







Thèse de doctorat

Université Paris-Est

Spécialité

Sciences et techniques de l'environnement

Soutenue publiquement par

Noëlie Daviau-Pellegrin

le 18 janvier 2016

Modélisation fine des échanges thermiques entre les bâtiments et l'atmosphère urbaine

Membres du jury :

Hassan BOUIA	: EnerBat, EDF R& D	- Invité
Bertrand CARISSIMO	: CEREA	- Directeur de thèse
Mohamed EL MANKIBI	: DGCB, ENTPE	- Rapporteur
Christian INARD	: LSIE, Univ. de La Rochelle	- Examinateur
Alberto MARTILLI	: CIEMAT	- Rapporteur
Maya MILLIEZ	: EnerBat, EDF R& D	- Invitée
Peter MOONEN	: LFC-R, Univ. Pau et Pays de l'Adour	- Examinateur
Jean-Jacques ROUX	: CETHIL, INSA de Lyon	- Examinateur

Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord à Bertrand Carissimo pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser cette thèse et pour l'encadrement et les conseils qu'il m'a prodigués tout au long de ces trois ans. Je remercie également chaleureusement Maya Milliez que j'ai vu à regret quitter le laboratoire pendant ma thèse, pour l'encadrement qu'elle a pu me procurer malgré ce contexte, pour sa relecture précieuse de mon travail ainsi que pour sa gentillesse et sa patience.

Je remercie de même Mohamed El Mankibi, Jean-Jacques Roux et Jean-Luc Hubert pour leur participation à mes comités de thèse, leur attention et tous leurs conseils. Je n'oublie bien sûr pas Gilles Plessis et Hassan Bouia de EnerBaT pour leur aide sur le logiciel BuildSysPro. Leur disponibilité et leur gentillesse ont largement contribué à l'aboutissement de mon travail numérique dans le temps imparti.

Je remercie tous les membres de ce jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'en faire partie et pour leur intérêt dans mes travaux. Parmi ceux que je n'ai pas encore cités, merci à Alberto Martilli qui a accepté d'être rapporteur tout en m'encourageant. Merci également à Peter Moonen pour sa gentillesse, son soutien et sa lecture très attentive de ma thèse. Mes remerciements vont de même à Christian Inard qui a accepté de présider ce jury de thèse. Enfin, je leur suis reconnaissante à tous pour les questions et remarques enrichissantes qu'ils ont soulevées sur mon travail.

Je remercie chaleureusement les personnes de EDF R&D qui m'ont aidée soit avec les outils et langages informatiques ou la dynamique des fluides atmosphérique, soit tout simplement par leur soutien : Yongfeng, Xiao, Arièle, Raphaël, Ali et Cédric, sans oublier Cyril Baudry et Yvan Fournier. Mes remerciements vont également aux membres du CEREA, notamment à Christian Seigneur et à Luc Musson-Genon pour m'avoir acceptée au sein du laboratoire, et à Véronique Dehlinger qui apporte une aide précieuse aux doctorants du laboratoire.

J'ai eu la chance de rencontrer Lucie et Adelya au cours de ces années de thèse. Merci à elles pour avoir su m'aider en m'écoutant et en m'éclairant sur mes travaux. Je remercie à nouveau Lucie pour sa relecture pointue de plusieurs parties de ce manuscrit, ses conseils techniques et son amitié.

Enfin je remercie mes lecteurs néophytes qui ont consacré de leur temps pour se plonger dans une lecture qui n'a pas dû être évidente pour eux : mes parents, Maëlle, Géraldine et Vanina. Et bien sûr, Pierre pour son soutien précieux, pour son écoute et ses remarques extérieures sur mes travaux et pour avoir accepté depuis mes phases de démoralisation jusqu'à mes soirées passées à rédiger.

Plus généralement, je remercie ma famille et mes amis qui m'ont entourée lors de ces années de thèse.

Table des matières

1 Atmosphère urbaine et énergétique des bâtiments : deux sujets complexes en interaction **7**

1.1 Étude de la couche limite atmosphérique 8

1.1.1 Caractéristiques de la couche limite atmosphérique 8

1.1.2 Lois atmosphériques appliquées à la couche de surface 11

1.1.3 Des phénomènes météorologiques à la canopée urbaine, une question d'échelle 12

1.2 Impacts des éléments de la canopée urbaine sur l'atmosphère et enjeux de leurs études 14

1.2.1 Le phénomène de l'îlot de chaleur urbain et ses implications . 14

1.2.2 Enjeux des propriétés physico-chimiques de l'air sur les populations 17

1.2.3 Interactions entre les aménagements urbains, les bâtiments et l'atmosphère 22

1.3 Énergétique du bâtiment 37

1.3.1 Le secteur du bâtiment en quelques chiffres 37

1.3.2 Effet du microclimat urbain sur le comportement énergétique du bâtiment 38

1.3.3 Conclusion 41

1.4 Conclusion et problématique 41

2 État de l'art sur la modélisation urbaine **43**

2.1 Modèles de climat urbain 44

2.1.1 Modèles de canopée urbaine complets 45

2.1.2 Modèles de canopée urbaine obtenus par couplage d'outils spécifiques . . . 47
2.1.3 Conclusion . . . 50
2.2 Modélisation énergétique du bâtiment . . . 51
2.2.1 Les transferts thermiques au niveau d'une paroi . . . 51
2.2.2 Forme matricielle généralisée du modèle d'état . . . 54
2.2.3 État de l'art sur les outils de modélisation du bâtiment . . . 55
2.2.4 Conclusion et choix d'un modèle de bâtiment . . . 67
2.3 Conclusion du chapitre . . . 68

3 Réalisation du couplage entre un outil de dynamique des fluides et un modèle de bâtiment 69

3.1 *Code_Saturne*, logiciel de dynamique des fluides intégrant des modèles de parois . . . 70
3.1.1 La CFD pour l'étude de l'atmosphère urbaine . . . 70
3.1.2 Présentation générale de *Code_Saturne* . . . 71
3.1.3 Modélisation atmosphérique dans *Code_Saturne* . . . 73
3.1.4 Lois de parois du logiciel . . . 75
3.1.5 Les modèles de parois de *Code_Saturne* . . . 76
3.1.6 Évolution de la température intérieure . . . 77
3.1.7 Comparaison des modèles de paroi de *Code_Saturne* avec SOLENE . . . 78
3.2 Choix du modèle de BuildSysPro et études préalables au couplage . . . 79
3.2.1 BuildSysPro : Création d'un modèle sous BuildSysPro et exploitation des matrices . . . 80
3.2.2 Gestion du format des matrices . . . 82
3.2.3 Résultats obtenus avec les matrices issues de BuildSysPro . . . 83
3.3 Réalisation du couplage entre *Code_Saturne* et BuildSysPro . . . 84
3.3.1 Présentation des méthodes possibles pour coupler des logiciels de thermique du bâtiment et de CFD . . . 84
3.3.2 Méthode de couplage de *Code_Saturne* avec BuildSysPro . . . 86
3.4 Conclusion du chapitre . . . 87

4 La campagne de mesures EM2PAU : dispositif expérimental et analyse des données 89

4.1 Présentation de la campagne de mesures EM2PAU 90

4.1.1 Contexte et environnement de EM2PAU 90

4.1.2 Le dispositif expérimental de EM2PAU 91

4.1.3 Simulations préparatoires de EM2PAU 94

4.2 Étude des mesures obtenues lors de la campagne 96

4.2.1 Étude des composantes horizontales du vent 97

4.2.2 La composante verticale du vent : information sur les effets dynamiques et thermiques dans le canyon 99

4.3 Conclusion du chapitre 112

5 Résultats des simulations et analyses 113

5.1 Les choix de modélisation 115

5.1.1 Création des maillages 115

5.1.2 Estimation des paramètres numériques 118

5.1.3 Paramètres de modélisation de *Code_Saturne* 120

5.1.4 Élaboration des profils météo 121

5.1.5 Sélection de situations propices aux effets thermiques 121

5.2 Étude des effets énergétiques des bâtiments sur les écoulements 124

5.2.1 Influence de la température des parois de bâtiment sur la température de l'air 125

5.2.2 Températures des parois et recirculation de l'air dans le canyon 128

5.2.3 Conclusion 136

5.3 Validation du couplage entre *Code_Saturne* et BuildSysPro : comparaison avec les simulations réalisées avec les températures de parois mesurées 137

5.3.1 Des températures de parois surestimées par le modèle couplé . 137

5.3.2 Analogies entre les simulations avec températures mesurées et couplage 139

5.3.3 Des phénomènes de recirculation de l'air similaires entre les simulations avec températures de surface forcées et couplage . 142

5.4 Bilan des simulations et comparaison détaillée avec les mesures 143
5.5 Études de sensibilité complémentaires 146
5.5.1 Opposition des effets dynamiques et thermiques dans un cas idéalisé, avec un vent perpendiculaire au canyon 146
5.5.2 Cas théorique avec un vent incident oblique 149
5.6 Conclusion du chapitre 151

A Calculs de physique atmosphérique de la VDI **157**

B Local Climate zone LCZ (Stewart and Oke, 2012) **161**

C Structure détaillée du couplage **163**
C.1 Initialisation du couplage 163
C.1.1 Étapes préalables 163
C.1.2 Définition des paramètres utilisés par la suite 163
C.1.3 Lecture générale des matrices 163
C.1.4 Repérage des positions des variables dans les matrices T, U et Y164
C.1.5 Création des fichiers temporaires 164
C.1.6 Bilan de la phase d'initialisation 165
C.2 La boucle du couplage 165
C.2.1 Résolution des équations du modèle de bâtiment 165
C.2.2 Le couplage dans *Code_Saturne* 166
C.2.3 Bilan 166

D Liste des logiciels utilisés **167**

Notations, symboles et abréviations

Caractères romains

A, dA	Surface ou surface élémentaire	m^2
C	Capacité thermique d'un élément	$\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}}$
C_p	Capacité massique d'un élément	$\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}}$
e	Épaisseur d'une paroi	m
R	Résistance thermique	$\mathrm{m^2 \cdot K \cdot W^{-1}}$
K	Conductance thermique	$\mathrm{W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}}$
p	Pression d'un fluide	Pa
r	Constante des gaz	$\mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$
T	Température	°C ou K
T_{ext}	Température de l'air extérieur	°C ou K
T_{int}	Température intérieure au bâtiment	°C ou K
T_s	Température de surface d'une paroi	°C ou K
V	Volume	m^3
g	Gravité	$\mathrm{m \cdot s{-}2}$
h_c	Coefficient de convection entre une surface et un fluide	$\mathrm{W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}}$
h_{ext}	Coefficient de convection extérieure	$\mathrm{W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}}$
h_{int}	Coefficient de convection intérieure	$\mathrm{W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}}$
Q_A	Flux de chaleur horizontal entre différents milieux	$\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
Q_c	Flux de chaleur convective	$\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
Q_{cond}	Flux de chaleur par conduction	$\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
Q_F	Flux de chaleur anthropogénique	$\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
Q_H	Flux de chaleur sensible	$\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
Q_{LE}	Flux de chaleur latente	$\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
Q_r	Flux radiatif	$\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
ΔQ_S	Chaleur stockée	$\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
S_{dir}	Rayonnement direct de courte longueur d'onde	$\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
S_{diff}	Rayonnement diffus de courte longueur d'onde	$\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
S^*	Flux net de rayonnement de courte longueur d'onde	$\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
$L\downarrow$	Rayonnement incident de grande longueur d'onde	$\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
L^*	Flux net de rayonnement de grande longueur d'onde	$\mathrm{W \cdot m^{-2}}$
$F_{i,j}$	Facteur de forme entre les surfaces i et j	-

u et v	Composantes horizontales du vent	$\mathrm{m \cdot s^{-1}}$
w	Composante verticale du vent	$\mathrm{m \cdot s^{-1}}$
z_0	Rugosité	m
z_{10}	Hauteur de 10 m	m

Caractères grecs

α	Albédo d'une surface	-
ε	Émissivité d'une surface	-
η	Viscosité dynamique d'un fluide	$\mathrm{kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}}$
θ	Température potentielle	K
λ	Conductivité thermique	$\mathrm{W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}}$
ν	Viscosité cinématique d'un fluide	$\mathrm{m^2 \cdot s^{-1}}$
ρ	Masse volumique	$\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$
σ	Constante de Boltzmann	$\mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}}$
ϕ_{HVAC}	Flux de chaleur dus aux systèmes de chauffage ou de climatisation	W
ϕ_{gains}	Gains internes du bâtiment	W
ϕ_{ventil}	Flux de chaleur dû au renouvellement d'air	W

Acronymes

1D, 2D ou 3D	uni, bi ou tridimensionnel
CEREA	Centre d'Enseignement et de Recherche en Environnement Atmosphérique
CERMA	CEntre de Recherche Méthodologique d'Architecture
CFD	Dynamique des fluides numérique
CLA	Couche limite atmosphérique
Code_Saturne	Logiciel de CFD 3D développé par EDF et le CEREA
EDF R&D	Électricité de France, Recherche et Développement
ENPC	École Nationale des Ponts et Chaussées
ENTPE	École Nationale des Travaux Publics de l'État
ESP-r	Logiciel de modélisation énergétique des bâtiments, développé par Strathclyde University, Glasgow
ICU	Îlot de chaleur urbain

Introduction

Les problèmes dus à la densité urbaine : pollution atmosphérique et îlot de chaleur urbain

L'exemple du London Smog

« It was a foggy day in London, and the fog was heavy and dark. Animate London, with smarting eyes and irritated lungs, was blinking, wheezing, and choking ; inanimate London was a sooty spectre, divided in purpose between being visible and invisible, and so being wholly neither. Gaslights flared in the shops with a haggard and unblest air, as knowing themselves to be night- creatures that had no business abroad under the sun ; while the sun itself when it was for a few moments dimly indicated through circling eddies of fog, showed as if it had gone out and were collapsing flat and cold.
Even in the surrounding country it was a foggy day, but there the fog was grey, whereas in London it was, at about the boundary line, dark yellow, and a little within it brown, and then browner, and then browner, until at the heart of the City– which call Saint Mary Axe–it was rusty-black. From any point of the high ridge of land northward, it might have been discerned that the loftiest buildings made an occasional struggle to get their heads above the foggy sea, and especially that the great dome of Saint Paul's seemed to die hard ; but this was not perceivable in the streets at their feet, where the whole metropolis was a heap of vapour charged with muffled sound of wheels, and enfolding a gigantic catarrh. » Charles Dickens, Our Mutual Friend,

tome 2, 3e livre, chapitre 1 (1865). [1]

Restons à Londres et remontons au XII^{e} siècle. Le bois se faisant de plus en plus rare et cher, les habitants de la ville ont dû trouver une autre source d'énergie. C'est alors le charbon qui a eu leur préférence en raison de son coût. Il s'agissait cependant de charbon de mauvaise qualité consumé dans des poêles à faible rendement (Neill (2001)), dont la combustion produisait plus de fumées que de chaleur. La ville a donc très tôt connu des problèmes de pollution atmosphérique, et dès le XIII^{e} siècle on remarque une prise de conscience sur les risques qu'elle occasionne, avec l'instauration d'une commission en 1285 pour étudier le problème qui n'a malheureusement pas été suivie d'effets (Staffordshire-University (2002)). Cette tendance se poursuit au XIV^{e} siècle avec les lois du roi Edouard I^{er} interdisant la combustion de ce charbon de mauvaise qualité. Mais celles-ci ne s'avèrent guère plus fructueuses, les mesures prises n'offrant pas d'alternatives à la population qui a donc continué d'utiliser ce combustible (Urbinato (1994), Thibault (2003)).

C'est au XVII^{e} siècle que John Evelyn fait le lien entre les épisodes de brouillard sévères et des taux de mortalité plus élevés que la normale dans A Character of England (1659) : *« [London was] cloaked in such a cloud of sea-coal [...] : this pestilential smoke which corrodes the very iron, and spoils all the moveables, [...] so fatally seizing on the lungs of the inhabitants, that cough and consumption spare no man. »* [2] Il décrit également les inconvénients de ce phénomène dans un pamphlet adressé au roi en 1661, *Fumifugium, or The Inconvenience of the Aer and the Smoak of London Dissipated*[3] où il dénonce les problèmes de santé des Londoniens dû à la pollution

1. Traduction Loreau, 1885 : *« C'était un jour d'épais brouillard. Le Londres vivant, les yeux rouges, les poumons irrités, la respiration sifflante, clignotait, éternuait et suffoquait. Le Londres inanimé était un spectre fuligineux, qui, partagé entre le désir d'être vu, et celui de rester invisible, n'était complétement ni l'un ni l'autre. Le gaz flambait dans les boutiques d'un air hagard et malheureux, comme un être nocturne qu'on oblige à sortir en plein jour ; et, quand d'aventure, le soleil indiquait sa présence à travers les tourbillons et les remous du brouillard, il paraissait mort, aplati et glacé.*
Dans les environs, également, c'était un jour de brume ; mais à la campagne le brouillard était gris, tandis qu'à Londres il était d'un jaune foncé à la lisière, devenait brun un peu plus loin, brunissait encore, et brunissant toujours, finissait par être d'un noir roussâtre au cœur de la Cité, qu'on appelle Sainte-Mary-Axe. De n'importe quel point de la rangée de collines qui se déploie vers le nord, vous auriez pu voir de temps à autre les édifices les plus hauts s'efforcer de lever la tête, et de la sortir de ces flots de brume ; surtout le dôme de Saint-Paul, qui semblait avoir de la peine à mourir ; mais rien de tout cela n'était visible du fond des rues qui se déroulaient au pied de ces monuments, et où la ville entière n'était qu'un amas de vapeurs chargé du bruit étouffé des rues, et enveloppant un catarrhe gigantesque. » Charles Dickens, L'ami commun, tome II, 3^{e} livre, chapitre 1 (1865).

