rural, le rayonnement CLO et GLO incident, ainsi que la température d'air et la vitesse du vent ont été prises comme données d'entrée.

Les comparaisons se feront sur la vitesse de friction et le flux de chaleur sensible

au site rural comme au site urbain. La longueur d'Obukhov sera calculée à partir des mesures de vitesse de friction et du flux sensible avec l'équation 6.1.

La période étudiée va du 10 juin au 9 juillet 2002. Dans un premier temps, les résultats vont être analysés sur un jour type moyen sur cette période. Ensuite, la période du 25/06 au 07/07 sera étudiée en détail. Enfin, les erreurs calculées sur la période complète seront présentés.

6.5.2 Jour moyen

Un jour moyen est défini comme la moyenne, à chaque heure de la journée, des grandeurs observées à la même heure sur la période du 25/06 au 07/07.

Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques moyennes sur le mois étudié sont présentées sur la Figure 6.10.

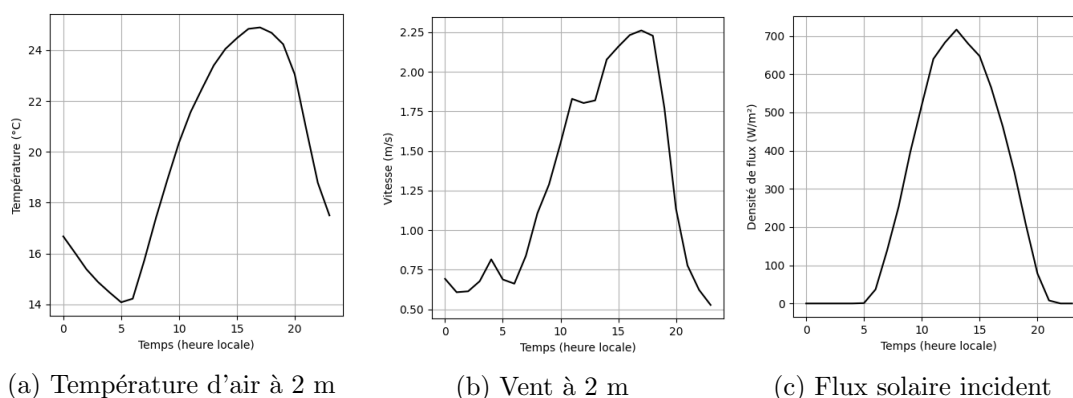


FIGURE 6.10 – Données météorologiques moyennées sur les 29 jours étudiés

Dans l'ensemble, la période a été très ensoleillée, le rayonnement solaire maximum du jour moyen dépassant les 700 W/m^2 . Les températures d'air moyennes sont comprises entre 14 et $25 \text{ }^\circ\text{C}$ et les vitesses de vent moyennes à 2 m entre $0,5$ et $2,25 \text{ m/s}$.

Résultats

Les grandeurs mesurées et simulées moyennes sont présentées sur la Figure 6.11. La hauteur de la CLA n'étant pas mesurée, seules les valeurs simulées de cette grandeur sont représentées.

En moyenne, la vitesse de friction simulée au site rural comme en ville reproduit bien la dynamique journalière. Dans la mesure où le flux sensible n'est paramétré qu'avec la LCZ, la précision ne peut pas être recherchée. Sur ce cas d'étude, le flux sensible simulé est proche du flux mesuré sur le cas urbain, malgré une certaine sous-estimation pour le cas rural. L'ordre de grandeur dans la différence rural/urbain est toutefois bien respecté. Avant d'analyser la stabilité, rappelons que la stabilité atmosphérique est neutre quand la longueur d'Obukhov tend vers l'infini, de plus en plus stable quand elle tend vers 0^+ et de plus en plus instable quand elle tend vers 0^- . Au site rural, on observe bien une atmosphère stable la nuit et instable le jour, ce qui correspond à la littérature

6.5. Validation du prétraitement des données météorologiques avec la campagne de mesures BUBBLE

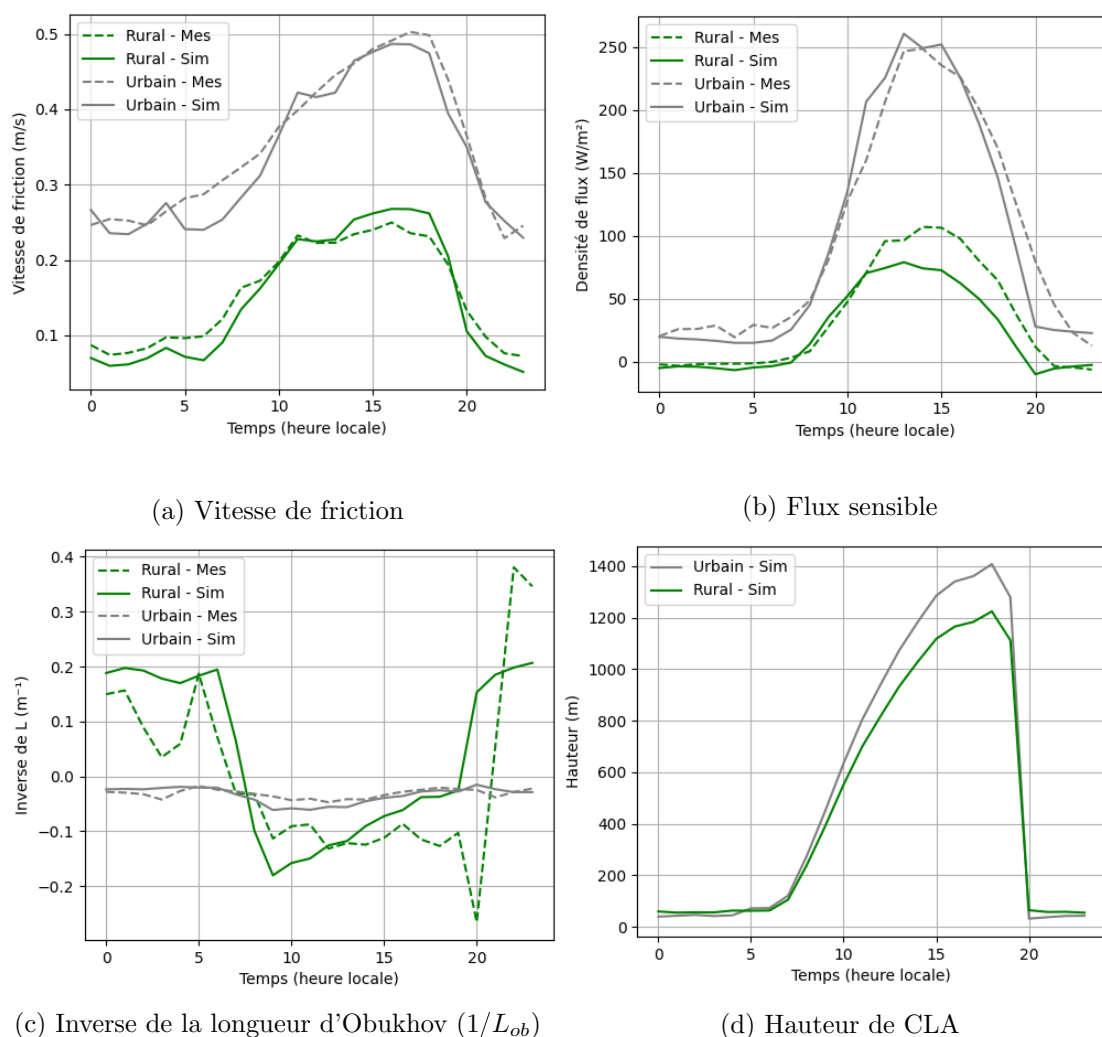


FIGURE 6.11 – Grandeurs mesurées et simulées, en ville et au site rural, moyennées sur 29 jours

[Garratt 1999]. Au contraire, en ville, la stabilité atmosphérique varie beaucoup moins et est toujours légèrement instable, proche du neutre. Cela s'explique par la turbulence générée mécaniquement par la rugosité de la ville (d'où la vitesse de friction élevée), qui réduit l'impact de la turbulence générée thermiquement. Le flux sensible et la vitesse de friction simulés étant proches des mesures, cela induit les bons résultats pour la stabilité. Ici, la moyenne de la stabilité en ville semble quasiment constante au cours de la journée. Dans ce cas, il faudra analyser les résultats plus en détail pour voir si le modèle apporte vraiment une plus-value par rapport au fait de prendre une valeur constante pour $1/L_{ob,urb}$, par exemple -0,03.

Enfin, la hauteur de couche limite croît au long de la journée, et de manière un peu plus importante en ville. Ces valeurs semblent cohérentes avec la dynamique et les ordres de grandeurs attendus [Oke *et al.* 2017]. La nuit, les valeurs sont plus faibles : autour de 60 m au site rural et autour de 40 m en ville. Le fait que cette hauteur soit plus faible en ville n'est pas étonnant, car il s'agit de l'épaisseur de la couche instable persistant au contact de la ville.

6.5.3 Période du 25/06 au 07/07

Conditions météorologiques

Les conditions météorologiques de la période étudiée sont données sur la Figure 6.12.

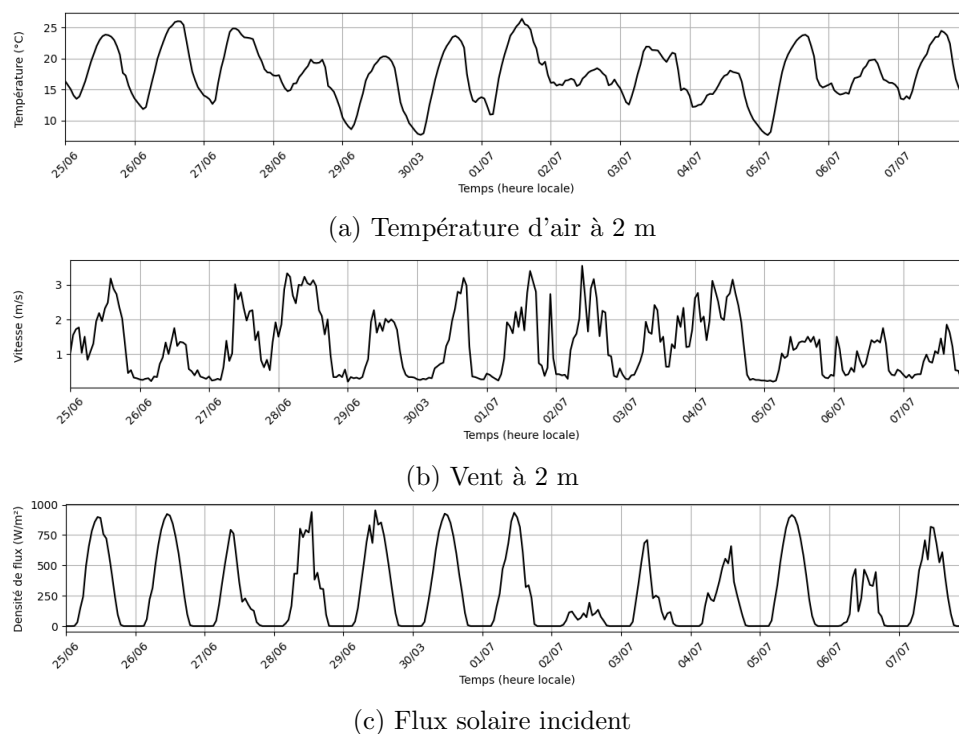


FIGURE 6.12 – Données météorologiques sur la périodes du 25/06/2002 au 07/07/2002

La plupart des journées sont ensoleillées mis à part quelques jours sur la deuxième partie de la période étudiée. De même, sur les trois derniers jours de la période, le vent à 2 m est plus faible que sur le reste de la période, ne dépassant pas 2 m/s.

Résultats

Les résultats sont représentés sur la période du 25/06 au 07/07 sur la Figure 6.13.

On observe une certaine variabilité dans la stabilité atmosphérique, à peu près reproduite par le modèle. Par exemple, le 2 juillet, le flux convectif est très faible (peu de flux solaire), l'atmosphère en ville est donc plus neutre que la moyenne dans les mesures comme la simulation. De même, les nuits du 27 au 28 juin et du 3 au 4 juillet sont assez venteuses, la stabilité atmosphérique est donc plus proche du neutre que la moyenne. Enfin, à l'inverse, le 26 juin et le 7 juillet sont ensoleillés et peu venteux : conditions propices à des journées instables, ce que le modèle et les mesures montrent bien. Par ailleurs, de manière générale, on constate que le modèle lisse les variations, et ne va pas bien reproduire les pics instantanés. Cela est particulièrement vrai pour la stabilité atmosphérique. Cela va donc augmenter les erreurs calculées, mais ne remet pas en cause la cohérence des résultats. Même si la stabilité atmosphérique en ville est quasiment constante tout au long du jour moyen, ce n'est pas forcément le cas pour un jour réel. En effet, la couverture nuageuse et la vitesse du vent principalement vont impacter les résultats. Il est donc nécessaire d'appliquer le prétraitement météorologique à chaque

6.5. Validation du prétraitement des données météorologiques avec la campagne de mesures BUBBLE

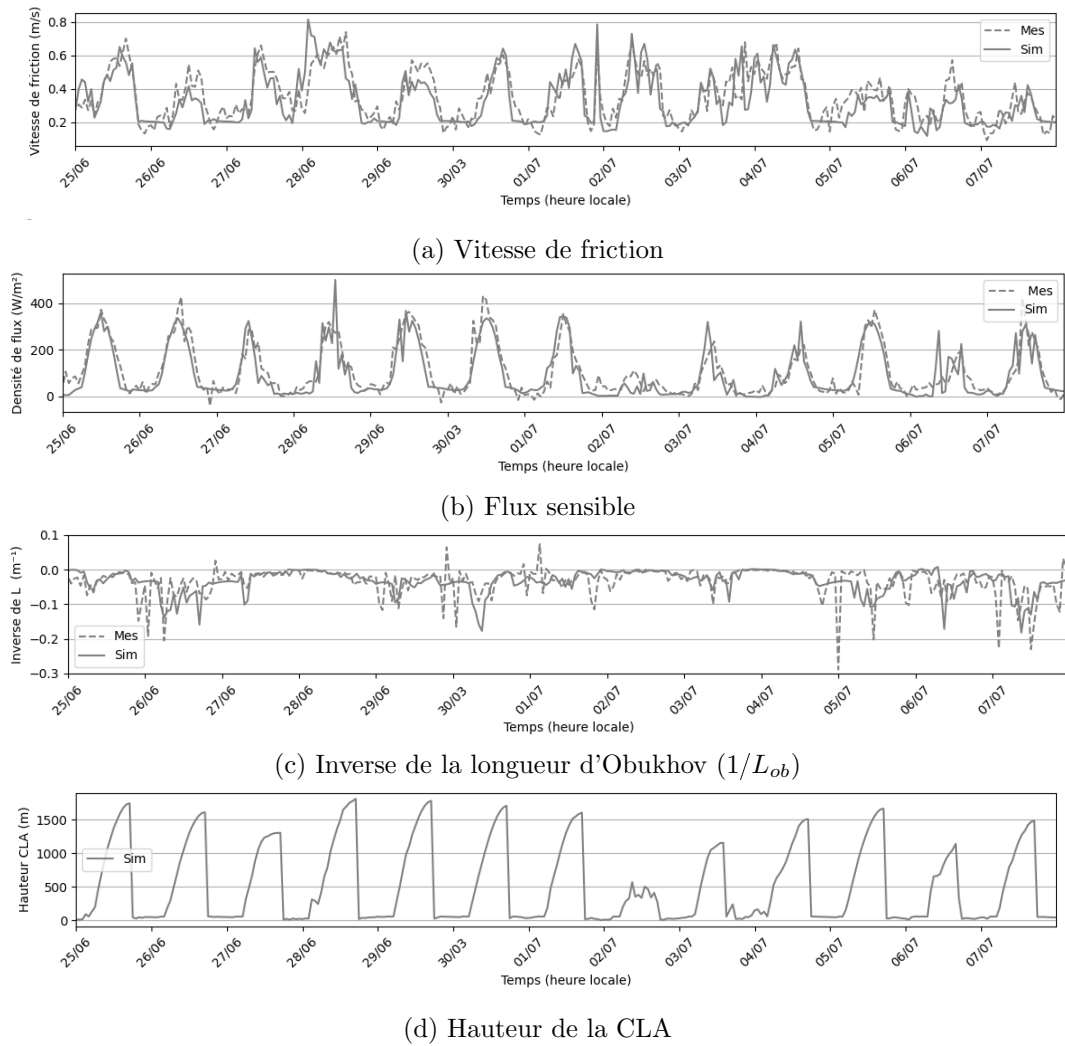


FIGURE 6.13 – Grandeurs mesurées et simulées en ville du 25/06 au 07/07

pas de temps, et il n'est pas possible de fixer la stabilité en ville à une valeur constante.

Enfin, la hauteur de CLA varie aussi très nettement en fonction de l'ensoleillement. Cela est particulièrement remarquable le 02/07 et le 06/07. Ce comportement était attendu, dans la mesure où la couche convective diurne va moins s'élever si les cycles de convections sont moins actifs.

6.5.4 Écarts sur la période complète

L'erreur moyenne absolue (MAE) et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) ont été calculées. Elles sont définies par :

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_i^N |y_i - y'_i| \quad (6.29)$$

Avec : $\begin{cases} y, y' : \text{Les valeurs correspondant à l'expérience et à la simulation} \\ N : \text{Le nombre de points disponibles pour calculer l'erreur.} \end{cases}$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_i^N |y_i - y'_i|^2} \quad (6.30)$$

Les écarts sont présentés dans le Tableau 6.4. Le flux convectif n'est pas analysé car il ne s'agit que d'un calcul intermédiaire, qui ne sera pas utilisé dans la modélisation du quartier.

	Vitesse de friction ($u_{*,urb}$)	Stabilité atmosphérique ($1/L_{ob,urb}$)
MAE absolue	0,071m/s	0,025 m^{-1}
MAE relative	16 %	19 %
RMSE absolue	0,095 m/s	0,039 m^{-1}
RMSE relative	21 %	29 %

TABLE 6.4 – MAE et RMSE des résultats du prétraitement météorologique (les valeurs relatives sont exprimées par rapport à l'amplitude moyenne journalière)

Pour la vitesse de friction, la MAE est de 16 % de l'amplitude moyenne journalière, avec une valeur de 0,071 m/s, ce qui est très satisfaisant. La RMSE est un peu plus importante, ce qui signifie que les erreurs peuvent être occasionnellement assez importantes (les valeurs d'erreur ne sont pas très resserrées autour de la moyenne). Ensuite, notons tout d'abord que le calcul de la stabilité atmosphérique fait intervenir le rapport entre la vitesse de friction et le flux sensible : l'écart sur $1/L_{ob,urb}$ cumule donc celui sur les deux autres grandeurs, tout en l'amplifiant. La MAE sur l'inverse de la longueur d'Obukhov est de $0,025 m^{-1}$, ce qui semble acceptable. En relatif par rapport à l'amplitude moyenne journalière, cela donne une MAE de 19 %, donc comme attendu plus important que pour la vitesse de friction. Là encore, l'erreur quadratique moyenne est plus importante, ce qui implique la même conclusion que pour la vitesse de friction.

6.6 Conclusion

Ce chapitre clôture la présentation du modèle MATHIS en s'intéressant à la prise en compte des effets méso-échelle.

Un prétraitement météorologique a été développé et permet d'obtenir la vitesse de friction, la stabilité atmosphérique et la hauteur de CLU sur un quartier d'intérêt. Il se base sur l'hypothèse d'une vitesse géostrophique uniforme sur la ville et le milieu rural. La théorie des similarités de Monin-Obukhov, la loi de trainée géostrophique et des bilans de surface paramétriques sur les zones rurale et urbaine sont utilisés dans ce modèle.

La vitesse de friction et la stabilité atmosphérique ont ensuite été comparées aux données de la campagne de mesure BUBBLE à Bâle, sur 29 jours à l'été 2002, montrant des erreurs de l'ordre de 20% de l'amplitude moyenne journalière.

En revanche, pour l'instant la condition limite de température en amont du domaine simulé n'est pas calculée par le prétraitement météorologique. En effet, il n'est plus pertinent d'utiliser l'hypothèse d'uniformité horizontale pour cette grandeur, qui croit par définition au contact de la ville dans le sens de l'écoulement. L'intégrer nécessiterait donc

de suivre un autre raisonnement que celui utilisé dans le prétraitement météorologique. Il s'agit d'une perspective d'amélioration.

Un cas d'application sur un quartier de Lyon sera effectué dans le chapitre suivant, et permettra de mettre en perspective les résultats du prétraitement météorologique. Notamment, le flux de chaleur sensible calculé par ce dernier pourra être comparé au flux de chaleur sensible effectivement émis par les toits et les rues du quartier simulé.

Rappel des hypothèses principales du prétraitement météorologique

Hypothèses générales :

- La vitesse est considérée uniforme horizontalement sur les zones urbaine et rurale respectivement
- La vitesse géostrophique est égale aux zones urbaine et rurale
- La température de surface de la zone urbaine ($T_{0,urb}$) utilisée pour le calcul des flux infrarouge et latent urbains est supposée égale à la température de surface de la zone rurale ($T_{0,met}$)
- Les caractéristiques des surfaces urbaine et rurale (albédo, émissivité, coefficient de stockage et fraction de végétation) ne dépendent que de leur LCZ.

Hypothèses spécifiques au calcul de la hauteur de couche limite urbaine nocturne ($h_{cla,urb}$) :

- L'écoulement est uniforme verticalement et non modifié par la ville
- La CLU est parfaitement mélangée
- Le profil vertical de température potentielle rural est linéaire
- Le flux de chaleur émis par la ville est uniforme.

Chapitre 7

Application sur un quartier de Lyon incluant des arbres

Dans ce chapitre, le modèle développé au cours de cette thèse est appliqué sur un cas d'étude réaliste. Les objectifs sont d'étudier le comportement des différents sous-modèles en vérifiant qualitativement la cohérence des résultats, ainsi que de mettre en évidence les perspectives prioritaires.

Pour cela, MATHIS est appliqué à un quartier de la ville de Lyon, sans inclure de végétation. Par la suite, une rue arborée réaliste est étudiée. Les résultats sur le même quartier en incluant des arbres sont ensuite analysés. Finalement, les résultats en terme de temps de calcul sont discutés.

Sommaire

7.1	Description du cas d'étude et des simulations	180
7.1.1	Description du cas d'étude	180
7.1.2	Mise en données	181
7.1.3	Configuration des simulations et présentation des résultats	185
7.2	Application sur un quartier de Lyon sans végétation	186
7.2.1	Résultats dans la couche de canopée urbaine	187
7.2.2	Résultats dans la couche limite urbaine	192
7.2.3	Conclusion	196
7.3	Effet de la modélisation des arbres sur une rue isolée	196
7.3.1	Choix des paramètres	196
7.3.2	Bilan énergétique sur les arbres	198
7.3.3	Modification du bilan énergétique sur les parois	201
7.3.4	Modification du bilan énergétique dans la rue et effet sur la température d'air	202
7.3.5	Conclusion	204
7.4	Effet de la modélisation des arbres sur le quartier	204
7.4.1	Arbres homogènes sur le quartier	205
7.4.2	Arbres réalistes	207
7.5	Coût de calcul	208
7.6	Conclusion	210

7.1 Description du cas d'étude et des simulations

Dans cette première partie, le cas d'étude choisi est présenté. Le modèle étant utilisé pour la première fois sur un quartier réaliste, la mise en données ainsi que la configuration des simulations sont ensuite décrites en détail. Les arbres ne sont pas mentionnés pour l'instant, et seront décrits dans les paragraphes qui les concernent spécifiquement.

7.1.1 Description du cas d'étude

Choix du quartier

Un quartier de la ville de Lyon a été choisi comme modèle : ses limites et sa localisation sont représentées sur la Figure 7.1.

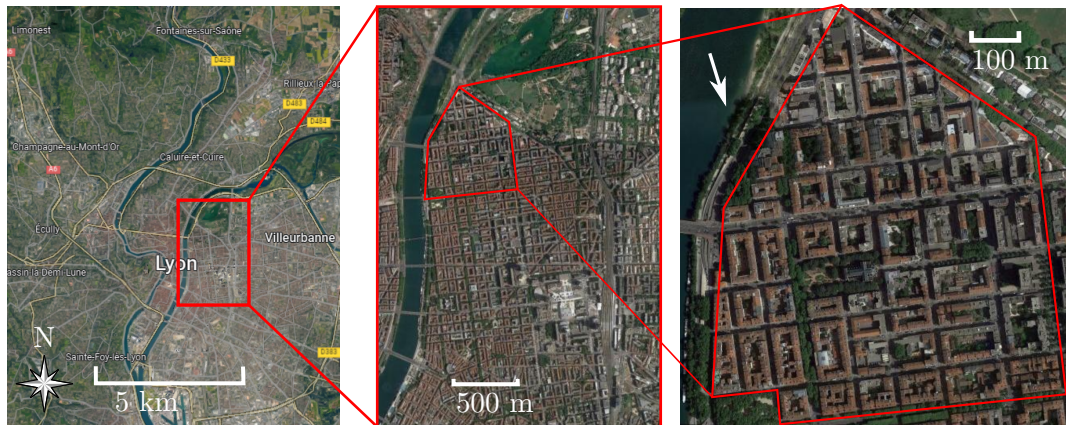


FIGURE 7.1 – Localisation géographique du domaine étudié à Lyon (6^e arrondissement de Lyon, délimité par le cours Franklin Roosevelt, la rue Garibaldi, le boulevard des Belges et le Rhône). La flèche blanche correspond à la direction du vent dominant en juillet 2022.

Le choix a été motivé en premier lieu par la proximité de la géométrie de ce quartier avec un réseau de rues canyons, dans le but de se placer dans une configuration correspondant le plus possible aux hypothèses de MATHIS.

Par ailleurs, ce quartier est positionné au Sud du parc de la Tête d'Or et à l'ouest du Rhône. Dans le cas d'un vent Nord-Nord-Ouest, qui correspond au vent dominant en juillet 2022, tracé sur la Figure 7.1, l'air arrivant sur le quartier sera donc moins impacté par l'ICU qu'un quartier se situant au cœur de zones bâties. Dans la mesure où la condition limite de température n'est pas modélisée par le prétraitement météorologique, il semble donc avantageux de choisir ce quartier.

Données météorologiques et période de simulation

Il a été choisi de créer un fichier météorologique reflétant un jour type, de manière à faciliter l'observation des phénomènes physiques attendus. Ainsi, la température d'air, la vitesse du vent, le rayonnement solaire et l'humidité relative ont été moyennés sur le mois de juillet 2022. Le jour moyen obtenu montre bien des variations lissées pour ces quatre grandeurs, représentées sur la Figure 7.2. Un total de 25 échéances horaires sont tracées sur ces courbes, afin de mettre en évidence la continuité des grandeurs dans

le cas où ces conditions météorologiques seraient utilisées en boucle. Les mesures sont celles de la station météo de Lyon-Bron.

La période de simulation est donc de 24 h et correspond à un jour estival type. Une simulation sur une période plus longue - de l'ordre de quelques semaines - aurait pu être choisie, toutefois cette option n'a pas été retenue afin de simplifier l'analyse des résultats.