2. Traduction française proposée : « [Londres était] revêtue d'un tel nuage de poussière de charbon [...] : cette fumée pestilentielle qui corrodait même le fer et abîmait tous les meubles, [...] en s'emparant si fatalement des poumons des habitants, que la toux et la consomption n'épargnait personne. »où *« consomption »* fait référence à la tuberculose pulmonaire.

3. Fumifugium, ou l'éclaircissement du problème de l'air et de la fumée de Londres

atmosphérique.

Malgré les mesures prises pour limiter cette pollution, le brouillard occasionné par la combustion du charbon ne disparaît pas avant plusieurs siècles et l'apparition de l'industrie en est même une nouvelle source. C'est alors que l'on commence à désigner sous le nom de « *smog* »(de *smoke*, la fumée et *fog*, le brouillard), ce brouillard caractéristique des oeuvres de Conan Doyle ou Dickens.

L'évènement le plus marquant de ce phénomène débute le 4 décembre 1952. Le climat est doux, un anticyclone apparaît au-dessus de Londres, le vent est très faible et une masse d'air tiède apportée par le Gulf Stream s'est installée sur la ville. La pollution engendrée par les usines, le chauffage des résidences et les véhicules (notamment les nouveaux bus roulant au diesel, qui remplacent les tramways électriques) stagne donc sur la capitale, engendrant une densité encore jamais observée du smog. Le brouillard s'inflitre jusque dans les bâtiments, et son épaisseur est telle qu'on y voit à peine à quelques mètres (Neill (2001)). Cet épisode est surtout marqué par un grand nombre d'hospitalisations pour problèmes respiratoires et est suivi de près par un pic de mortalité (Davis et al. (2002)).
Ce Grand Smog de Londres dure 5 jours, causant officiellement la mort de 4 000 personnes, et de près du triple dans les faits (Bell et al., 2004). Cet épisode initie la loi anti-pollution de 1956 et la conversion énergétique des Londoniens qui se sont tournés notamment vers le gaz et l'électricité (Neill (2001)).
D'autres évènements similaires ont été documentés, on peut notamment mentionner Donora (Pensylvanie, USA) en 1948, et l'événement de la Vallée de la Meuse en Belgique en 1930.

De nombreuses études mettent en évidence les impacts sanitaires de la pollution, depuis les taux de mortalité associés aux phénomènes de pollution intenses aux maladies chroniques respiratoires ou cardiaques des populations affectées (Davis et al. (2002)).

Une situation actuelle toujours critique pour la pollution

La fin de l'utilisation du charbon dans un grand nombre de villes a marqué la fin du smog tel qu'on le connaissait jusqu'au milieu du XX^{e} siècle. Cependant l'arrivée de l'automobile est à l'origine de la naissance d'un nouveau phénomène : le smog photochimique. Créé par la réaction des produits de combustion d'hydrocarbures ou d'oxydes d'azote qui se transforment en ozones ou en formaldéhydes sous l'effet du soleil, ce phénomène s'observe principalement dans les villes plus ensoleillées telles que Los Angeles ou Athènes (Neill (2001)). Si le smog n'est plus aussi nettement

observable, il existe actuellement toujours des nuages de pollution dans les villes où des mesures sont parfois prises lorsque les seuils de pollution atmosphérique dépassent les limites sanitaires (limitation des vitesses et circulation alternée, aides pour utiliser des systèmes de chauffage moins polluants, limitation des émissions agricoles azotées).

De même on retrouve des taux très élevés de particules en suspension, notamment dans les grandes villes chinoises ou indiennes, qui engendrent des situations tout aussi dramatiques que celle de Londres au début du XX^e siècle (Davis et al. (2002)). Les conséquences de cette pollution se manifestent même dans des régions rurales où de nos jours les personnes développent des maladies respiratoires avec des taux similaires à ceux d'une population de fumeurs.

D'autres effets tels que l'îlot de chaleur urbain

Dans le contexte actuel de changement climatique, la problématique de la pollution atmosphérique ne se limite plus seulement à la qualité de l'air. Elle est par exemple directement impliquée dans l'effet de serre et contribue, associée à de nombreux autres phénomènes tels que les sources de chaleur anthropiques ou les effets thermiques des bâtiments, à l'existence des îlots de chaleur urbains. On peut relever jusqu'à 15°C d'écart entre Paris et les campagnes avoisinantes (Moonen et al., 2012).

Un contexte de prise de conscience environnementale

Ces dernières années ont été marquées par une multiplication de mesures environnementales portant aussi bien sur la protection des milieux naturels et de la biodiversité ou sur l'encadrement de la pollution industrielle que sur les impacts écologiques des bâtiments et des villes. C'est dans ce cadre que s'inscrivent les lois du Grenelle de l'Environnement [4], les Plans de Protection de l'Atmosphère (PPA) [5], les politiques de densification urbaine [6] et de transition énergétique pour la croissance verte [7], ou encore les Réglementations Thermiques [8] imposées aux bâtiments neufs et l'incitation à la rénovation des bâtiments anciens.

Depuis 2007, plus de 50% de la population mondiale réside en ville et les trois quarts de la population européenne est urbaine (ONU (2014), Banque Mondiale (2014b)). À

4. Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010
5. Loi n° 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie
6. Loi pour l'accès au logement et un urbanisme rénové n° 2014-366 du 24 mars 2014
7. Loi n° 2015-992 du 17 août 2015
8. Lois n° 2009-967 du 3 août 2009 et 2010-788 du 12 juillet 2010

l'instar du phénomène de changement climatique qui inquiète, ces chiffres expliquent également l'intérêt accru porté à l'étude de l'atmosphère urbaine. Cet intérêt porte aussi bien sur le maintien du confort en ville, dans la rue et dans les bâtiments, que sur la santé, mise à mal entre les températures trop élevées et la mauvaise qualité de l'air.

C'est donc dans ce contexte, où les scientifiques de différents domaines ont un rôle à jouer afin d'améliorer les conditions de vie en milieu urbain et de limiter l'impact de ses nuisances sur l'environnement, que s'ancre ce travail de thèse. Nous nous intéresserons ici plus précisément aux échanges énergétiques entre les bâtiments et l'atmosphère urbaine. Les domaines atmosphérique et du bâtiment font souvent l'objet d'études distinctes, or ils sont en relation étroite, notamment en milieu urbain, et la méconnaissance de l'un constitue une limite à l'étude de l'autre.

Présentation du travail de thèse

Le travail de thèse exposé ici porte sur l'étude de l'atmosphère urbaine, fortement influencée par de nombreux facteurs parmi lesquels les bâtiments sont un élément clef. Le couplage du modèle de dynamique des fluides *Code_Saturne* (Archambeau et al. (2003)) avec le modèle de bâtiment BuildSysPro (Plessis et al. (2014)) est réalisé afin de modéliser finement les échanges énergétiques qui ont lieu entre l'atmosphère urbaine et les bâtiments.
Dans un premier temps, nous présentons le contexte de ce travail de thèse et sa problématique en mettant en lumière l'importance de l'atmosphère urbaine en ce qui concerne les enjeux environnementaux et les enjeux sanitaires. Nous exposons également la complexité de son étude en raison des nombreux facteurs qui influencent son écoulement, en particulier en milieu urbain. Parmi eux, nous développons tout particulièrement l'impact des bâtiments.
Après avoir présenté les principes fondamentaux de la physique atmosphérique et de la thermique du bâtiment, nous étudions dans un deuxième temps les outils de modélisation qui ont été développés pour étudier le microclimat urbain et le comportement énergétique des bâtiments. Par ailleurs, nous dressons brièvement un état de l'art des travaux portant sur l'étude conjointe de ces deux systèmes.
La troisième partie de ce manuscrit développe la principale contribution de cette thèse. Nous détaillons les travaux menés afin de réaliser le couplage entre *Code_Saturne* et BuildSysPro, depuis le traitement des modèles à la mise en place de l'échange de données entre les deux codes.
Nous présentons dans un quatrième temps la campagne de mesures EM2PAU que nous utilisons pour la validation des simulations, et dont nous analysons les mesures

afin de déterminer l'influence des effets dynamiques et thermiques sur les écoulements d'air dans une rue canyon.
Enfin, après avoir expliqué les choix de modélisation et la mise en place des simulations dans un cinquième volet, nous présentons les résultats obtenus au cours de ce travail de thèse aussi bien sur la mise en évidence des effets thermiques des bâtiments sur les écoulements que pour étudier la qualité des simulations réalisées avec le couplage.

Chapitre 1

Atmosphère urbaine et énergétique des bâtiments : deux sujets complexes en interaction

Sommaire

1.1 Étude de la couche limite atmosphérique 8

1.1.1 Caractéristiques de la couche limite atmosphérique 8

1.1.2 Lois atmosphériques appliquées à la couche de surface . . 11

1.1.3 Des phénomènes météorologiques à la canopée urbaine, une question d'échelle 12

1.2 Impacts des éléments de la canopée urbaine sur l'atmosphère et enjeux de leurs études 14

1.2.1 Le phénomène de l'îlot de chaleur urbain et ses implications 14

1.2.2 Enjeux des propriétés physico-chimiques de l'air sur les populations 17

1.2.3 Interactions entre les aménagements urbains, les bâtiments et l'atmosphère 22

1.3 Énergétique du bâtiment 37

1.3.1 Le secteur du bâtiment en quelques chiffres 37

1.3.2 Effet du microclimat urbain sur le comportement énergétique du bâtiment 38

1.3.3 Conclusion 41

1.4 Conclusion et problématique 41

La couche de surface urbaine désigne la partie inférieure de la couche limite atmosphérique en milieu urbain. La couche limite atmosphérique, quant à elle, est la couche la plus basse de l'atmosphère dont la hauteur maximale est de quelques kilomètres. Il s'agit d'un milieu complexe influencé par les caractéristiques de la surface de la Terre et par les activités humaines, notamment les rejets de chaleur et de pollution. La couche limite atmosphérique exerce elle-même un rôle dans de nombreux processus physiques de la haute atmosphère (Milliez, 2006). C'est également le milieu dans lequel nous habitons et les populations humaines et les autres espèces vivantes en dépendent. Toutes ces propriétés en font un milieu dont les caractéristiques ont un impact prépondérant sur l'environnement et sur la santé.
Milieu complexe aux enjeux multiples, la couche limite atmosphérique est le sujet de nombreuses études. Les propriétés physiques de cette partie de l'atmosphère ainsi que ses interactions avec les éléments de la surface terrestre, notamment urbaine, sont présentées dans cette première partie. Nous nous intéressons plus particulièrement aux bâtiments, éléments majeurs du milieu urbain et sources de polluants et de chaleur, et aux échanges qui s'opèrent entre ces deux systèmes.

1.1 Étude de la couche limite atmosphérique

De nombreux échanges se produisent entre la Terre et son atmosphère. Ces échanges peuvent être de nature énergétique (turbulence, chaleurs sensible et latente), massique (transferts d'eau ou de gaz), ou encore provenir des résistances de friction exercée par l'air sur la surface terrestre (Arya, 1999). Ce sont ces échanges de quantité de mouvement, de chaleur et de masse entre la Terre et la couche inférieure de l'atmosphère qui justifient la définition de la couche limite atmosphérique, en interaction directe avec la surface terrestre et présentant des propriétés physiques particulières.

1.1.1 Caractéristiques de la couche limite atmosphérique

La couche limite atmosphérique est la partie inférieure de la troposphère directement influencée par la surface de la Terre (Figure 1.1). Cette couche répond aux forces de surfaces dans un laps de temps de l'ordre de grandeur de l'heure (Stull (1988)). C'est également la zone de l'atmosphère où les variations diurnes de température sont directement perceptibles. Enfin, c'est également dans cette couche que sont émis la plupart des polluants (Milliez, 2006)

Variable dans le temps et dans l'espace, la couche limite atmosphérique s'étend jus-

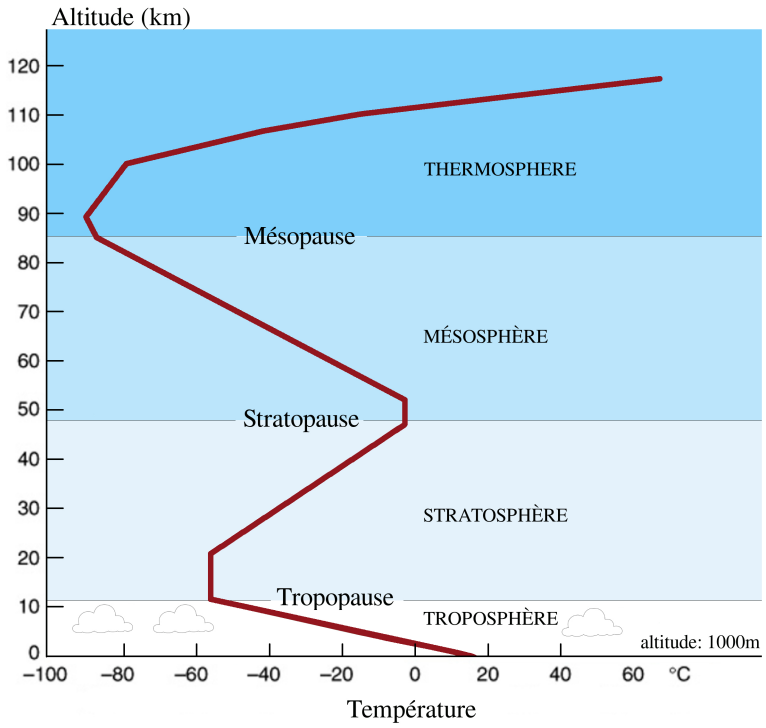


FIGURE 1.1 – Représentation schématique des couches de l'atmosphère (d'après Stull (1988)).

qu'à 1 000 ou 2 000 m d'altitude, occupant jusqu'à 10 % de la troposphère. Elle contient cependant 75 % de la masse de l'atmosphère, les 25 % restants se répartissant dans l'atmosphère libre sus-jacente.

Ce que l'on appelle « atmosphère urbaine » fait partie de cette couche limite et correspond à sa partie inférieure, la couche de surface urbaine. Elle est elle-même constituée de deux sous-couches, la sous-couche rugueuse aux écoulements très hétérogènes où se trouvent les éléments propres au milieu urbain (bâtiments, canopée urbaine), et la sous-couche sus-jacente considérée comme homogène aussi bien pour l'écoulement que pour les propriétés physico-chimiques (Milliez, 2006).

On note par la suite θ la température potentielle d'une particule d'air sec, soit la température qu'aurait cette particule si on l'amenait adiabatiquement de sa pression effective à la pression de réference $p_0 = 1\,000\,\text{hPa}$:

$$\theta = T \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{r}{c_p}} \tag{1.1}$$

avec

T	en K	T la température réelle de l'air ;
p	en Pa	sa pression ;
c_p	$1004\,\mathrm{J}\cdot\mathrm{kg}^{-1}\cdot\mathrm{K}^{-1}$	la chaleur spécifique de l'air sec à pression constante ;
r	$287\,\mathrm{J}\cdot\mathrm{kg}^{-1}\cdot\mathrm{K}^{-1}$	la constante des gaz pour l'air sec.

Influencée par les variations diurnes de température, la couche limite atmosphérique présente un gradient de température potentielle suivant l'altitude qui détermine la stratification thermique de l'atmosphère. En fonction de ce gradient on distingue trois situations :

- $\dfrac{\partial\overline{\theta}}{\partial z} > 0$: la température potentielle de l'air au niveau du sol est plus faible que celle des couches d'air sus-jacentes, l'atmosphère est **stable** ;
- $\dfrac{\partial\overline{\theta}}{\partial z} = 0$: la valeur de la température ne dépend pas de l'altitude, l'atmosphère est **neutre** ;
- $\dfrac{\partial\overline{\theta}}{\partial z} < 0$: la température potentielle de l'air au niveau du sol est plus élevée que celle des couches d'air sus-jacentes, l'atmosphère est **instable**.

L'atmosphère neutre correspond à un état où les mouvements verticaux adiabatiques ne créent pas de force de flottabilité. Cette situation peut s'observer juste après le lever du soleil ou juste avant son coucher. En atmosphère stratifiée, la densité de l'air et donc sa température potentielle dépendent de l'altitude considérée. L'atmosphère est dite instable si la température potentielle est plus importante au niveau du sol, ce qui a tendance à engendrer des turbulences. Elle est stable dans le cas contraire.

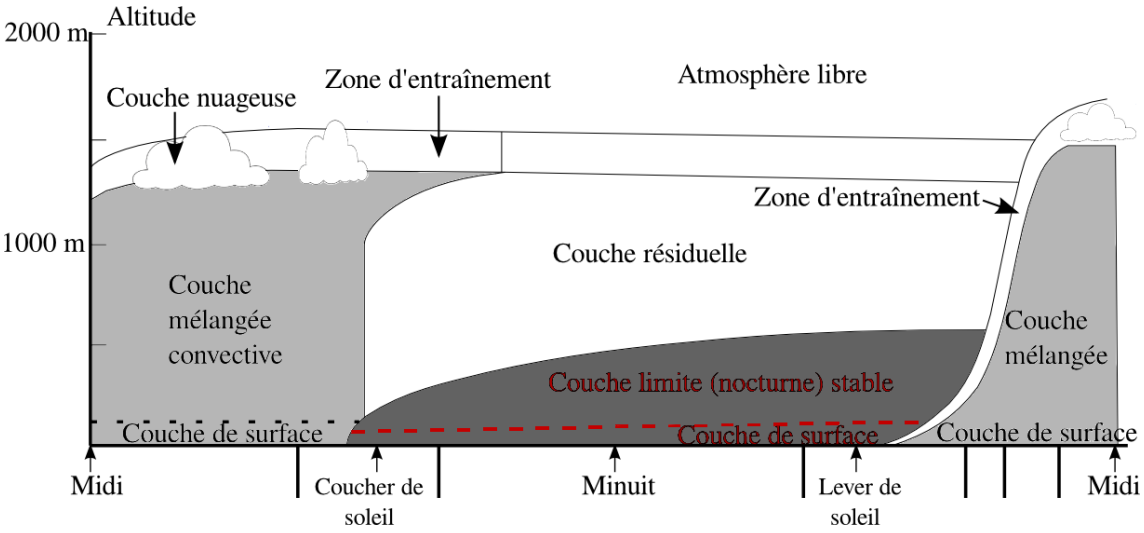


FIGURE 1.2 – Évolution de la couche limite atmosphérique au cours du cycle diurne (d'après Stull (1988)).

En couche limite atmosphérique instable, la couche convective (ou couche de mélange) est très turbulente, ce qui favorise l'homogénéisation des propriétés du fluide. Elle est généralement observée durant la journée et est d'autant plus turbulente que l'ensoleillement est important.
La couche convective peut être divisée en une couche nuageuse et une couche sous les nuages.
Une couche limite atmosphérique stable s'observe principalement de nuit. La turbulence y est faible voire nulle, ce qui contribue à l'accumulation des polluants. Elle est surmontée d'une couche résiduelle qui contient l'ancienne couche convective mais présente une turbulence moindre.

1.1.2 Lois atmosphériques appliquées à la couche de surface

Nous présentons ici les lois physiques atmosphériques que nous utiliserons par la suite pour construire des profils de vent et de températures à partir de mesures réalisées à un unique point situé à 10 m d'altitude.
Tout d'abord, nous notons z_0 la longueur de rugosité telle que $\frac{\overline{h_s}}{30} < z_0 < \frac{\overline{h_s}}{10}$ avec h_s la hauteur moyenne des obstacles au niveau du sol.

Deux mécanismes interviennent dans la dispersion atmosphérique :
- le profil de vitesse moyenne du vent ;
- les fluctuations turbulentes mécaniques ou thermiques du flux d'air.

Par la suite, pour tout paramètre x nous notons $\overline{x}$ sa moyenne temporelle et x' sa fluctuation turbulente, telles que pour une altitude z et un instant t donnés,

$$x_{(z,t)} = \overline{x}_{(z,t)} + x'_{(z,t)}$$

Paramètres utilisés pour définir les profils de vent et de température - u et v sont les composantes horizontales du vent avec un vent de référence (mesuré en hauteur) de direction α et de force u_{ref}. u et v sont telles qu'on peut écrire le module du vent $ff = \sqrt{u^2 + v^2}$. On note w sa composante verticale.

À partir de ces composantes, on définit la vitesse de friction u_* :

$$u_* = \left[\left(\overline{w'u'}\right)^2_{z_0} + \left(\overline{w'v'}\right)^2_{z_0} \right]^{\frac{1}{4}} \tag{1.2}$$

De même on a la température caractéristique θ_* telle que :

$$\theta_* = -\frac{\overline{(w'\theta')}_{z_0}}{u_*} \tag{1.3}$$

la vitesse convective standard :

$$w_* = \left(\frac{g}{\overline{\theta}}\overline{(w'\theta')}_{z_0} z_i\right)^{\frac{1}{3}} \tag{1.4}$$

et la longueur de Monin-Obukhov L_{MO} :

$$L_{MO} = -\frac{u_*^3}{\kappa \frac{g}{\overline{\theta}}\overline{(w'\theta')}_{z_0}} \tag{1.5}$$

avec κ la constante de von Karman et g la constante gravitationnelle,

ce qui donne pour des conditions stables (on remplace $\frac{g}{\overline{\theta}}\overline{(w'\theta')}_{z_0}$ par $-\frac{u_*^3}{\kappa L_{MO}}$) :

$$w_* = u_* \left(-\frac{z_i}{\kappa L_{MO}}\right)^{\frac{1}{3}} \tag{1.6}$$

La hauteur de la couche limite est définie selon Holtslag and Westrhenen (1991) par :

$$\begin{cases} z_i = 1100\,\mathrm{m} & \text{pour } \dfrac{z}{L_{MO}} < 0 \\ \\ z_i = \max\left[250\,\mathrm{m}, \min\left(800\,\mathrm{m}, c_2\sqrt{\dfrac{u_* L}{f}}\right)\right] & \text{pour } \dfrac{z}{L_{MO}} > 0 \end{cases} \tag{1.7}$$

avec $c_2 = 0,7\,\mathrm{m}^{-1}$ et $f = 1,11 \cdot 10^{-4}\,\mathrm{s}^{-1}$ le paramètre de Coriolis.

1.1.3 Des phénomènes météorologiques à la canopée urbaine, une question d'échelle

Afin de mieux comprendre les phénomènes physiques observés à l'échelle de la ville, depuis les transferts de masse jusqu'aux modifications des flux radiatifs en passant par la dispersion des polluants, nous nous intéressons aux différentes échelles spatiales et temporelles.

À chaque phénomène physique correspond une échelle plus pertinente que les autres. D'après Britter and Hanna (2003), également repris par Milliez (2006), quatre

échelles spatiales peuvent être distinguées pour étudier les écoulements d'air en milieu urbain :

— l'échelle régionale, qui peut dépasser la centaine de kilomètres, englobe le milieu urbain comme une zone perturbatrice dans une région plus vaste ;
— l'échelle de la ville, qui peut aller jusqu'à 20 km, permet de considérer les effets des bâtiments en les moyennant sur l'ensemble de la zone d'étude ;
— l'échelle du quartier, inférieure à 2 km, à laquelle on peut déjà observer les phénomènes qui se produisent dans la canopée urbaine, et où l'on peut utiliser des modèles de canopée urbaine considérant un seul bâtiment type ;
— l'échelle de l'îlot urbain, ne dépassant pas quelques centaines de mètres, est l'échelle où l'on peut étudier plus précisément les échanges qui ont lieu entre les bâtiments et l'atmosphère environnante ; à cette échelle on peut utiliser des modèles de bâtiments plus détaillés permettant une étude plus fine des phénomènes.

Si cette division en échelles facilite l'approche des phénomènes atmosphériques, les phénomènes observés à une échelle donnée n'en sont cependant pas moins en interaction avec ceux des autres échelles. Le choix d'une échelle influe surtout sur les modèles adaptés pour analyser les phénomènes atmosphériques, en fonction de leur niveau de précision et leur complexité (Milliez (2006)).

Les approches utilisées par la communauté scientifique peuvent chacune regrouper deux ou trois des échelles présentées précédemment. On distingue ainsi la méso-échelle pouvant aller de 10 à 200 km. Cette échelle s'adapte donc à l'étude des phénomènes régionaux et de la ville, ce qui permet d'étudier les interactions locales entre une zone urbaine et ses environs.
Britter and Hanna (2003) présente également l'échelle sub-méso (de 100 m à 10 km) qui réunit l'échelle de la ville et celle du quartier.
L'échelle « micro » regroupe les échelles du quartier et de l'îlot. À ce niveau, tous les obstacles du milieu sont explicitement inclus dans les études (Orlanski, 1975). On peut y définir deux sous-échelles : celle du bâtiment est inférieure à la centaine de mètres, et celle du composant, au maximum de l'ordre de la dizaine de mètres, permet d'étudier les phénomènes qui se produisent au niveau des composants du bâtiment.

Notre travail sera réalisé à l'échelle locale, ou nous nous intéresserons aux interactions entre les bâtiments et la canopée. À cette échelle les différents éléments urbains, dont les bâtiments, forment une structure irrégulière et sont autant de perturbations pour les écoulements.

1.2 Impacts des éléments de la canopée urbaine sur l'atmosphère et enjeux de leurs études

1.2.1 Le phénomène de l'îlot de chaleur urbain et ses implications

L'îlot de chaleur urbain est un phénomène caractérisé par les écarts de températures de l'air observés entre une région urbaine et les zones rurales environnantes (Oke, 1987). De nombreuses études portent sur ce phénomène qui, s'il peut avoir des rétroactions positives en hiver ou dans les régions climatiques froides (Santamouris et al. (2001)), peut en revanche considérablement affecter le confort urbain, la santé des populations. L'îlot de chaleur urbain s'inscrit dans un contexte où l'on observe des pics de chaleur de plus en plus importants en été qui occasionnent de nombreux décès, comme ce fut le cas en 2003 en Europe.

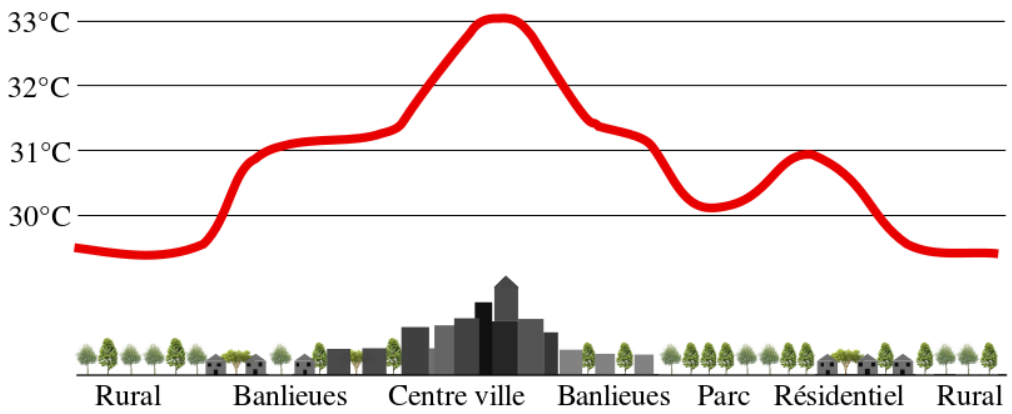


FIGURE 1.3 – Profil horizontal des températures lors d'un phénomène d'îlot de chaleur urbain.

Il a été démontré qu'il affecte le comportement thermique et la consommation énergétique des bâtiments (Santamouris et al. (2001), Assimakopoulos et al. (2006), Bueno et al. (2012a), Kikegawa et al. (2003)). À Athènes, où l'îlot de chaleur urbain dépasse les 10 °C, la quantité d'énergie utilisée pour la climatisation peut être doublée entre le centre-ville et les régions environnantes. Le pic de consommation en été peut même être triplé. Santamouris et al. (2001) soulignent même que la zone présentant la consommation maximale est en plein centre de la ville et proche d'une route dont le trafic routier est très important. Outre son impact sur la consommation énergétique liée notamment à l'utilisation de la climatisation, l'îlot de chaleur urbain agit également sur la pollution atmosphérique avec des

effets directs (smog photochimique) et des effets indirects (émissions des sites de production électrique). (Santamouris et al., 2001).
En hiver, l'impact de la demande énergétique sur le climat urbain peut représenter un cercle vertueux : le chauffage des bâtiments chauffe l'atmosphère et diminue ainsi les besoins en chaleur. Cependant il engendre un cercle vicieux en été, en particulier lors des phénomènes d'îlots de chaleur urbains élevés. L'utilisation de la climatisation engendre un rejet de chaleur dans le milieu extérieur, la réaction des populations pour se rafraîchir contribue ainsi considérablement à entretenir l'îlot de chaleur urbain (Moonen et al., 2012). Kikegawa et al. (2003) estiment que la suppression des émissions de chaleur provenant des systèmes de climatisation seule peut permettre une diminution de la température urbaine de plus de 1 °C l'été dans certains quartiers de Tokyo.

L'îlot de chaleur urbain est dû à de nombreux facteurs (Oke (1987) et Moonen et al. (2012)) :

- le piégeage des rayonnements de grandes et courtes longueurs d'onde par multi-réflexions entre les surfaces urbaines, notamment le sol et les bâtiments, qui accroît également l'absorption de ces radiations par les éléments urbains ;
- de plus faibles facteurs de forme [1] avec le ciel qui réduisent les pertes thermiques de grande longueur d'onde ;
- les rejets de chaleur anthropiques provenant des activités humaines et des équipements ;
- la capacité de stockage de chaleur sensible dans les matériaux de construction, en raison de l'inertie thermique des bâtiments et des autres éléments urbains ;
- un effet de serre favorisé par la pollution de l'air, qui devient moins transparent et absorbe plus les rayonnements ;
- une évapotranspiration et donc une perte par chaleur latente plus faible qu'en milieu rural en raison de la proportion plus importante de surfaces artificielles imperméables au détriment des surfaces évaporatives humides ou végétales ;
- des vitesses moyennes de vent plus faibles qui limitent le refroidissement convectif des parois.

Si l'îlot de chaleur urbain est communément défini comme une différence de température entre milieux urbains et ruraux, on relève une grande diversité de régions aussi bien dites « urbaines » que « rurales ».
Afin de prendre en compte cette diversité, Stewart and Oke (2012) définissent le concept de zones climatiques locales (Local Climate Zones, LCZ). Chacune de ces zones climatiques est caractérisée par des rapports d'aspect, des facteurs de forme,

1. Facteur de forme entre deux surfaces : proportion du flux émis par une surface qui atteint la seconde surface.

des surfaces construites, des proportions de surface imperméable propres, une végétation et des rugosités particulères, qui lui confèrent des propriétés thermiques, radiatives et métaboliques propres (cf Annexe B).

En comparant les contrastes thermiques entre des villes de typologies différentes, Stewart and Oke (2012) démontrent l'influence des caractéristiques urbaines sur les phénomènes thermiques urbains. Par exemple, la structure de la surface (choix des matériaux, notamment des matériaux de couverture, et de la végétation) affecte le climat local en raison de son impact sur les équilibres radiatifs de grande et courte longueurs d'ondes. Le revêtement de la surface modifie son albédo [2], les potentiels de réchauffement et de refroidissement du sol et la présence d'humidité.
Ainsi les caractéristiques et phénomènes physiques observés dans une ville donnée diffèrent de ceux observés dans d'autres zones urbaines, et l'îlot de chaleur urbain est donc différent selon la ville ou le quartier urbain considéré.
Ce système de classification apporte un meilleur niveau de précision par rapport au clivage entre urbain et rural et peut être appliqué à plusieurs fins : la définition plus précise de l'amplitude de l'îlot de chaleur urbain en tant que différence entre deux LCZ, la révision d'une partie de la littérature portant sur l'îlot de chaleur urbain, la modélisation climatique, l'analyse historique et les prévisions météorologiques, ou encore l'architecture et l'urbanisme.

L'amplitude de l'îlot de chaleur urbain varie selon les régions mais également les moments de la journée, on observe même parfois un « îlot de fraîcheur urbain » en zone urbaine le matin (Theeuwes, 2015). L'îlot de chaleur urbain est d'autant plus important que la turbulence des écoulements est faible, le refroidissement par convection étant réduit, et que les facteurs de forme entre le ciel et les surfaces urbaines sont faibles, diminuant le refroidissement par rayonnement infrarouge du milieu urbain. Sa période d'intensité maximale se situe quelques heures après le coucher du soleil en conditions de nuit estivale calme et dégagée (Johnson et al., 1991). Cette situation favorise en effet le refroidissement rapide des zones rurales, tandis qu'en ville le refroidissement est limité par l'absence de turbulence et le piégeage radiatif des flux infrarouges (voir Figure 1.7).

Ainsi les contrastes de température en ville sont surtout déterminés par la géométrie des bâtiments et les matériaux constitutifs des surfaces urbaines (Stewart and Oke, 2012).

2. L'albédo d'une surface est son pouvoir réfléchissant et se définit par le ratio de flux solaire réfléchi par le flux incident.

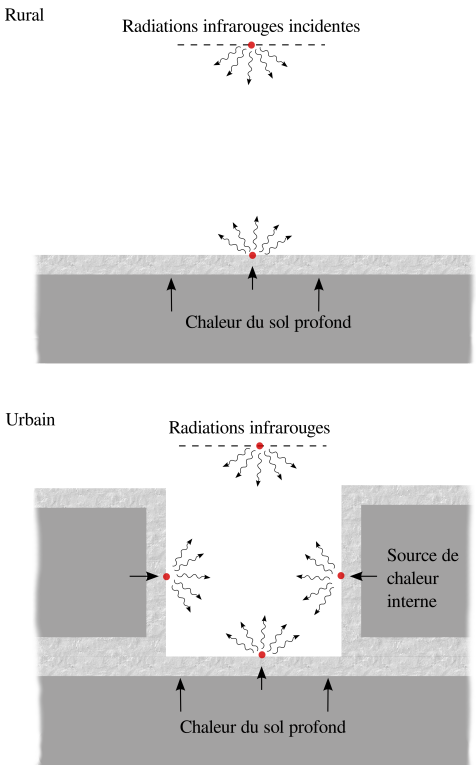


FIGURE 1.4 – Représentation schématique du refroidissement nocturne en zones rurale et urbaine (d'après Johnson et al. (1991)).

1.2.2 Enjeux des propriétés physico-chimiques de l'air sur les populations

1.2.2.1 Impacts sanitaires de la pollution et de la température de l'air

Parmi les nombreuses raisons justifiant l'étude de l'atmosphère urbaine, l'enjeu sanitaire et le confort urbain sont d'une importance primordiale, et ce d'autant plus qu'une fraction conséquente de la population vit en ville : 79 % en France, 75 % en Europe et 53 % dans le monde en 2014 d'après les données de la Banque Mondiale (Banque Mondiale (2014b) et Banque Mondiale (2014a)).