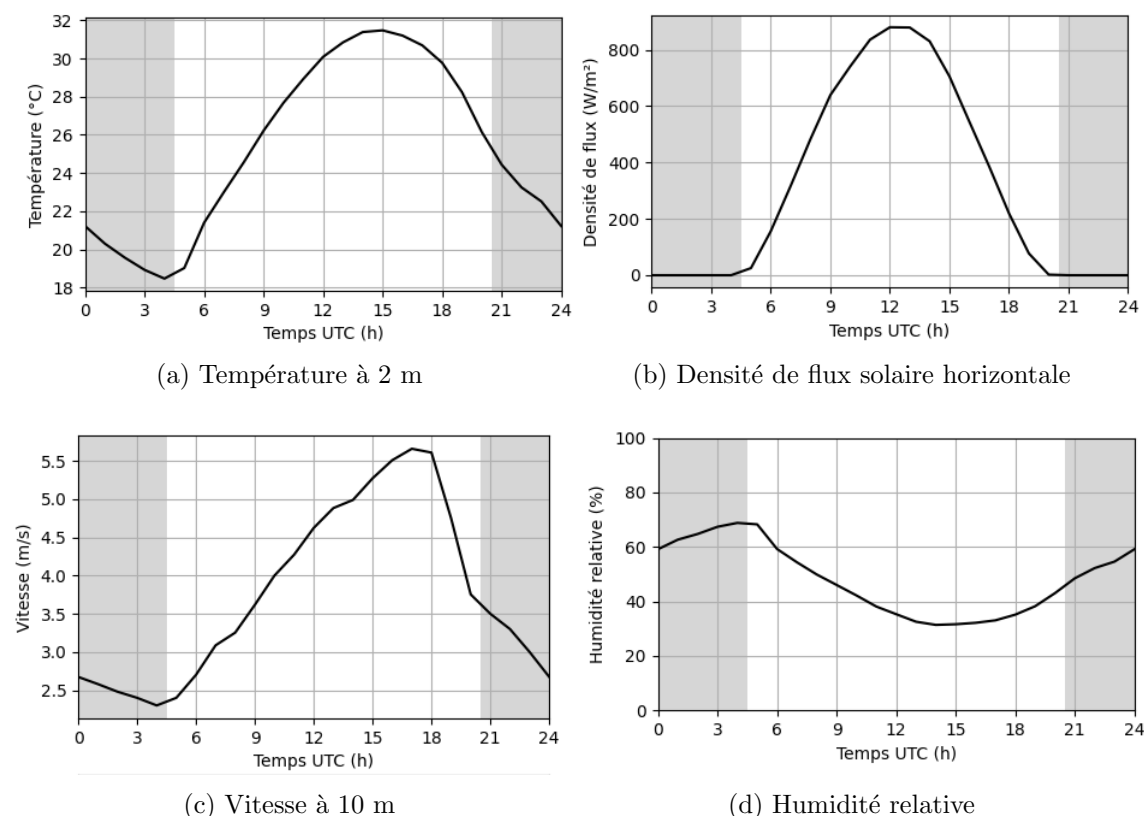


FIGURE 7.2 – Données météorologiques à la station de Lyon-Bron moyennées sur juillet 2022

La direction du vent a été fixée à une orientation Nord-Nord-Ouest, qui correspond à la direction dominante, représentée sur la Figure 7.1. Il n'a pas été choisi de faire varier la direction du vent, de manière à simplifier l'interprétation des résultats pour cette première application de MATHIS.

7.1.2 Mise en données

Construction de la géométrie

Le quartier réel doit être simplifié de façon à construire une géométrie composée de quatre éléments (voir chapitre 5) :

- Des bâtiments
- Des rues
- Des intersections
- Des places.

Les cours n'étant pas encore incluses dans le modèle, elles ne sont pas prises en compte dans la géométrie.

7.1. Description du cas d'étude et des simulations

Même si les structures de MATHIS et SIRANE sont semblables, des éléments supplémentaires sont nécessaires pour MATHIS : les bâtiments et les faces (murs, sols, toits), pour lesquels les coordonnées et les noms des éléments voisins doivent être connus. La procédure automatique de construction de la géométrie de SIRANE [Soulhac *et al.* 2011] ne peut donc pas être utilisée.

Une procédure semi-automatique a donc été élaborée afin d'accéder aux coordonnées des bâtiments, des rues, des intersections et des places, ainsi que des faces qui les composent (murs, sols, toits). Pour cela, la base de données topographique des bâtiments a été utilisée comme point de départ (Figure 7.3a) [IGN 2021]. Les coordonnées des bâtiments ont été déterminées manuellement à partir de cette dernière, tout en simplifiant leur forme lorsque cela était nécessaire de manière à rester dans une configuration de réseau de rues canyon. A partir de cette première étape manuelle, les murs ont pu être générés automatiquement. Ensuite, une autre étape manuelle a consisté à lister les liens entre les rues et les murs, et entre les rues et les intersections. A partir de ces informations, les coordonnées des sols et des intersections ont finalement été générées automatiquement. La géométrie obtenue est visible sur la Figure 7.3b.

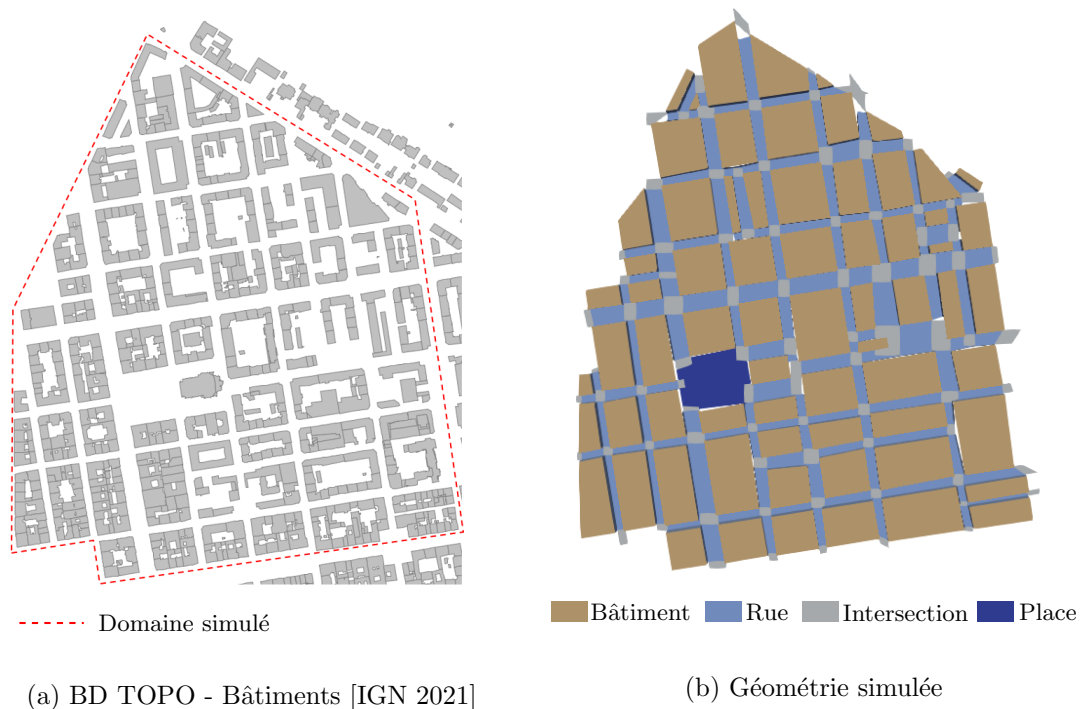


FIGURE 7.3 – Construction de la géométrie

Il apparaît en comparant la géométrie construite (Figure 7.3b) à la base de données topographique (Figure 7.3a) que la surface occupée par les toits est bien plus importante sur la géométrie construite que dans la réalité, dû à l'absence de représentation des cours dans le modèle. Pour éviter que cette différence ne viennent déséquilibrer de façon non réaliste les bilans et donc perturber l'analyse des résultats, notamment le champ de température potentielle nocturne dans la CLU, une correction a été apportée. Pour cela, la surface de chaque toit a été relevée à partir de la base de donnée topographique. En appliquant MATHIS, le bilan de chaleur effectué sur chaque toit sera donc comptabilisé en utilisant cette deuxième surface, et non celle visible sur la Figure 7.3b.

Chapitre 7. Application sur un quartier de Lyon incluant des arbres

Le domaine ainsi construit est composé de 122 rues, 68 bâtiments, 86 intersections et une place, ce qui correspond à un total de 523 faces.

Propriétés des matériaux

Une homogénéité des propriétés des matériaux sur le quartier a été choisie, dans le but de faciliter l'analyse des résultats pour cette première application de MATHIS en conditions réalistes. Par ailleurs, il est délicat d'accéder à la variabilité des propriétés des matériaux. Si cela est souhaité dans une application ultérieure de MATHIS, une option pourrait être d'utiliser le type de matériaux donnés dans la base de donnée topographique des bâtiments, détaillés dans [IGN 2021]. [Masson *et al.* 2020] évoque également d'autres pistes comme le traitement d'image ou l'utilisation d'une base de données participative.

	Matériau	U [W/(m ² K)]	Epaisseur [m]	Conductivité [W/(mK)]	Capacité thermique volumique [MJ/(m ³ K)]
Murs	Pierres de taille	0,37	0,4	2,19	2,25
	Isolation		0,075	0,03	0,02
Toits	Tuile		0,02	0,84	1,77
	Rampant (bois)	0,36	0,06	0,13	1
	Isolation		0,07	0,03	0,02
Sols	Enrobé		0,05	0,75	1,94
	Grave non traitée	/	0,35	1,8	1,59
	Sol		1,6	0,68	1,62

TABLE 7.1 – Propriétés des matériaux utilisés pour le cas d'application à Lyon (inspirées de [Rochard *et al.* 2015] et de [Oke *et al.* 2017] p169)

Afin d'estimer les propriétés moyennes des bâtiments du quartier, la base de données TABULA [Rochard *et al.* 2015] est utilisée. Elle permet de faire le lien entre différentes caractéristiques de bâtiments (date de construction, taille du bâtiment, type de rénovation) et les matériaux de construction. Pour le quartier de Lyon ciblé, la catégorie 01-AB a été choisie. Elle correspond à un immeuble collectif de plus de 10 logements construits avant 1915. Les données pour une rénovation standard ont été prises. Ces choix ont été guidés par une analyse visuelle du quartier. Que ce soit pour les murs ou les toits, seuls les matériaux correspondant à la surface dominante ont été retenus. Cela a conduit notamment à négliger les fenêtres, qui représentaient 20 % de la surface. En effet, le but est d'obtenir des propriétés réalistes et non exactes. Par ailleurs, aucun modèle de bâtiment n'existe pour l'instant dans MATHIS, il n'est donc pas possible de modéliser la transparence des fenêtres.

En complément de la base de données TABULA, les propriétés des matériaux données

7.1. Description du cas d'étude et des simulations

dans [Oke *et al.* 2017] (p 169) ont été utilisées pour les murs et les toits. Pour les sols, des propriétés vraisemblables ont été retenues, sans recherche de précision [Techniroute , Viabilité hivernale , Pilage 2007]. Les trottoirs et le sol végétalisé ont été négligés. Les propriétés des matériaux sont données dans le Tableau 7.1.

	Albédo	Emissivité	Longueur de rugosité aérodynamique
Murs	0,4	0,9	-
Toits	0,2	0,9	-
Sols	0,15	0,9	0,05

TABLE 7.2 – Propriétés de surface utilisées pour le cas d'application à Lyon (inspirées de [Oke *et al.* 2017] p 129)

Dans le quartier étudié, une analyse visuelle montre que les façades sont en majorité claires, mais souvent agrémentées de balcons. Un albédo de 0,4 a donc été choisi, basé sur ces observations et sur les encadrements donnés dans [Oke *et al.* 2017] (p 129). Pour les toits, un albédo de 0,2 a été retenu, ce qui correspond à des tuiles d'ancienneté moyenne d'après [Oke *et al.* 2017] (p 129). Par ailleurs, des émissivités de 0,9 ont été prises pour toutes les surfaces, ce paramètre variant relativement peu pour les surfaces urbaines [Oke *et al.* 2017] (p 130). Enfin, une longueur de rugosité aérodynamique pour les sols est nécessaire à la modélisation aérodynamique décrite au chapitre 2. Une longueur de rugosité aérodynamique de 0,05 m est choisie, ce qui correspond à des éléments de rugosité d'une hauteur moyenne de 50 cm. Les propriétés de surfaces sont rassemblées dans le Tableau 7.2.

Propriétés de surface pour le prétraitement météorologique

Un nombre de données d'entrée restreint est nécessaire pour utiliser le prétraitement météorologique décrit au chapitre 6 : seule la zone LCZ [Stewart & Oke 2012] et la hauteur des éléments de rugosité sont requis. Les paramètres choisis sont présentés dans le Tableau 7.3. La hauteur des éléments de rugosité en ville correspond à la hauteur moyenne des bâtiments sur le domaine simulé. Le choix des deux LCZs et de la hauteur des éléments de rugosité à la station météorologique correspondent à une estimation à partir de l'analyse visuelle des sites.

	LCZ	Hauteur des éléments de rugosité
Site météo	D	0,5
Site urbain	2	20

TABLE 7.3 – Données d'entrée du prétraitement météorologique pour le cas d'application à Lyon

En plus de ces éléments, il est également nécessaire de choisir la distance en amont du vent qui est urbanisée (Δx), et qui intervient dans la hauteur de couche limite atmosphérique urbaine nocturne (voir chapitre 6). Dans ce cas d'étude, le fait de fixer la direction du vent permet de fixer également Δx . Cette distance a été prise à 5 km, ce

qui place la limite de la ville à peu près à la frontière de Fontaines-sur-Saône (Figure 7.1).

7.1.3 Configuration des simulations et présentation des résultats

Initialisation et conditions limites

L'initialisation a été faite en appliquant les conditions météorologiques du jour étudié en boucle sur plusieurs jours, jusqu'à ce que les différentes températures ne soient plus impactées par les conditions initiales. En pratique, une initialisation sur 6 jours a été effectuée.

Le prétraitement météorologique étant utilisé pour les conditions limites aérauliques, seule la température potentielle de l'air en entrée de domaine doit être choisie. Cette température potentielle, nommée θ_b est considérée uniforme verticalement, ce qui correspond à une stabilité atmosphérique neutre, et prise égale à la température mesurée à la station météorologique de Bron (Figure 7.2a).

Présentation des résultats

Dans la CLU, il est préférable de considérer des températures potentielles, notées θ , de façon à exclure l'effet de la pression liée à l'altitude sur la température. Pour la cohérence de ce chapitre, il a donc été choisi d'utiliser des températures potentielles uniquement, même si cela n'est pas utile dans la couche de canopée urbaine. Pour rappel, les températures potentielles dépendent de z et sont définies par l'équation 5.12. Dans la couche de canopée urbaine, on considère $z = 0$ et la pression égale à la pression atmosphérique, la température potentielle (θ) et la température (T) sont donc quasiment équivalentes, avec $\theta = 0,996T$.

Démarche d'activation progressive des modules

Une démarche d'activation progressive des sous-modèles est adoptée, dans le but de faciliter l'interprétation des résultats, en isolant les phénomènes. Quatre configurations sont choisies et sont décrites dans le Tableau 7.4 et sur la Figure 7.4.

	Advection horizontale rues	Rues connectées aux intersections	Modèle panaches gaussiens
Cas A - Rues isolées			
Cas B - Rues isolées ventilées	X		
Cas C - Rues connectées	X	X	
Cas D - Modèle complet	X	X	X

TABLE 7.4 – Quatre configurations utilisées pour les simulations

Dans un premier temps, le cas A permettra d'observer les effets du modèle de rue

7.2. Application sur un quartier de Lyon sans végétation

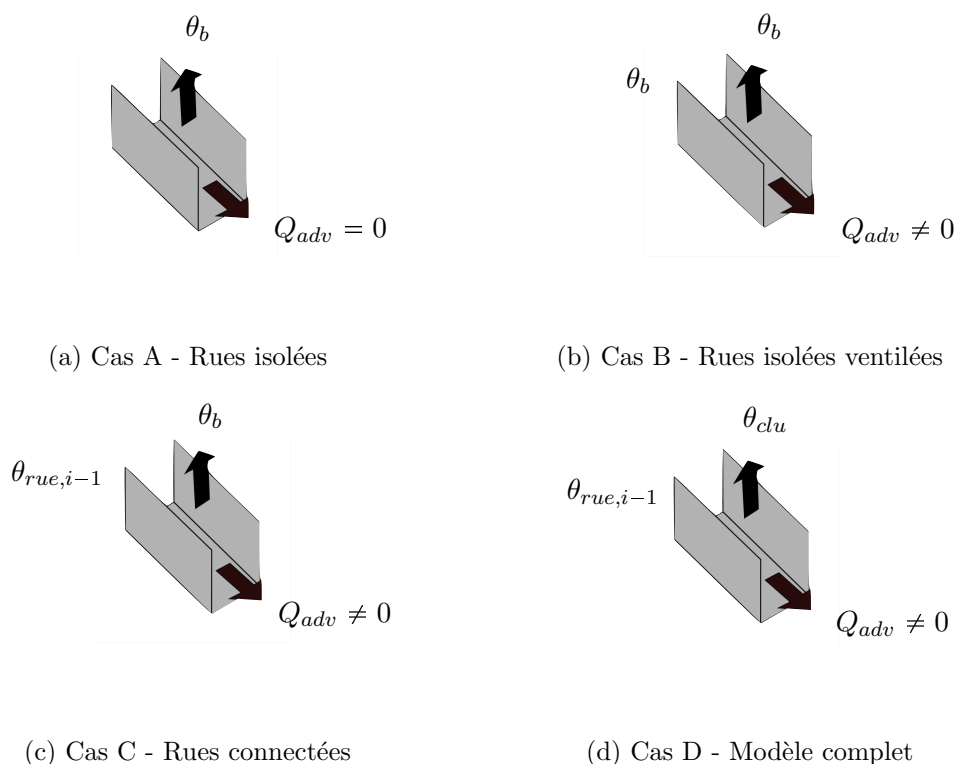


FIGURE 7.4 – Configurations étudiées pour le cas d'application à Lyon (correspond au Tableau 7.4). θ_b [K] est la température potentielle en entrée du domaine, Q_{adv} [W/m^2] est la densité de flux advectée horizontalement à travers la rue, $\theta_{rue,i-1}$ [K] est la température potentielle des rues amont connectées dans le réseau de rues et θ_{clu} [K] est la température potentielle au-dessus de la rue calculée avec les panaches gaussiens.

uniquement. En effet, il consiste à supprimer l'advection horizontale dans les rues, et à imposer la température au dessus de la rue.

Ensuite, une première évolution (cas B) consiste à activer une advection horizontale dans les rues, mais en imposant la température en amont de chaque rue. Dans ce cas de figure, les rues ne sont donc pas connectées entre elles. La température au dessus des rues est encore imposée sur ce cas.

Dans un troisième temps, le modèle d'intersection est activé. Les rues sont connectées entre elles, et l'advection horizontale qui les traverse est dépendante de la température des rues amont. En revanche, le modèle de panache n'est pas utilisé et la température au dessus des rues est toujours imposée.

Enfin, le cas D consiste à activer en plus du cas C le modèle de panaches gaussiens. La température au-dessus des rues n'est donc plus fixée, mais calculée à l'aide de la superposition des panaches gaussiens. Ce cas correspond au modèle complet.

7.2 Application sur un quartier de Lyon sans végétation

Les résultats des simulations sur le quartier de Lyon sans végétation sont présentés dans cette deuxième partie, en distinguant la couche de canopée urbaine et la couche

limite urbaine. Une étude qualitative est menée, dans le but d'évaluer la cohérence des grandeurs simulées et le comportement physique du système.

7.2.1 Résultats dans la couche de canopée urbaine

Les résultats dans la couche de canopée urbaine sont présentés dans cette partie, en dissociant l'évolution temporelle et la distribution spatiale.

L'échauffement par rapport à la température potentielle d'entrée θ_b sera nommé îlot de chaleur urbain. Toutefois, il est important de préciser que cette grandeur ne correspond pas à l'ICU réel du quartier, qui dépend du aussi reste de l'agglomération. Elle ne représente que l'ICU généré par le quartier lui-même.

7.2.1.1 Évolution temporelle de l'îlot de chaleur urbain dans la canopée urbaine

L'évolution temporelle journalière de l'ICU dans la canopée urbaine est assez documentée dans la littérature [Oke *et al.* 2017] (p 218). Il est donc intéressant de commencer par comparer les résultats des simulations à ces attentes.

Pour cette analyse temporelle, les résultats du modèle complet (cas D) sont directement analysés. Les cas intermédiaires n'apportent en effet pas de conclusion supplémentaire pour cet aspect. L'évolution temporelle de l'échauffement de la température d'air par rapport à celle à l'entrée du domaine (θ_b) est représentée sur la Figure 7.5 pour deux rues du domaines. Ces rues sont nommées « rue amont » et « rue aval » en référence à leur position respective par rapport au sens du vent, donnée sur la Figure 7.6. Bien que ces résultats correspondent à un échauffement local et non pas à l'ICU, qui est une grandeur intervenant à plus grande échelle, elles peuvent être considérées comme une première approximation de ce dernier.

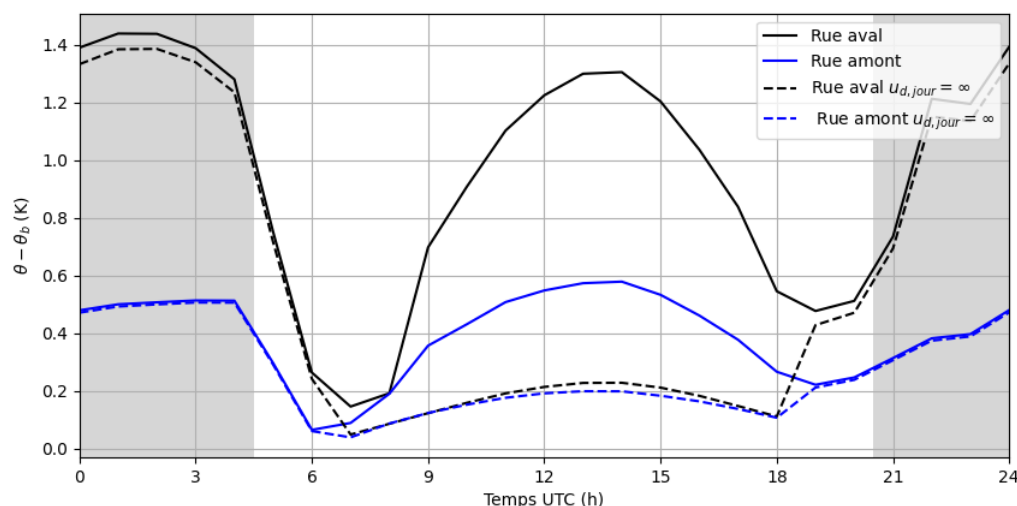


FIGURE 7.5 – Évolution temporelle de l'échauffement de la température d'air par rapport à celle à l'entrée du domaine (θ_b) dans les rues amont et aval (voir Figure 7.6)

Sur la Figure 7.5, les courbes en trait plein sont obtenues avec le modèle complet tel qu'il a été décrit au long de la thèse. Dans ce cas, un échauffement nocturne

7.2. Application sur un quartier de Lyon sans végétation

de la température d'air est bien obtenu, conformément aux attentes. Toutefois, un échauffement en journée, dont le maximum est atteint autour de 13 h, est également visible. Cela ne correspond pas aux observations : l'ICU en journée est en effet proche de zéro [Oke *et al.* 2017] (p 218).

L'ordre de grandeur des flux convectifs émis par les parois ayant été validé au chapitre 4, l'hypothèse est formulée que l'écart observé provient plutôt de la vitesse d'échange verticale entre la rue et la CLU (u_d), qui serait trop faible en journée. Cela revient à dire que la résistance aérodynamique entre la rue et la CLU serait trop élevée. Pour tester cette hypothèse, les courbes en pointillés sur la Figure 7.5 montrent l'échauffement qui serait obtenu avec une vitesse verticale d'échange infinie en journée (une résistance aérodynamique nulle). Dans ce cas, la forme des courbes est beaucoup plus proche des attentes, ce qui donne du crédit à cette hypothèse.

Une piste pour expliquer cette sous-estimation supposée de u_d pourrait être liée à l'absence de prise en compte la convection naturelle dans la rue pour la modélisation de cette grandeur. Sur ce cas d'étude, la vitesse moyenne dans les rues du quartier simulée en journée est de 2 m/s. En journée, l'échauffement des températures de surface donne en effet un rôle plus important à la flottabilité que pour des conditions nocturnes. Que la validité de cette piste soit confirmée ou non, la possible sous-estimation de u_d en journée peut être identifiée comme un premier point à approfondir dans MATHIS.



FIGURE 7.6 – Position des rues amont et aval



FIGURE 7.7 – Rapport d'aspect H/W

7.2.1.2 Distribution spatiale de l'îlot de chaleur urbain dans la couche de canopée urbaine

Pour analyser la distribution spatiale de l'ICU, il a été choisi de s'intéresser à la moyenne nocturne des températures d'air, soit entre 21 h et 4 h en heures UTC, plutôt que de choisir une heure précise. Dans cette partie, la démarche d'activation progressive des sous-modèles est appliquée, selon les quatre cas présentés dans le Tableau 7.4. La Figure 7.8 présente les cartes d'échauffement dans les rues du domaine.

Cas A - Rues isolées

Dans le cas de rues isolées sans advection horizontale, l'ICU simulé varie entre 0,4 K et 3,5 K (Figure 7.8a).

Il semble que le rapport d'aspect soit un des facteurs principaux expliquant ces variations. En effet, en observant la distribution spatiales des rapports d'aspect, représentés sur la Figure 7.7, des similitudes apparaissent avec la distribution de l'ICU (Figure 7.8a).

Pour s'en assurer, le carré du coefficient de Pearson r^2 a été calculé selon [Lejeune 2010] et est inscrit sur la Figure 7.9. Ce coefficient, dans les cas où il est significatif, représente le pourcentage de la variance d'une première série de données expliquée par la deuxième, selon un lien linéaire. Ici, si le coefficient est significatif, sa valeur de 0,95 signifie que 95 % de la variance de l'ICU dans le cas A est expliqué par le rapport d'aspect. Pour statuer sur la significativité de la corrélation, un test doit être effectué. Tout au long de ce chapitre, tous les r^2 présentés sont significatifs (les tests sont en Annexe F). Un seuil de risque de 5 % a été choisi, ce qui signifie que l'on accepte une probabilité de 5 % que l'on conclue à un r^2 significatif alors qu'il ne l'est pas.

Le lien entre rapport d'aspect et ICU est documenté dans la littérature [Oke *et al.* 2017] (p 216), les résultats correspondent donc aux attentes sur ce point. Cependant, [Theeuwes *et al.* 2014] montre qu'à partir d'un certain rapport d'aspect, variable selon l'intensité du rayonnement solaire, augmenter le rapport d'aspect ne fait plus augmenter l'ICU et peut même le faire diminuer, dû à l'effet d'ombrage des murs en journée. Ce phénomène n'est pas observé sur la Figure 7.9. Il se peut que cette différence provienne du fait que les rapports d'aspect du quartier ne soient pas suffisamment élevés pour que ce phénomène apparaisse. Il est également possible que l'effet du rapport d'aspect sur la vitesse verticale d'échange u_d soit trop élevé. En effet, [Theeuwes *et al.* 2014] cite une diminution du rafraîchissement infrarouge comme le principal phénomène qui cause cette augmentation de l'ICU avec le rapport d'aspect. Cela est bien retrouvé dans les simulations, comme le met en évidence la Figure 7.10a. Pourtant, un autre élément accentue cet effet avec MATHIS : il s'agit de la diminution de u_d , divisée quasiment par deux entre un $H/W = 0,5$ et $H/W = 2$, et visible sur la Figure 7.10b. Or, ce phénomène n'est pas cité dans [Theeuwes *et al.* 2014]. Cette conclusion confirme l'importance de travailler plus en profondeur sur la modélisation de u_d , qui joue ici un rôle important.