De nombreuses études soulignent l'influence de l'atmosphère urbaine sur la santé de la population. Les impacts des polluants seuls sur la santé sont difficiles à quantifier. Néanmoins, un lien entre les épisodes de fortes pollutions atmosphériques et l'évolution du taux de mortalité a pu être mis en évidence (Pope and Dockery, 2006). Les polluants s'avèrent être un danger respiratoire (Bascom, 1996) et un facteur aggravant pour certaines maladies, notamment le cancer du poumon (Doll, 1978). Le rapport de l'OMS International Agency for Research on Cancer (2013) qualifie la pollution atmosphérique de problème sanitaire majeur en raison

des maladies cardio-vasculaires et des cancers qu'elle peut provoquer parmi les populations exposées à des taux trop importants. L'OMS estime qu'en 2010, la pollution de l'air était responsable de 223 000 décès dus au cancer du poumon à l'échelle mondiale. Il a ainsi été observé, lors de la fermeture de 13 mois d'une aciérie dans la vallée de l'Utah durant l'hiver 1986-1987, une diminution de la concentration en particules fines PM10 (particules de diamètre inférieur à $10\,\mu$m de $15\,\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$). Cette amélioration de la qualité de l'air a été accompagnée d'une baisse de la mortalité de $3,2\,\%$ (Pope and Dockery, 2006). De même, dans les années 80 à Dublin, l'interdiction de la vente du charbon, alors utilisé pour le chauffage domestique, a entraîné la baisse de la concentration en particules fines de $36\,\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ et avec elle du taux de mortalité aussi bien due aux problèmes cardiovasculaires que respiratoires.

Deux grandes campagnes ont été menées dans les années 1990 aux États-Unis afin d'étudier les relations entre l'exposition aux particules fines et les problèmes respiratoires ou cardiaques chez les populations : celle des Harvard Six Cities et celle de l'American Cancer Society (ACS) (Pope and Dockery (2006), Zeger et al. (2008)). Selon les deux études, les décès dus à des problèmes cardiaques ou pulmonaires étaient significativement associés aux concentrations en sulfates et en $\text{PM}_{2,5}$, particules fines de diamètre inférieur à $2,5\,\mu$m.
Cependant d'autres études, qui s'étaient penchées sur la réaction des populations aux concentrations en particules, n'ont pas pu mettre en évidence l'existence d'un seuil en dessous duquel aucun effet de la pollution sur la santé ne serait observable (Pope and Dockery, 2006) : cette réponse est linéairement proportionnelle à la concentration des polluants.
On remarque que les effets nocifs pour la santé dépendent à la fois de la nature des polluants, de leurs concentrations et de la durée de l'exposition. Néanmoins, aucune expérience n'est encore réellement parvenue à mettre en évidence les impacts de chacun de ces facteurs.

Outre la pollution, le phénomène de surmortalité lors de vagues de chaleur montre également que des températures trop élevées ont des conséquences notables sur la santé publique. Basu and Samet (2002) notent une sensibilité plus importante des populations à la température qu'à la pollution de l'air, dont les effets à plus long terme sont moins facilement observables.
Ils observent que certaines catégories de la population sont plus affectées par les vagues de chaleur telles que les personnes déjà fragilisées par certaines maladies, notamment cardio-vasculaires. Basu and Samet (2002) remarquent en outre une influence des zones géographiques : les zones généralement les plus chaudes ou celles

au climat plus sec sont les moins touchées.

1.2.2.2 Confort et sécurité pour les populations en milieu urbain

La notion de confort urbain est relativement subjective et peut être influencée par des critères physiologiques ou culturels propres à chaque personne (Lam, 2015). Il dépend des nombreux paramètres qui interagissent avec les sens humains. En ce qui concerne la physique urbaine, le confort regroupe trois domaines.
Le confort acoustique tout d'abord dépend du cadre sonore et de la propagation des ondes acoustiques, qui elle-même varie en fonction du milieu, des conditions atmosphériques et des obstacles. Il est d'autant plus important que le bruit a des conséquences sociologiques et psychologiques (Picaut, 2012).
Le confort lié au vent et enfin le confort thermique dépendent de l'écoulement atmosphérique, des températures d'air et du milieu radiatif ambiant. Ils sont donc influencés par les propriétés dynamiques de l'air (ainsi un vent trop fort est source d'inconfort voire d'insécurité tandis qu'un vent léger est souvent appréciable) et le confort thermique dépend également de ses propriétés physico-chimiques. Nous nous intéressons plus particulièrement à ces deux types de confort dans notre étude et nous les désignons sous le terme de confort urbain.

Le confort thermique dépend principalement de quatre paramètres (Ramponi (2013)) :

- la température de l'air ;
- la température radiante moyenne (MRT, Mean Radiant Temperature) [3] ;
- la vitesse du vent ;
- l'humidité.

Ces paramètres influent sur le confort thermique par l'intermédiaires des trois modes de transferts thermiques que nous détaillons au paragraphe 1.2.3.1 : la conduction (transfert de chaleur sans mouvement de particules engendré par gradient de température), la convection (qui implique des mouvements de particules) et le rayonnement.
La température de l'air affecte le confort thermique de par les échanges convectifs qui ont lieu entre l'individu et son environnement, échanges convectifs qui peuvent être forcés par la vitesse de l'air. De même que l'humidité de l'air, la température influe également sur les flux de chaleur latente entre la personne et l'air en lui

3. La température radiante moyenne ou MRT prend en compte les radiations de courtes et de grandes longueurs d'ondes et représente la température moyenne pondérée d'une enceinte qui émettrait la même quantité de radiations que l'environnement urbain (Johansson et al., 2012). Elle est largement utilisée pour étudier le confort thermique.

permettant par exemple un rafraîchissement par évapotranspiration. La température radiante dépend quant à elle des différentes sources de rayonnement entourant l'individu : radiations solaires, mais également des rayonnements dépendant des températures des différentes surfaces urbaines environnantes.

L'aménagement urbain (morphologie urbaine, nature des surfaces, usages qu'il engendre) exerce un rôle non négligeable sur le confort thermique. En effet, il influence les bilans radiatifs et l'ombrage et en modifiant aussi bien les écoulements d'air que les transferts de chaleur et d'humidité. Le rapport d'aspect de la canopée urbaine, c'est-à-dire le rapport entre sa hauteur et sa largeur, ainsi que d'autres paramètres tels que son orientation affectent significativement le confort urbain dans des climats chauds et secs (Moonen et al., 2012). La présence de surfaces imperméables et la faible quantité de végétation ont un impact sur l'humidité de l'air du milieu urbain, de même que l'îlot de chaleur urbain y affecte la température de l'air. Dans de nombreuses configurations, ajouter de l'ombrage et de la végétation pour un rafraîchissement par évapotranspiration peut permettre de maintenir un niveau de confort thermique acceptable.

De nombreux indices de confort thermique ont été développés. Si une partie d'entre eux ciblent le confort dans les bâtiments, la plupart s'applique également à un milieu extérieur. Parmi ces indices, l'UTCI (Universal Thermal Comfort Index) calcule les échanges de chaleur entre le corps humain et son environnement en intègrant les paramètres météorologiques tels que la température, l'humidité, le vent et les rayonnements. Cependant cet indice reste subjectif, son calcul ne prenant pas en compte la perception des gens. Ainsi pour le même échantillon de personnes, l'UTCI varie selon qu'il ait été établi avant et après une période de canicule (Lam, 2015).

On peut classifier ces indices en fonction des éléments sur lesquels ils s'appuient (Carlucci and Pagliano, 2012). Certains indices proviennent du calcul de l'équilibre énergétique du corps humain et intègrent ainsi des paramètres physiologiques ou comportementaux (humidité de la peau, métabolisme lié à l'activité ou la vêture), et des paramètres de l'environnement. D'autres sont issus de l'étude des sollicitations physiologiques, reposant sur l'idée que des conditions de stress environnementaux égales produisent des contraintes physiologiques semblables. Ils s'appuient donc sur les corrélations entre les conditions environnementales et paramètres comportementaux, et les sollicitations thermiques qu'ils engendrent chez les individus. Enfin des indices sont obtenus à partir de mesures de paramètres physiques décrivant l'environnement thermique, mais ceux-ci ne donnent pas d'information sur l'effet produit par ces paramètres sur les individus.

De plus, les écoulements d'air affectent souvent directement le confort des habitants des zones urbaines (Sini et al., 1995). L'étude menée par Acero et al. (2012) sur Bilbao met en évidence l'effet de la situation géographique de la ville sur la ventilation urbaine. Cette ville présente en effet des caractéristiques très spécifiques : elle est située à proximité du bord de mer, qui lui amène une brise marine, et l'agglomération est encaissée entre deux rangées de montagne. En raison de leurs structures urbaines et orientations différentes, les quartiers de la ville bénéficient inégalement de cette ventilation, et les mieux ventilés d'entre eux sont ceux qui présentent un meilleur confort thermique en été. Pour les mêmes conditions météorologiques et moments de la journée, un quartier du centre-ville où la ventilation est bonne offre un bien meilleur confort thermique que le quartier ancien plus dense et mal ventilé, et ce surtout aux heures où les rayons du soleil entrent dans les canopées.
Si le vent joue un rôle dans le confort thermique, il influe également sur le confort d'un aspect dynamique. Ainsi Blocken and Persoon (2009) étudient le confort des piétons lié au vent autour du stade de l'ArenA à Amsterdam avant et après l'ajout de hauts bâtiments. Il est alors observé que si le confort lié au vent est légèrement amélioré au niveau des étages, il est en revanche très déterioré localement par la construction des tours.
Plusieurs échelles de critères de confort lié au vent ont été établies. La plupart d'entre elles consistent en des valeurs seuils de vitesse de vent au-delà desquelles le confort est réduit. Les différents types d'activités y sont également distingués : le confort est ainsi altéré selon que la personne est assise, se promène ou marche rapidement (Janssen et al., 2013). Les vitesses de vent sont alors qualifiées d'agréables à inconfortables, puis dangereuses en raison des accidents qu'elles peuvent provoquer (pour des vitesses supérieures à 15 ou 20 $\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ selon les échelles).

1.2.2.3 Conclusion

Plus de la moitié de la population urbaine mondiale vit en ville, et cette proportion continue d'augmenter (Banque Mondiale, 2014a). Ce chiffre ainsi que les nombreux impacts que l'atmosphère urbaine peut avoir sur les populations, aussi bien en ce qui concerne le confort que la santé, justifient l'étude approfondie des phénomènes qui y ont lieu. Cependant cette étude est complexe en milieu urbain en raison des nombreux facteurs qui influent sur les phénomènes atmosphériques observés. La partie suivante porte sur l'analyse de ces éléments et de leurs interactions avec l'atmosphère.

1.2.3 Interactions entre les aménagements urbains, les bâtiments et l'atmosphère

1.2.3.1 Introduction aux différents modes de transfert de la chaleur

On distingue communément trois modes de transfert de la chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement (Adams, 1964).

— **La conduction** correspond à un transfert de chaleur engendré par la présence d'un gradient de température, sans déplacement de matière. Il s'agit du seul mode de transfert de chaleur observé dans un matériau opaque. Ce phénomène est exprimé par la loi de Fourier, qui établit la valeur du débit calorifique $\frac{dQ}{dt}$ comme fonction du gradient de température $\frac{dT}{dx}$ et de la conductivité thermique λ du milieu où s'effectue le transfert de chaleur en $\mathrm{W} \cdot \mathrm{K}^{-1} \cdot \mathrm{m}^{-1}$. Dans le cas d'une étude unidimensionnelle, la loi de Fourier s'écrit :

$$\frac{dQ}{dt} = -\lambda A \frac{dT}{dx} \tag{1.8}$$

avec A l'aire de la section traversée par le flux (en m^2).

— **La convection** implique un transport de chaleur par déplacement de particules. Elle s'opère donc dans un fluide et peut aussi bien être le résultat d'un gradient de température, qui se manifeste également par une différence de densité entre les différentes parties du fluide, que celui d'une sollicitation mécanique de ce fluide. Dans le cas de l'étude de l'interaction entre une surface solide élémentaire dA de température T_s et l'atmosphère environnante à la température T_a, le flux énergétique $\frac{d\phi_{conv}}{dA}$ allant de la surface vers le fluide s'exprime sous la forme :

$$\frac{d\phi_{conv}}{dA} = h_c(T_s - T_{air}) \tag{1.9}$$

en notant h_c le coefficient convectif de transfert de la chaleur en $\mathrm{W} \cdot \mathrm{K}^{-1} \cdot \mathrm{m}^{-2}$. Ce coefficient dépend notamment des propriétés du fluide concerné et de sa vitesse. Plus la vitesse du fluide est élevée et la différence de températures entre l'air extérieur et les surfaces importante, plus l'échange de chaleur avec les surfaces est significatif. Il est également influencé par les caractéristiques de la surface.

— **Le rayonnement** est l'énergie émise par un corps dans son environnement et dépend de sa température. Pour un corps noir à une température T, le

flux radiatif dQ_r émis pour une surface élémentaire dA s'écrit :

$$dQ_r = \sigma dAT^4 \tag{1.10}$$

où σ est la constante de Stefan-Boltzmann.
Lorsque cette énergie est reçue par un autre corps, elle peut être réfléchie, transmise ou bien absorbée par ce corps. L'énergie émise par un corps non noir dépend de son émissivité ε et devient alors $\varepsilon\sigma T^4$. La partie absorbée de l'énergie est convertie en chaleur. Deux corps de températures différentes placés dans un même milieu échangent ainsi en continu de l'énergie par rayonnement proportionnelle à la différence entre leurs températures jusqu'à l'instant asymptotique où ils atteignent la même température.

Un quatrième mode de transfert de chaleur peut également être mentionné pour son influence aussi bien sur le bilan énergétique urbain que dans le cadre de l'étude des bâtiments : **la chaleur latente**. Dans le cadre de notre étude, il s'agit de l'énergie absorbée ou restituée par l'eau lors de son changement d'état.

1.2.3.2 Bilan énergétique du milieu urbain

L'étude du bilan énergétique en milieu urbain permet de mieux comprendre la façon dont les multiples systèmes peuvent avoir un impact sur l'atmosphère qui les entoure.
Le spectre des radiations dans le milieu atmosphérique est divisé en deux groupes. Les **radiations solaires** de courtes longueurs d'onde (0.3 - 2.5 μm) sont émises par le soleil et donc observables uniquement en période diurne, tandis que les **flux infrarouges** ont des longueurs d'onde plus importantes (2.5 - 18 μm) et s'observent à tout moment.

Nous notons par la suite :

— les radiations de grandes longueurs d'onde ou infrarouges, dont le flux net s'écrit sous la forme :

$$L^* = \varepsilon L^{\downarrow} - \varepsilon\sigma T^4 \tag{1.11}$$

— les radiations de courtes longueurs d'onde ou solaires, pour lesquelles le flux net à la paroi s'écrit :

$$S^* = (1 - \alpha)(S_{dir} + S_{diff}) \tag{1.12}$$

avec

S_{dir}	en $\mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2}$	le flux solaire direct ;
S_{diff}	en $\mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2}$	le flux solaire diffus ;
$L^{\downarrow}$	en $\mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2}$	le flux infrarouge incident provenant de l'atmosphère et des surfaces avoisinantes ;
α		l'albédo de la surface réceptrice ;
ε		l'émissivité de la surface réceptrice.

En milieu rural, on peut écrire le bilan énergétique (Oke, 1987) :

$$Q^* = Q_H + Q_{LE} + \Delta Q_S \tag{1.13}$$

avec

Q^*	le rayonnement net ;
Q_H	le flux de chaleur sensible ;
Q_{LE}	le flux de chaleur latente ;
ΔQ_S	le flux de stockage au sol ;

comme représenté Figure 1.5.

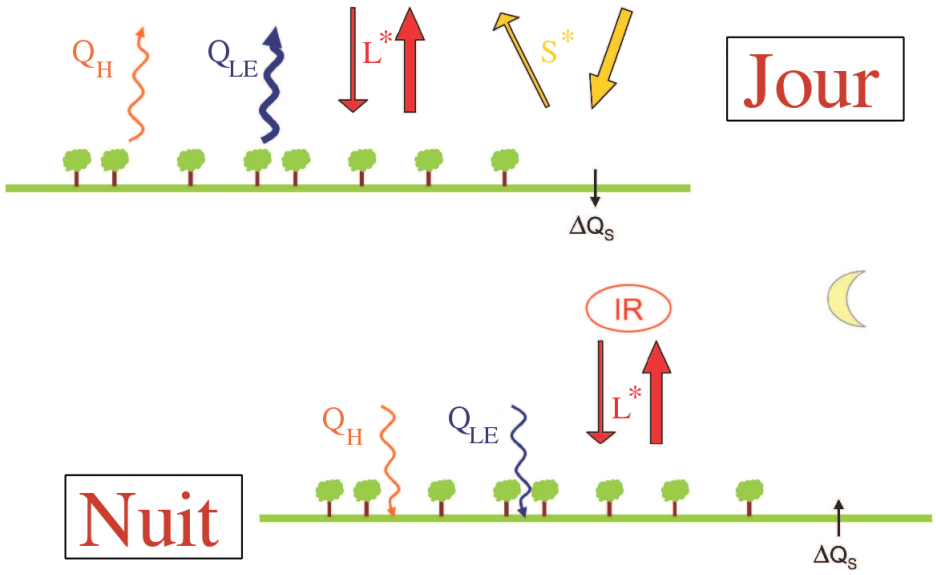


FIGURE 1.5 – Bilans énergétiques diurne et nocturne d'une surface rurale (d'après Milliez (2006)).

À l'inverse des zones rurales où les échanges énergétiques entre les éléments au sol sont relativement limités, le milieu urbain voit son bilan énergétique largement

influencé par ses aménagements (Figure 1.6). On peut écrire ce bilan énergétique (Oke, 1987) :

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

avec

ΔQ_A	le flux horizontal de chaleur entre le milieu urbain et les zones avoisinantes,
Q_F	le flux de chaleur anthropique.