Sur les Figures 7.9, 7.10a et 7.10b, les deux orientations principales des rues sont également distinguées, nommées par simplicité Est-Ouest et Nord-Sud, même si leur orientation n'est en réalité pas exactement Est-Ouest ou Nord-Sud. L'advection horizontale étant nulle, l'orientation des rues a un impact très faible sur l'ICU nocturne. Pour s'en assurer, une analyse de la variance à un facteur, avec un risque de

7.2. Application sur un quartier de Lyon sans végétation

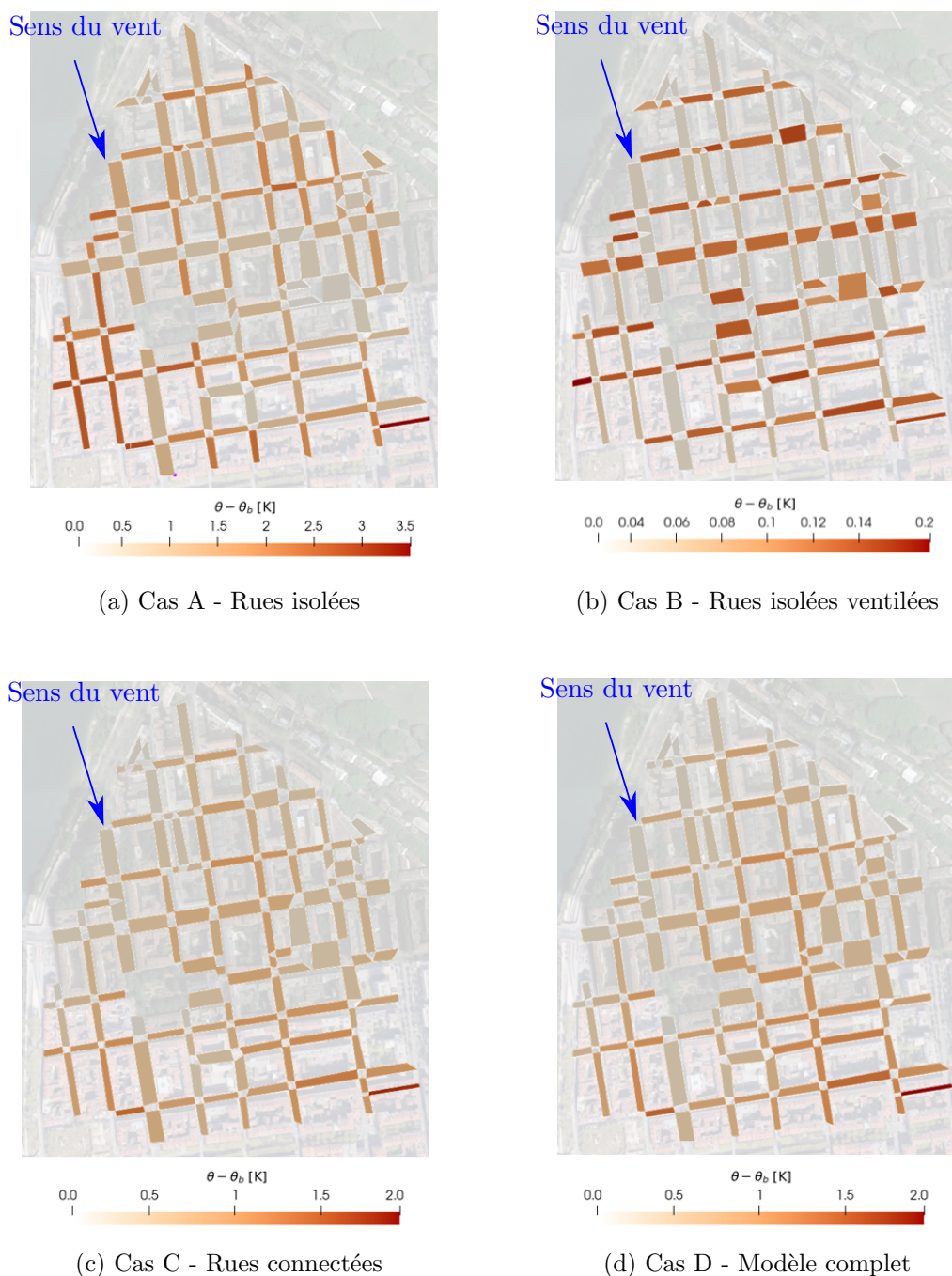


FIGURE 7.8 – Distribution spatiale de l'ICU nocturne (moyenne entre 21h et 4h)

5 % a été effectuée, sans montrer de différence significative. Même si des différences de répartition de l'ensoleillement existent entre ces deux orientations, les différences sur le rayonnement total emmagasiné par la rue est donc négligeable, du moins dans le cadre de l'hypothèse de rue infinie. Une différence est toutefois visible concernant le rafraîchissement nocturne par GLO (Figure 7.10a) : la convection aux parois étant plus efficace pour les rues Nord-Sud, leur température est un peu plus faible, elles émettent donc moins de rayonnement.

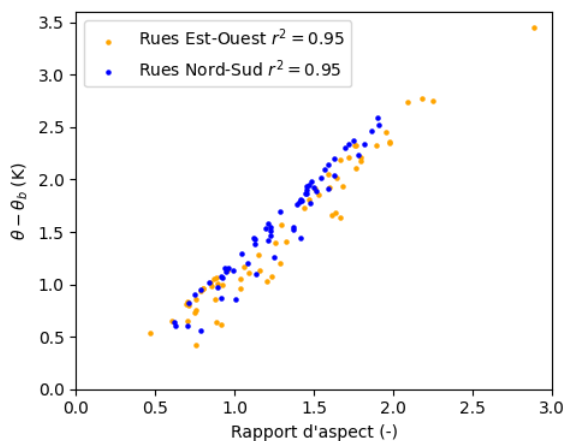
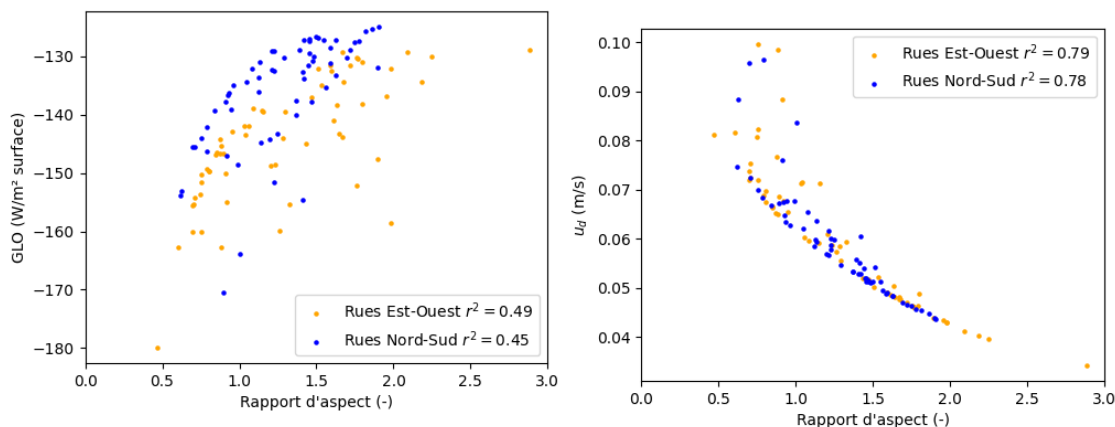


FIGURE 7.9 – Impact du rapport d’aspect sur l’échauffement moyen nocturne (entre 21h et 4h) dans les rues dans le cas A



(a) Densité de flux infrarouge ramené aux surfaces urbaines (murs + route)

(b) Vitesse verticale d’échange u_d

FIGURE 7.10 – Grandeurs (moyenne entre 21h et 4h) expliquant l’échauffement nocturne croissant avec le rapport d’aspect dans le cas A

Cas B - Rues isolées ventilées

Dans un deuxième temps, l’advection horizontale est prise en compte, en fixant la température en amont de chaque rue.

Dans ce cas, l’ICU moyen nocturne simulé est très faible, ne dépassant pas 0,2 K (Figure 7.8b). Cela est cohérent avec le choix de fixer la température en amont de chaque rue à celle mesurée à la station météorologique, ce qui induit un flux de chaleur advecté horizontalement très efficace. L’ICU est en effet un phénomène lié à l’accumulation de chaleur sur une grande surface, et l’échauffement lié à une seule rue ne peut qu’être très faible.

Une différence très claire entre les rues Nord-Sud et Est-Ouest est ici observée, significative selon une analyse de la variance à un facteur. En effet, la ventilation est beaucoup plus efficace pour les rues dans le sens du vent, dans lesquelles l’ICU est ici quasiment nul.

Cas C - Rues connectées

Lorsque les rues sont connectées, l'ordre de grandeur de l'ICU moyen nocturne se situe entre les deux cas précédents, c'est-à-dire allant jusqu'à 1,8 K. Des différences très nettes sont donc observées entre une advection horizontale dans la couche de canopée urbaine nulle (cas A), maximale (cas B) ou modélisée (cas C). Cela met en évidence l'importance de ce phénomène et confirme l'intérêt d'une modélisation en réseau de rues.

Sur la carte de la Figure 7.8c, il semble qu'un effet de la distance au bord du domaine apparaissent. Cet effet est cohérent avec le fait de connecter les rues entre elles, ce qui enclenche une certaine accumulation de chaleur le long du domaine. Cet effet est présent pour les cas C et D, et sera détaillé au paragraphe suivant.

Cas D - Modèle complet

Enfin, les résultats avec le modèle complet sont relativement similaires au cas C, avec une accentuation de l'effet d'accumulation de chaleur le long du domaine, provoquée par les panaches gaussiens dans la CLU.

Pour mettre en évidence cet effet, et tester l'impact du rapport d'aspect dans ce cas, l'ICU en fonction du rapport d'aspect (Figure 7.11a) de la distance au bord du domaine (Figure 7.11b) a été tracé.

Il apparait que l'influence du rapport d'aspect a drastiquement diminué par rapport au cas A, et que ce paramètre n'explique plus que 10 % pour les rues Nord-Sud et 14 % pour les rues Est-Ouest de la variance de l'ICU. Toutefois, il reste significatif au risque de 5 %. Sur le domaine étudié, l'advection horizontale et la dispersion dans la CLU sont donc suffisamment importantes pour que le fait de les activer modifie le rôle du rapport d'aspect.

Par ailleurs, la distance au bord du domaine joue un rôle important dans l'ICU, avec un r^2 de 0,51 pour les rues Est-Ouest et de 0,63 pour les rues Nord-Sud. La différence entre les rues Nord-Sud et Est-Ouest est ici claire, et confirmée par une analyse de la variance à un facteur au risque de 5% [Lejeune 2010], avec un ICU plus faible pour les rues dans le sens du vent.

Pour conclure sur la distribution de l'ICU dans les rues du domaine, le fait de connecter les rues a un effet très significatif, mais perd progressivement de son importance au fur et à mesure que la température d'air s'élève dans la canopée. Cela montre d'une part l'importance de la condition limite de température d'air, qui va jouer sur le flux advecté horizontalement, à travers la convection aux parois. D'autre part, cela confirme la pertinence d'utiliser un modèle de rues connectées tel que MATHIS, au moins en amont de la ville ou à la suite d'un parc.

7.2.2 Résultats dans la couche limite urbaine

Dans la couche limite urbaine, la superposition de panaches gaussiens, décrits au chapitre 5, permet de calculer un champ de température potentielle à chaque pas de temps. Seul le cas D du Tableau 7.4 pourra donc être étudié, les panaches gaussiens n'étant pas activés dans les autres cas.

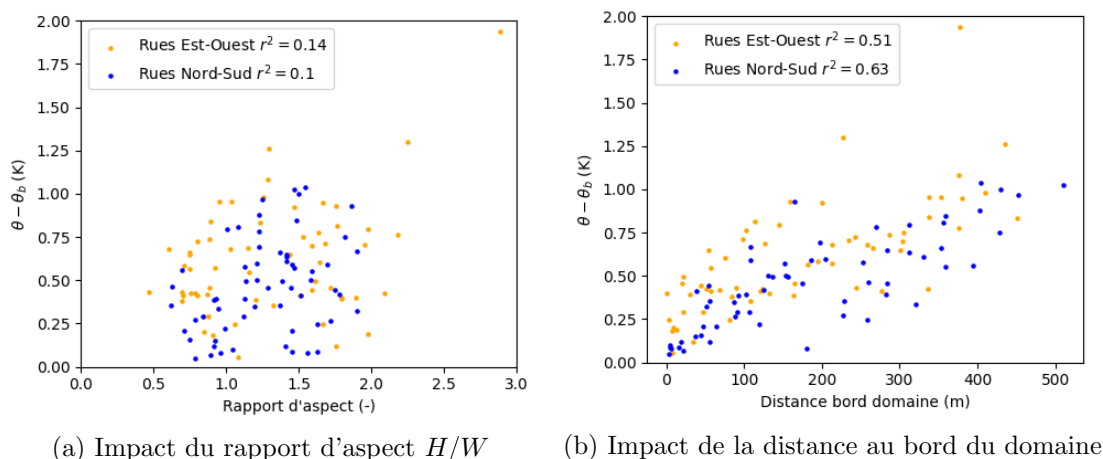


FIGURE 7.11 – Paramètres impactant l'échauffement moyen nocturne (entre 21h et 4h) dans les rues dans le cas D

Flux de chaleur émis par le domaine

Avant de s'intéresser au champ de température potentielle dans la CLU, une première étape est d'observer le flux sensible émis par le domaine entier. En effet, c'est le signe de ce terme qui détermine le sens de la pente du profil vertical de température potentielle, et ainsi la stabilité atmosphérique du domaine.

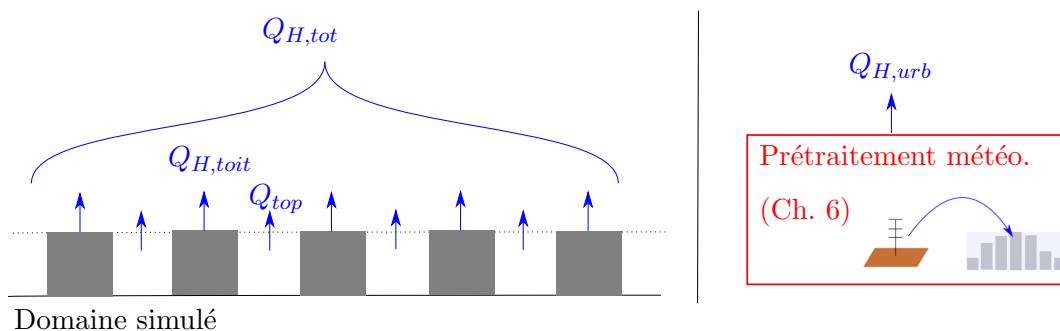


FIGURE 7.12 – Représentation des flux de chaleur émis par le domaine tracés sur la Figure 7.13

Cette grandeur est peut être calculée de deux façons différentes, schématisées sur la Figure 7.12. D'une part, elle peut être estimée à partir des résultats de MATHIS, en sommant les flux verticaux provenant des rues ainsi que les flux convectifs des toits (en négligeant les intersections et la place). D'autre part, elle est également modélisée par le prétraitement météorologique présenté au chapitre 6, à partir d'un bilan de surface paramétrique.

Ces flux sont tracés sur la Figure 7.13. Avec le modèle complet (cas D), la densité de flux sensible émis par le domaine est positif au cours de la journée, atteignant un sommet vers 13 h. En soirée, elle diminue progressivement jusqu'à devenir brièvement négative en fin de nuit. En fin de nuit, l'ICU dans les rues reste pourtant positif, comme cela avait été montré pour deux rues sur la Figure 7.5. En revanche, la température des toits, devenue plus faible que celle de l'air, le flux de chaleur absorbé par les toits compense ainsi une partie du flux de chaleur émis par les rues.

7.2. Application sur un quartier de Lyon sans végétation

Le fait que la température des toits soit plus faible que celle de l'air la nuit a été observé fin mai dans la ville de Toulouse [Palme & Salvati 2021], début juillet à Bâle [Oke *et al.* 2017] (p 211) et fin avril à Berlin [Oke *et al.* 2017] (p 203) et correspond donc aux attentes. Cela s'explique par le rafraîchissement infrarouge de ces surfaces, qui ont un facteur de vue du ciel proche de 1. En revanche, le fait que le flux total devienne négatif n'est pas forcément attendu [Oke *et al.* 2017] (p 174, 189, 191).

A titre de comparaison, la densité de flux sensible émise par le domaine dans le cas A (rues isolées) est aussi représentée, même si la CLU n'est pas modélisée dans cette configuration. Il apparaît que dans ce cas, l'absence d'advection horizontale provoque un flux sensible émis plus important en journée, et qui reste toujours positif la nuit. Avec le modèle complet (cas D), le fait que le flux sensible semble faible la nuit pourrait donc être expliqué par une advection horizontale importante, due à la taille réduite du domaine.

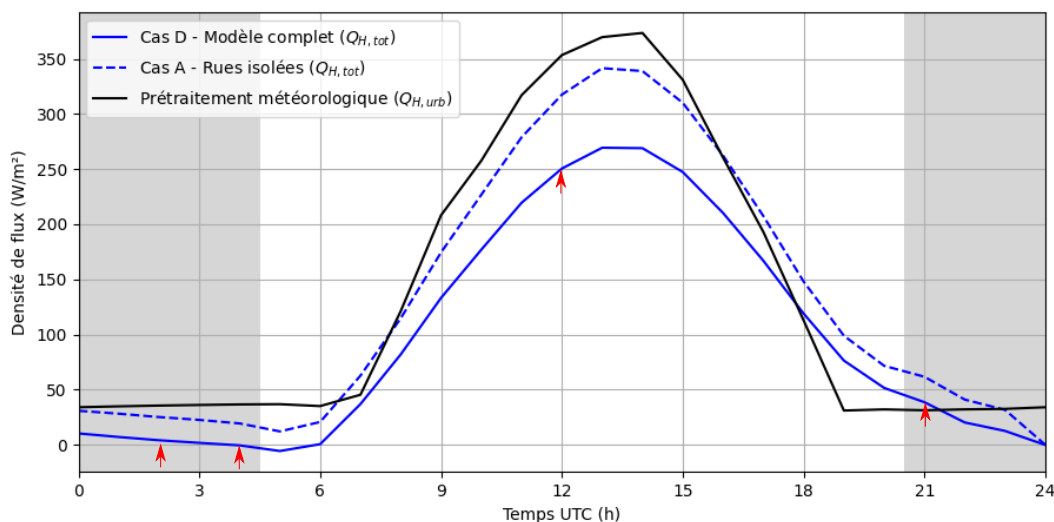


FIGURE 7.13 – Flux sensible émis par le domaine simulé calculé par MATHIS dans les cas A et D (émis par les rues et toits) comparé à celui calculé par le prétraitement météorologique. Les flèches rouges correspondent aux profils verticaux de température potentielle tracés sur la Figure 7.14

Enfin, les densités de flux tracées sur la Figure 7.13 pour les cas A et D correspondent au terme de flux sensible modélisé par le prétraitement météorologique, nommé $Q_{H,urb}$ au chapitre 6. Cette grandeur a donc également été tracée sur la Figure 7.13, afin de comparer les valeurs calculées par le prétraitement à celles obtenues sur le domaine réel.

Le flux estimé par le prétraitement est assez proche de celui obtenu dans le cas A, avec toutefois des transitions plus brutales, notamment à 19 h et 7 h. Cela semble cohérent dans la mesure où le prétraitement météorologique fait l'hypothèse d'une homogénéité horizontale des grandeurs, et donc néglige l'advection horizontale, comme le cas A.

Ce résultat est donc satisfaisant. À terme, cependant, on pourrait imaginer itérer avec la densité de flux sensible calculée sur le domaine réel, et ne se servir du prétraitement que pour l'initialisation. Cette option, si elle est intéressante pour la cohérence globale du modèle, aurait néanmoins un coût en terme de temps de calcul. Elle n'a pour l'instant pas été testée.

Température potentielle dans la CLU

Les profils verticaux de température potentielle sont tracés à quatre moments de la journée : 2 h, 4 h, 12 h, et 22 h (flèches rouges sur la Figure 7.13). Ils ont été représentés sur la Figure 7.14 au-dessus des rues amont et aval, dont les positions ont été données sur la Figure 7.6.

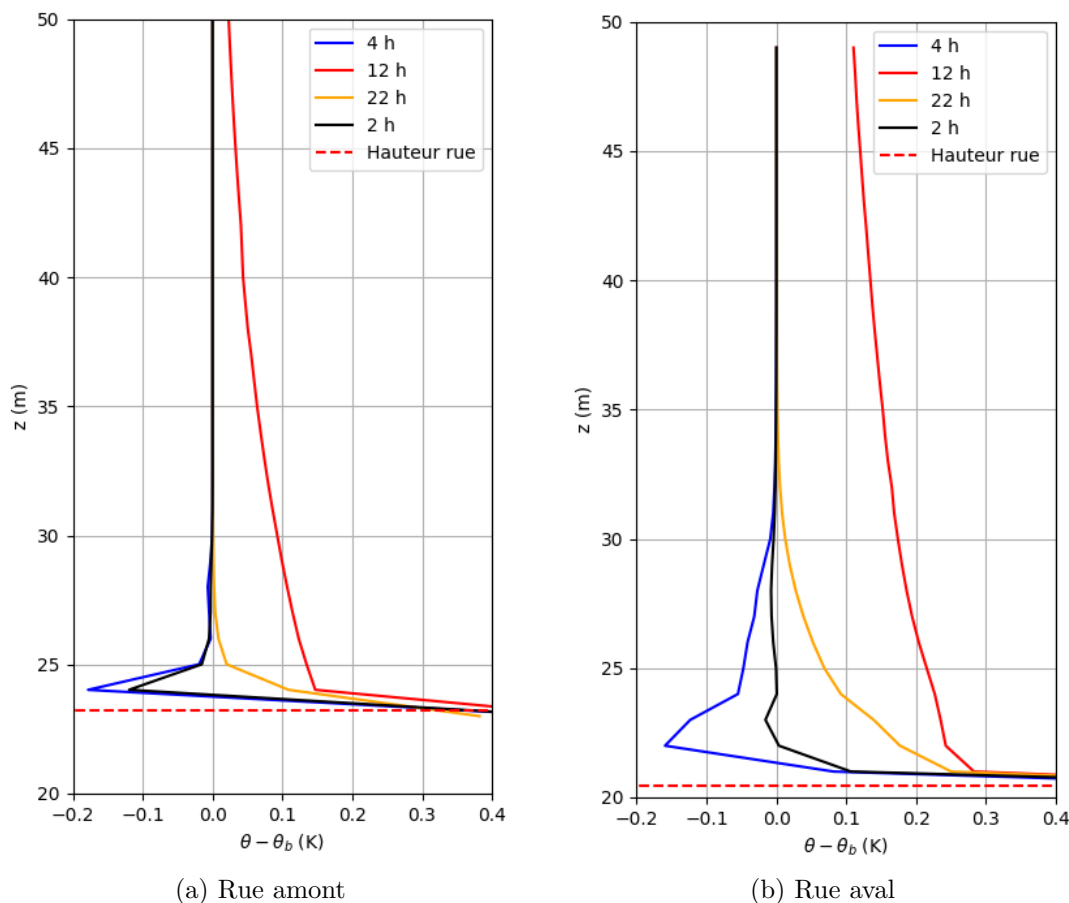


FIGURE 7.14 – Profils verticaux de température potentielle dans la CLU modélisés par panaches Gaussiens (Cas D) au-dessus des rues amont et aval (Figure 7.6)

Tout d’abord, aux quatre instants choisis, la formation de la couche limite thermique entre la rue amont et aval est bien visible. En effet, pour la rue amont, la nuit, θ_b est atteinte à peine 5 m au-dessus de la hauteur de la rue, contre 10-15 m au-dessus de la rue aval. De même à 12h, l’échauffement par rapport à θ_b est beaucoup plus faible au-dessus de la rue amont que de la rue aval. Cela montre la capacité des panache à développer une couche limite thermique, même si cela reste qualitatif.

A 12h et à 21h, les profils correspondent à une atmosphère instable, ce qui est cohérent avec le flux positif à ces heures sur la Figure 7.13. En revanche, la hauteur de la couche limite thermique est très différente à ces deux instants. A 12h, à 50 m, la fin de la couche limite thermique n’est toujours pas atteinte. A 21h, au contraire, même au-dessus de la rue aval, l’épaisseur de la couche limite thermique est inférieure à 35 m. Cela montre une meilleure dispersion de la chaleur à 12h qu’à 21h, conformément aux attentes. Cette différence est causée principalement par la plus faible hauteur de couche limite nocturne

modélisée par le prétraitement météorologique (120 m à 21h contre 1300 m à 12h).

Ensuite, à 2h et 4h, les profils verticaux ne sont plus monotones, et montrent une diminution de la température potentielle juste au-dessus de la rue, suivit d'une augmentation à mesure que la hauteur augmente. Cela s'explique par le fait que la température des toits soit devenue inférieure à la température d'air, le rafraîchissement localisé juste au-dessus de la rue est donc un effet du toit précédent la rue, qui provoque un panache de fraîcheur. Conformément au signe du flux sensible sur la Figure 7.13, la pente du profil vertical au-dessus, hors de l'effet local du toit précédent la rue, est neutre à 2h et légèrement stable à 4h.

L'utilisation de panaches gaussiens permet donc d'obtenir un champ de température potentielle cohérent avec le flux de chaleur sensible émis, et qui reproduit une meilleure dispersion diurne que nocturne de la chaleur. Ces résultats sont donc encourageant, même s'ils restent qualitatifs. Afin de confirmer ces conclusions, il serait intéressant de confronter le champ de température potentielle obtenu par ce modèle à des mesures ou à un modèle plus détaillé.

7.2.3 Conclusion

Cette première application de MATHIS sur un quartier réaliste a montré dans l'ensemble une bonne représentation des phénomènes physiques attendus, que ce soit pour une rue isolée, pour un réseau de rues connectées ou pour la couche limite urbaine.

Deux points principaux ont cependant émergé, comme des éléments à améliorer avant d'interpréter les résultats fournis par MATHIS. D'une part, le modèle de vitesse d'échange verticale entre les rues et la CLU nécessiterait un approfondissement. En effet, cette grandeur pourrait être sous-estimée en journée, et sa dépendance au rapport d'aspect pourrait être surestimée. D'autre part, utiliser la température de la station météorologique comme condition limite empêche d'avoir des résultats réalistes. L'utilisation d'un profil vertical neutre de température potentielle prise égale à une mesure hors de la ville semble conduire à une surestimation de l'effet de l'advection horizontale.

7.3 Effet de la modélisation des arbres sur une rue isolée

Dans cette partie, le modèle d'arbre est appliqué sur une rue isolée. L'objectif est d'analyser les différents flux de chaleur en jeu et l'effet des arbres sur les températures de surface et d'air. L'idée est de détailler les phénomènes qui se produisent dans une rue, avant de passer à une application au quartier dans la dernière partie du chapitre.

7.3.1 Choix des paramètres

Cas d'étude

Il a été choisi de cibler la rue la plus arborée du domaine, d'après la base de données du Grand Lyon sur les arbres d'alignements [Métropole de Lyon]. Il s'agit de l'avenue du Maréchal Foch, dont la position est donnée sur la Figure 7.15b. Deux rangées de platanes à feuilles d'érable (*platanus acerifolia*) sont implantées tout au long de cette rue. Les conditions météorologiques choisies sont les mêmes que dans la partie précédente (paragraphe 7.1).

Mise en données

La hauteur et la largeur de la rue simulée correspondent à la moyenne observée le long de la rue ciblée, avec deux murs de mêmes hauteur. Le rapport d'aspect de la rue est de 0,85. Les matériaux choisis sont les mêmes que dans la partie précédente (paragraphe 7.1.2). Les hauteurs minimum et maximum du houppier des arbres ont été prises à 5 m

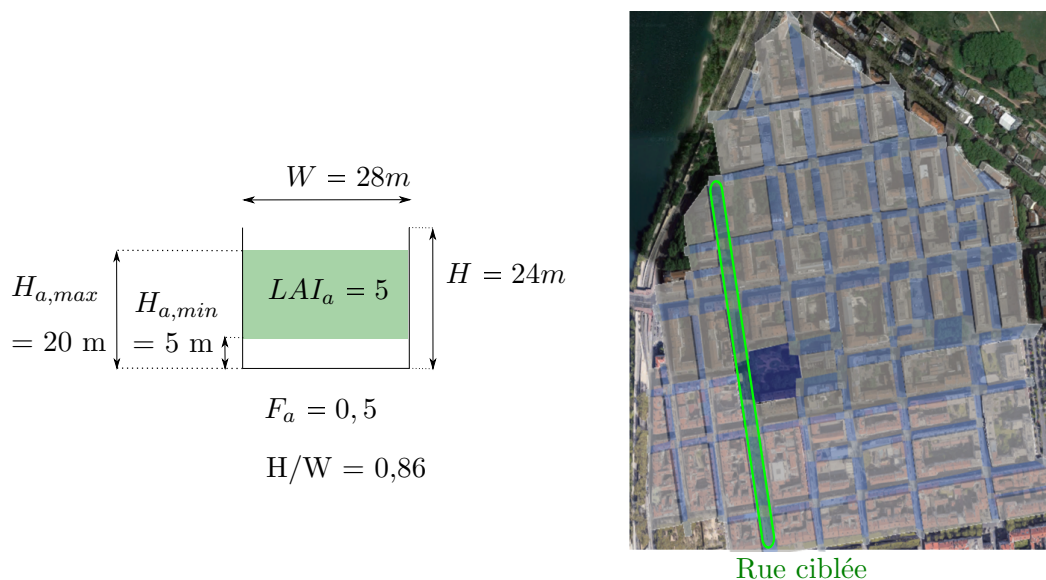


FIGURE 7.15 – Caractéristiques de la rue arborée isolée étudiée

et 20 m respectivement, et la fraction horizontale de recouvrement des arbres est de 50%. Ces trois paramètres sont des valeurs réalistes sur la rue considérée, d'après l'analyse de la base de donnée du Grand Lyon [Métropole de Lyon].

L'estimation du *Leaf Area Index* des arbres (LAI_a) est moins évidente. En effet, ce paramètre a un fort impact et n'est pas directement déductible des paramètres géométriques. Selon [Bréda 2008], une canopée forestière de feuillus a en moyenne un LAI autour de $5 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Dans [Sanusi & Livesley 2020], le LAI de platanes à feuilles d'érables à Melbourne a été mesuré entre 4 et $5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ en début d'été. Les arbres ont ensuite été affectés par une canicule, et leur LAI n'était plus que de 2 à $3 \text{ m}^2/\text{m}^2$ encore deux mois et demi après la canicule. Cela montre la variabilité du LAI et la difficulté de fixer ce paramètre. Au vu de ces éléments, un LAI de $5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ a été choisi, ce qui correspond donc à un feuillage relativement dense.

Ensuite, la résistance stomatique minimum $r_{s,min}$ est un paramètre important pour l'évaporation, dont l'influence a été observée au chapitre 4. Elle a été fixée à 50 s/m , ce qui correspond aux mesures citées dans [Garratt 1999] (p 134).

Enfin, la disponibilité en eau du sol, à travers le paramètre F_2 qui joue sur la résistance stomatique, est difficile à estimer. F_2 est pris ici à 0,5 comme valeur de référence, mais la sensibilité de l'évaporation par rapport à ce paramètre sera étudiée. Les différents paramètres sont rassemblés dans le Tableau 7.5.

7.3. Effet de la modélisation des arbres sur une rue isolée

Paramètres	Cas de référence	Variantes
Fraction arborée	0,5	/
Densité de feuillage LAI_a	5 m ² /m ²	/
Résistance stomatique minimum r_{smin}	50 s/m	/
Disponibilité en eau F_2	0,5	0,25 ; 1

TABLE 7.5 – Paramètres choisis pour modéliser arbres

Configuration des simulations

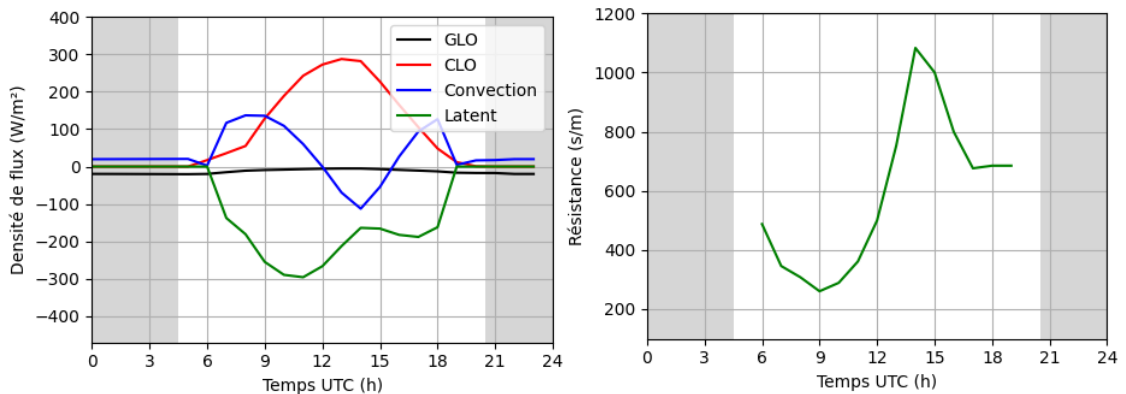
La rue étudiée dans cette partie est une rue isolée, elle correspond donc au cas A du Tableau 7.4, schématisé sur la Figure 7.8a. L’advection horizontale est négligée, et la température potentielle au dessus de la rue est égale à θ_b , qui correspond aux mesures de la station météorologique de Lyon-Bron.

7.3.2 Bilan énergétique sur les arbres

Dans cette partie, les résultats sont présentés sur les arbres uniquement. Dans les parties suivantes, les parois puis la rue entière seront ensuite analysées.

Cas de référence ($F_2 = 0,5$)

Le bilan d’énergie sur les arbres, ramené à 1 m² de section horizontale de la rue, est présenté sur la Figure 7.16a. Sur ce graphique, le sens des flux est selon la convention suivante : un flux positif amène de l’énergie aux arbres, et un flux négatif leur en retire.



(a) Bilan d’énergie sur les arbres (par m² de rue)

(b) Résistance stomatique des arbres

FIGURE 7.16 – Grandeurs simulées sur les arbres dans la rue isolée avec les paramètres du Tableau 7.5

Le rayonnement solaire apporte de l’énergie aux arbres en journée, alors que le rayonnement infrarouge leur en retire légèrement de jour comme de nuit. En journée, le rafraichissement infrarouge devient très faible, ce qui est dû au fait que les parois (murs, sol) se réchauffent et rayonnent donc plus, ce qui atteint les arbres.

Tout au long de la journée, de l’évapotranspiration est observée, et rafraichit les

arbres (flux négatif sur la Figure 7.16a). La forme de la courbe du flux latent présente une inflexion entre 12h et 16h environ qui peut sembler surprenante à première vue. Pour mieux comprendre cela, la résistance stomatique des arbres simulée tout au long de la journée a été tracée (Figure 7.16b). Il apparaît en effet que parallèlement à cette diminution de l'évapotranspiration, une augmentation de la résistance stomatique est simulée, avec un maximum autour de 14h. C'est donc une fermeture des stomates qui explique la baisse d'évapotranspiration, au moment où la température d'air est la plus élevée (Figure 7.2a). Cette observation est à mettre en parallèle avec un phénomène appelé dépression de midi [Tuzet *et al.* 2003]. Dans certaines conditions, les plantes peuvent fermer leurs stomates en milieu de journée afin d'éviter de se déshydrater. Il est probable que les courbes de la Figure 7.16 montrent bien ce phénomène, à travers le facteur F_4 intervenant dans la formule de Jarvis (équation 4.34), qui réduit la résistance stomatique au fur et à mesure que la température d'air s'éloigne d'une température optimale de 25°C (voir chapitre 4).

Sur la Figure 7.16a, le flux latent est plus important que le flux radiatif sur la majeure partie de la journée (excepté entre 12h et 16h), ce qui engendre un flux convectif positif, c'est-à-dire que les arbres se réchauffent par convection et que leur température de surface est donc moins élevée que celle de l'air.

Il est difficile de conclure sur l'ordre de grandeur respectif des flux latent et convectif. Dans [Oke *et al.* 2017] (p 203), des mesures fin avril à Berlin montrent des températures de feuilles supérieures à celle de l'air, ce qui n'est le cas qu'entre 12h et 16h sur la Figure 7.16a. Sur un pommier à Saint Epain en France à l'été 2012, [Saudreau *et al.* 2017] ont mesuré pour les feuilles à l'ombre des températures inférieures à celle de l'air, et l'inverse pour les feuilles au soleil. La température moyenne dépendrait donc de la proportion de feuilles ensoleillées. Une autre façon d'avoir un ordre de grandeur est de calculer le nombre de litres d'eau évaporés par m². Les résultats présentés correspondent à 3,5 L/jour. A titre de comparaison, une consommation d'eau estival autour de 2 L/jour a été mesurée sur des platanes à feuilles d'érable à Los Angeles, avec une densité de 100 arbres par hectare [Litvak *et al.* 2017]. Les paramètres géométriques des arbres de la Figure 7.15a correspondraient à une densité de 100 arbres par hectare si leur couronne faisait 4 m de diamètre, soient de petits arbres. Enfin, le modèle de Blaney-Criddle [Asawa *et al.* 2008] permet d'obtenir un ordre de grandeur de la consommation d'eau par :

$$E = k \frac{p}{100} (1,8T + 32) \quad (7.1)$$

Avec :

- E [L/mois] : L'évapotranspiration mensuelle
- k [-] : Un coefficient empirique, donné entre 11 et 19 pour des orangers
- p [%] : Pourcentage d'heure en journée, qui vaut 10,99 pour une latitude de 50 deg en juillet
- T [°C] : Température moyenne sur la période, soit 25,2 °C dans le cas étudié.

Des valeurs du coefficient k sont données pour différentes cultures dans [Asawa *et al.* 2008]. Parmi elles, une seule culture correspond à des arbres (orangers et citronniers), avec des valeurs entre 11 et 19. En appliquant l'équation ci-dessus dans les conditions du cas d'étude, avec un coefficient k de 15, une évaporation de 4,25 L/jour est obtenue. Malgré ces différents éléments, il est difficile de conclure et la sensibilité au

7.3. Effet de la modélisation des arbres sur une rue isolée

paramètre F_2 va donc être étudiée.

Sensibilité à la disponibilité en eau

Le bilan d'énergie sur les arbres est à nouveau présenté pour des arbres parfaitement irrigués ($F_2 = 1$) et pour une plus faible disponibilité en eau ($F_2 = 0,25$) sur la Figure 7.17.

Pour $F_2 = 1$, le flux latent est supérieur au flux radiatif tout au long de la journée, ce qui conduit à un flux convectif toujours positif, c'est-à-dire une température de feuille inférieure à la température d'air. Dans ce cas, la consommation d'eau des arbres est de 5,8 L/jour.

Pour un $F_2 = 0,25$ au contraire, le flux convectif est négatif de 10h à 17h, ce qui correspond à une température de feuilles supérieure à celle de l'air et à 2 L d'eau consommée par jour et par mètre carré. Cela est plus proche des mesures à Los Angeles [Litvak *et al.* 2017]. Toutefois, $F_2 = 0,25$ correspond à un sol sec, alors que les arbres de [Litvak *et al.* 2017] avaient peu de stress hydrique.

Les valeurs de consommation d'eau sur la journée étudiées sont rassemblées dans le Tableau 7.6.

	$F_2 = 0,25$	$F_2 = 0,5$	$F_2 = 1$
Evapotranspiration (L/jour)	2,0	3,5	5,8

TABLE 7.6 – Consommation d'eau sur la journée considérée

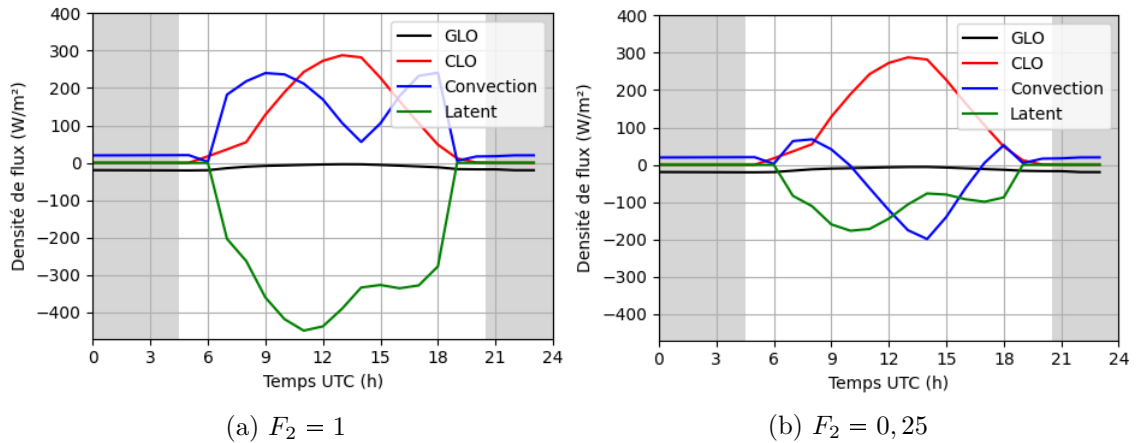


FIGURE 7.17 – Bilan d'énergie sur les arbres avec deux variations de la disponibilité en eau (les autres paramètres sont ceux du Tableau 7.5)

La sensibilité à la disponibilité en eau est donc particulièrement importante, les cas étudiés modulant le flux latent d'un facteur 3.

Conclusion

L'ordre de grandeur de l'évapotranspiration simulée correspond donc aux valeurs de la littérature du modèle de Blaney-Criddle. Il est difficile de conclure plus précisément,

étant donné la grande variabilité du modèle aux différents paramètres (résistance stomatique minimum, LAI, disponibilité en eau) et à l'absence de mesures sur ce cas d'application. Cela confirme l'intérêt de comparer le modèle d'arbre à d'autres modèles, ainsi qu'à des mesures.

7.3.3 Modification du bilan énergétique sur les parois

Les arbres, en bloquant une partie du rayonnement solaire et infrarouge qui les traverse, et en freinant l'écoulement de l'air dans la rue, vont également avoir un effet sur les parois (murs et sol). Le bilan d'énergie sur l'ensemble des parois, exprimé par mètre carré de section horizontale de la rue, est tracé sur les Figures 7.18a, 7.18b et 7.18c. Comme pour les arbres à la partie précédente, la convention de signe est la suivante : si le flux réchauffe les parois, il est positif, sinon il est négatif.

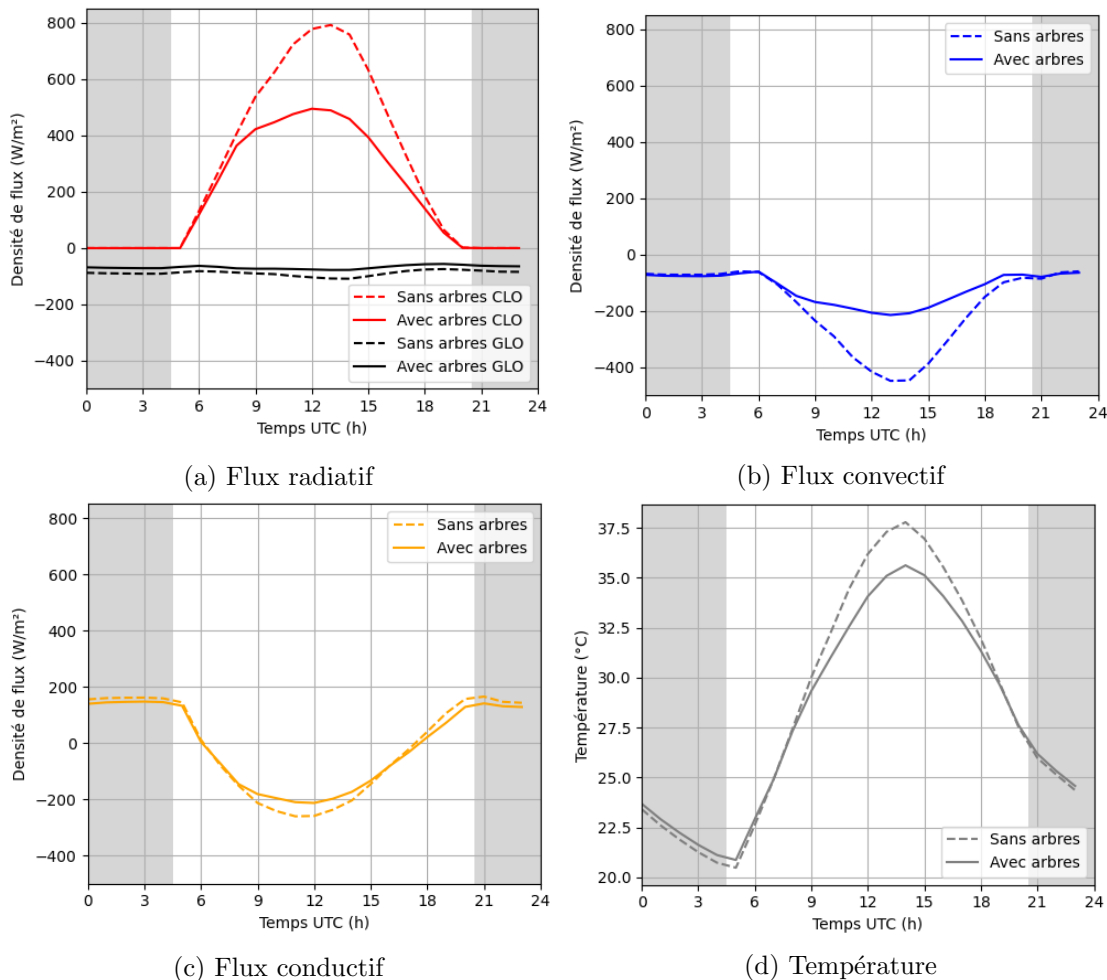


FIGURE 7.18 – Grandeurs simulées sur les parois dans la rue isolée avec et sans arbres. Les valeurs présentées sont les moyennes sur les murs et le sol (pondérées par leur surface respective). Les densités de flux sont affichées positives lorsqu'elles apportent de l'énergie aux parois et négatives lorsqu'elles en prélèvent, et sont exprimées par m^2 de la section horizontale de la rue.

Le flux solaire sur les parois est largement diminué en présence d'arbres en journée,

ce qui correspond à l'effet d'ombrage attendu. De même, les parois bénéficient d'un moins bon rafraîchissement par rayonnement infrarouge en présence d'arbre. Cet effet était également attendu, et est cité dans la littérature [Wujeska-Klaue & Pfautsch 2020, Mballo *et al.* 2021]. En journée, l'ombrage des parois provoque un plus faible stockage de chaleur (Figure 7.18c). Il induit également une plus faible température de surface (Figure 7.18d), et par conséquent un échange convectif moindre avec l'air de la rue. La nuit, un plus faible déstockage est observé (Figure 7.18c). Pourtant, le piégeage radiatif compense cet effet, ce qui entraîne une température de surface légèrement supérieur en présence d'arbres.

Dans l'ensemble, le bilan d'énergie sur les parois montre donc des phénomènes qualitativement conformes aux attentes.

7.3.4 Modification du bilan énergétique dans la rue et effet sur la température d'air

Dans cette partie, un bilan d'énergie est effectué sur le système { parois + arbres }, ce qui revient à sommer les densité de flux exprimées dans les deux parties précédentes. Le modèle d'arbre négligeant la conduction, le flux conduit sur le système est déjà tracé sur la Figure 7.18c. De même, aucun flux latent n'étant considéré sur les parois, le flux latent du système est celui de la Figure 7.16a. Seuls les flux radiatifs et convectifs sont donc représentés sur la Figure 7.19.

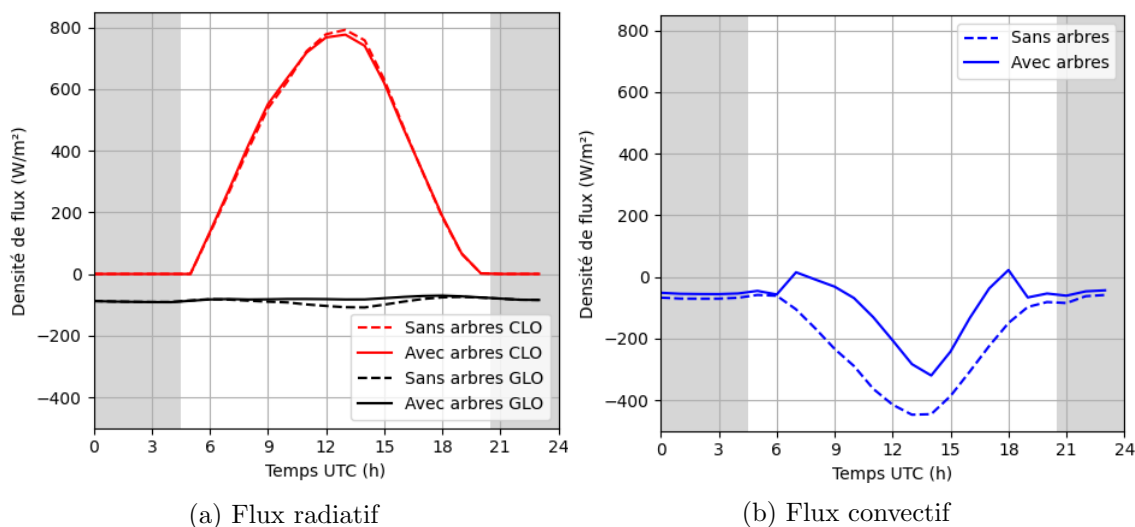


FIGURE 7.19 – Bilan d'énergie sur le système { parois + arbres } dans la rue isolée avec et sans arbres, soit la somme des courbes des Figures 7.16 et 7.18. Les densité de flux sont affichées positives lorsqu'elles apportent de l'énergie au système et négatives lorsqu'elles en prélèvent, et sont exprimées par m^2 de la section horizontale de la rue.

Bien que les arbres de ce cas d'étude soient assez imposants, il apparait que le bilan radiatif total de la rue est finalement assez peu impacté par leur présence. L'albédo de la rue est très légèrement augmenté, et le rafraîchissement infrarouge diurne est légèrement réduit, dû aux plus faibles températures des parois. Les arbres semblent donc plutôt répartir les flux différemment entre les éléments de la rue, et non modifier le bilan radiatif complet.

Au contraire, le flux convectif est assez différent avec et sans arbres. Le flux sensible dégagé par le système {parois et arbres}, qui sera nommé $Q_{H,can}$, est réduit en présence d'arbres sur les 24h observées. Cette réduction est plus grande en journée, grâce à l'évapotranspiration. Mais même la nuit, la chaleur sensible dégagée est plus faible.

Si on s'intéresse maintenant à la température d'air dans la rue, un bilan d'énergie sur l'air de la rue doit être réalisé, en faisant intervenir le flux qui s'échappe de la rue Q_{top} [W/m²] :

$$Q_{top} = \rho c_p u_d (\theta_{can} - \theta_b) \quad (7.2)$$

Avec : $\begin{cases} u_d \text{ [m/s]} : \text{La vitesse verticale d'échange entre la rue et la CLU} \\ \theta_{can} \text{ [K]} : \text{La température potentielle dans la rue} \\ \theta_b \text{ [K]} : \text{La température potentielle au-dessus de la rue (avec le cas A).} \end{cases}$

Ainsi, en appliquant un bilan sur l'air de la rue comme schématisé sur la Figure 7.20, l'échauffement dans la rue est :

$$\theta_{can} - \theta_b = \frac{Q_{H,can}}{\rho c_p u_d} \quad (7.3)$$

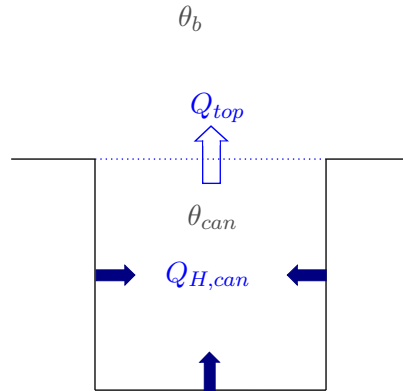


FIGURE 7.20 – Formalisation du bilan d'énergie sur la zone d'air dans une rue isolés (Cas A)

Or, si les arbres ont un impact sur $Q_{H,can}$ comme cela vient d'être montré, ils ont également un effet sur la vitesse d'échange verticale u_d . Afin de l'évaluer, les vitesses verticales d'échange u_d avec et sans arbres sont comparées sur la Figure 7.21a. Il en ressort que les arbres freinent u_d de jour comme de nuit, avec une amplitude approximativement proportionnelle à la valeur de u_d .

Ainsi des effets antagonistes se produisent et celui qui sera dominant déterminera de l'effet des arbres sur la température d'air.

Sur ce cas d'étude, la diminution de $Q_{H,can}$ est suffisamment importante pour que la température d'air soit réduite par la présence d'arbre quel que soit l'instant observé, comme la Figure 7.21b le laisse voir. Si une vitesse verticale d'échange infinie u_d est prise en journée, comme évoqué dans la partie 7.2.1.1, l'échauffement $\theta - \theta_b$ deviendrait nul en journée par définition, mais ne serait pas modifié la nuit.

7.4. Effet de la modélisation des arbres sur le quartier

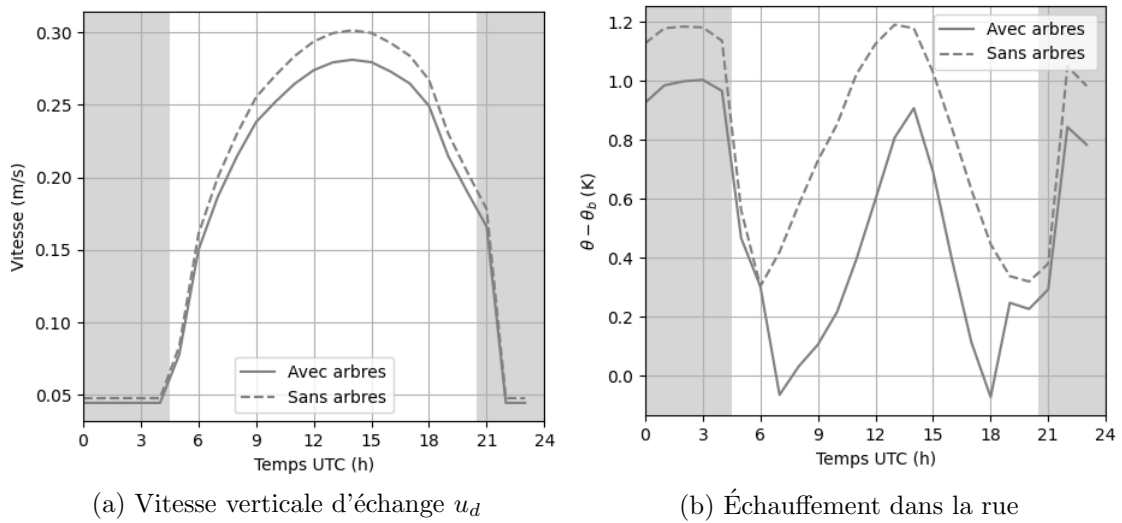


FIGURE 7.21 – Effet des arbres sur la vitesse d'échange verticale et la température d'air

Dans la littérature, aucune conclusion nette n'apparaît concernant l'effet des arbres sur la température d'air nocturne en ville. Des simulations avec Envi-met à Montréal [Wang & Akbari 2016] amènent à un rafraîchissement nocturne de la température d'air dû à la présence d'arbres. Au contraire, les mesures effectuées à Sydney (Australie) [Wujeska-Klaue & Pfautsch 2020] et à Nanjing (Chine) [Huang *et al.* 2008] montraient plutôt une élévation de la température d'air nocturne. Enfin, les résultats de simulations effectuées avec le modèle WRF-UCM laissent voir une élévation de la température d'air nocturne dans certains cas, et un rafraîchissement dans d'autres [Loughner *et al.* 2012].