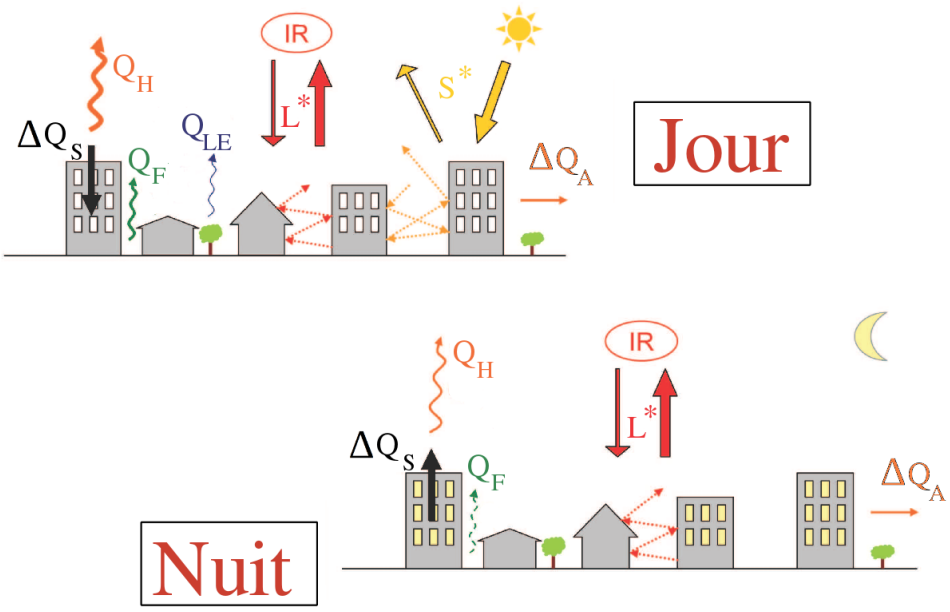


FIGURE 1.6 – Bilans énergétiques diurne et nocturne d'une surface urbaine (d'après Milliez (2006)).

Chaleur anthropique - Le flux de chaleur anthropique ΔQ_F provient de sources liées aux activités humaines telles que les moyens de transports, les bâtiments, notamment avec leurs systèmes de chauffage et de climatisation, les équipements publics ou encore les activités humaines naturelles (métabolisme) ou non (industries). Ce flux peut être important localement, mais il est généralement inférieur à $100\,\mathrm{W \cdot m^{-2}}$ à l'échelle de la ville (Pigeon et al., 2007).

Chaleurs latente et sensible - Le flux de chaleur latente Q_{LE} est beaucoup moins important en milieu urbain, où l'eau ruisselle sur des surfaces imperméables avant d'être évacuée par les égouts au lieu de s'infiltrer dans le sol puis de s'évaporer, où la présence de végétation et donc d'évapotranspiration est limitée et où la température de l'air est plus élevée (Arnfield and Grimmond (1998), Masson (2000)). Le flux de chaleur sensible Q_H est le flux de chaleur par convection thermique dû

aux transferts aérodynamiques de chaleur entre l'air et les surfaces (Bouyer, 2009). Cette convection peut aussi bien être naturelle, engendrée par des gradients de température, que forcée par une sollicitation externe comme le vent.

Chaleur stockée - Les éléments d'un environnement urbain ou rural stockent une partie de la chaleur qu'ils reçoivent la journée pour la libérer durant la nuit. Cette chaleur stockée Q_S est importante en zone urbaine où les revêtements au sol ont souvent des albédos faibles (surfaces sombres et absorbantes) et où les bâtiments ont une importante capacité de stockage via leurs matériaux de construction et l'inertie de leurs volumes.

Flux radiatif - En milieu urbain, on observe des réflexions des flux radiatifs d'une surface à l'autre. Ceci correspond au phénomène de piégeage radiatif qui affecte le bilan énergétique et qui se matérialise par les multi-réflexions des rayonnements sur les différentes surfaces. À chaque réflexion des flux, une partie d'entre eux est absorbée par la surface réceptrice et le reste est réémis vers les autres surfaces ou vers le ciel.

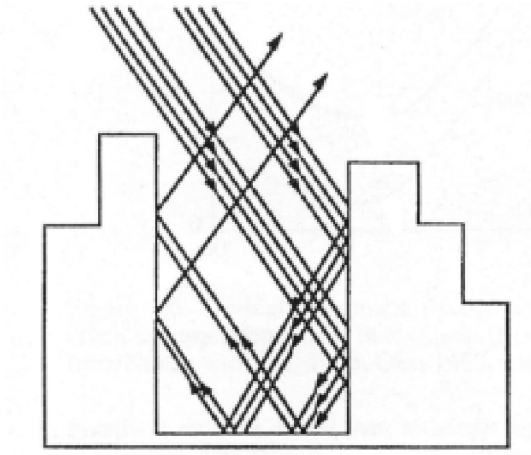


FIGURE 1.7 – Piégeage radiatif entre trois surfaces urbaines (Ringenbach (2004)).

Si l'ombre portée par les constructions urbaines sur les surfaces environnantes limite le flux solaire direct, le piégeage radiatif multiplie les flux solaires diffus par l'environnement en comparaison avec un milieu rural (Milliez, 2006). Ainsi Idczak et al. (2010) soulignent que l'évolution temporelle des températures de surface des bâtiments devrait montrer deux pics, l'un dû aux radiations solaires directes et l'autre à la réflexion produite à la surface de la paroi du bâtiment en vis-à-vis.
L'intensité du piégeage se caractérise par le rapport d'aspect du canyon urbain : plus le canyon est profond, plus le piégeage est important (Bouyer, 2009).

Ce phénomène présente un rôle important dans le bilan radiatif urbain car il réduit significativement le refroidissement nocturne.

1.2.3.3 L'impact des éléments présents dans la canopée urbaine sur l'atmosphère

Après avoir présenté l'influence de la structure urbaine (Section 1.2.1), nous allons à présent détailler les principales caractéristiques urbaines qui peuvent avoir un impact sur les flux radiatifs, les écoulements d'air ou encore sur le confort en milieu urbain.

Les caractéristiques des matériaux de surface, telles que leurs propriétés optiques, thermo-physiques et radiatives, déterminent le comportement des matériaux vis à vis des rayonnements incidents, du transfert ou du stockage de la chaleur. Elles varient considérablement selon la nature des matériaux.
Santamouris (2005) souligne l'influence de la couleur des matériaux : l'augmentation de l'albédo des villes pourrait entraîner une forte diminution de l'îlot de chaleur urbain. Il donne pour exemple la possibilité de diminuer de 2 °C à 4 °C la température de Los Angeles en augmentant l'albédo de 0,13.
Bouyer (2009) cite également les travaux de Berg et Quinn sur l'influence de la couleur des routes. Cette étude montre que des routes peintes en blanc en été avec un albédo de 0,55 ont presque la même température que la température de l'air, alors que les routes classiques, qui présentent un albédo proche de 0,15, sont plus chaudes de 11 °C que la température de l'air.

Les caractéristiques des matériaux de surface sont également très importantes pour les bâtiments dont la nature des matériaux de construction et la couleur de l'enveloppe influencent la chaleur qu'ils absorbent. Ceci influe donc sur l'énergie qu'ils stockent puis libèrent lors d'écarts de température entre leur milieu intérieur et l'atmosphère urbaine.

Outre l'influence de la structure et l'orientation des rues, **la végétation** est également un aménagement urbain susceptible de modifier les écoulements d'air et les températures. En particulier, les arbres ont des effets sur l'atmosphère qui peuvent être complexes et ambivalents. L'insertion de végétation en milieu urbain est l'une des mesures les plus communément proposées dans l'optique de réduire l'îlot de chaleur urbain (Mochida and Lun (2008)). La végétation en ville a une fonction esthétique en termes d'architecture urbaine et peut contribuer à la santé et au bien-être

des habitants (Groenewegen et al., 2006). Mochida and Lun (2008) lui attribuent de nombreux autres effets bénéfiques. Tout d'abord, elle peut procurer du confort thermique en ville grâce à l'évapotranspiration et l'absorption de rayonnement solaire pour la photosynthèse. En outre, les arbres à feuilles caduques offrent de l'ombrage en été avec leurs feuilles et bloquent les échanges entre les surfaces urbaines et le ciel (Coutts, 2015). Ils protègent ainsi les bâtiments d'une partie du rayonnement solaire et améliorent le confort des piétons. En revanche leur ombre est fortement réduite en hiver après la chute de leurs feuilles, permettant ainsi au rayonnement d'atteindre les bâtiments et les rues.

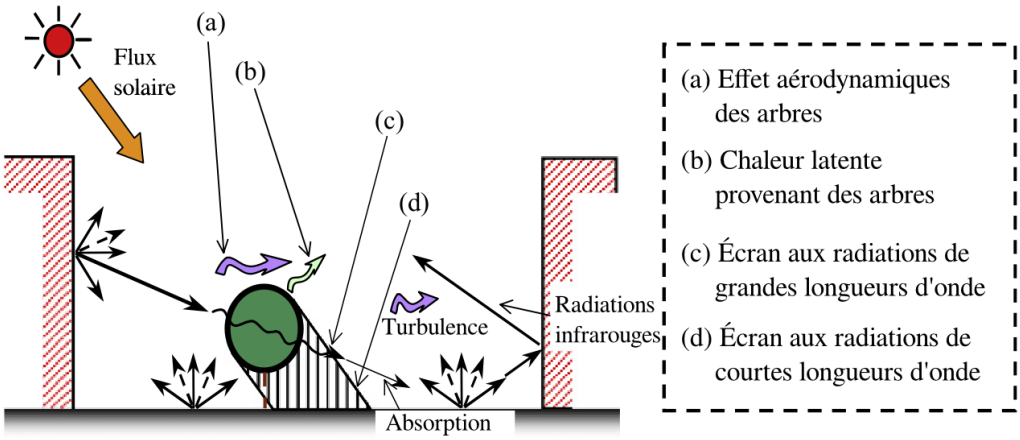


FIGURE 1.8 – Effets dynamiques et thermiques des arbres dans la canopée (d'après Mochida and Lun (2008)).

De nombreuses études relèvent des écarts de températures entre les espaces verts urbains et les quartiers bâtis environnants pouvant aller de 1 à 8°C (Bouyer, 2009), pour des climats, des types d'urbanisme et des étendues d'espace vert variables.

De plus, Mochida and Lun (2008) soulignent l'impact de la végétation sur les vitesses de vent au niveau des piétons. Au même titre que les bâtiments ou les véhicules, la végétation modifie les écoulements de par son impact sur la rugosité et la porosité de la surface urbaine.

D'autres impacts de la végétation sont la modification de la biodiversité et de la qualité de l'air. La plupart des études présentent les impacts positifs sur la qualité de l'air en mettant en avant la capacité des végétaux à capter des particules polluantes de l'atmosphère (Mochida and Lun, 2008). Néanmoins, la présence d'arbres en ville et la modification des écoulements peut entraver la ventilation des rues. Buccoleri et al. (2010) présentent les effets aérodynamiques des arbres sur les mouvements d'air et les concentrations de polluants atmosphériques en ville, en prenant en compte la direction des vents et le rapport d'aspect du canyon urbain dans le cas d'une rue de Bari, en Italie, avec et sans plantation d'arbres. Si les

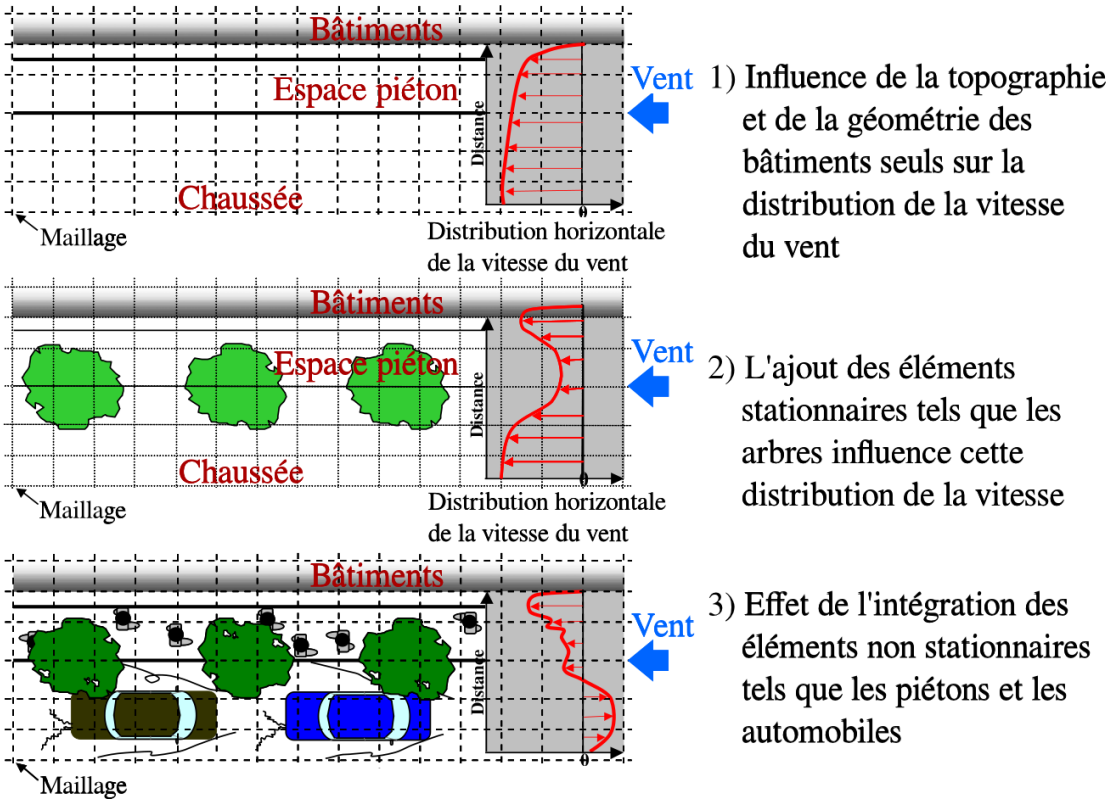


FIGURE 1.9 – Effets des arbres sur l'écoulement du vent dans la canopée (d'après Mochida and Lun (2008)).

arbres contribuent à réduire les concentrations de polluants dans l'air via les dépôts de particules qui se fixent à leur surface, ils constituent en revanche un obstacle aux écoulements d'air qui tendent à évacuer les polluants du canyon urbain. Ils engendrent ainsi une augmentation de la concentration en polluants inertes en ville. Cependant ce phénomène ne s'observe pas pour des substances plus réactives comme l'ozone.
Par ailleurs, l'orientation des rues par rapport aux vents dominants modifie de façon significative l'impact que la végétation peut avoir sur les écoulements d'air et la dispersion des polluants : Buccoleri et al. (2010) démontrent que des rues perpendiculaires aux vents dominants contribuent à la détérioration de la qualité de l'air en ville, et ce d'autant plus si elles sont arborées.

En outre, la végétation peut elle-même émettre des composants organiques volatiles (COV) biogéniques, surtout en conditions de stress telles qu'un important épisode de pollution l'air ou des températures trop élevées (Kesselmeier and Staudt, 1999). Elle peut donc déteriorer la qualité de l'air en ville, engendrant ainsi un effet contraire à celui escompté. Ces émissions de COV dépendent des espèces végétales, d'où l'importance de choisir en conséquence les végétaux à introduire en milieu

urbain.

Nous venons de voir que l'orientation des rues a un impact conséquent sur les écoulements d'air en milieu urbain, en nous intéressant aux cas où il y a de la végétation. De façon plus générale, **l'aménagement urbain** exerce une influence sur les écoulements atmosphériques. D'après l'étude de Acero et al. (2012), les grandes différences de confort thermique entre le nouveau centre-ville et le centre ancien dense de Bilbao s'expliquent par un agencement des canopées tel que les écoulements d'air y sont presque nuls malgré la bonne ventilation générale de la région et du reste de la ville. Les quartiers du centre-ville sont beaucoup plus ventilés et le confort thermique des usagers y est bien meilleur.
L'agencement urbain a en outre un impact conséquent sur les phénomènes radiatifs : les ombres portées par les objets du milieu urbain ainsi que le piégeage radiatif entre leurs surfaces modifient les rayonnements directs et indirects.

Les bâtiments exercent une influence sur l'atmosphère urbaine aussi bien d'un point de vue dynamique, en déviant les écoulements d'air, que thermiquement, en chauffant différentiellement l'air ou en modifiant la dispersion des polluants et les bilans radiatifs. Leurs effets thermiques sont dus non seulement aux transferts de chaleur au niveau de leurs parois, mais également aux divers rejets anthropiques dans l'atmosphère qui les environne, en particulier ceux des systèmes de climatisation ou de ventilation. De par leurs effets sur l'atmosphère urbaine, les bâtiments affectent ainsi d'autres phénomènes tels que la répartition des polluants atmosphériques ou encore le confort en ville.

Nous allons maintenant présenter plus en détail les effets que ces derniers peuvent exercer sur l'atmosphère urbaine, qui correspond à l'environnement extérieur des bâtiments dans notre étude. Nous nous intéressons dans un premier temps à l'impact dynamique que les bâtiments exercent sur l'atmosphère en temps qu'obstacles solides à l'écoulement des flux, avant de présenter les échanges thermiques qui s'opèrent entre ces deux systèmes.

1.2.3.4 Les bâtiments comme obstacles aux écoulements d'air

Les bâtiments constituent des obstacles aux écoulements d'air. À l'inverse de la végétation, il s'agit d'obstacles qui ne sont ni poreux, ni flexibles. Ils sont par ailleurs très majoritairement dotés d'angles saillants conduisant au développement de phé-

nomènes aérodynamiques complexes. Si les bâtiments contribuent à la réduction de la vitesse moyenne du vent en milieu urbain, ils peuvent également engendrer des turbulences susceptibles d'affecter le confort et la sécurité des citadins.
Un bâtiment cubique isolé placé perpendiculairement à l'écoulement provoque des phénomènes complexes de recirculation d'air (Oke, 1987). La Figure 1.10 montre les écoulements autour d'un obstacle parallélépipédique pouvant représenter un bâtiment haut, avec un vent incident perpendiculaire à l'obstacle. Les écoulements incidents sont déviés par le bâtiment et se divisent en flux latéraux de part et d'autre de cet obstacle et en flux ascendant et descendant. Ce dernier engendre l'apparition d'un vortex en forme de fer à cheval au contact du sol, en amont du bâtiment (flèche 5, Figure 1.10). Les flux latéraux s'accélèrent lorsqu'ils passent les côtés du bâtiment, tandis que le flux ascendant contourne le bâtiment par le haut ou bien par les côtés. Le flux descendant contribue également à alimenter les vortex en fer à cheval (point 2, Figure 1.10). On observe des zones de séparation aux angles amont du bâtiment, et l'on peut observer des zones de rattachement plus en aval sur les faces du bâtiment où une dépression s'est mise en place (Beranek and Koten, 1979). Également en raison d'une dépression dans la zone en aval du bâtiment, on observe une direction des écoulements opposée à celle du vent incident : il s'agit de la zone de retour (point 6, Figure 1.10) où deux vortex horizontaux tournant en sens inverses et un vortex vertical se mettent en place.

Chaque obstacle fait perdre au vent incident de l'énergie cinétique de son flux moyen, mais augmente l'énergie cinétique de ses flux secondaires et de sa turbulence (Bottema, 1993). Il en résulte des profils de la vitesse du vent très altérés au passage d'un bâtiment avec des flux turbulents autour et dans le sillage de l'obstacle.

Les perturbations provoquées par le bâtiment se complexifient si le bâtiment a une forme différente ou bien si la direction du vent incident n'est pas perpendiculaire à l'obstacle. La longueur de la zone de retour est d'autant plus importante que l'obstacle est large, et d'autant plus petite qu'il est long (parallèle au flux incident). Selon l'incidence du vent et selon la morphologie du bâtiment considérée, on observe différents phénomènes de recirculation autour du bâtiment et dans les cavités que l'architecture de ce dernier peut former (Figure 1.12). Différents cas d'études portant sur des morphologies de bâtiment et des morphologies urbaines sont observés par Merlier (2015).

Les dimensions du bâtiment sont aussi à prendre en considération. Notamment en raison du profil logarithmique de la vitesse de vent (qui croît avec l'altitude), les bâtiments plus hauts dévient une masse d'air plus importante vers le bas. Ce

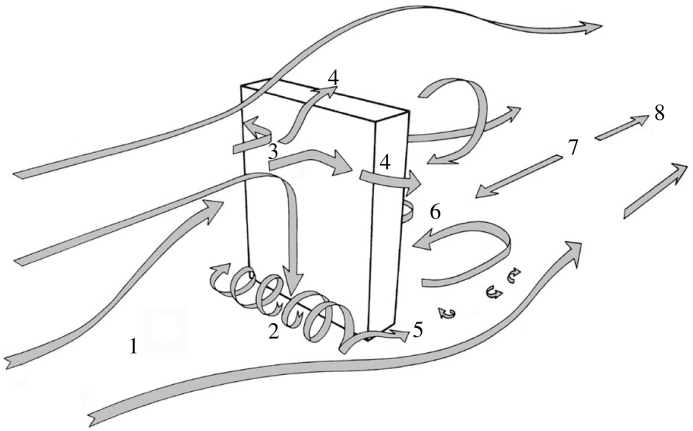


FIGURE 1.10 – Représentation schématique des écoulements d'air autour d'un bâtiment haut (Moonen et al. (2012) et Merlier (2015), d'après Beranek and Koten (1979)).

— au dessus du bâtiment : zone de séparation ;
— 1 et 7 : les régions de stagnation amont et aval (respectivement) ;
— 2 : recirculation en fer à cheval
— 3 : le point de stagnation sur la face amont ;
— 4 et 5 : les courants de bords après séparation des flux ;
— 6 : la zone de retour ;
— 8 : le sillage du bâtiment où le profil de la vitesse du vent apparaît modifié par l'obstacle (Figure 1.11).

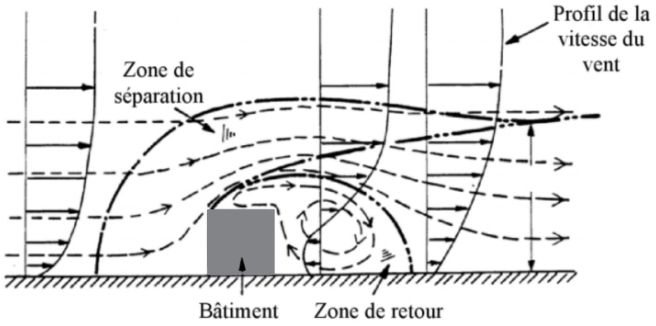


FIGURE 1.11 – Écoulement du vent autour d'un bâtiment cubique en coupe verticale et avec incidence perpendiculaire (Bouyer (2009) d'après M.Robitu (2005)).

phénomène engendre des vitesses de vent plus élevées au niveau de la rue et des piétons.

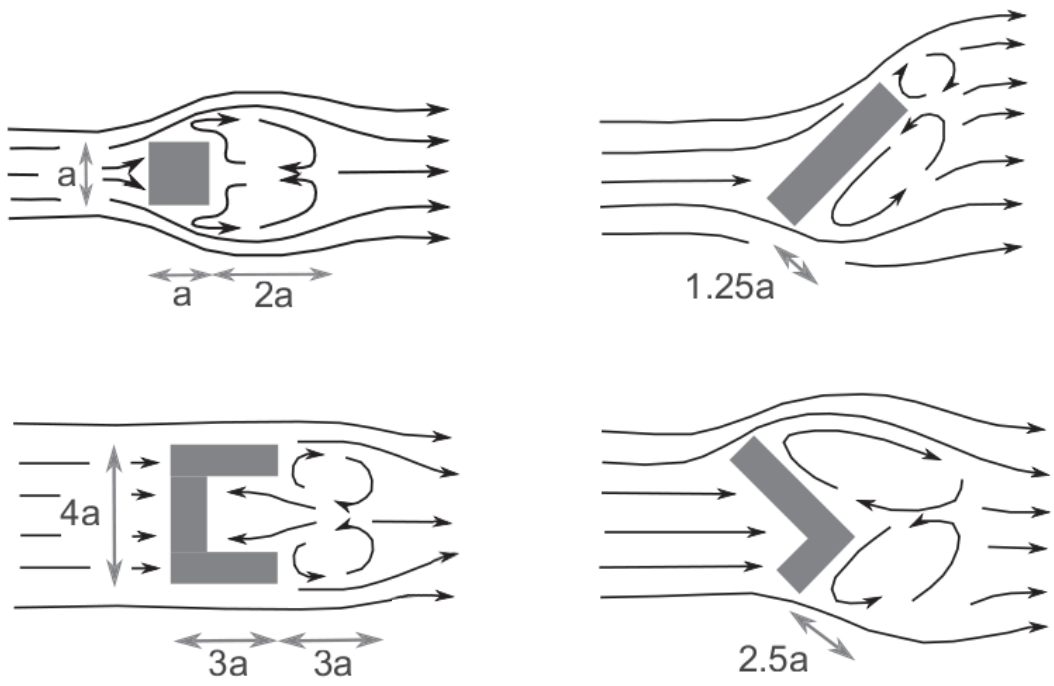


FIGURE 1.12 – Écoulement du vent autour de bâtiments de formes rectangulaires, en U ou en L et avec différentes incidences de vent (figures extraites de Merlier (2015), d'après Brown and M.DeKay (2000)).

Cette modélisation de bâtiments isolés présente des limites dans la mesure où une zone urbaine est caractérisée par un ensemble de bâtiments, et non un seul bâtiment. Les phénomènes observés sont alors d'autant plus complexes qu'un nombre important de bâtiments aux formes et à la disposition complexes entrent en jeu.
Considérons le cas simple d'un canyon urbain, soit l'équivalent de deux bâtiments rectangulaires disposés parallèlement autour d'une rue. Selon le rapport d'aspect du canyon, Oke (1987) définit trois régimes d'écoulement dans des conditions de vent incident perpendiculaire au canyon (Figure 1.13).

- Le **régime de rugosité isolée** lorsque les bâtiments sont suffisamment espacés : la couche de cisaillement se rattache en aval avant d'être perturbée par l'obstacle suivant.
- Le **régime d'interférence des sillages** avec des obstacles plus rapprochés (rapports d'aspect du canyon entre 0,65 et 0,7) : la zone de retour du premier obstacle se voit perturbée par les recirculations entre les deux rangées de bâtiments.
- Le **régime de recouvrement des flux** : un vortex se met en place dans le

canyon et est entretenu par le flux passant au-dessus des obstacles.

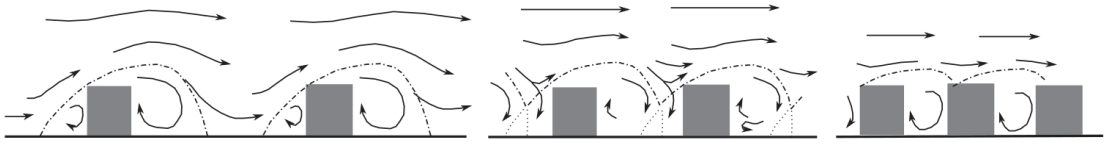


FIGURE 1.13 – Les trois régimes d'écoulement : rugosité isolée, interférence des sillages et recouvrement des flux (Merlier (2015), d'après Oke (1987)).

Enfin, la disposition des bâtiments peut engendrer des géométries urbaines particulières affectant de multiples façons les écoulements (Figure 1.14). L'effet dit « Venturi » [4] est étudié plus particulièrement par Blocken et al. (2008) qui met en évidence une accélération de l'air à proximité du sol. Il souligne en revanche que les vitesses horizontales diminuent en hauteur où les flux tendent à contourner les bâtiments en passant au-dessus ou sur les côtés. L'organisation des bâtiments peut également influer sur les écoulements en les canalisant ou encore en favorisant l'apparition de phénomènes de recirculation dans des espaces intérieurs (travaux de Merlier (2015)). Tous ces effets sont d'autant plus importants à envisager qu'ils peuvent affecter significativement le confort voire la sécurité des citadins.

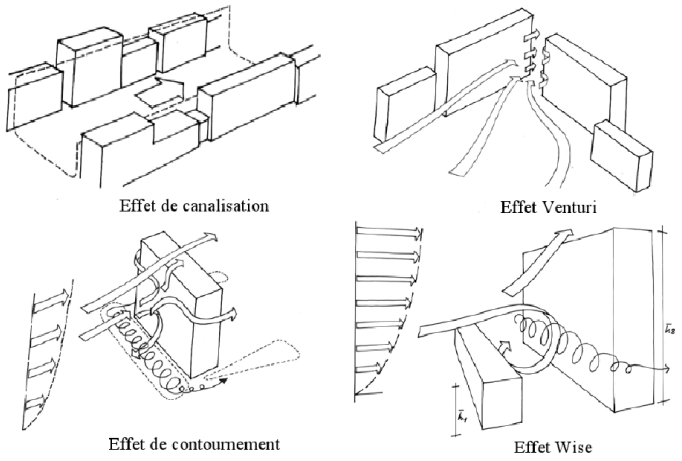


FIGURE 1.14 – Présentation d'effets aérodynamiques types (Bouyer (2009), d'après Gandemer and Guyot (1976)).

4. L'effet Venturi correspond à une accélération du fluide dû à un rétrécissement de la section dans laquelle il circule. Or en milieu urbain peu de sections fermées sont observées, d'où une appellation inappropriée du phénomène (Blocken et al., 2008).

1.2.3.5 Échanges énergétiques entre les bâtiments et l'atmosphère

Si l'influence des éléments extérieurs sur le bâtiment est fréquemment étudiée, notamment afin de réduire la consommation énergétique de ce dernier, l'étude de l'impact thermique des bâtiments sur l'atmosphère n'en est pas moins importante. Ce phénomène est facilement observable dans le cadre d'un canyon urbain, c'est-à-dire d'une rue continue ininterrompue. En simulant des parois surchauffées de 5°C par rapport à la température de l'air, Sini et al. (1995) remarque que si la façade du canyon faisant face au vent est chauffée, elle engendre un flux ascendant qui s'oppose à la recirculation liée à l'entrée de l'air dans le canyon au-dessus des bâtiments. En revanche, si le sol ou la façade du bâtiment aval ont une température de plus de 5°C supérieure à celle de l'air, le vortex qui s'est mis en place dans le canyon est plus intense. Ce phénomène est lié à l'effet de flottabilité : l'air chauffé a une densité moins importante que l'air environnant et présente alors un mouvement ascendant.

Les différents types de transferts thermiques présentés au paragraphe 1.2.3.1 s'appliquent à l'étude du bâtiment (Figure 1.15).

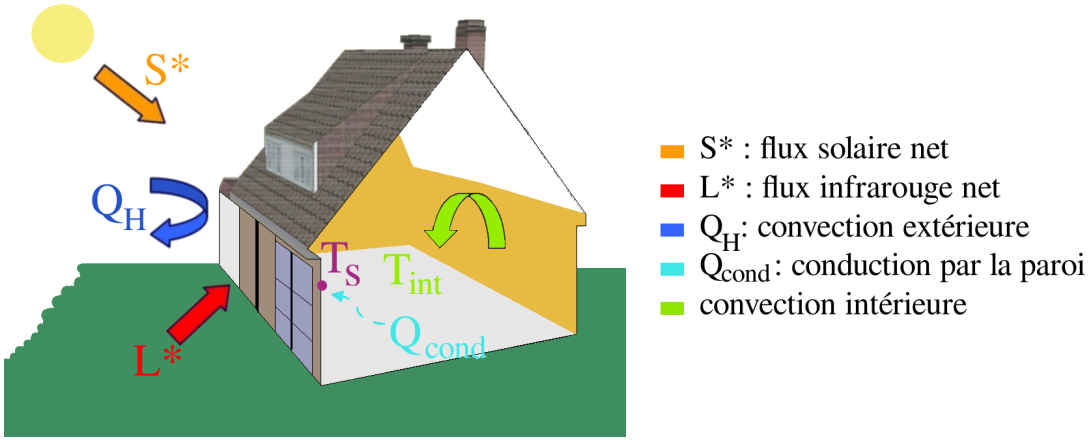


FIGURE 1.15 – Schématisation des différents échanges énergétiques entre un bâtiment et son environnement (d'après Qu (2011)).

On observe de la **conduction** de chaleur à travers les parois du bâtiment engendrée par la différence de température entre ses milieux intérieur et extérieur, et dépendante des matériaux de construction de l'édifice et de leur épaisseur. De même, des phénomènes de **convection** ont lieu de part et d'autre des parois. La convection extérieure nous intéresse plus particulièrement car elle est favorisée par le coefficient de convection extérieure h_{ext} qui dépend lui-même des vitesses du vent dans la canopée. Ainsi les écoulements atmosphériques conditionnent les échanges convectifs

entre l'enveloppe du bâtiment et l'atmosphère. Enfin le bâtiment influe sur les bilans radiatifs de multiples façons. Tout d'abord, il reçoit des **rayonnements solaires et infrarouges** qu'il réfléchit en partie dans l'atmosphère urbaine. Il agit également comme masque solaire en ombrageant d'autres surfaces urbaines et il est lui-même une source de rayonnement infrarouge.
Dans le cadre de l'étude des transferts de masse et de chaleur dans les matériaux constituant l'enveloppe des bâtiments sous sollicitation atmosphérique, Janssen et al. (2007) écrivent le bilan radiatif sur une paroi $Q_r = S^* + L^*$ avec S^* le flux solaire net et L^* le flux infrarouge net (pour une surface échangeant des flux radiatifs avec le ciel et le sol) :

$$L^* = \sigma\varepsilon \left[F_{sol} \left(T_{sol}^4 - T_{s_{ext}}^4 \right) + F_{ciel} \left(T_{ciel}^4 - T_{s_{ext}}^4 \right) \right] \tag{1.14}$$

où

- F_{sol} et F_{ciel} sont les facteurs de vue entre la surface et le sol ou le ciel ;
- T_{sol}, T_{ciel} et $T_{s_{ext}}$ respectivement les températures du sol, du ciel et de la surface extérieure de la paroi ;
- σ la constante de Stefan-Boltzmann ;
- ε l'émissivité du matériau.

F_{sol} et F_{ciel} sont les facteurs de vue entre la surface et le sol ou le ciel.

Deux propriétés principales des parois du bâtiment influencent donc les échanges radiatifs. Leur émissivité intervient dans le bilan radiatif infrarouge, tandis que leur albédo modifie leur comportement au rayonnement solaire. Ainsi un mur présentant un albédo important (un mur de couleur claire) réfléchit plus de rayonnement solaire qu'un mur à l'albédo faible, et un mur dont l'émissivité est importante émet plus de rayonnement infrarouge dans l'atmosphère.

Les matériaux des bâtiments sont considérés comme des milieux poreux où ont lieu des échanges de chaleur sensible et latente dus aux transferts de vapeur d'eau (Janssen et al., 2007) :

$$Q_H + Q_{LE} = (c_v T_{s_{ext}} + L_v)\, h_{m,e} (p_{v_{ext}} - p_{v_{surf,ext}}) \tag{1.15}$$

avec

- Q_H le flux convectif (ou de chaleur sensible) sur la paroi ;
- Q_{LE} le flux de chaleur latente ;
- $h_{m,e}$ le coefficient de transfert de masse ;
- $p_{v_{ext}}$ la pression de vapeur extérieure
- et $p_{v_{surf,ext}}$ la pression de vapeur au niveau de la surface ;

— c_v la chaleur spécifique de la vapeur ;
— L_v la chaleur de vaporisation en $J \cdot kg^{-1}$.