7.3.5 Conclusion

Le modèle d'arbre est globalement cohérent, et reproduit qualitativement les phénomènes attendus. Pourtant, il est possible que l'évapotranspiration soit surestimée, même si cela doit être confirmé. Par ailleurs, le fait que de nombreux phénomènes physiques se compensent (effet solaire, infrarouge, aérodynamique, évapotranspiration) ne permet pas de conclure sur la validité du modèle avec une analyse qualitative. Des travaux futurs de confrontation de ce modèle à des mesures ou à d'autres modèles seront donc indispensables avant de pouvoir interpréter les résultats concernant l'effet des arbres.

7.4 Effet de la modélisation des arbres sur le quartier

Dans cette partie, le modèle d'arbre sera appliqué sur le quartier de Lyon déjà décrit. Deux objectifs sont poursuivis : d'une part, élargir l'application de la partie précédente à différentes géométries de rues ; d'autre part, observer les interactions entre le modèle d'arbre et l'advection horizontale dans le quartier.

7.4.1 Arbres homogènes sur le quartier

Dans un premier temps, une répartition homogènes d'arbres sur le quartier est étudiée. L'idée est d'ajouter de la complexité au modèle de manière progressive, conformément à la démarche développée dans ce chapitre.

Choix des paramètres

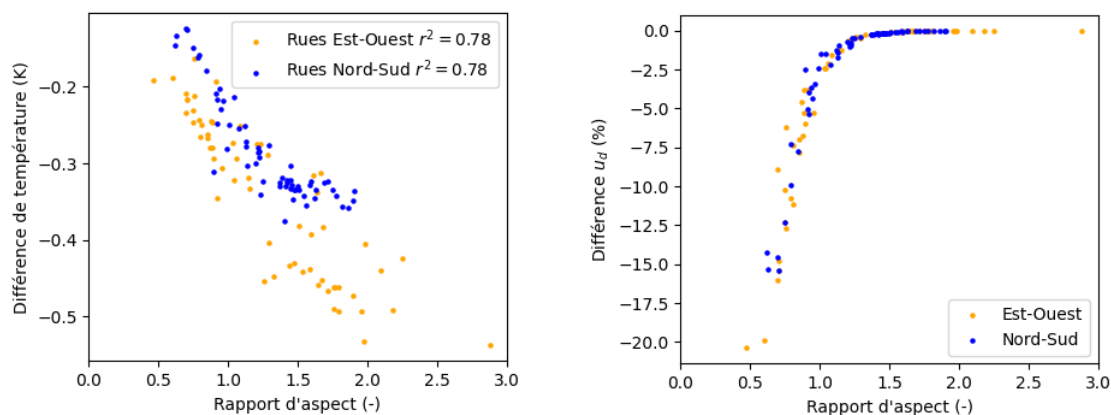
Les mêmes arbres que ceux décrits à la partie précédente (Figure 7.15a) sont conservés. Ils sont cette fois placés sur chaque rue du quartier de Lyon décrit section 7.1.2. Une seule modification doit être apportée à la géométrie des arbres : dans le cas où un mur est moins haut que les arbres (soit 20 m), ces derniers sont raccourcis à la hauteur du mur. En effet, le cas où les arbres dépassent de la rue n'a pas été prévu dans la modélisation radiative des arbres (chapitre 3).

Résultats avec des rues isolées (Cas A)

Pour commencer, les rues du quartier sont considérées isolées selon le cas A de la classification du Tableau 7.4. L'ICU étant un phénomène nocturne, comme dans la première partie l'intérêt est porté à la moyenne nocturne des températures d'air dans le quartier, soit la moyenne entre 21h et 4h. L'effet des arbres sur la température d'air nocturne est présenté pour chaque rue du quartier en fonction de son rapport d'aspect et de son orientation sur la Figure 7.22a.

Notons d'abord que quel que soit le rapport d'aspect et l'orientation, les arbres induisent un rafraîchissement nocturne. Comme à la partie précédente, cela signifie que la diminution du flux convectif dégagé dans la rue est dominante par rapport à la diminution de l'échange entre la rue et la CLU.

Par ailleurs, le fait que les rues Nord-Sud, dans le sens du vent, voient un plus faible rafraîchissement est à mettre en relation avec la diminution des coefficients convectifs des parois due aux arbres, qui a plus d'impact dans les rues où le flux convectif est plus important.



(a) Différence de température d'air induite par les arbres

(b) Différence de vitesse d'échange verticale u_d induite par les arbres

FIGURE 7.22 – Effet des arbres sur les grandeurs nocturnes (moyenne de 21 h à 4 h) sur les différentes rues du quartier dans la configuration A - rues isolées (Tableau 7.4)

Enfin, une forte corrélation est observée entre le rafraîchissement des arbres et le rapport d'aspect (H/W) des rues. Pour comprendre, il faut s'intéresser de plus près à la vitesse d'échange verticale u_d entre les rues et la CLU. Il avait été vu sur la Figure 7.10b que cette dernière diminuait avec le rapport d'aspect. La Figure 7.22b met maintenant en évidence que l'effet des arbres diminue également avec le rapport d'aspect. Cela avait déjà été observé au chapitre 2, et explique donc le plus faible rafraîchissement observé pour les rues dégagées.

Résultats avec le modèle complet (Cas D)

Dans cette section, les rues sont maintenant connectées aux intersections et les panaches dans la CLU sont activés. Si on effectue un bilan énergétique sur l'air de la rue, formalisé sur la Figure 7.23, l'échauffement d'une rue par rapport à la CLU s'écrit :

$$\theta_{can} - \theta_{clu} = \frac{Q_{H,can} - Q_{adv}}{\rho c_p u_d} \quad (7.4)$$

Avec : $\left\{ \begin{array}{l} \theta_{clu} [K] : \text{La température potentielle au dessus de la rue} \\ Q_{adv} [W/m^2] : \text{Le flux de chaleur advecté horizontalement à travers la rue.} \end{array} \right.$

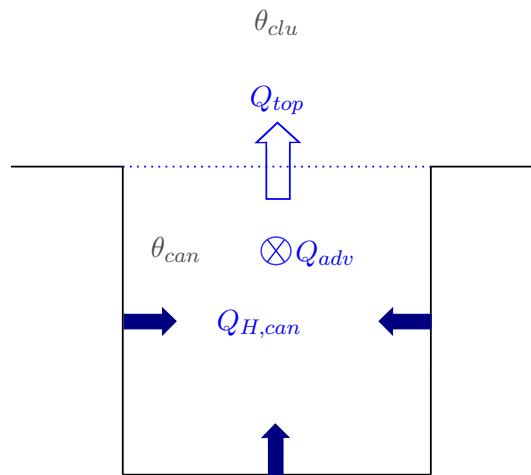


FIGURE 7.23 – Formalisation du bilan d'énergie sur la zone d'air dans une rue du modèle complet (Cas D)

Or, le terme d'advection Q_{adv} dépend de la vitesse moyenne longitudinale dans la rue, qui est freinée par les arbres. Pour que les arbres induisent un rafraîchissement, il faut donc que le flux sensible émis par les éléments de la rue $Q_{H,can}$ diminue suffisamment pour compenser à la fois la baisse de u_d et celle de Q_{adv} .

La distribution spatiale de l'effet des arbres sur la température d'air nocturne, ainsi que son lien avec le rapport d'aspect sont représentés sur la Figure 7.24. Contrairement à ce qui a été observé pour les rues isolées, un échauffement de la température d'air dû aux arbres est observé sur la majorité des rues. Cela signifie que le terme d'advection Q_{adv} dans l'équation 7.4 joue un rôle important, puisqu'il fait basculer la conclusion sur l'effet nocturne des arbres d'un rafraîchissement vers un échauffement. De même, le fait que quelques rues sur lesquelles un rafraîchissement est observé se situent en aval du vent, où Q_{adv} devient plus faible, confirme cette conclusion.

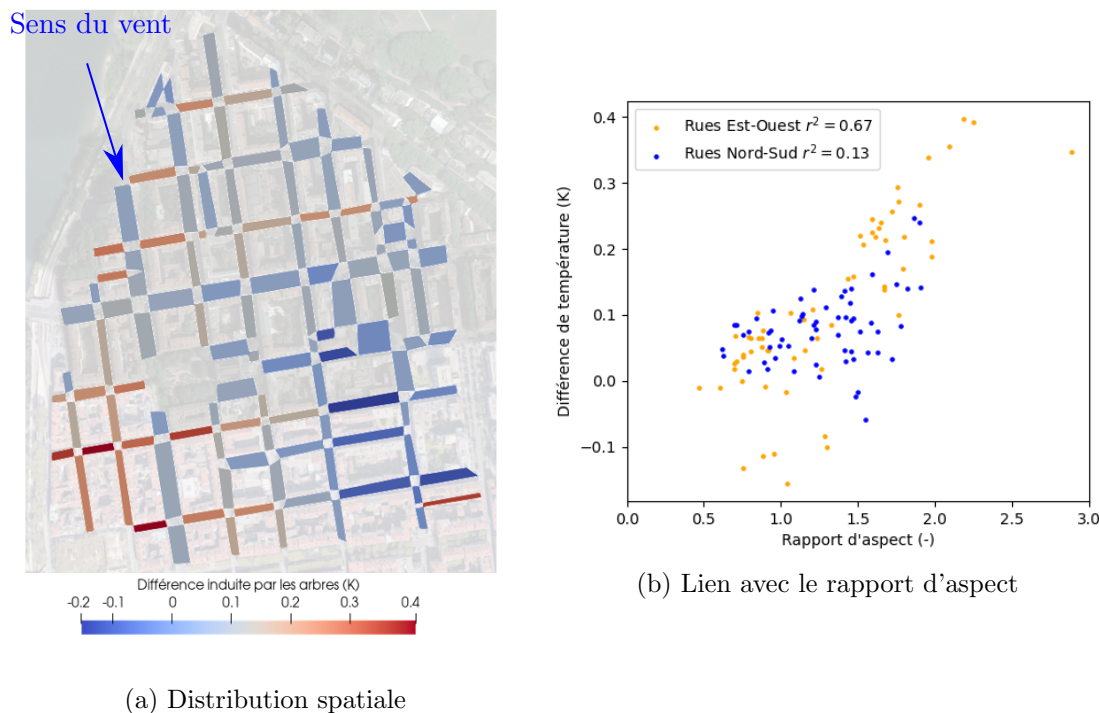


FIGURE 7.24 – Effet des arbres sur la température d’air nocturne (moyenne de 21 h à 4 h) sur les différentes rues du quartier dans la configuration D - modèle complet (Tableau 7.4)

Dans cette configuration, le rapport d’aspect a un effet opposé à celui observé pour les rues isolées. En effet, plus les rues sont dégagées (H/W faible) et moins l’échauffement est important. Cela est particulièrement vrai pour les rues orientées Est-Ouest, avec un r^2 de 0,67. Mais même pour les rues Nord-Sud, un effet significatif au risque de 5%, bien que faible, est observé. Cela s’explique par le fait que, sans arbres, le terme d’advection a plus de poids pour les rues encaissées, pour lesquelles la chaleur dégagée $Q_{H,can}$ nocturne est plus importante. L’effet des arbres sur le terme d’advection aura donc plus d’impact.

Pour conclure, l’effet des arbres sur la température d’air nocturne est très différent selon que l’on considère l’advection horizontale ou non. Cela provient du fait que, même si les arbres réduisent le stockage de chaleur diurne, et donc le déstockage nocturne ils freinent également l’air, ce qui joue sur l’évacuation de la chaleur nocturne, que ce soit verticalement ou horizontalement.

7.4.2 Arbres réalistes

Finalement, les arbres existant réellement dans le quartier de Lyon vont être modélisés. Le but est d’analyser les résultats obtenus lorsque toutes les couches de complexité du modèle sont activées. Un deuxième objectif est de proposer une démarche pour accéder à la variabilité des paramètres des arbres sur un quartier.

Choix des paramètres

La base de données de la Métropole de Lyon sur les arbres d’alignement [Métropole de Lyon] est le principal outil utilisé. Cette base de données permet d’accéder à la position exacte de chaque arbre, ainsi qu’à la circonférence et aux hauteurs inférieure et supérieure de son houppier.

Pour accéder à la fraction de recouvrement horizontal des arbres dans chaque rue, une méthode de type Monte Carlo a été utilisée. Si chaque arbre est considéré comme un disque dans un plan horizontal, de centre et de diamètre connus, pour un certain nombre de points aléatoires dans chaque rue, il est possible d’exécuter un test d’appartenance à chaque arbre. La fraction d’arbres est ensuite le rapport du nombre de points appartenant à un arbre sur le nombre de points total. Les fractions d’arbres obtenues de cette manière sont représentées sur la Figure 7.25.

Concernant les autres paramètres, ils ont été fixés aux mêmes valeurs que celles prises pour l’analyse de la rue isolée, soit celles du Tableau 7.5. La disponibilité en eau F_2 est donc prise égale à 0,5, et la résistance stomatique minimum vaut 50 s/m.

Seules les hauteurs minimum et maximum du houppier ($H_{a,min}$ et $H_{a,max}$) et la fraction horizontale de recouvrement des arbres (F_a) varient donc sur le domaine. Pour le LAI, une option aurait été de le calculer à partir de ces trois paramètres, par exemple en imposant une densité volumique. Cependant, cette option semblant assez hasardeuse, elle n’a pas été retenue, et la valeur moyenne donnée par [Bréda 2008] a été prise pour tous les arbres.

Avec le modèle complet (Cas D)

Pour ce cas d’étude, le modèle complet a été directement utilisé, afin d’observer pour cette dernière partie l’ensemble des couches de complexité.

La différence de température d’air nocturne induite par les arbres est représentée sur la Figure 7.26. Comme pour les arbres uniformes (paragraphe 7.4.1), un échauffement est observé dans la majorité des cas. Quelques rues d’orientation Est-Ouest et éloignées du bord du domaine sont néanmoins rafraîchies par la présence d’arbres.

Différentes hauteurs ou fractions d’arbres ne changent donc pas les conclusions déjà énoncées avec des arbres uniformes : avec MATHIS, un rafraîchissement nocturne est observé lorsque l’advection horizontale est nulle ou faible, et un échauffement lorsqu’elle est importante, du moins pour les conditions météorologiques étudiées ici.

7.5 Coût de calcul

Pour finir, les temps de calcul pour les différentes simulations effectuées sont présentés dans cette partie. En effet, le choix de l’approche de modélisation en réseau de rues a été fait en partie dans l’optique de faciliter l’accessibilité des simulations sur un quartier.

Dans le cadre de l’étude présentée, un ordinateur portable équipé d’un processeur Intel Core i7-10850H (6 coeurs, 12 Mo de mémoire cache, 2,7 GHz) et de 32 Go de mémoire RAM a été utilisé. Les temps de calcul obtenus dans les différentes configurations pour 24 h temps simulé sont présentés dans le Tableau 7.7. La semaine d’initialisation n’est pas prise en compte dans les temps de calcul présentés.

Le temps de calcul le plus faible est obtenu pour les cas A et B, pour lesquelles aucun lien entre les rues n’est modélisé, ce qui facilite donc la convergence de la boucle itérative. Lorsque l’advection horizontale dans le réseau de rue est ajoutée (Cas C), le

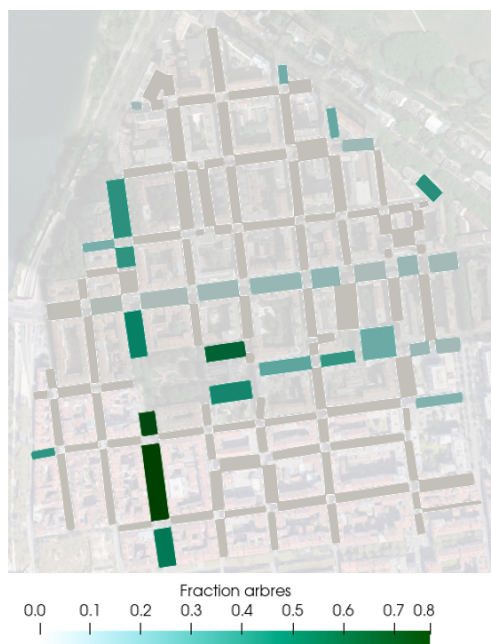


FIGURE 7.25 – Distribution spatiale de la fraction d’arbres réaliste selon la base de données de la Métropole de Lyon [Métropole de Lyon]

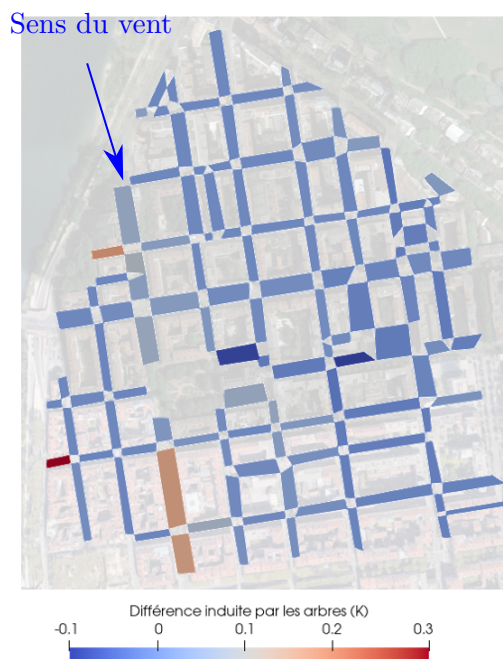


FIGURE 7.26 – Effet des arbres sur la distribution spatiale de la température d’air nocturne (de 21h à 4h) dans le cas D - modèle complet (Tableau 7.4)

Cas A	Cas B	Cas C	Cas D
20 min	20 min	35 min	1h 12 min

TABLE 7.7 – Temps de calcul pour 24 h simulées avec un ordinateur portable équipé d’un processeur Intel Core i7-10850H (6 coeurs, 12 Mo de mémoire cache, 2,7 GHz) et de 32 Go de mémoire RAM

temps de calcul augmente de 15 min. Enfin, lorsque le modèle complet est utilisé, le temps de calcul pour 24 h simulé double par rapport au cas C et atteint 1 h 12 min. Il apparaît donc que l’activation des panaches de chaleur dans la couche limite urbaine joue un rôle majeur dans le temps de calcul du modèle complet.

Les résultats en terme de temps de calcul sont satisfaisants. En effet, sur un domaine similaire à celui présenté dans cette partie (47 ha composé de 122 rues et de 68 bâtiments), une étude sur quelques semaines est envisageable. En revanche, il serait compliqué d’étendre la taille du modèle et/ou la période de simulation à un ordre de grandeur supérieur. Toutefois, notons qu’aucune optimisation du code n’a été réalisée à l’heure actuelle. Si cela est souhaité, certaines méthodes d’optimisation, inspirées de SIRANE, pourraient améliorer les performances de MATHIS.

7.6 Conclusion

L'activation progressive des différents sous-modèles de MATHIS appliqués sur un quartier de Lyon, avec et sans arbres, a permis par une analyse qualitative de montrer la cohérence globale du modèle. Notamment, le modèle reproduit bien une élévation nocturne de la température d'air dans les rues et une dépendance de l'ICU au rapport d'aspect des rues. De même, il simule une advection horizontale cohérente dans le réseau de rues, qui est à l'origine d'un ICU plus faible dans les rues dont l'axe est dans le sens du vent dominant. Au contraire, dans ces rues, l'effet de freinage aéraulique des arbres prend plus d'importance que pour les rues perpendiculaires au vent. Par ailleurs, des profils verticaux de température potentielle dans la CLU montrant le développement d'une couche limite thermique ont été observés. Une atmosphère instable est obtenue en journée et en soirée, qui devient neutre puis légèrement stable en fin de nuit.

Toutefois, certains points sur lesquels un travail supplémentaire est nécessaire pour pouvoir interpréter pleinement les résultats de MATHIS sont ressortis. Premièrement, la vitesse d'échange verticale entre une rue et la CLU semble surestimée en journée, et une trop forte dépendance au rapport d'aspect de la rue est suspectée, notamment pour les rapports d'aspect élevés. Ensuite, utiliser en entrée du domaine un profil vertical de température potentielle neutre, égale à celle d'une station météorologique péri-urbaine est problématique. Cela augmente artificiellement l'importance de l'advection horizontale, et fausse donc les résultats, même si l'on raisonne en relatif par rapport à la température d'entrée. Enfin, les différents sous-modèles intervenant pour la prise en compte des arbres nécessiteraient tous des étapes de validation supplémentaires. En particulier, l'effet des arbres sur l'aéraulique a un rôle très important, puisqu'il est responsable d'une augmentation de l'ICU nocturne sur ce cas d'étude, due à une moins bonne ventilation des rues. Une bonne confiance en la calibration de ce modèle est donc indispensable avant de pouvoir interpréter les résultats, même s'ils semblent cohérents.

Enfin, tout au long de ce chapitre les propriétés des matériaux ont été prises uniformes sur le quartier, et seul un jour moyen de données météorologiques a été utilisé. Faire varier ces deux éléments pourrait amener des conclusions supplémentaires.

Comme l'application sur le cas d'étude effectuée dans ce chapitre le montre, MATHIS permet donc une analyse physique des phénomènes impliqués dans l'îlot de chaleur urbain à l'échelle du quartier. Il s'agit donc d'un outil prometteur pour avancer dans la compréhension de ces phénomènes et par extension de l'îlot de chaleur urbain.

Conclusion et perspectives

Synthèse du travail effectué

Afin de répondre à l'enjeu des surchauffes urbaines, liées à la fois au changement climatique, à la ville et par extension à l'ICU, les modèles de climat urbains sont des outils d'aide à la décision puissants. Les modèles existants permettent dans la majorité des cas soit d'estimer les grandeurs moyennes sur un quartier, soit au contraire de les évaluer sur un maillage 3D fin sur une zone réduite.

Dans cette thèse, une nouvelle approche de modèle de climat urbain est proposée, dans le but d'évaluer une distribution spatiale de températures d'air sur un quartier étendu. Elle se base sur trois sous-modèles principaux :

- Un prétraitement météorologique qui estime la vitesse de friction et la stabilité atmosphérique sur le quartier urbain choisi, en supposant une vitesse géostrophique uniforme entre la station météorologique et le quartier urbain
- Un réseau de rues canyon connectées aux intersections, dans lequel chaque rue est représentée par un modèle similaire à un modèle de canopée urbaine à une couche, c'est-à-dire où les flux de chaleur sont modélisés sans subdivision en maillage
- Un modèle de CLU calculant un champ de température potentielle à l'aide de panaches gaussiens.

La première partie de cette thèse s'est concentrée sur le modèle de rue, pour lequel un compromis entre précision et temps de calcul était recherché, dans la mesure où ce modèle est appliqué sur chaque rue du quartier. Une modélisation aéraulique, radiative et thermo-énergétique a été proposée à travers trois chapitres respectifs. Celles-ci ont été basées sur la littérature et sur le travail effectué lors de cette thèse. Notamment, des simulations CFD ont permis de développer une modélisation paramétrique des vitesses proches parois. Concernant le modèle radiatif, la méthode des radiosités a été utilisée. Enfin, la conduction dans les parois est modélisée par une discrétisation de l'équation de la chaleur. Une attention particulière a été portée à la représentation des arbres. Leur effet radiatif a été pris en compte à l'aide de transmittances interpolées depuis une base de données constituée à l'aide de lancé de rayons. L'évapotranspiration est prise en compte avec l'équation de Penman-Monteith. Trois comparaisons avec un autre modèle ou des mesures sur des dispositifs expérimentaux ont été conduites. Premièrement, le modèle radiatif sans arbres a été comparé avec un modèle de Monte Carlo, avec des résultats très similaires. Ensuite, le dispositif expérimental ClimaBat, qui consiste en des rues à échelle réduite instrumentées à La Rochelle, a pu être utilisé pour confronter le modèle de rue sans végétation à une semaine de mesures, montrant une bonne adéquation (RMSE inférieures à 20 % de l'amplitude moyenne journalière). Enfin, la modélisation des arbres a été évaluée qualitativement à l'aide de mesures sur une journée dans une rue

expérimentale arborée à Angers. Elle a révélé une prise en compte radiative cohérente, avec une diminution des températures et du flux conduit aux parois du bon ordre de grandeur. L'évapotranspiration modélisée était en revanche trop importante, sans qu'il soit possible de conclure définitivement sur l'origine de cet écart.

La deuxième partie a été consacrée au modèle de quartier. Pour cela, la constitution du réseau de rues, ainsi que l'ajout du modèle de panaches gaussiens pour la CLU ont été présentés dans un premier chapitre, suivi d'une analyse de sensibilité sur l'étalement des panaches. Ensuite, le prétraitement météorologique, qui est par définition indépendant des autres modules, a été traité dans le deuxième chapitre de cette partie. Il est basé sur l'uniformité de la vitesse géostrophique entre la station météorologique et la ville, et permet d'estimer la vitesse de friction, la stabilité atmosphérique et la hauteur de couche limite sur le domaine urbain d'intérêt. Les résultats du prétraitement météorologique ont pu être comparés aux mesures de la campagne BUBBLE, sur un mois d'été complet, montrant des écarts satisfaisants (RMSE inférieures à 30 % de l'amplitude moyenne journalière). Finalement, dans le dernier chapitre, le modèle développé au long de la thèse a été appliqué sur un quartier de la ville de Lyon, avec et sans arbres. Cela a permis de montrer une cohérence globale du modèle, avec une reproduction des phénomènes attendus. Certains points méritant un travail supplémentaire ont toutefois émergés, et vont être détaillés dans les perspectives.

Perspectives

A l'issu de cette thèse, une première version de MATHIS fonctionnelle existe, comme l'a démontré l'application du dernier chapitre sur un quartier de Lyon. Trois points principaux à approfondir ont toutefois été identifiés, et vont être présentés. Un certain nombre de perspectives à plus long terme seront ensuite évoquées.

Condition limite de température

En premier lieu, il a été vu que le choix du profil vertical de température potentielle en entrée du domaine est crucial pour l'interprétation des résultats. En effet, on aurait pu supposer que quel que soit le choix de cette température, à condition de raisonner en relatif par rapport à celle-ci, les résultats n'en seraient pas impactés. Or, ce n'est pas ce qui a été observé. Même en relatif, la température en bord de domaine a une grande importance. Cela s'explique par le fait qu'elle ait un impact sur l'advection horizontale dans le domaine, qui peut changer à la fois l'ordre de grandeur et la répartition de l'ICU dans la couche de canopée urbaine. Par ailleurs, une advection horizontale importante a également pour effet de donner plus de poids au ralentissement de l'écoulement par les arbres, et pourrait donc amener à des conclusions erronées vis-à-vis de ces derniers.

Un travail sur cette condition limite de température est donc une perspective prioritaire. La difficulté, contrairement aux conditions limites aérauliques, est l'impossibilité de considérer une homogénéité horizontale, au risque d'aller contre l'essence même de MATHIS. Une option envisageable pourrait être de construire autour du quartier d'intérêt un modèle de ville dégradé, qui ne représenterait pas chaque rue distinctement, mais prendrait en compte plus grossièrement l'effet de la zone urbaine complète.

Vitesse verticale d'échange au sommet des rues

Ensuite, une confrontation du modèle de vitesse d'échange, idéalement à des mesures, mais pourquoi pas à d'autres modèles est une perspective intéressante. Deux éléments amènent cette conclusion.

Tout d'abord, sur le cas d'application sans arbres du dernier chapitre, l'évolution temporelle de l'ICU montrait un sommet dans l'après-midi, contrairement aux attentes. L'ordre de grandeur du flux convectif émis par les parois ayant été validé, il est supposé que cet écart puisse être dû à une trop faible vitesse d'échange au sommet des rues en journée. Cela pourrait provenir notamment de l'absence de prise en compte de la flottabilité.

Par ailleurs, sur le cas d'application sur un quartier de Lyon sans végétation, il était attendu qu'à partir d'un certain rapport d'aspect, l'augmentation de celui-ci n'ait plus d'impact, voire fasse diminuer l'ICU, contrairement aux résultats des simulations. Une hypothèse avancée pour expliquer cela est une trop forte dépendance de la vitesse d'échange au rapport d'aspect pour des rapports d'aspect (H/W) élevés.

Modèle d'arbres

Les arbres ont de multiples effets sur le microclimat urbain. D'une part, ils bloquent une partie du rayonnement solaire et transpirent, ce qui améliore le confort thermique. D'autre part, ils bloquent également une partie du rayonnement infrarouge émis par les parois et freinent l'écoulement, ce qui diminue le confort thermique. Pour juger de leur impact complet, une estimation correcte de chacun des phénomènes est donc essentielle.

Or, le modèle d'arbre n'a pu être analysé que qualitativement lors de cette thèse. Il serait donc intéressant, en priorité de confronter l'évapotranspiration modélisée à des mesures ou d'autres modèles. En effet, cette grandeur pourrait être surestimée, au vu de la comparaison avec la rue arborée d'Angers au chapitre 4. Si cela est avéré, une subdivision du feuillage, notamment entre les feuilles ombragées et ensoleillées, pourrait être une piste. Ensuite, le modèle aérodynamique n'ayant été développé que récemment par [Maison *et al.* 2022b], et se basant exclusivement sur des simulations CFD, un travail de validation supplémentaire serait une perspective intéressante, surtout au vu de l'impact de ce modèle sur les conclusions. Enfin, le modèle radiatif, bien qu'il ait montré des résultats satisfaisants sur la comparaison avec la rue arborée d'Angers au chapitre 4, devrait également subir d'autres étapes de validation plus approfondies.

Autres perspectives

Enfin, quelques perspectives à plus long terme seraient également intéressantes.

Premièrement, la méthode qui consiste à valider séparément les sous-modèles a des limites. Par exemple, certains modules comme le modèle de CLU utilisant des panaches gaussiens, sont plus difficiles à isoler et à valider séparément. Ensuite, les interactions entre les sous-modèles peuvent amplifier les erreurs. Il serait donc intéressant de comparer MATHIS à une campagne de mesure à plus grande échelle, incluant notamment des mesures dans la CLU.

Par ailleurs, MATHIS n'a pas actuellement ni de modèle de bâtiment, ni de modèle hydrologique. Ces deux ajouts permettraient donc une représentation plus complète des phénomènes complexes et couplés qui se produisent dans les villes.

Finalement, l'utilisation de MATHIS et SIRANE [Soulhac *et al.* 2011] pour des

études croisées de pollution et d'ICU est la dernière perspective cernée, qui permettrait de mettre à profit les similarités entre ces deux modèles, et de travailler de front sur ces deux enjeux interdépendants.

Conclusion générale

L'approche proposée dans cette thèse pour la modélisation du climat urbain paraît à ce stade pertinente. En effet, le fait de représenter un quartier comme un réseau de rues permet d'envisager des simulations sur des zones étendues et/ou des périodes longues, tout en gardant une représentation semi-explicite de la géométrie. Par ailleurs, l'utilisation d'un modèle de panaches gaussiens appliqué à la thermique apporte une solution intéressante pour simuler un champ de température dans la CLU avec un coût de calcul réduit.

Les différentes comparaisons des sous-modèles à d'autres modèles, à des mesures sur des dispositifs expérimentaux ou en conditions réelles ont montré des résultats encourageants. De même, l'application du modèle sur un quartier de la ville de Lyon a révélé le potentiel de l'outil développé pour étudier le climat urbain à l'échelle du quartier. MATHIS semble donc un modèle adapté et pertinent, dont il serait intéressant de poursuivre le développement. Cet outil pourrait apporter un éclairage sur certains choix d'urbanisme, concernant la géométrie d'un quartier (rapport d'aspect, orientation des bâtiments), la végétalisation urbaine, ainsi que sur la question de l'impact de zones dégagées (parcs, fleuves) sur le rafraîchissement des quartiers attenants.

Ce travail de thèse est donc complémentaire aux autres approches de modélisation existantes, et apporte une contribution à l'adaptation des villes au changement climatique et à la lutte contre les surchauffes urbaines.

Bibliographie

- [Akbari 2002] H. Akbari. *Shade trees reduce building energy use and CO2 emissions from power plants*. Environmental Pollution, vol. 116, no. SUPPL. 1, pages 119–126, 2002.
- [Allegrini *et al.* 2012] Jonas Allegrini, Viktor Dorer and Jan Carmeliet. *Wind tunnel measurements of buoyant flows in street canyons*. Building and Environment, 2012.
- [Allen 2016] Richard G. Allen. *Evaporation, evapotranspiration, and irrigation water requirements*. American s édition, 2016.
- [Asawa *et al.* 2008] G. L. Asawa, Tukiran Taniredja, Efi Miftah. Faridli and Sri Harmianto. *Irrigation and water resources engineering*. New age international publishers, 2008.
- [Beljaars 1992] Anton Beljaars. *The parametrization of the planetary boundary layer*. Meteorological Training Course Lecture Series, 1992.
- [Beveridge 2013] J Ross Beveridge. *Interpolation Lecture*. Technical report, Colorado State University, 2013.
- [Blocken *et al.* 2009] B Blocken, T Defraeye, D Derome and J Carmeliet. *High-resolution CFD simulations for forced convective heat transfer coefficients at the facade of a low-rise building*. Building and Environment, vol. 44, no. 12, pages 2396–2412, 2009.
- [Bouyer 2009] Julien Bouyer. *Modélisation et simulation des microclimats urbains : Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments*. PhD thesis, Université de Nantes, 2009.
- [Bowler *et al.* 2010] Diana E. Bowler, Lisette Buyung-Ali, Teri M. Knight and Andrew S. Pullin. *Urban greening to cool towns and cities : A systematic review of the empirical evidence*. Landscape and Urban Planning, vol. 97, no. 3, pages 147–155, 2010.
- [Bréda 2008] Nathalie Bréda. *Leaf Area Index*. In Encyclopedia of Ecology, pages 2148–2154. 2008.
- [Bruse 1999] Michael Bruse. *Simulating microscale climate interactions in complex terrain with a high-resolution numerical model : A case study for the Sydney CBD Area (Model Description)*. International Conference on Urban Climatology, page 6, 1999.
- [Bueno *et al.* 2013] Bruno Bueno, Leslie Norford, Julia Hidalgo and Grégoire Pigeon. *The urban weather generator*. Journal of Building Performance Simulation, vol. 6, no. 24, pages 269–281, 2013.

-
- [Bueno *et al.* 2014] Bruno Bueno, Matthias Roth, Leslie Norford and Reuben Li. *Computationally efficient prediction of canopy level urban air temperature at the neighbourhood scale*. Urban Climate, vol. 9, pages 35–53, 2014.
- [Buffa *et al.* 2021] Elisa Buffa, Jérôme Jacob and Pierre Sagaut. *Lattice-Boltzmann-based large-eddy simulation of high-rise building aerodynamics with inlet turbulence reconstruction*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 212, 2021.
- [Cengel 2003] Y. Cengel. *Fundamentals of convection*. In McGraw-Hill, editor, Heat transfer - A practical approach, pages 333–514. 2003.
- [CERC 2020] CERC. *Boundary Layer Structure Specification Cerc*. Technical report, 2020.
- [Christen *et al.* 2012] Andreas Christen, Fred Meier and Dieter Scherer. *High-frequency fluctuations of surface temperatures in an urban environment*. Theoretical and Applied Climatology, vol. 108, no. 1-2, pages 301–324, 2012.
- [De Ridder *et al.* 2015] K De Ridder, D. Lauwaet and B. Maiheu. *UrbClim - A fast urban boundary layer climate model*. Urban Climate, vol. 12, pages 21–48, 2015.
- [Djedjig *et al.* 2015] Rabah Djedjig, Emmanuel Bozonnet, Rafik Belarbi and La Rochelle. *Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons*. pages 34–44, 2015.
- [Drake *et al.* 2019] Paul L. Drake, Hugo J. de Boer, Stanislaus J. Schymanski and Erik J. Veneklaas. *Two sides to every leaf : water and CO₂ transport in hypostomatous and amphistomatous leaves*. New Phytologist, vol. 222, no. 3, pages 1179–1187, 2019.
- [Duan *et al.* 2019] Shuangping Duan, Zhiwen Luo, Xinyan Yang and Yuguo Li. *The impact of building operations on urban heat/cool islands under urban densification : A comparison between naturally-ventilated and air-conditioned buildings*. Applied Energy, vol. 235, pages 129–138, 2019.
- [Dupont *et al.* 2006] Sylvain Dupont, Patrice G. Mestayer, Emmanuel Guilloteau, Emmanuel Berthier and Hervé Andrieu. *Parameterization of the urban water budget with the submesoscale soil model*. Journal of Applied Meteorology and Climatology, vol. 45, no. 4, pages 624–648, 2006.
- [Ellena *et al.* 2020] Marta Ellena, Margaretha Breil and Stefano Soriani. *Urban Climate The heat-health nexus in the urban context : A systematic literature review exploring the socio-economic vulnerabilities and built environment characteristics*. Urban Climate, vol. 34, no. July, page 100676, 2020.
- [EnergyPlus] EnergyPlus. <https://energyplus.net/>. Consulté le : 27/07/2023.
- [Florides & Kalogirou 2005] Georgios Florides and Soteris Kalogirou. *Measurements of Ground Temperature at Various Depths*. 8th REHVA World Congress, pages 1–6, 2005.
- [Fröhlich 2018] Dominik Fröhlich. *Spatial Estimation of Thermal Indices in Urban Areas — Basics of the SkyHelios Model*. pages 1–14, 2018.
- [Galtier *et al.* 2022] M. Galtier, W. Woelffel, F. André, V. P. Solovjov, B. W. Webb and S. Roy. *Assessment of narrow-band and full spectrum gas radiation methods in a real industrial glass furnace configuration*. Applied Thermal Engineering, vol. 216, 2022.
-

- [Garratt 1999] J.R. Garratt. The atmospheric boundary layer. 1999.
- [Gillner *et al.* 2015] Sten Gillner, Juliane Vogt, Andreas Tharang, Sebastian Dettmann and Andreas Roloff. *Role of street trees in mitigating effects of heat and drought at highly sealed urban sites*. Landscape and Urban Planning, vol. 143, pages 33–42, 2015.
- [Grimmond *et al.* 2011] C. S.B. Grimmond, M. Blackett, M. J. Best, J. J. Baik, S. E. Belcher, J. Beringer, S. I. Bohnenstengel, I. Calmet, F. Chen, A. Coutts, A. Dandou, K. Fortuniak, M. L. Gouvea, R. Hamdi, M. Hendry, M. Kanda, T. Kawai, Y. Kawamoto, H. Kondo, E. S. Krayenhoff, S. H. Lee, T. Loridan, A. Martilli, V. Masson, S. Miao, K. Oleson, R. Ooka, G. Pigeon, A. Porson, Y. H. Ryu, F. Salamanca, G. J. Steeneveld, M. Tombrou, J. A. Voogt, D. T. Young and N. Zhang. *Initial results from Phase 2 of the international urban energy balance model comparison*. International Journal of Climatology, vol. 31, pages 244–272, 2011.
- [Gros 2013] Adrien Gros. *Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier*. PhD thesis, Université de La Rochelle, 2013.
- [Holtslag & Van Ulden 1982] A. Holtslag and A. Van Ulden. *Simple estimates of night-time surface fluxes from routine weather data*. Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, vol. 82-4, 1982.
- [Holtslag & Van Ulden 1983] A. Holtslag and A. Van Ulden. *A simple scheme for day-time estimates of the surface fluxes from routine weather data*. Journal of climate and applied meteorology, vol. 22-4, 1983.
- [Howell *et al.* 2021a] John R. Howell, M. Pinar Mengüç, Kyle Daun and Robert Siegel. Radiation, Thermal Transfer, Heat. 2021.
- [Howell *et al.* 2021b] John R. Howell, M. Pinar Mengüç, Kyle Daun and Robert Siegel. Thermal radiation heat transfer - online appendix. 2021.
- [Huang *et al.* 2008] Liangmei Huang, Jianlong Li, Dehua Zhao and Jiyu Zhu. *A fieldwork study on the diurnal changes of urban microclimate in four types of ground cover and urban heat island of Nanjing, China*. Building and Environment, vol. 43, no. 1, pages 7–17, 2008.
- [Huang *et al.* 2014] Jianxiang Huang, Jose Guillermo Cedeño-laurent and John D Spengler. *CityComfort+ : A Simulation-Based Method for Predicting Mean Radiant Temperature in Dense Urban Areas*. Building and Environment, 2014.
- [Huang *et al.* 2022] Jianxiang Huang, Tongping Hao, Yali Wang and Phil Jones. *A street-scale simulation model for the cooling performance of urban greenery : Evidence from a high-density city*. Sustainable Cities and Society, vol. 82, no. March, page 103908, 2022.
- [Hunt *et al.* 1988] J Hunt, R Holroyd and D Carruthers. *Preparatory Studies for a Complex Dispersion Model*. 1988.
- [Idczak *et al.* 2010] Marcin Idczak, Dominique Groleau, Patrice Mestayer, Jean Michel Rosant and Jean François Sini. *An application of the thermo-radiative model SOLENE for the evaluation of street canyon energy balance*. Building and Environment, vol. 45, no. 5, pages 1262–1275, 2010.
- [IEA 2018] *The future of cooling*. Technical report, International Organisation for Standardisation, 2018.

-
- [IGN 2021] IGN. *BD TOPO® Version 3.0 - Descriptif de contenu*. 2021.
- [Ito *et al.* 1972] N Ito, K Kimura and J Oka. *A field experiment study on the convective heat transfer coefficient on the exterior surface of a building (Part 2)*. ASHRAE Transactions, vol. 78, 1972.
- [J. A. Businger 1971] Y. Izumi E.F. Bradley J. A. Businger J. C. Wyngaard. *Flux-Profile Relationships in the Atmospheric Surface Layer*. Journal of atmospheric Sciences, vol. 28, no. 2, pages 181–189, 1971.
- [Jacob *et al.* 2019] Jérôme Jacob, Orestis Malaspinas and Pierre Sagaut. *A new hybrid recursive regularised bhatnagar–gross–krook collision model for lattice boltzmann method-based large eddy simulation*. Journal of Turbulence, vol. 19, no. 11, pages 1051–1076, 2019.
- [Jacob *et al.* 2021] Jérôme Jacob, Lucie Merlier and Felix Marlow. *Lattice Boltzmann Method-Based Simulations of Pollutant Dispersion and Urban Physics*. pages 1–24, 2021.
- [Jänicke *et al.* 2021] Britta Jänicke, Dragan Milošević and Suneja Manavvi. *Review of user-friendly models to improve the urban micro-climate*. Atmosphere, vol. 12, no. 10, pages 1–22, 2021.
- [Jarvis 1976] P Jarvis. *The Interpretation of the Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in the Field*. the Royal Society, vol. 273, pages 593–610, 1976.
- [Kanda *et al.* 2007] M. Kanda, M. Kanega, T. Kawai, R. Moriwaki and H. Sugawara. *Roughness lengths for momentum and heat derived from outdoor urban scale models*. Journal of Applied Meteorology and Climatology, vol. 46, no. 7, pages 1067–1079, 2007.
- [Kim *et al.* 2018] Youngseob Kim, You Wu, Christian Seigneur and Yelva Roustan. *Multi-scale modeling of urban air pollution : Development and application of a Street-in-Grid model (v1.0) by coupling MUNICH (v1.0) and Polair3D (v1.8.1)*. Geoscientific Model Development, vol. 11, no. 2, pages 611–629, 2018.
- [Knoerr & Gay 1965] K. R. Knoerr and L.W. Gay. *Tree Leaf Energy Balance*. Ecological Society of America, vol. 46, no. 1, pages 17–24, 1965.
- [Kobayashi & Morikawa 2000] Sadanori Kobayashi and Kazuyoshi Morikawa. *Convective heat transfer coefficient of rooftop surface in downward heat flow*. J. Archit. Plann. Environ., vol. 536, pages 21–27, 2000.
- [Krayenhoff *et al.* 2014] E. S. Krayenhoff, A. Christen, A. Martilli and T. R. Oke. *A Multi-layer Radiation Model for Urban Neighbourhoods with Trees*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 149, no. 3, pages 139–178, 2014.
- [Krüger *et al.* 2017] Timm Krüger, Halim Kusumaatmaja, Alexandr Kuzmin, Orest Shardt, Goncalo Silva and Erlend Magnus Viggen. *The Lattice Boltzmann Method, Principles and Practice*. Springer édition, 2017.
- [Lac *et al.* 2018] Christine Lac, Jean Pierre Chaboureau, Valéry Masson, Jean Pierre Pinty, Pierre Tulet, Juan Escobar, Maud Leriche, Christelle Barthe, Benjamin Aouizerats, Clotilde Augros, Pierre Aumond, Franck Auguste, Peter Bechtold, Sarah Berthet, Soline Bielli, Frédéric Bosseur, Olivier Caumont, Jean Martial Cohard, Jeanne Colin, Fleur Couvreur, Joan Cuxart, Gaëlle Delautier, Thibaut Dauhut, Véronique Ducrocq, Jean Baptiste Filippi, Didier Gazen, Olivier Geoffroy, François Gheusi, Rachel Honnert, Jean Philippe Lafore, Cindy Lebeau
-

- Brossier, Quentin Libois, Thibaut Lunet, Céline Mari, Tomislav Maric, Patrick Mascart, Maxime Mogé, Gilles Molinié, Olivier Nuissier, Florian Pantillon, Philippe Peyrillé, Julien Pergaud, Emilie Perraud, Joris Pianezze, Jean Luc Redelsperger, Didier Ricard, Evelyne Richard, Sébastien Riette, Quentin Rodier, Robert Schoetter, Léo Seyfried, Joël Stein, Karsten Suhre, Marie Taufour, Odile Thouron, Sandra Turner, Antoine Verrelle, Benoît Vié, Florian Visentin, Vincent Vionnet and Philippe Wautelet. *Overview of the Meso-NH model version 5.4 and its applications*. Geoscientific Model Development, vol. 11, no. 5, pages 1929–1969, 2018.
- [Lauzet *et al.* 2019] Nicolas Lauzet, Auline Rodler, Marjorie Musy, Marie Hélène Azam, Sihem Guernouti, Dasaraden Mauree and Thibaut Colinart. *How building energy models take the local climate into account in an urban context – A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 116, 2019.
- [Le Bras & Masson 2015] Julien Le Bras and Valery Masson. *A fast and spatialized urban weather generator for long-term urban studies at the city-scale*. Frontiers in Earth Science, vol. 3, pages 1–12, 2015.
- [Lee & Park 2008] Sang Hyun Lee and Soon Ung Park. *A vegetated urban canopy model for meteorological and environmental modelling*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 126, pages 73–102, 2008.
- [Lejeune 2010] Michel Lejeune. *Statistique, La théorie et ses applications*. 2010.
- [Leroy *et al.* 2021] Marie Leroy, Héloïse Marie, Karine Lapray, Marjorie Musy, Auline Rodler and Sihem Guernouti. *Rafraîchir les villes, des solutions variées*. ADEME, 2021.
- [Lienhard IV & Lienhard V 2017] John H. Lienhard IV and John H. Lienhard V. *A HEAT TRANSFER TEXTBOOK*, fourth edition. 2017.
- [Lindberg *et al.* 2008] Fredrik Lindberg, Björn Holmer and Sofia Thorsson. *SOLWEIG 1.0 - Modelling spatial variations of 3D radiant fluxes and mean radiant temperature in complex urban settings*. International Journal of Biometeorology, vol. 52, no. 7, pages 697–713, 2008.
- [Lindberg *et al.* 2018] Fredrik Lindberg, C. S.B. Grimmond, Andrew Gabey, Bei Huang, Christoph W. Kent, Ting Sun, Natalie E. Theeuwes, Leena Järvi, Helen C. Ward, I. Capel-Timms, Yuanyong Chang, Per Jonsson, Niklas Krave, Dongwei Liu, D. Meyer, K. Frans G. Olofson, Jianguo Tan, Dag Wästberg, Lingbo Xue and Zhe Zhang. *Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP) : An integrated tool for city-based climate services*. Environmental Modelling and Software, vol. 99, no. October 2017, pages 70–87, 2018.
- [Litvak *et al.* 2017] Elizaveta Litvak, Heather R Mccarthy and Diane E Pataki. *A method for estimating transpiration of irrigated urban trees in California*. Landscape and Urban Planning, vol. 158, pages 48–61, 2017.
- [Loughner *et al.* 2012] Christopher P. Loughner, Dale J. Allen, Da Lin Zhang, Kenneth E. Pickering, Russell R. Dickerson and Laura Landry. *Roles of urban tree canopy and buildings in urban heat island effects : Parameterization and preliminary results*. Journal of Applied Meteorology and Climatology, vol. 51, no. 10, pages 1775–1793, 2012.
- [Loveday & Taki 1996] D. L. Loveday and A. H. Taki. *Convective heat transfer coefficients at a plane surface on a full-scale building facade*. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 39, no. 8, pages 1729–1742, 1996.

- [Maison *et al.* 2022a] Alice Maison, Cédric Flageul, Bertrand Carissimo, Andrée Tuzet and Karine Sartelet. *Parameterization of Horizontal and Vertical Transfers for the Street-Network Model MUNICH Using the CFD Model Code Saturne*. Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 13, no. 4, 2022.
- [Maison *et al.* 2022b] Alice Maison, Cédric Flageul, Bertrand Carissimo, Yunyi Wang, Andrée Tuzet and Karine Sartelet. *Parameterizing the aerodynamic effect of trees in street canyons for the street network model MUNICH using the CFD model Code Saturne*. Atmospheric Chemistry and Physics, vol. 22, no. 14, pages 9369–9388, 2022.
- [Marie *et al.* 2017] Héloïse Marie, Karine Lapray and Marjorie Musy. *Diagnostic de la surchauffe urbaine*. ADEME, 2017.
- [Masson *et al.* 2020] Valéry Masson, Wieke Heldens, Erwan Bocher, Marion Bonhomme, Bénédicte Bucher, Cornelia Burmeister, Cécile de Munck, Thomas Esch, Julia Hidalgo, Farah Kanani-Sühring, Yu Ting Kwok, Aude Lemonsu, Jean Pierre Lévy, Björn Maronga, Dirk Pavlik, Gwendall Petit, Linda See, Robert Schoetter, Nathalie Tornay, Athanasios Votsis and Julian Zeidler. *City-descriptive input data for urban climate models : Model requirements, data sources and challenges*. Urban Climate, vol. 31, no. December 2018, 2020.
- [Masson 2000] V Masson. *A physically-based scheme for the urban energy budget in atmospheric models*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 94, pages 357–397, 2000.
- [Matzarakis *et al.* 2010] Andreas Matzarakis, Frank Rutz and Helmut Mayer. *Modelling radiation fluxes in simple and complex environments : Basics of the RayMan model*. International Journal of Biometeorology, vol. 54, no. 2, pages 131–139, 2010.
- [Mauree *et al.* 2017] Dasaraden Mauree, Nadege Blond, Manon Kohler and Alain Clappier. *On the coherence in the boundary layer : Development of a Canopy Interface Model*. Frontiers in Earth Science, vol. 4, no. January, pages 1–12, 2017.
- [Mballo *et al.* 2021] S. Mballo, S. Herpin, M. Manteau, S. Demotes-Mainard and P. E. Bournet. *Impact of well-watered trees on the microclimate inside a canyon street scale model in outdoor environment*. Urban Climate, vol. 37, 2021.
- [Meili *et al.* 2020] Naika Meili, Gabriele Manoli, Elie Burlando Paolo Bou-zeid, Winston T L Chow, Andrew M Coutts, Edoardo Daly, Kerry A Nice, Matthias Roth, Nigel J Tapper, Erik Velasco and Enrique R Vivoni. *An urban ecohydrological model to quantify the effect of vegetation on urban climate and hydrology*. Geoscientific Model Development, vol. 13, pages 335–362, 2020.
- [Merlier 2016] Lucie Merlier. *On the interactions between urban structures and air flows : A numerical study of the effects of urban morphology on the building wind environment and the related building energy loads*. PhD thesis, INSA Lyon, 2016.
- [Métropole de Lyon] Métropole de Lyon. *Arbres d’alignement de la Métropole de Lyon*. <https://data.grandlyon.com/jeux-de-donnees/arbres-alignement-metropole-lyon/info>. Consulté le : 27/07/2023.
- [Mirsadeghi *et al.* 2013] M. Mirsadeghi, D. Cóstola, B. Blocken and J. L.M. Hensen. *Review of external convective heat transfer coefficient models in building energy simulation programs : Implementation and uncertainty*. Applied Thermal Engineering, vol. 56, no. 1-2, pages 134–151, 2013.

Bibliographie

- [Mirzaei 2015] Parham A Mirzaei. *Recent challenges in modeling of urban heat island §*. Sustainable Cities and Society, vol. 19, pages 200–206, 2015.
- [Molina-aiz & Valera 2012] Francisco Domingo Molina-aiz and Diego Luis Valera. *Determining the emissivity of the leaves of nine horticultural crops by means of infrared thermography*. Scientia Horticulturae, no. October 2017, 2012.
- [Monin & Obukhov 1954] A.S. Monin and A.M. Obukhov. *Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere*. Tr. Akad. Nauk SSSR Geophiz. Inst., vol. 24, pages 163–187, 1954.
- [Moradi 2021] Mohsen Moradi. *The Vertical City Weather Generator*. PhD thesis, University of Guelph, 2021.
- [Nagel *et al.* 2022] Tim Nagel, Robert Schoetter, Valéry Masson, Christine Lac and Bertrand Carissimo. *Numerical Analysis of the Atmospheric Boundary-Layer Turbulence Influence on Microscale Transport of Pollutant in an Idealized Urban Environment*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 184, no. 1, pages 113–141, 2022.
- [Noilhan & Planton 1989] J Noilhan and S Planton. *A simple parameterization of land surface processes for meteorological models*. Monthly Weather Review, vol. 117, pages 536–549, 1989.
- [Nunez & Oke 1977] Nunez and Oke. *Energy Balance of an Urban Canyon*. Journal of Applied Meteorology, vol. 16, pages 11–19, 1977.
- [Oke *et al.* 2017] T. R. Oke, G. Mills, A. Christen and J. A. Voogt. Urban climate. 2017.
- [Oke 1978] T. R. Oke. *Boundary layer climates*. Routledge, 1978.
- [Oke 1981] T. R. Oke. *CANYON GEOMETRY AND THE NOCTURNAL URBAN HEAT ISLAND : COMPARISON OF SCALE MODEL*. vol. 1, pages 237–254, 1981.
- [ONU 2018] *Revision of the world urbanization prospects*. Technical report, ONU, 2018.
- [Overby *et al.* 2016] Matthew Overby, Peter Willemsen, Brian N. Bailey, Scot Halverson and Eric R. Pardyjak. *A rapid and scalable radiation transfer model for complex urban domains*. Urban Climate, vol. 15, pages 25–44, 2016.
- [Palme & Salvati 2021] Massimo Palme and Agnese Salvati. *Urban Microclimate Modelling for Confort Energy Studies*. Springer Cham, 2021.
- [Pigeon *et al.* 2007] G Pigeon, D. Legain, P. Durand and V Masson. *Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France)*. International Journal of Climatology, vol. 27, pages 1969–1981, 2007.
- [Pilage 2007] Olivier Pilage. *Evolution de la température d'une couche d'enrobé bitumineux nouvellement posée*. Centre de Recherches Routières, 2007.
- [Poole *et al.* 1995] Eugene L. Poole, Michael A. Heroux, Pravin Vaidya and Anil Joshi. *Performance of iterative methods in ANSYS on cray parallel/vector supercomputers*. Computing Systems in Engineering, vol. 6, no. 3, pages 251–259, 1995.
- [Redon 2017] Emilie Redon. *Modélisation de la végétation urbaine comme régulateur thermique*. PhD thesis, Université de Toulouse, 2017.
- [Ribeiro *et al.* 2021] I. Ribeiro, A. Martilli, M. Falls, A. Zonato and G. Villalba. *Highly resolved WRF-BEP/BEM simulations over Barcelona urban area with LCZ*. Atmospheric Research, vol. 248, 2021.