Les transferts de vapeur d'eau entre deux points sont ainsi entraînés par les différences de pression de vapeur entre la surface et l'air extérieur et par la température de la surface du bâtiment.

Les bâtiments échangent ainsi de la chaleur et de la masse au niveau de leurs parois avec leur environnement extérieur, et ces échanges dépendent aussi bien des propriétés des parois du bâtiments et de son milieu intérieur que des caractéristiques de l'atmosphère qui l'environne.

1.2.3.6 Conclusion

L'atmosphère urbaine est un milieu complexe soumis aux influences des multiples éléments présents dans la canopée urbaine. La structure du tissu urbain, la présence de végétation ou encore les bâtiments ont des impacts sur les écoulements de l'air. Parmi ces éléments, les bâtiments nous intéressent plus particulièrement : s'ils influent sur l'atmosphère de différentes façons, il apparaît que leur bilan énergétique est lui-même dépendant des propriétés dynamiques et physico-chimiques de l'atmosphère urbaine. Des échanges ont lieu entre les deux systèmes qui sont donc interdépendants. Ainsi nous allons à présent changer de point de vue et nous intéresser aux phénomènes énergétiques qui ont lieu au sein du bâtiment.

1.3 Énergétique du bâtiment

La physique du bâtiment correspond à l'étude du comportement des bâtiments et de leurs composants en termes de transferts de chaleur et de masse, d'acoustique, d'éclairage, d'énergie et de propriétés des environnements intérieur et extérieur (Blocken, 2012).
Cette partie se centre sur l'aspect énergétique du bâtiment lié au microclimat urbain afin de pouvoir mieux appréhender l'influence de l'atmosphère urbaine sur les bâtiments.

1.3.1 Le secteur du bâtiment en quelques chiffres

Les bâtiments exercent une influence importante sur de nombreux phénomènes physiques, notamment en milieu urbain où leur densité est importante. Les secteurs résidentiel et tertiaire représentaient 20 % des émissions de gaz à effet de serre

et 24 % des emissions de CO_2 en France en 2012 (ADEME, 2014), et comptaient pour 45 % de la consommation d'énergie finale en 2013 (ADEME, 2014) (35 % à l'échelle mondiale), devant les autres secteurs comme les transports (31 %) ou l'industrie (21 %). Les bâtiments constituent ainsi à la fois une source de pollution atmosphérique et de consommation énergétique importante. Ceci en fait également l'un des gisements d'économie d'énergie les plus importants.

1.3.2 Effet du microclimat urbain sur le comportement énergétique du bâtiment

Nous avons abordé au paragraphe 1.2.3.5 les différents modes de transferts énergétiques entre les bâtiments et l'atmosphère qui les environne. Il s'agit d'échanges d'énergie et de masse qui s'opèrent entre les deux systèmes et qui impliquent donc leur interdépendance.
Le microclimat urbain affecte les conditions thermiques intérieures du bâtiment, et ainsi sur son comportement énergétique, de différentes façons. Tout d'abord, les rayonnements directs et diffus, altérés par les éléments urbains et par les matériaux de revêtements (cf. paragraphe 1.2.3.3), affectent les bâtiments. D'autre part, la température et la vitesse de l'air extérieur influent sur les échanges conductifs et convectifs entre le bâtiment et son milieu (Figure 1.16). En outre, l'enveloppe d'un bâtiment n'est pas étanche et des infiltrations d'air ont lieu au niveau des endroits moins isolés ou bien par les systèmes de ventilation (Figure 1.17).

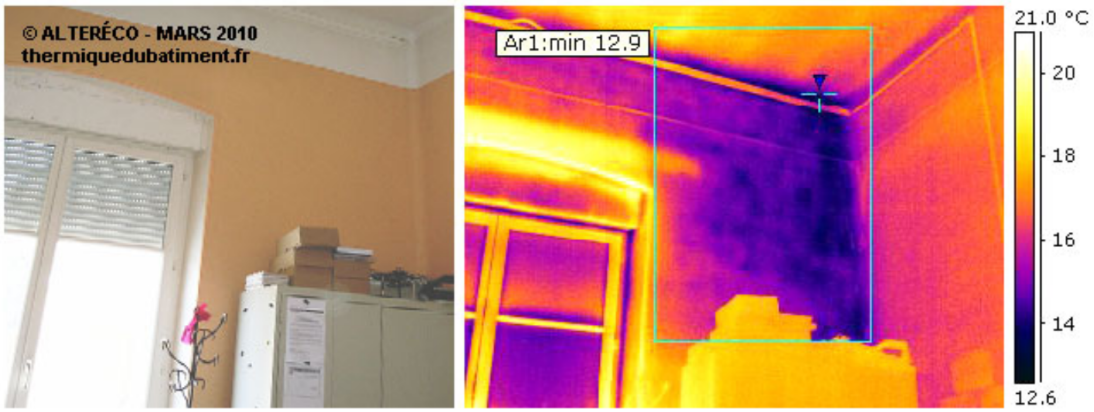


FIGURE 1.16 – Effet de la conduction dans la paroi du bâtiment sur le milieu intérieur (ALTERÉCO (2015b)).

Lors de la modélisation d'un bâtiment ou d'un groupe de bâtiments, les températures extérieures sont utilisées comme conditions limites pour prendre en compte

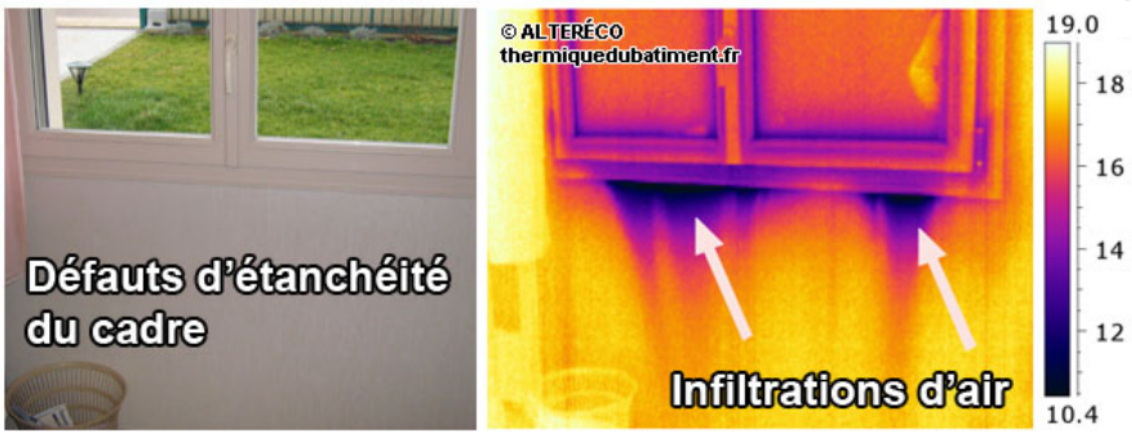


FIGURE 1.17 – Infiltrations d'air extérieur dans un bâtiment au niveau d'une menuiserie (ALTERÉCO (2015a)).

les divers échanges qui s'opèrent entre le bâtiment et son environnement extérieur (Bueno et al., 2012a).

De nombreux paramètres influencent la consommation énergétique des bâtiments : microclimat local, ombrages des bâtiments environnants (réduction des apports solaires), multiréflexions entre les surfaces urbaines, impact du vent sur la ventilation naturelle et la convection dynamique au niveau de l'enveloppe, rafraîchissement passif.

L'îlot de chaleur urbain affecte la demande énergétique des bâtiments de par son impact sur les gains de chaleur du bâtiment par infiltrations ou par transferts. La conception du bâtiment a donc un rôle en limitant ou en favorisant ces échanges. Ainsi un bâtiment présentant une proportion importante de surface vitrée sera plus affecté par l'îlot de chaleur urbain.
L'îlot de chaleur urbain contribue ainsi à augmenter la demande énergétique des bâtiments pour répondre aux besoins de refroidissement. Kikegawa et al. (2003) étudient la consommation énergétique dans un quartier de Tokyo où les systèmes de climatisation de l'air sont omniprésents. Ils remarquent ainsi que cette consommation est directement proportionnelle à la température maximale journalière de l'air lorsque celle-ci dépasse 28 °C, c'est-à-dire lorsque les systèmes de refroidissement sont en fonctionnement. Cette surconsommation participe par ailleurs à une aggravation du phénomène en rejetant de la chaleur dans l'atmosphère urbaine.

Des études ont été menées sur les échanges de chaleur radiative entre les bâtiments

et sur la chaleur émise par les systèmes de climatisation dans la canopée. Ashie et al. (1999) ont développé un modèle de canopée couplé avec une modélisation CFD [5], afin d'analyser le climat urbain et de clarifier les interactions entre les conditions intérieures et extérieures des bâtiments. Cette étude est réalisée en intégrant les systèmes de conditionnement d'air et l'impact de l'agencement des bâtiments sur les températures extérieures et la consommation en climatisation.
L'agencement des bâtiments en milieu urbain influe sur les ensoleillements de leurs surfaces et du sol. Le modèle considère donc les ratios de surfaces ensoleillées et les phénomènes de piégeage radiatif et permet d'observer l'impact d'une forte densité de bâtiments sur le rafraîchissement nocturne. À partir des informations concernant diverses sources de chaleur interne (consommation énergétique dans le bâtiment liée à son usage) et de chaleur externe (telles que les radiations solaires) et en intégrant la performance des systèmes de climatisation, le modèle estime l'influence de l'agencement des bâtiments sur la consommation énergétique de la climatisation. Ainsi, l'implantation des bâtiments permet de réduire l'énergie de refroidissement de 3 à 25 %.
Les modélisations de Ashie et al. (1999) mettent également en évidence que la plantation de végétaux sur le sol et les toits des bâtiments réduit la température de l'air, les besoins en rafraîchissement et la consommation énergétique pour le rafraîchissement (de 13 % pour cette dernière).

Dans l'expérience développée par Ali-Toudert (2009), différentes géométries urbaines et conception des bâtiments ont été testées dans trois régions climatiques différentes. Le projet avait pour objectif de mettre en évidence les interdépendances entre les échelles de la ville et du bâtiment sur le plan énergétique ainsi que les effets de ces éléments sur le microclimat urbain. À cette fin, des ensembles urbains avec différents rapports d'aspect et orientations solaires et constitués de bâtiments présentant des ratios de surfaces vitrées, des isolations thermiques et des inerties thermiques variables sont étudiés. S'il est mis en évidence que le microclimat urbain diffère sensiblement des données climatiques standard avec en particulier des températures plus élevées dans la canopée et que ces écarts dépendent de la structure urbaine, les changements de température affectent le bâtiment. En outre, l'inertie thermique des bâtiments contribue à ralentir les variations de températures du milieu urbain. Il en résulte des différences de températures entre les zones rurales et urbaines plus extrêmes.
Les changements de température de la canopée occasionnés et la conception du bâtiment peuvent influer quand à eux sur les besoins en chauffage ou en rafraîchissement des bâtiments.

5. Dynamique des fluides numérique ; Computational Fluid Dynamics (CFD)

Les bâtiments interagissent donc sur les besoins énergétiques les uns des autres par la modification du microclimat urbain qu'ils occasionnent. En outre, une meilleure isolation du bâtiment de son environnement extérieur (obtenue en végétalisant les surfaces du bâtiment ou en utilisant une proportion de matériaux opaques) et l'ajout de végétation dans cet environnement contribue à rafraîchir le bâtiment en période de chaleur.

1.3.3 Conclusion

Nous nous sommes intéressés dans cette partie aux échanges qui ont lieu au niveau des parois des bâtiments, sans considérer en détail les autres échanges relatifs par exemple aux rejets des systèmes de ventilation ou de climatisation dans la canopée urbaine. Nous avons donc pu voir qu'une paroi de bâtiment est un lieu d'échanges entre l'atmosphère et le bâtiment. Des transferts de masse, notamment avec la vapeur d'eau et l'air, et d'échanges de chaleur s'y mettent en place. Ces derniers se divisent en trois catégories : les transferts convectifs qui ont lieu à la surface de la paroi, les transferts conductifs qui la traversent et les échanges radiatifs avec l'énergie solaire et les flux infrarouges issus de l'environnement de la paroi. Cette étude met en évidence l'influence des conditions de l'air extérieur, qui ont un rôle important pour les flux conductifs et convectifs. Les bâtiments sont également soumis au rayonnement radiatif provenant de l'atmosphère et de leur environnement. L'utilisation conjointe d'un modèle de bâtiment, qui résoudra les équations de transferts thermiques, et d'un logiciel de CFD capable de procurer des informations plus fines concernant les données extérieures serait donc pertinente aussi bien pour une étude atmosphérique que pour l'étude énergétique d'un bâtiment.

1.4 Conclusion et problématique

L'atmosphère urbaine peut se définir comme un système complexe en interaction avec de nombreux éléments. Or chacun de ces éléments affecte et est influencé par les propriétés physiques de l'atmosphère, et le bâtiment est un élément clef du paysage urbain. Comme nous l'avons vu précédemment, il agit à la fois en tant qu'obstacle sur les écoulements et comme source ou puits de chaleur, aussi bien pour le bilan thermique de ses parois que pour les rejets de chaleurs issus de la climatisation ou de la ventilation. Enfin, il modifie le bilan radiatif en contribuant à stocker ou réémettre les flux qu'il reçoit de son environnement et en créant de l'ombrage dans la canopée. Il s'agit donc d'un élément qu'il est nécessaire d'inclure pour simuler en détail la dynamique des écoulements atmosphériques.

De nombreux outils de modélisation des bâtiments ont été réalisés. Ils sont généralement élaborés afin de pouvoir estimer les consommations d'un bâtiment donné et d'étudier les méthodes possibles pour diminuer son empreinte écologique sans dégrader son confort intérieur. Ils utilisent habituellement les données climatiques standard de vent et de températures comme conditions limites. Cependant, les effets du microclimat urbain sont généralement négligés (Ali-Toudert (2015), Bueno et al. (2012a)). Or ces derniers interviennent aussi bien sur les transferts de chaleur à travers les parois, comme la porosité ou la conduction, que dans les échanges énergétiques liés à la ventilation du bâtiment.

Parallèlement, Kikegawa et al. (2003) ont mis en évidence que la non prise en compte des effets thermiques des bâtiments engendre des erreurs dans l'estimation de la température de l'air. Les données du bâtiment sont habituellement utilisées comme conditions limites lors de l'étude de la dynamique des écoulements de l'air en milieu urbain, notamment la température intérieure et la température de surface extérieure. Des modélisations plus approfondies pourraient également intégrer les échanges énergétiques qui s'opèrent au niveau des extractions de ventilation ou de climatisation.

Nous sommes ainsi en présence de deux communautés scientifiques traitant deux sujets interdépendants. Pour cette raison, il existe un réel besoin de coupler les outils numériques de modélisation atmosphérique et du bâtiment.

C'est dans ce contexte que s'ancre ce travail de thèse, où les résultats des simulations atmosphériques seront plus particulièrement détaillés. Nous cherchons à étudier les effets de l'énergétique des bâtiments sur les écoulements à l'échelle de l'îlot urbain. Le choix de cette échelle se justifie par l'observation que l'on peut y faire de ces phénomènes et il s'agit de l'échelle adaptée à l'étude de l'influence de nouveaux quartiers, de l'impact des conditions de vent sur les bâtiments et de la ventilation naturelle.

Ainsi, après une revue des travaux prenant en compte les bâtiments et l'atmosphère urbaine exposée à la Partie 2, nous présentons l'étude de différents modèles de bâtiments afin de déterminer quel couplage avec un logiciel de dynamique des fluides atmosphérique s'avère le plus pertinent. Nous détaillons ensuite le couplage réalisé entre ces deux outils Chapitre 3. Dans le Chapitre 4, nous présentons la campagne de mesures EM2PAU que nous utilisons pour la validation de notre modèle. Nous y analysons les données de cette expérimentation afin d'étudier les effets thermiques que les bâtiments peuvent exercer sur les écoulements d'air dans le canyon. Enfin nous étudions ces effets grâce aux simulations réalisées et validons le modèle dans le Chapitre 4.

Chapitre 2

État de l'art sur la modélisation urbaine

Sommaire

2.1 Modèles de climat urbain 44

2.1.1 Modèles de canopée urbaine complets 45

2.1.2 Modèles de canopée urbaine obtenus par couplage d'outils spécifiques 47

2.1.3 Conclusion 50

2.2 Modélisation énergétique du bâtiment 51

2.2.1 Les transferts thermiques au niveau d'une paroi 51

2.2.2 Forme matricielle généralisée du modèle d'état 54

2.2.3 État de l'art sur les outils de modélisation du bâtiment . 55

2.2.4 Conclusion et choix d'un modèle de bâtiment 67

2.3 Conclusion du chapitre 68

Nous avons vu en première partie l'importance des échanges qui ont lieu entre les bâtiments et l'atmosphère environnante. Ces interactions entre les deux domaines justifient le besoin de développer des outils qui puissent à la fois modéliser les phénomènes dynamiques et radiatifs complexes qui ont lieu dans un milieu urbain, ainsi que les propriétés des bâtiments qui en occupent une surface importante.

Il existe de nombreux modèles de climat qui s'efforcent d'intégrer les effets des bâtiments sur l'atmosphère urbaine. Nous pouvons ainsi citer le modèle TEB (Town Energy Budget) ou les logiciels de dynamique des fluides OpenFoam, Fluent et *Code_Saturne*.