- [Rochard *et al.* 2015] Ulrich Rochard, Santhiah Shanthirablan and Camille Brejon. *Bâtiments résidentiels : Typologie du parc existant et solutions exemplaires pour la rénovation énergétique en France*. pages 1–119, 2015.
- [Rockel *et al.* 2008] Burkhard Rockel, Andreas Will and Andreas Hense. *The regional climate model COSMO-CLM (CCLM)*. Meteorologische Zeitschrift, vol. 17, no. 4, pages 347–348, 2008.
- [Rotach *et al.* 2005] R Rotach M W ans Vogt, C Bernhofer, E Batchvarova, A Christen, A Clappier, B Feddersen, G Martucci, H Mayer, V Mitev, T R Oke, E Parlow, H Richner, M Roth, D Ruffieux, J A Salmond, M Schatzmann and J A Voogt. *BUBBLE – an Urban Boundary Layer Meteorology Project*. Theoretical and Applied Climatology, vol. 81, pages 231–261, 2005.
- [Ryu *et al.* 2016] Young Hee Ryu, Elie Bou-Zeid, Zhi Hua Wang and James A. Smith. *Realistic Representation of Trees in an Urban Canopy Model*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 159, pages 193–220, 2016.
- [Salim *et al.* 2011] Salim Mohamed Salim, Riccardo Buccolieri, Andrew Chan and Silvana Di Sabatino. *Numerical simulation of atmospheric pollutant dispersion in an urban street canyon : Comparison between RANS and LES*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 99, no. 2-3, pages 103–113, 2011.
- [Salim *et al.* 2018] Mohamed H. Salim, K. Heinke Schlünzen, David Grawe, Marita Boettcher, Andrea M.U. Gierisch and Björn H. Fock. *The microscale obstacle-resolving meteorological model MITRAS v2.0 : Model theory*. Geoscientific Model Development, vol. 11, no. 8, pages 3427–3445, 2018.
- [Salizzoni *et al.* 2009] P Salizzoni, L Soulhac and P Mejean. *Street canyon ventilation and atmospheric turbulence*. Atmospheric Environment, vol. 43, no. 32, pages 5056–5067, 2009.
- [Salizzoni *et al.* 2011] Pietro Salizzoni, Massimo Marro, Lionel Soulhac, Nathalie Grosjean and Richard J. Perkins. *Turbulent Transfer Between Street Canyons and the Overlying Atmospheric Boundary Layer*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 141, no. 3, pages 393–414, 2011.
- [Santa *et al.* 2020] Giorgia Dalla Santa, Antonio Galgano, Raffaele Sassi, Matteo Cultrera, Paolo Scotton, Johannes Mueller, David Bertermann, Dimitrios Mendrinos, Riccardo Pasquali, Rodolfo Perego, Sebastian Pera, Eloisa Di, Giorgio Cassiani, Michele De Carli and Adriana Bernardi. *Geothermics An updated ground thermal properties database for GSHP applications*. Geothermics, vol. 85, no. May 2019, page 101758, 2020.
- [Santamouris *et al.* 2001] M. Santamouris, N. Papanikolaou, I. Livada, I. Koronakis, C. Georgakis, A. Argiriou and D. N. Assimakopoulos. *On the impact of urban climate on the energy consumption of building*. Solar Energy, vol. 70, no. 3, pages 201–216, 2001.
- [Sanusi & Livesley 2020] Ruzana Sanusi and Stephen J Livesley. *London Plane trees (Platanus x acerifolia) before, during and after a heatwave : Losing leaves means less cooling benefit*. Urban Forestry and Urban Greening, vol. 54, no. April, page 126746, 2020.
- [Saudreau *et al.* 2017] Marc Saudreau, Amélie Ezanic, Boris Adam, Robin Caillon, Pascal Walser and Sylvain Pincebourde. *Temperature heterogeneity over leaf surfaces : the contribution of the lamina microtopography*. Plant Cell and Environment, vol. 40, no. 10, pages 2174–2188, 2017.

Bibliographie

- [Schoetter *et al.* 2020] Robert Schoetter, Yu Ting Kwok, Cécile De Munck, Kevin Ka Lun Lau, Wai Kin Wong and Valéry Masson. *Multi-layer coupling between SURFEX-TEB-v9.0 and Meso-NH-v5.3 for modelling the urban climate of high-rise cities*. Geoscientific Model Development, vol. 13, no. 11, pages 5609–5643, 2020.
- [Shu *et al.* 2020] Chang Shu, Liangzhu (Leon) Wang and Mohammad Mortezaadeh. *Dimensional analysis of Reynolds independence and regional critical Reynolds numbers for urban aerodynamics*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 203, no. May, page 104232, 2020.
- [Skamarock *et al.* 2005] W. C. Skamarock, J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, W. Wang and J. G. Powers. *A description of the advanced research WRF version 2*. no. June, page 100, 2005.
- [Soulhac *et al.* 2008] Lionel Soulhac, Richard J. Perkins and Pietro Salizzoni. *Flow in a street canyon for any external wind direction*. Boundary-Layer Meteorology, vol. 126, no. 3, pages 365–388, 2008.
- [Soulhac *et al.* 2009] L. Soulhac, V. Garbero, P. Salizzoni, P. Mejean and R. J. Perkins. *Flow and dispersion in street intersections*. Atmospheric Environment, vol. 43, no. 18, pages 2981–2996, 2009.
- [Soulhac *et al.* 2011] Lionel Soulhac, Pietro Salizzoni, F. X. Cierco and Richard Perkins. *The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion ; part I, presentation of the model*. Atmospheric Environment, vol. 45, no. 39, pages 7379–7395, 2011.
- [Soulhac *et al.* 2017] L. Soulhac, C. V. Nguyen, P. Volta and P. Salizzoni. *The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion. PART III : Validation against NO₂ yearly concentration measurements in a large urban agglomeration*. Atmospheric Environment, vol. 167, pages 377–388, 2017.
- [Soulhac 2000] Lionel Soulhac. *Modélisation de la dispersion atmosphérique à l'intérieur de la canopée urbaine*. PhD thesis, Ecole Centrale de Lyon, 2000.
- [Steuri *et al.* 2020] Bettina Steuri, Steffen Bender and Jörg Cortekar. *Successful user-science interaction to co-develop the new urban climate model PALM-4U*. Urban Climate, vol. 32, no. January, page 100630, 2020.
- [Stewart & Oke 2012] I.D. Stewart and T.R. Oke. *Local Climate Zones for Urban Temperature Studies*. Bulletin of the American Meteorological Society, pages 1880–1900, 2012.
- [Stewart 1988] J. B. Stewart. *Modelling surface conductance of pine forest*. Agricultural and Forest Meteorology, vol. 43, no. 1, pages 19–35, 1988.
- [Stull 1988] Roland B. Stull. *An introduction to boundary layer meteorology*. 1988.
- [Summers 1964] P. Summers. *An urban ventilation model applied to Montreal*. PhD thesis, McGill University Montreal, 1964.
- [Tabor & Baba-ahmadi 2010] G R Tabor and M H Baba-ahmadi. *Fluids Inlet conditions for large eddy simulation : A review*. Computers and Fluids, vol. 39, no. 4, pages 553–567, 2010.
- [Tang *et al.* 2021] Yihao Tang, Ting Sun, Zhiwen Luo, Hamidreza Omidvar, Natalie Theeuwes, Xiaoxiong Xie, Jie Xiong, Runming Yao and Sue Grimmond. *Urban meteorological forcing data for building energy simulations*. Building and Environment, vol. 204, no. May, page 108088, 2021.

- [Techniroute] Techniroute. <https://techniroute.fr/vos-routes/>. Consulté le : 27/07/2023.
- [Theeuwes *et al.* 2014] N. E. Theeuwes, G. J. Steeneveld, R. J. Ronda, B. G. Heusinkveld, L. W. A. van Hove and A. A. M. Holtslag. *Seasonal dependence of the urban heat island on the street canyon aspect ratio*. no. October, pages 2197–2210, 2014.
- [Theeuwes *et al.* 2019] Natalie E. Theeuwes, Reinder J. Ronda, Ian N. Harman, Andreas Christen and C. Sue B. Grimmond. *Parametrizing Horizontally-Averaged Wind and Temperature Profiles in the Urban Roughness Sublayer*. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 173, no. 3, pages 321–348, 2019.
- [Toesca *et al.* 2022] Adrien Toesca, Damien David, André Kuster, Michel Lussault and Kévy Johanne. *An urban thermal tool chain to simulate summer thermal comfort in passive urban buildings*. *Building and Environment*, vol. 215, no. December 2021, 2022.
- [Tremeac *et al.* 2012] Brice Tremeac, Pierre Bousquet, Cecile de Munck, Gregoire Pigeon, Valery Masson, Colette Marchadier, Michele Merchat, Pierre Poeuf and Francis Meunier. *Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures*. *Applied Energy*, vol. 95, pages 102–110, 2012.
- [Trnsys] Trnsys. <https://www.trnsys.com/>. Consulté le : 27/07/2023.
- [Tuzet *et al.* 2003] A Tuzet, A Perrier and R Leuning. *A coupled model of stomatal conductance , photosynthesis*. *Plant, Cell and Environment*, vol. 26, pages 1097–1116, 2003.
- [Viabilité hivernale] Viabilité hivernale. *La température de surface*. <https://www.viabilite-hivernale.developpement-durable.gouv.fr/la-temperature-de-surface-a4134.html>. Consulté le : 27/07/2023.
- [Vinet 2010] Jérôme Vinet. *Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain . Caractérisation de l ’ impact de l ’ eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs*. PhD thesis, Université de Nantes, 2010.
- [Wang & Akbari 2016] Yupeng Wang and Hashem Akbari. *The effects of street tree planting on Urban Heat Island mitigation in Montreal*. *Sustainable Cities and Society*, vol. 27, no. 2016, pages 122–128, 2016.
- [Wang *et al.* 2013] Zhi Hua Wang, Elie Bou-Zeid and James A. Smith. *A coupled energy transport and hydrological model for urban canopies evaluated using a wireless sensor network*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 139, pages 1643–1657, 2013.
- [Wang *et al.* 2021] Chenghao Wang, Zhi-hua Wang and Young-hee Ryu. *A single-layer urban canopy model with transmissive radiation exchange between trees and street canyons*. *Building and Environment*, vol. 191, 2021.
- [Wang 2012] Weiguo Wang. *An Analytical Model for Mean Wind Profiles in Sparse Canopies*. *Boundary-Layer Meteorology*, vol. 142, no. 3, pages 383–399, 2012.
- [Ward *et al.* 2016] H. C. Ward, S. Kotthaus, L. Järvi and C. S.B. Grimmond. *Surface Urban Energy and Water Balance Scheme (SUEWS) : Development and evaluation at two UK sites*. *Urban Climate*, vol. 18, pages 1–32, 2016.
- [Wilhelm *et al.* 2018] S. Wilhelm, J. Jacob and P. Sagaut. *An explicit power-law-based wall model for lattice Boltzmann method-Reynolds-averaged numerical simulations of the flow around airfoils*. *Physics of Fluids*, vol. 30, no. 6, 2018.

Bibliographie

- [Wujeska-Klaue & Pfautsch 2020] Agnieszka Wujeska-Klaue and Sebastian Pfautsch. *The best Urban trees for daytime cooling leave nights slightly warmer*. *Forests*, vol. 11, no. 9, 2020.
- [Yamada 1975] T. Yamada. *On the Similarity Functions A, B and C of the Planetary Boundary Layer*. *Journal of the atmospheric sciences*, pages 781–793, 1975.
- [Yao *et al.* 2011] Runming Yao, Qing Luo and Baizhan Li. *A simplified mathematical model for urban microclimate simulation*. *Building and Environment*, vol. 46, pages 253–265, 2011.
- [Yao *et al.* 2015] Runming Yao, Qing Luo, Zhiwen Luo, Lai Jiang and Yu Yang. *An integrated study of urban microclimates in Chongqing, China : Historical weather data, transverse measurement and numerical simulation*. *Sustainable Cities and Society*, vol. 14, no. 1, pages 187–199, 2015.
- [Zheng & Yang 2021] Xing Zheng and Jiachuan Yang. *CFD simulations of wind flow and pollutant dispersion in a street canyon with traffic flow : Comparison between RANS and LES*. *Sustainable Cities and Society*, vol. 75, no. August, page 103307, 2021.
- [Zheng *et al.* 2020] X. Zheng, H. Montazeri and B. Blocken. *CFD simulations of wind flow and mean surface pressure for buildings with balconies : Comparison of RANS and LES*. *Building and Environment*, vol. 173, no. February, page 106747, 2020.
- [Zheng *et al.* 2021] X. Zheng, M. Montazeri and B. Blocken. *Large-eddy simulation of pollutant dispersion in generic urban street canyons : guidelines for domain size*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 211, no. October 2020, page 104527, 2021.

Annexe A

Structure du code de MATHIS

MATHIS est développé dans le langage orienté objet python. Sa structure est représentée sur la Figure A.1.

Trois étapes de calcul peuvent être distinguées. Tout d'abord, les grandeurs géométriques sont calculées une seule fois, lors de l'initialisation du domaine étudié. Parmi ces grandeurs, on peut citer les facteurs de forme des différents éléments.

Ensuite, à chaque pas de temps, certaines grandeurs peuvent être calculées explicitement. Cela correspond à la zone supérieure de la Figure A.1. Le prétraitement météorologique peut ainsi être appliqué indépendamment du reste du code. Il fournit la vitesse de friction, la longueur d'Obukhov et la hauteur de CLU, qui sont nécessaires au calcul de l'écoulement dans le domaine. Par ailleurs, les flux solaires peuvent également être déterminés indépendamment des autres grandeurs à chaque pas de temps.

Enfin, une boucle itérative est définie afin de déterminer les grandeurs interdépendantes : flux infrarouges, conductifs, convectifs, latent, advecté et diffusé, et températures de surface et d'air. Elle correspond à la zone inférieure de la Figure A.1.

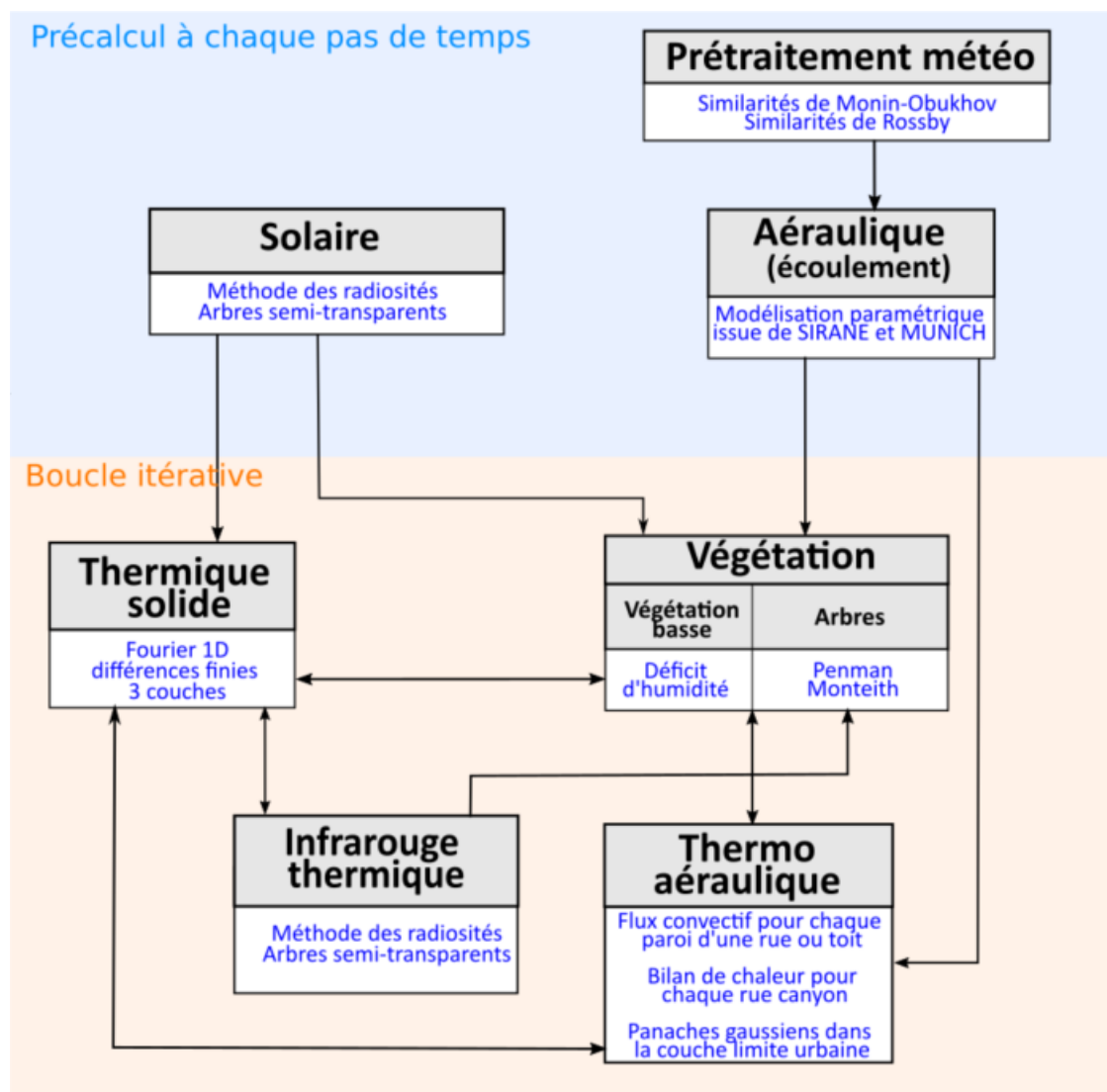


FIGURE A.1 – Structure du code de MATHIS

Annexe B

Maillages dans la configuration D

Les maillages choisis dans la configuration D sont présentés sur la Figure B.1.

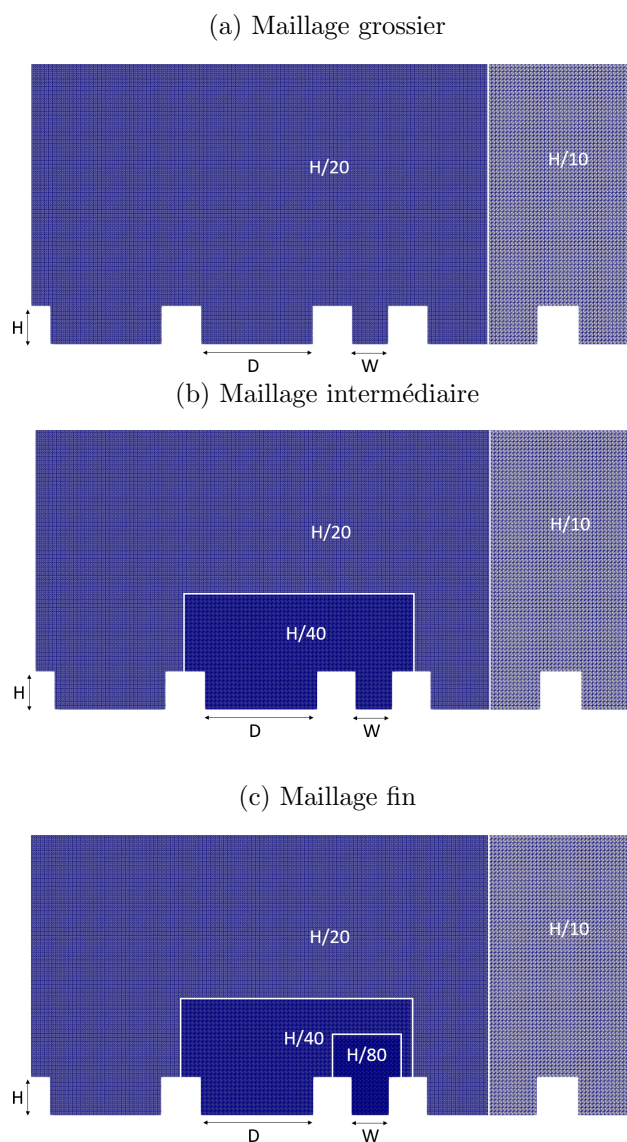


FIGURE B.1 – Maillages choisis pour les simulations dans la configuration D

Annexe C

Erreurs d'interpolation pour le calcul des transmittances

De manière à estimer les erreurs d'interpolation dans la base de données pour les transmittances τ_{mm} , τ_{sc} et τ_{ms} ou τ_{mc} , cent cas ont été choisis aléatoirement. Pour cela, six paramètres ont variés, entre les bornes suivantes :

- La hauteur des murs H , prise entre 5m et 50m
- La largeur de la rue W , prise entre 5m et 50m
- Le LAD , pris entre 0,1 et 5
- La hauteur minimum du houppier $H_{a,min}$, prise entre 0 et 5m
- La hauteur maximum du houppier $H_{a,max}$, prise entre 1 et 20m, et toujours supérieure à $H_{a,min}$.
- La fraction de recouvrement horizontale f_a , prise entre 0,1 et 1.

Les erreurs obtenues pour chaque cas pour τ_{mm} , τ_{ms} ou τ_{mc} et τ_{sc} sont présentées sur les Figures C.2 et C.3. Elles sont également représentées graphiquement sur la Figure C.1.

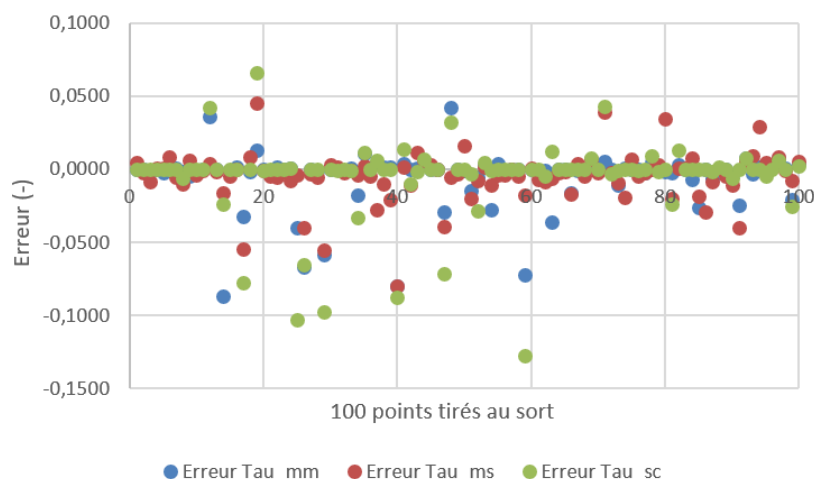


FIGURE C.1 – Représentation des erreurs d'interpolation des transmittances pour les 100 cas aléatoires détaillés sur les Figures C.2 et C.3

Annexe C : Erreurs d'interpolation pour le calcul des transmittances

	Paramètres						Interpolation BDD			Lancé rayons			Erreurs		
	H	W	H _{a,mm}	H _{a,max}	LAD	f _a	τ _{m,m}	τ _{m,s}	τ _{s,c}	τ _{m,m}	τ _{m,s}	τ _{s,c}	τ _{m,m}	τ _{m,s}	τ _{s,c}
51	10,84	36,03	2,70	7,92	1,55	0,84	0,297934	0,46111	0,1727	0,283404	0,44119	0,1698	-0,0145	-0,0199	-0,0029
52	32,04	19,38	4,01	7,80	0,72	0,79	0,783059	0,54815	0,3866	0,77776	0,54041	0,3581	-0,0053	-0,0077	-0,0286
53	38,98	17,32	2,40	3,40	4,39	0,25	0,969157	0,79719	0,759	0,972739	0,79913	0,7638	0,0036	0,0019	0,0048
54	8,04	45,66	2,54	8,04	4,05	0,49	0,58329	0,7001	0,5064	0,556143	0,68977	0,5060	-0,0271	-0,0103	-0,0004
55	10,19	47,42	0,03	4,72	3,55	0,85	0,398339	0,18253	0,1542	0,402579	0,17914	0,1541	0,0042	-0,0034	-0,0001
56	21,38	48,86	1,14	15,80	1,44	0,21	0,802704	0,80934	0,7855	0,80189	0,80551	0,7855	-0,0008	-0,0038	0,0000
57	43,75	39,82	2,46	16,54	1,75	0,10	0,944323	0,91184	0,899	0,94446	0,9119	0,8990	0,0001	0,0001	0,0000
58	45,49	13,95	1,20	6,95	4,53	0,36	0,932935	0,67637	0,6435	0,932897	0,67211	0,6435	0,0000	-0,0043	0,0000
59	7,90	47,08	4,82	7,90	1,64	0,66	0,665192	0,82079	0,4932	0,593444	0,80356	0,3661	-0,0717	-0,0172	-0,1271
60	48,13	41,41	0,00	13,41	2,26	0,79	0,669176	0,21501	0,2088	0,669374	0,21571	0,2088	0,0002	0,0007	0,0000
61	21,78	13,37	2,45	14,17	2,16	0,39	0,688376	0,71832	0,6122	0,687251	0,71187	0,6122	-0,0011	-0,0064	0,0000
62	47,30	11,47	4,60	7,13	2,53	0,38	0,943795	0,78241	0,6365	0,943179	0,77389	0,6318	-0,0006	-0,0085	-0,0047
63	6,96	37,93	3,37	4,37	0,35	0,34	0,860635	0,95403	0,907	0,824613	0,94818	0,9194	-0,0360	-0,0059	0,0125
64	20,35	39,33	1,40	7,48	3,90	0,24	0,860027	0,78263	0,7572	0,86033	0,78039	0,7572	0,0003	-0,0022	0,0000
65	40,55	34,88	2,61	18,76	2,98	0,11	0,927822	0,90478	0,8894	0,927907	0,90336	0,8894	0,0001	-0,0014	0,0000
66	11,21	42,38	1,86	11,21	2,22	0,76	0,278067	0,4216	0,2402	0,261793	0,40467	0,2401	-0,0163	-0,0169	0,0000
67	47,05	9,84	0,47	13,58	4,66	0,60	0,797176	0,44055	0,4007	0,796361	0,44427	0,4007	-0,0008	0,0037	0,0000
68	23,60	47,61	2,79	8,57	3,12	0,30	0,833681	0,75685	0,704	0,833887	0,75215	0,7039	0,0002	-0,0047	0,0000
69	20,26	22,88	0,50	1,50	0,66	0,11	0,989108	0,94419	0,9544	0,992131	0,95133	0,9622	0,0030	0,0071	0,0078
70	21,58	42,94	2,41	9,50	3,69	0,21	0,859074	0,81894	0,7854	0,859147	0,81668	0,7854	0,0001	-0,0023	0,0000
71	46,80	24,75	1,04	2,04	0,39	0,71	0,976761	0,77057	0,8059	0,982605	0,81011	0,8490	0,0058	0,0395	0,0431
72	49,19	37,16	1,35	7,71	0,90	0,12	0,973076	0,89087	0,8826	0,972938	0,88914	0,8800	-0,0001	-0,0017	-0,0026
73	10,28	35,01	3,54	7,52	3,29	0,55	0,570759	0,68225	0,4533	0,560151	0,6729	0,4529	-0,0106	-0,0094	-0,0004
74	43,31	15,44	4,09	18,10	3,01	0,69	0,644216	0,55047	0,3052	0,645233	0,53151	0,3052	0,0010	-0,0190	0,0000
75	39,79	5,55	1,07	13,38	1,21	0,39	0,863321	0,74537	0,6121	0,863593	0,75239	0,6120	0,0003	0,0070	-0,0001
76	39,13	18,52	3,43	9,51	1,62	0,24	0,926064	0,82307	0,7609	0,926281	0,81887	0,7605	0,0002	-0,0042	-0,0004
77	20,19	33,62	3,11	19,48	1,31	0,22	0,786354	0,83517	0,7777	0,783912	0,83346	0,7777	-0,0024	-0,0017	0,0000
78	31,99	18,13	0,64	2,03	1,44	0,41	0,966311	0,69258	0,7024	0,971354	0,69257	0,7121	0,0050	0,0000	0,0097
79	21,68	46,42	4,76	8,41	3,62	0,71	0,603683	0,49971	0,2918	0,603667	0,50293	0,2908	0,0000	0,0032	-0,0010
80	24,33	42,92	0,83	16,84	2,16	0,87	0,223869	0,19212	0,1315	0,222646	0,22683	0,1315	-0,0012	0,0347	0,0000
81	34,05	41,82	4,59	7,16	0,65	0,88	0,757869	0,50728	0,4534	0,755932	0,48759	0,4298	-0,0019	-0,0197	-0,0236
82	49,52	11,14	2,33	3,52	1,67	0,55	0,962134	0,68285	0,6009	0,965712	0,68354	0,6142	0,0036	0,0007	0,0132
83	48,86	35,08	1,04	2,75	0,85	0,19	0,988017	0,87576	0,8894	0,98825	0,87685	0,8893	0,0002	0,0011	-0,0002
84	20,05	49,93	2,67	19,36	3,68	0,70	0,322794	0,41858	0,3024	0,316159	0,42619	0,3024	-0,0066	0,0076	0,0000
85	5,82	39,67	0,65	5,82	4,93	0,76	0,27722	0,36006	0,2413	0,250992	0,34214	0,2413	-0,0262	-0,0179	0,0000
86	46,65	16,04	0,26	8,91	3,51	0,32	0,921645	0,72026	0,6768	0,921735	0,69121	0,6768	0,0001	-0,0290	0,0000
87	11,58	39,18	4,56	7,79	2,95	0,22	0,846458	0,88901	0,783	0,840511	0,88092	0,7816	-0,0059	-0,0081	-0,0014
88	27,96	43,25	1,90	2,90	0,56	0,10	0,988077	0,95937	0,9673	0,988404	0,96047	0,9688	0,0003	0,0011	0,0016
89	49,25	48,41	1,84	10,38	2,50	0,41	0,867013	0,62615	0,5939	0,867059	0,62169	0,5939	0,0000	-0,0045	0,0000
90	13,90	26,62	2,56	13,90	0,84	0,82	0,215624	0,44898	0,1878	0,212342	0,43806	0,1823	-0,0033	-0,0109	-0,0056
91	11,12	7,91	2,55	11,12	4,38	0,70	0,376859	0,64103	0,3011	0,35273	0,60114	0,3011	-0,0241	-0,0399	0,0000
92	26,96	43,78	0,70	1,70	3,97	0,27	0,963469	0,75059	0,7433	0,971302	0,7565	0,7513	0,0078	0,0059	0,0079
93	21,40	38,61	4,30	13,40	2,08	0,70	0,437381	0,49726	0,2972	0,434874	0,50695	0,2972	-0,0025	0,0097	0,0000
94	29,47	49,21	4,06	11,13	4,42	0,83	0,524303	0,33537	0,1668	0,525669	0,36443	0,1668	0,0014	0,0291	0,0000
95	47,21	22,83	0,73	4,23	2,86	0,68	0,919587	0,35803	0,3262	0,919291	0,36268	0,3214	-0,0003	0,0046	-0,0048
96	42,07	33,47	4,97	6,60	2,86	0,50	0,890055	0,62781	0,5317	0,891561	0,6299	0,5321	0,0015	0,0021	0,0004
97	20,09	32,21	0,38	1,38	3,51	0,32	0,956438	0,70475	0,7107	0,964485	0,71344	0,7173	0,0080	0,0087	0,0066
98	15,78	26,12	2,33	6,87	3,95	0,29	0,812826	0,76912	0,7052	0,813626	0,7688	0,7052	0,0008	-0,0003	0,0000
99	6,45	24,09	3,73	6,45	1,14	0,15	0,926953	0,9684	0,8968	0,906434	0,96076	0,8715	-0,0205	-0,0076	-0,0254
100	14,04	28,07	0,08	1,08	2,73	0,46	0,938176	0,58299	0,6141	0,942447	0,58892	0,6169	0,0043	0,0059	0,0027

FIGURE C.2 – Cas choisis aléatoirement sur lesquels sont comparés les transmittances interpolées dans la base de données et calculées avec de lancé de rayons avec 2 000 000 rayons. Cas 1 à 50.

Annexe C : Erreurs d'interpolation pour le calcul des transmittances

	Paramètres						Interpolation BDD			Lancé rayons			Erreurs		
	H	W	H _{2,mm}	H _{2,max}	LAD	f _a	τ _{mm}	τ _{ms}	τ _{sc}	τ _{mm}	τ _{ms}	τ _{sc}	τ _{mm}	τ _{ms}	τ _{sc}
51	10,84	36,03	2,70	7,92	1,55	0,84	0,297934	0,461111	0,1727	0,283404	0,441119	0,1698	-0,0145	-0,0199	-0,0029
52	32,04	19,38	4,01	7,80	0,72	0,79	0,783059	0,54815	0,3866	0,77776	0,54041	0,3581	-0,0053	-0,0077	-0,0286
53	38,98	17,32	2,40	3,40	4,39	0,25	0,969157	0,79719	0,759	0,972739	0,79913	0,7638	0,0036	0,0019	0,0048
54	8,04	45,66	2,54	8,04	4,05	0,49	0,58329	0,7001	0,5064	0,556143	0,68977	0,5060	-0,0271	-0,0103	-0,0004
55	10,19	47,42	0,03	4,72	3,55	0,85	0,398339	0,18253	0,1542	0,402579	0,17914	0,1541	0,0042	-0,0034	-0,0001
56	21,38	48,86	1,14	15,80	1,44	0,21	0,802704	0,80934	0,7855	0,80189	0,80551	0,7855	-0,0008	-0,0038	0,0000
57	43,75	39,82	2,46	16,54	1,75	0,10	0,944323	0,91184	0,899	0,94446	0,9119	0,8990	0,0001	0,0001	0,0000
58	45,49	13,95	1,20	6,95	4,53	0,36	0,932935	0,67637	0,6435	0,932897	0,67211	0,6435	0,0000	-0,0043	0,0000
59	7,90	47,08	4,82	7,90	1,64	0,66	0,665192	0,82079	0,4932	0,593444	0,80356	0,3661	-0,0717	-0,0172	-0,1271
60	48,13	41,41	0,00	13,41	2,26	0,79	0,669176	0,21501	0,2088	0,669374	0,21571	0,2088	0,0002	0,0007	0,0000
61	21,78	13,37	2,45	14,17	2,16	0,39	0,688376	0,71832	0,6122	0,687251	0,71187	0,6122	-0,0011	-0,0064	0,0000
62	47,30	11,47	4,60	7,13	2,53	0,38	0,943795	0,78241	0,6365	0,943179	0,77389	0,6318	-0,0006	-0,0085	-0,0047
63	6,96	37,93	3,37	4,37	0,35	0,34	0,860635	0,95403	0,907	0,824613	0,94818	0,9194	-0,0360	-0,0059	0,0125
64	20,35	39,33	1,40	7,48	3,90	0,24	0,860027	0,78263	0,7572	0,86033	0,78039	0,7572	0,0003	-0,0022	0,0000
65	40,55	34,88	2,61	18,76	2,98	0,11	0,927822	0,90478	0,8894	0,927907	0,90336	0,8894	0,0001	-0,0014	0,0000
66	11,21	42,38	1,86	11,21	2,22	0,76	0,278067	0,4216	0,2402	0,261793	0,40467	0,2401	-0,0163	-0,0169	0,0000
67	47,05	9,84	0,47	13,58	4,66	0,60	0,797176	0,44055	0,4007	0,796361	0,44427	0,4007	-0,0008	0,0037	0,0000
68	23,60	47,61	2,79	8,57	3,12	0,30	0,833681	0,75685	0,704	0,833887	0,75215	0,7039	0,0002	-0,0047	0,0000
69	20,26	22,88	0,50	1,50	0,66	0,11	0,989108	0,94419	0,9544	0,992131	0,95133	0,9622	0,0030	0,0071	0,0078
70	21,58	42,94	2,41	9,50	3,69	0,21	0,859074	0,81894	0,7854	0,859147	0,81668	0,7854	0,0001	-0,0023	0,0000
71	46,80	24,75	1,04	2,04	0,39	0,71	0,976761	0,77057	0,8059	0,982605	0,81011	0,8490	0,0058	0,0395	0,0431
72	49,19	37,16	1,35	7,71	0,90	0,12	0,973076	0,89087	0,8826	0,972938	0,88914	0,8800	-0,0001	-0,0017	-0,0026
73	10,28	35,01	3,54	7,52	3,29	0,55	0,570759	0,68225	0,4533	0,560151	0,6729	0,4529	-0,0106	-0,0094	-0,0004
74	43,31	15,44	4,09	18,10	3,01	0,69	0,644216	0,55047	0,3052	0,645233	0,53151	0,3052	0,0010	-0,0190	0,0000
75	39,79	5,55	1,07	13,38	1,21	0,39	0,863321	0,74537	0,6121	0,863593	0,75239	0,6120	0,0003	0,0070	-0,0001
76	39,13	18,52	3,43	9,51	1,62	0,24	0,926064	0,82307	0,7609	0,926281	0,81887	0,7605	0,0002	-0,0042	-0,0004
77	20,19	33,62	3,11	19,48	1,31	0,22	0,786354	0,83517	0,7777	0,783912	0,83346	0,7777	-0,0024	-0,0017	0,0000
78	31,99	18,13	0,64	2,03	1,44	0,41	0,966311	0,69258	0,7024	0,971354	0,69257	0,7121	0,0050	0,0000	0,0097
79	21,68	46,42	4,76	8,41	3,62	0,71	0,603683	0,49971	0,2918	0,603667	0,50293	0,2908	0,0000	0,0032	-0,0010
80	24,33	42,92	0,83	16,84	2,16	0,87	0,223869	0,19212	0,1315	0,222646	0,22683	0,1315	-0,0012	0,0347	0,0000
81	34,05	41,82	4,59	7,16	0,65	0,88	0,757869	0,50728	0,4534	0,755932	0,48759	0,4298	-0,0019	-0,0197	-0,0236
82	49,52	11,14	2,33	3,52	1,67	0,55	0,962134	0,68285	0,6009	0,965712	0,68354	0,6142	0,0036	0,0007	0,0132
83	48,86	35,08	1,04	2,75	0,85	0,19	0,988017	0,87576	0,8894	0,98825	0,87685	0,8893	0,0002	0,0011	-0,0002
84	20,05	49,93	2,67	19,36	3,68	0,70	0,322794	0,41858	0,3024	0,316159	0,42619	0,3024	-0,0066	0,0076	0,0000
85	5,82	39,67	0,65	5,82	4,93	0,76	0,27722	0,36006	0,2413	0,250992	0,34214	0,2413	-0,0262	-0,0179	0,0000
86	46,65	16,04	0,26	8,91	3,51	0,32	0,921645	0,72026	0,6768	0,921735	0,69121	0,6768	0,0001	-0,0290	0,0000
87	11,58	39,18	4,56	7,79	2,95	0,22	0,846458	0,88901	0,783	0,840511	0,88092	0,7816	-0,0059	-0,0081	-0,0014
88	27,96	43,25	1,90	2,90	0,56	0,10	0,988077	0,95937	0,9673	0,988404	0,96047	0,9688	0,0003	0,0011	0,0016
89	49,25	48,41	1,84	10,38	2,50	0,41	0,867013	0,62615	0,5939	0,867059	0,62169	0,5939	0,0000	-0,0045	0,0000
90	13,90	26,62	2,56	13,90	0,84	0,82	0,215624	0,44898	0,1878	0,212342	0,43806	0,1823	-0,0033	-0,0109	-0,0056
91	11,12	7,91	2,55	11,12	4,38	0,70	0,376859	0,64103	0,3011	0,35273	0,60114	0,3011	-0,0241	-0,0399	0,0000
92	26,96	43,78	0,70	1,70	3,97	0,27	0,963469	0,75059	0,7433	0,971302	0,7565	0,7513	0,0078	0,0059	0,0079
93	21,40	38,61	4,30	13,40	2,08	0,70	0,437381	0,49726	0,2972	0,434874	0,50695	0,2972	-0,0025	0,0097	0,0000
94	29,47	49,21	4,06	11,13	4,42	0,83	0,524303	0,33537	0,1668	0,525669	0,36443	0,1668	0,0014	0,0291	0,0000
95	47,21	22,83	0,73	4,23	2,86	0,68	0,919587	0,35803	0,3262	0,919291	0,36268	0,3214	-0,0003	0,0046	-0,0048
96	42,07	33,47	4,97	6,60	2,86	0,50	0,890055	0,62781	0,5317	0,891561	0,6299	0,5321	0,0015	0,0021	0,0004
97	20,09	32,21	0,38	1,38	3,51	0,32	0,956438	0,70475	0,7107	0,964485	0,71344	0,7173	0,0080	0,0087	0,0066
98	15,78	26,12	2,33	6,87	3,95	0,29	0,812826	0,76912	0,7052	0,813626	0,7688	0,7052	0,0008	-0,0003	0,0000
99	6,45	24,09	3,73	6,45	1,14	0,15	0,926953	0,9684	0,8968	0,906434	0,96076	0,8715	-0,0205	-0,0076	-0,0254
100	14,04	28,07	0,08	1,08	2,73	0,46	0,938176	0,58299	0,6141	0,942447	0,58892	0,6169	0,0043	0,0059	0,0027

FIGURE C.3 – Cas choisis aléatoirement sur lesquels sont comparés les transmittances interpolées dans la base de données et calculées avec de lancé de rayons avec 2 000 000 rayons. Cas 50 à 100.

Annexe D

Paramétrisation des surfaces urbaines et rurales avec les LCZ

La classification des surfaces en LCZ (Local Climate Zone) [Stewart & Oke 2012] propose 17 types de surfaces, en fonction de la densité et de la nature des éléments de surfaces.

Le Tableau D.1 permet d'estimer le lien entre le type de LCZ et les quatre paramètres utiles au bilan de surface :

- L'albédo (α) est directement donnée dans la publication d'origine pour chaque zone [Stewart & Oke 2012].
- L'émissivité (ϵ) est estimée à partir de [Oke *et al.* 2017] p 141.
- Le coefficient de stockage (C_{jour} ou C_{nuit}) qui représente la fraction du flux radiatif stocké, est estimé à partir de [Oke *et al.* 2017] p 175.
- La fraction de végétation (f_v) est estimée en fonction de la description des surfaces et des exemples donnés dans [Oke *et al.* 2017] p183.

	α	ϵ	C_{day}	C_{night}	f_v
LCZ 1	0.15	0.95	0.5	1.7	0.1
LCZ 2	0.15	0.95	0.4	1.5	0.1
LCZ 3	0.15	0.95	0.35	1.3	0.25
LCZ 4	0.17	0.93	0.33	1.2	0.3
LCZ 5	0.17	0.93	0.32	1.1	0.3
LCZ 6	0.17	0.93	0.3	0.9	0.6
LCZ 7	0.17	0.93	0.3	0.9	0.25
LCZ 8	0.17	0.93	0.35	1.3	0.25
LCZ 9	0.2	0.9	0.27	0.5	0.8
LCZ 10	0.17	0.93	0.35	1.3	0.25
LCZ A	0.2	0.9	0.27	0.5	1
LCZ B	0.2	0.9	0.25	0.2	1
LCZ C	0.2	0.9	0.2	0	0.7
LCZ D	0.2	0.9	0.2	0	0.9

TABLE D.1 – Paramétrisation du bilan de surface en fonction des LCZ (α : albédo, ϵ : émissivité, C_{jour} : coefficient de stockage diurne, C_{nuit} : coefficient de stockage nocturne, f_v : fraction de végétation)

Annexe E

Hauteur de la couche limite urbaine nocturne

Le modèle de [Summers 1964] se base sur quatre hypothèses :

- La vitesse en amont de la ville u_{met} est uniforme verticalement
- Le vent n'est pas modifié par la ville $u_{met} = u_{urb}$
- La CLU est parfaitement mélangée

$$\frac{\partial \theta_{urb}}{\partial z} = 0 \quad (\text{E.1})$$

- Le profil vertical de température potentielle rurale est linéaire

$$\theta_{met}(z) = \theta_{0,met} + \alpha z \quad (\text{E.2})$$

Avec : $\begin{cases} \theta_{0,met} [K] : \text{La température potentielle rurale au niveau du sol} \\ \alpha = \frac{\partial \theta_{met}}{\partial z}. \end{cases}$

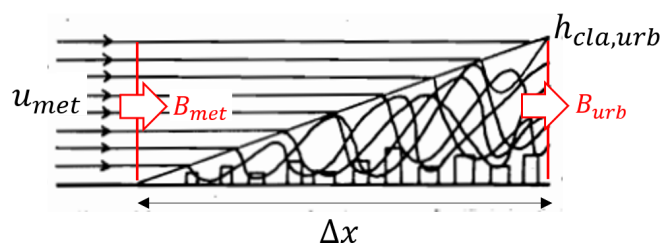


FIGURE E.1 – Hypothèse et dénominations pour le modèle de Summers. Adapté de [Summers 1964].

Si l'on se place en 2D, les flux traversant les deux lignes verticales B_{met} et B_{urb} (en W/m) sur la Figure E.1 sont exprimés par :

$$B_{met} = \rho c_p u_{met} \int_0^{h_{cla,urb}} \theta_{met}(z) dz \quad (\text{E.3})$$

$$B_{urb} = \rho c_p u_{urb} \theta_{urb} h_{cla,urb} \quad (\text{E.4})$$

En remplaçant $\theta_{met}(z)$ par son expression (équation E.2), puis en intégrant, on obtient :

$$B_{met} = \rho c_p u_{met} \left(\theta_{0,met} h_{cla,urb} + \frac{\alpha h_{cla,urb}^2}{2} \right) \quad (E.5)$$

Ensuite, en utilisant le fait que $\theta_{urb} = \theta_{met}(h_{cla,urb})$, on peut écrire :

$$B_{urb} = \rho c_p u_{urb} h_{cla,urb} (\theta_{0,met} + \alpha h_{cla,urb}) \quad (E.6)$$

Et donc :

$$B_{urb} - B_{met} = \rho c_p u_{met} h_{cla,urb} \alpha \frac{h_{cla,urb}^2}{2} \quad (E.7)$$

Si la chaleur supplémentaire entre les plans B_{met} et B_{urb} provient de la ville, on peut écrire :

$$B_{urb} - B_{met} = \int_0^x Q_{H,urb}(x) dx \quad (E.8)$$

Avec $Q_{H,urb}(x)$ [W/m] la densité de flux provenant de la ville.

Enfin, si l'on considère un flux de chaleur uniforme sur la ville, on peut intégrer cette dernière équation, ce qui permet d'exprimer la hauteur de CLU nocturne :

$$h_{cla,urb} = \sqrt{\frac{2Q_{H,urb}\Delta x}{u_{met} \frac{\partial \theta_{met}}{\partial z}} \rho c_p} \quad (E.9)$$

La pente du profil vertical de température potentielle au site météo est supposée uniforme entre le sol et une hauteur de 60 m. Cette hypothèse a été préférée par rapport à calculer une dérivée de l'équation 6.4 car c'est celle qui a été faite également dans la thèse de [Summers 1964] pour valider cette équation.

Annexe F

Coefficients de corrélation

Le coefficient de corrélation linéaire (Pearson) entre la série $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ et la série $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ est défini par :

$$r^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{F.1})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} \bar{x} : \text{La moyenne de la série } X \\ \bar{y} : \text{La moyenne de la série } Y \\ N : \text{Le nombre d'éléments dans chaque série.} \end{cases}$$

Les corrélations étant calculées séparément pour les deux orientations des rues, et le domaine étant composé de 65 rues Nord-Sud et de 65 rues Est-Ouest, $N = 65$. Ce coefficient r^2 représente le pourcentage de variabilité de la variable Y expliqué la variable X avec un modèle linéaire. Afin de déterminer si les résultats sont significatifs, on calcule f par :

$$f = \frac{(N - 2)r^2}{1 - r^2} \quad (\text{F.2})$$

Pour déterminer la significativité de la corrélation linéaire, le paramètre f doit être comparé à une valeur critique $F_p^{(\nu_1, \nu_2)}$, lu dans une table numérique décrivant les quantiles de la loi de Fisher-Snedecor. Le paramètre p apparaissant au dénominateur définit au risque bilatéral accepté. Le risque bilatéral choisi est de 5 %, ce qui correspond à $p = 1 - 0,05/2 = 0,975$. Les paramètres ν_1 et ν_2 sont nommés degrés de liberté. ν_1 est déterminé par le nombre de variables à expliquer, soit 1 dans notre cas. ν_2 dépend du nombre d'éléments dans les séries X et Y, selon $\nu_2 = N - 2$. Ainsi, la valeur critique est :

$$F_{0,975}^{(1;63)} = 5,26 \quad (\text{F.3})$$

Pour chaque coefficient de corrélation présenté dans le chapitre 7, les valeurs de f sont comparées à $F_{0,975}^{(1;63)}$ pour déterminer la significativité des coefficients de corrélation dans le Tableau F.1.

Figure	Orientation rues	r^2	f	$F_{0,975}^{(1;63)}$	Conclusion
Figure 7.9	Est-Ouest	0,95	1157	5,26	$f > F_{0,975}^{(1;63)}$ significatif
Figure 7.9	Nord-Sud	0,95	1268	5,26	$f > F_{0,975}^{(1;63)}$ significatif
Figure 7.10a	Est-Ouest	0,49	60	5,26	$f > F_{0,975}^{(1;63)}$ significatif
Figure 7.10a	Nord-Sud	0,45	51	5,26	$f > F_{0,975}^{(1;63)}$ significatif
Figure 7.10b	Est-Ouest	0,79	233	5,26	$f > F_{0,975}^{(1;63)}$ significatif
Figure 7.10b	Nord-Sud	0,78	229	5,26	$f > F_{0,975}^{(1;63)}$ significatif
Figure 7.11a	Est-Ouest	0,14	10	5,26	$f > F_{0,975}^{(1;63)}$ significatif
Figure 7.11a	Nord-Sud	0,1	7	5,26	$f > F_{0,975}^{(1;63)}$ significatif
Figure 7.11b	Est-Ouest	0,51	64	5,26	$f > F_{0,975}^{(1;63)}$ significatif
Figure 7.11b	Nord-Sud	0,63	108	5,26	$f > F_{0,975}^{(1;63)}$ significatif
Figure 7.22a	Est-Ouest	0,78	220	5,26	$f > F_{0,975}^{(1;63)}$ significatif
Figure 7.22a	Nord-Sud	0,78	229	5,26	$f > F_{0,975}^{(1;63)}$ significatif
Figure 7.24b	Est-Ouest	0,67	125	5,26	$f > F_{0,975}^{(1;63)}$ significatif
Figure 7.24b	Nord-Sud	0,13	10	5,26	$f > F_{0,975}^{(1;63)}$ significatif

TABLE F.1 – Significativité des coefficients de corrélation présentées dans le chapitre 7



FOLIO ADMINISTRATIF

THESE DE L'INSA LYON, MEMBRE DE L'UNIVERSITE DE LYON.

NOM : SORIANO

DATE de SOUTENANCE : 18/12/2023

Prénoms : Julie

TITRE : Modélisation de la distribution spatiale de l'îlot de chaleur urbain à l'échelle locale : mise en place et évaluation d'une approche par réseau de rues

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2023ISAL0107

Ecole doctorale : Mécanique, Energétique, Génie civil, Accoustique (MEGA)

Spécialité : Thermique Energétique

RESUME :

L'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur encourage la prise en compte de l'îlot de chaleur urbain dans les choix politiques d'aménagement urbain.

Dans ce contexte, la modélisation du microclimat urbain est un outil précieux pour évaluer différentes configurations urbaines. Pour étudier le confort d'été, deux types de modèles sont souvent utilisés : des modèles détaillés ayant recours à la CFD, ou bien des modèles de canopée urbaine qui représentent un motif urbain répété avec les caractéristiques moyennes d'un quartier. Dans cette thèse, un nouveau modèle se plaçant entre ces deux catégories en termes de précision et de temps de calcul est développé. Son objectif est de modéliser l'îlot de chaleur de canopée urbaine à l'échelle locale et sur une période de l'ordre d'une saison, en représentant explicitement les bâtiments.

Pour cela, une approche en réseau de rues est proposée, inspirée de modèles de dispersion de polluants, et notamment du modèle SIRANE. Elle consiste à utiliser un maillage zonal dans lequel chaque rue canyon correspond à une maille. Les intersections relient entre elles les différentes rues, formant un réseau. Le champ de température dans la couche limite urbaine est obtenu par un modèle de panaches gaussiens, détourné de son application classique de dispersion des polluants.

Une première partie du travail de thèse consiste au développement d'un modèle paramétrique aérodynamique, radiatif et thermique de rue canyon infinie, ayant vocation à être appliqué comme modèle de sous-maille sur chaque rue du réseau. Une attention particulière est donc apportée au compromis précision/temps de calcul. Une représentation paramétrique des arbres est également proposée et intègre leur impact sur les phénomènes aérodynamiques et radiatifs dans la rue, ainsi que l'évapotranspiration. Ce modèle est confronté à une semaine de mesures sur des rues expérimentales sans végétation (ClimaBat), montrant une erreur quadratique moyenne inférieure à 20 % de l'amplitude moyenne journalière. Enfin, la modélisation des arbres est comparée qualitativement à 24h de mesures sur une rue expérimentale arborée à Angers, montrant la cohérence des résultats concernant le modèle radiatif, mais des écarts sur l'évapotranspiration.

Dans une deuxième partie, un changement d'échelle est effectué et l'approche en réseau de rue est présentée en détail. Par ailleurs, afin de tenir compte des effets méso-échelle, un prétraitement des données météorologiques est développé. Son objectif est d'estimer la vitesse de friction, la stabilité atmosphérique et la hauteur de couche limite urbaine sur le quartier urbain simulé, à partir de mesures à une station météorologique péri-urbaine ou rurale. Il se base sur l'hypothèse d'une vitesse géostrophique uniforme et sur un bilan de surface paramétrique sur les zones rurale et urbaine. Des mesures à Bâle dans le cadre de la campagne BUBBLE ont permis de confronter le prétraitement météorologique à des mesures sur une période d'un mois. Des erreurs inférieures à 30 % de l'amplitude moyenne journalière ont été obtenues.

Finalement, le modèle complet est appliqué sur un quartier de Lyon, dans le but d'évaluer la cohérence des résultats obtenus. Dans l'ensemble, cette application a montré la capacité du modèle à représenter les phénomènes physiques attendus et son potentiel pour des études de microclimat urbain, bien que des développements supplémentaires soient encore nécessaires.

MOTS-CLÉS : Microclimat urbain, Îlot de chaleur urbain, Modélisation, Rue canyon, Réseau de rues, Arbres, Canopée urbaine, Couche limite urbain

Laboratoire (s) de recherche : Centre d'Energétique et de Thermique de Lyon (CETHIL UMR)

Directeur de thèse: Frédéric KUZNIK

Président de jury : Stéphane GINESTET

Composition du jury : Marjorie MUSY, Erwin FRANQUET, Stéphane GINESTET, Christophe MENEZO, Frédéric KUZNIK, Lionel SOULHAC, Lucie MERLIER, Damien DAVID