Nous réalisons des études numériques de dynamique des fluides appliquée à l'atmosphère urbaine avec le logiciel *Code_Saturne*, présenté au Chapitre 3, à l'échelle de la canopée urbaine. De par cette influence que les bâtiments exercent sur l'atmosphère que nous simulons, nous avons besoin d'un modèle de bâtiment qui puisse être utilisé conjointement dans nos travaux.

Dans un premier temps, nous nous intéressons aux travaux qui ont déjà été réalisés dans cette voie. Puis nous étudions les modèles d'énergétique du bâtiment afin de pouvoir choisir un logiciel qui convienne au couplage que nous projetons de réaliser.

2.1 Modèles de climat urbain

Les modèles méso-échelles intègrent de plus en plus des modèles de canopée urbaine avec des modèles énergétiques des bâtiments (Bueno et al., 2012b). Le couplage d'un outil de modélisation du climat urbain avec des modèles énergétiques appliqués au bâtiment permet d'étudier les effets du bâtiment sur l'écoulement de l'air ainsi que la demande et la consommation énergétiques des bâtiments en milieu urbain.

Il existe trois principales méthodes pour étudier le climat urbain. La première consiste à étudier l'air de la canopée et les différentes surfaces, dont les parois des bâtiments, dans un même code. La deuxième méthode est d'implémenter dans le modèle de climat urbain un modèle de simulation énergétique du bâtiment. Enfin la troisième méthode est le couplage de ces deux outils qui calculent chacun les conditions limites de l'autre. La comparaison des résultats de ces méthodes avec des données expérimentales révèle les avantages de la simulation intégrée du bâtiment.

Nous distinguons dans cette étude d'une part les modèles de canopée urbaine que nous qualifions de « complets » car ils intègrent les échanges avec les bâtiments, et d'autre part les modèles composés, où un modèle de bâtiment est couplé avec dans un modèle de canopée urbaine.

2.1.1 Modèles de canopée urbaine complets

2.1.1.1 TEB (Town Energy Budget)

TEB (Town Energy Budget, Masson (2000)) est un modèle tridimensionnel de canopée urbaine qui permet d'évaluer les flux de quantité de mouvement, les flux turbulents et les flux d'énergie et d'eau entre la canopée urbaine et l'atmosphère.

Les caractéristiques de la ville et leurs effets sur l'atmosphère sont moyennés spatialement. Les géométries de chaque bâtiment ne sont donc pas individuellement prises en compte. La forme générale et les matériaux de construction des bâtiments sont pris en compte pour élaborer un canyon urbain entouré de deux rangées de bâtiments identiques. Trois surfaces différentes avec des bilans énergétiques propres à chacune sont distinguées dans le canyon : les murs, les toits et la chaussée (Masson (2000), Lemonsu et al. (2004)).
La surface urbaine est représentée comme un assemblage de canyons urbains bidimensionnels aux bâtiments de mêmes hauteur et largeur situés le long de routes identiques. Toutes les orientations sont possibles pour les canyons afin de s'approcher au mieux de la structure réelle d'une ville. Les murs sont traités de façon identique pour les calculs sauf en ce qui concerne le rayonnement solaire direct. De plus, des bilans énergétiques sont ajoutés pour les surfaces horizontales (toits et routes) en présence de neige. Ce modèle peut donc s'adapter à différentes conditions météorologiques et aux cycles diurnes. Il reproduit le bilan énergétique des surfaces urbaines à méso-échelle (Masson, 2000).

TEB peut également modéliser les flux de chaleur et d'humidité anthropiques provenant du logement, du trafic routier ou de l'industrie (Masson (2000). Il retourne alors les conditions climatiques et les flux d'énergie dans le quartier ou la ville étudiés (Bueno et al., 2011). TEB est également utilisé avec SURFEX, l'ensemble permettant de modéliser différents types de surfaces urbaines, composées de matériaux de construction aussi bien que de surfaces d'eau ou de végétation.

2.1.1.2 Modèle RC urbain

Le modèle de Résistance-Capacitance est issu des équations de conservation de l'énergie similaires aux équations de conservation en électricité. Il repose sur des

réseaux de résistances et de capacitances pour représenter les différents éléments (Bueno et al., 2012a), et l'on peut ainsi facilement relier les paramètres internes au bâtiments aux éléments extérieurs (Figure 2.1).

Le modèle de bâtiment monozone avec masse thermique interne repose sur les hypothèses suivantes : température intérieure constante, taux d'infiltration et de ventilation constants, gains internes constants, sol du bâtiment adiabatique, température homogène dans le canyon.

Il s'agit donc d'un modèle simple et facile à mettre en place tout en étant numériquement efficace, et il peut s'étendre d'une partie de bâtiment à tout un quartier. Il permet donc de modéliser à la fois le bâtiment et le microclimat urbain. Cependant il n'intègre pas les écoulements atmosphériques.
Le modèle RC urbain représente les relations physiques fondamentales qui régissent les interactions entre les bâtiments et leur environnement. Bueno et al. (2012a) l'utilisent pour étudier les effets de l'îlot de chaleur urbain sur la consommation énergétique et inversement l'impact de l'environnement intérieur du bâtiment sur les températures d'air extérieur. Le modèle leur permet ainsi de mettre en évidence les effets de la ventilation et des transferts thermiques qui ont lieu au niveau de l'enveloppe du bâtiment, en donnant des résultats proches de ceux du couplage de TEB avec le modèle de bâtiment EnergyPlus.

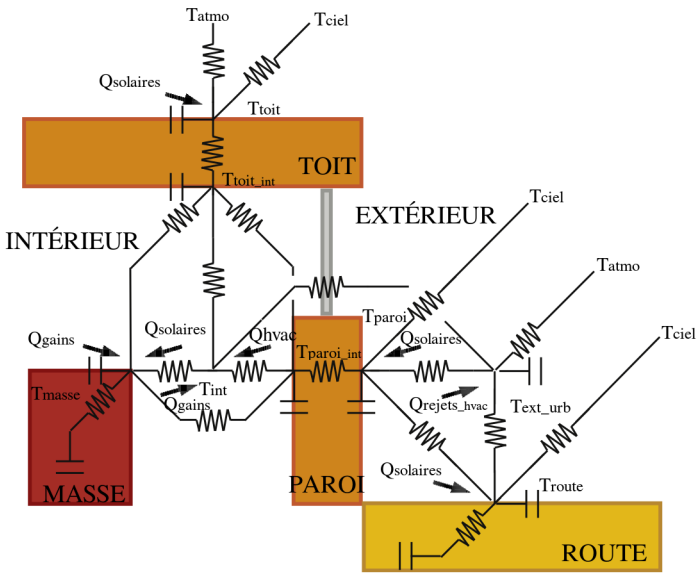


FIGURE 2.1 – Représentation d'une canopée urbaine et d'un modèle énergétique de bâtiment modélisés par réseau de résistances et capacitances (d'après Bueno et al. (2012a))

2.1.1.3 Modèle d'énergétique du bâtiment intégré à un modèle de canopée urbaine

Le modèle présenté par Kikegawa et al. (2003) a été développé afin d'évaluer la consommation énergétique des bâtiments et l'influence de la climatisation sur la température de l'air extérieur. Il est constitué de trois éléments :

- un modèle météorologique méso-échelle tridimensionnel MM ;
- un modèle de canopée unidimensionnel CM capable de calculer les variations temporelles de la température de l'air, de l'humidité et des vitesses du vent dans la canopée urbaine ;
- un modèle d'analyse énergétique du bâtiment BEM, où le bâtiment est considéré comme une boîte.

MM communique à CM les conditions initiales et des couches supérieures du domaine couvert par ce modèle de canopée. Parallèlement, BEM fournit à CM des données sur les flux de chaleur anthropique émis par les bâtiments. BEM a été développé afin de calculer la consommation énergétique des bâtiments pour la climatisation et les rejets de chaleur qu'elle occasionne dans la canopée. Il calcule les échanges de chaleur entre l'air intérieur et les murs du bâtiment, les gains solaires et internes ainsi que les échanges dus à la ventilation. Il prend également en compte les coefficients de performance (COP) des systèmes de climatisation.
Ce modèle permet de prédire avec une précision satisfaisante la consommation énergétique pour le rafraîchissement des bâtiments et les variations de températures intérieures et extérieures.

2.1.2 Modèles de canopée urbaine obtenus par couplage d'outils spécifiques

2.1.2.1 Utilisation conjointe d'outils de modélisation atmosphérique et de simulation énergétique du bâtiment

L'étude présentée dans l'article de Saneinejad et al. (2011) se penche sur les effets du rafraîchissement par évaporation au niveau des températures dans un canyon urbain. Elle présente un modèle déterminant les échanges massiques et de chaleur entre les parois du canyon et l'air. Ce modèle est donc un couplage entre deux sous-modèles qui échangent leurs résultats à chaque pas de temps :

- un modèle de CFD qui résout les transferts de chaleur et d'humidité ;
- un modèle de transport de chaleur, d'air et d'humidité de l'enveloppe du bâtiment (BEHAM), qui résout ces transferts dans les parois des bâtiments poreux.

On introduit le coefficient de transfert de chaleur convectif $h_c = \frac{q_{c,h,w}}{T_w - T_{ref}}$ et le coefficient de transfert de masse convectif $h_m = \frac{q_{c,m,w}}{p_w - p_{ref}}$ avec

— $q_{c,h,w}$ flux de chaleur normal à la surface ;

— $q_{c,m,w}$ flux massique normal à la surface ;

— T_w et p_w les température et pression de vapeur du mur ;

— T_{ref} et p_{ref} les température et pression de la vapeur au lieu de référence.

Les indices c, h et m font référence aux valeurs de surface de convection, de chaleur et d'humidité du mur w.

On observe alors que le profil du coefficient de convection extérieure change continuellement au cours du temps.

Dans le modèle couplé, chaque sous-modèle résout les transports convectifs de chaleur, d'air et d'humidité : l'un dans l'air, et le second dans la paroi poreuse. L'auteur étudie également le pas de temps optimal à adopter pour le couplage, en prenant pour référence 28 secondes, et en allant de 28 à 1800 secondes. Un pas de temps de 112s s'est révélé être le meilleur compromis entre efficacité et précision. Une comparaison entre les températures dans le canyon urbain avec et sans couplage révèle une différence pouvant aller jusqu'à 0.7°C, d'où l'intérêt du couplage pour des prédictions plus fiables.

2.1.2.2 Le modèle thermo-radiatif SOLENE Micro-Climat

Le logiciel 3D d'ensoleillement et de thermique SOLENE est un modèle thermo-radiatif créé en 1993 par le CERMA, CEntre de Recherche Méthodologique d'Architecture (Miguet and Groleau (2002), Hénon (2008), Idczak et al. (2010)). Initialement conçu afin de modéliser les flux solaires, l'éclairage naturel et les rayonnements infrarouges pour un bâtiment ou un ensemble de bâtiments, il est utilisé pour l'analyse des équilibres énergétiques du canyon urbain. Il est par ailleurs constamment développé afin d'étudier les aspects environnementaux des projets urbains et architecturaux. SOLENE calcule les apports solaires, lumineux et thermiques des éléments urbains sur les conditions extérieures et le confort urbain, mais il n'intègre pas les flux de chaleur latente ou anthropique.

Capable de prendre en compte des géométries complexes, SOLENE permet l'analyse des interactions entre la forme urbaine et ses dimensions environnementales et climatiques, mais également la corrélation des données géométriques de l'espace bâti avec les propriétés physiques urbaines.

Les surfaces de l'espace modélisé sont représentées par un réseau tridimensionnel de maillages hexaédriques ou tétraédriques dont chaque facette a une surface d'environ

$1\,m^2$. L'ensemble est surplombé par une voûte céleste hémisphérique qui permet de prendre en compte la radiation solaire diffuse anisotrope, c'est-à-dire dépendante de la direction considérée.
La radiation thermique infrarouge du ciel est supposée isotrope (identique quelle que soit la direction).

Les applications de ce logiciel sont très diverses, pouvant aller du microclimat urbain à l'élaboration de systèmes de rafraîchissement ou de bâtiments basse consommation (Ringenbach (2004), Bouyer (2009), Idczak et al. (2010), Qu (2011), Athamena et al. (2011), Malys (2012)).

2.1.2.3 Couplages réalisés avec le modèle micro-météorologique TEB -

On peut relever différents couplages opérés entre le modèle de canyon urbain TEB (présenté au paragraphe 2.1.1.1) et des logiciels de modélisation du bâtiment. Nous pouvons tout d'abord énoncer le couplage effectué avec EnergyPlus (paragraphe 2.2.3.1) comme présenté par Bueno et al. (2011) et Crawley et al. (2001), réalisé afin de proposer une représentation plus réaliste des caractéristiques des bâtiments et ainsi une analyse plus fine des interactions entre les bâtiments et le microclimat urbain. Cependant, ce couplage requiert de nombreuses itérations entre les deux modèles et l'ajout d'un couplage avec un modèle atmosphérique en est d'autant plus compliqué (Bueno et al., 2012b). Ensuite TEB propose l'intégration du modèle d'énergétique du bâtiment BEM (paragraphe 2.1.1.1) intégré au modèle de canopée (Kikegawa et al. (2003), Salamanca et al. (2010)). Ce modèle de bâtiment est suffisamment complet pour produire des résultats similaires à EnergyPlus à l'échelle d'un quartier (Bueno et al., 2012b), EnergyPlus étant pourtant plus sophistiqué.

Ali-Toudert (2015) élabore un couplage entre les modèles urbain TEB et de bâtiment TRNSYS (paragraphe 2.2.3.1) afin d'étudier la demande énergétique des bâtiments en ville. Il s'agit ici d'implémenter TEB dans TRNSYS, opération rendue possible par la modularité de TRNSYS. En outre, TEB possède des caractéristiques relatives aux pas de temps et durée de simulation favorisant son couplage avec TRNSYS. Dans le cadre du couplage, TEB retourne tous les termes de l'équilibre énergétique urbain au modèle de bâtiment. Il permet également de remarquer les impacts de la géométrie des canyons et de la construction des surfaces urbaines sur la formation du microclimat urbain.

2.1.2.4 Couplages réalisés avec *Code_Saturne* -

Code_Saturne a été lui-même couplé à plusieurs reprises avec SOLENE, notamment son module radiatif et son modèle de paroi (Athamena (2012)). Athamena (2012) a réalisé un couplage dynamique complet entre les deux logiciels, la CFD communiquant les coefficients de convection extérieure et les températures d'air extérieures au modèle thermo-radiatif, et SOLENE lui transmettant les températures de surfaces extérieures. Pour ces études, les résultats de simulations sont particulièrement proches des températures de surface et d'air mesurées. Athamena (2012) estime les vitesses de vent simulées satisfaisantes lorsque les conditions d'entrées correspondent bien aux mesures, mais que la simulation de l'énergie cinétique turbulente reste trop peu précise. Le couplage permet donc principalement une bonne estimation des paramètres thermiques, tout en nécessitant des améliorations concernant l'aspect dynamique.

Couplages réalisés entre outils de modélisation et mesures - Enfin, on trouve également dans la littérature des couplages entre les modélisations et les mesures, dans le but d'affiner les simulations. Les données sur le climat et la météo utilisées dans des modélisations de bâtiments proviennent de la station la plus près du site, dont les conditions sont relativement similaires à celles du site étudié. Dans l'article de Unzeta et al. (2009), le principe est de coupler le calcul de la température de surface des murs et la consommation énergétique des bâtiments à partir des données météorologiques. La simulation utilise un modèle urbain qui calcule les températures de l'air à partir de celle des murs, et la chaleur libérée par les bâtiments. L'article présente un générateur de météo urbaine (UWG) qui couple EnergyPlus, programme de simulation du bâtiment, avec un modèle urbain. L'UWG calcule les températures de l'air urbain et leurs impacts sur la consommation énergétique des bâtiments, en tenant compte des processus complexes de transfert de chaleur. Les résultats donnent des températures plus élevées que celles mesurées par la station météo, ce qui confirme la thèse de l'îlot de chaleur urbain.

2.1.3 Conclusion

De nombreux travaux ont déjà été réalisés afin de prendre conjointement en compte le microclimat urbain et les propriétés énergétiques des bâtiments, avec des niveaux de précision variables pour l'étude énergétique du bâtiment. Nous souhaitons dispo-

ser d'un outil qui puisse être utilisé pour étudier aussi bien l'atmosphère urbaine que le comportement thermique d'un bâtiment, avec une modélisation la plus complète possible de ces deux systèmes. Pour cette raison, nous choisissons de réaliser le couplage de logiciels existants, ce qui nous permet de rassembler dans un seul et même outil l'expertise des deux domaines. En ce qui concerne la physique atmosphérique, nous utilisons le logiciel de dynamique des fluides *Code_Saturne* (cf. Partie 3). Nous recherchons donc dans la littérature un modèle de bâtiment qui puisse se prêter au couplage. Ce modèle doit pouvoir fournir au logiciel de dynamique des fluides les données dont il a besoin pour déterminer ses conditions limites aux abords des bâtiments. Réciproquement, il doit être en mesure de réaliser ses calculs à partir des données atmosphériques calculées par *Code_Saturne*.

2.2 Modélisation énergétique du bâtiment

2.2.1 Les transferts thermiques au niveau d'une paroi

Pour la suite, nous définissons la zone thermique comme un volume d'air, bâtiment ou partie de bâtiment, aux propriétés homogènes. Chacune des parois d'un bâtiment peut être modélisée de façon plus ou moins détaillée en fonction des propriétés physiques des matériaux qui la constituent. Dans le cas d'un bâtiment dit monozone, c'est-à-dire contenant une seule zone thermique, toutes les parois sont en contact avec un unique volume d'air intérieur. On effectue alors un bilan de chaleur au niveau de chaque paroi en prenant en compte les échanges conductifs, convectifs et radiatifs. Les surfaces de la paroi étant supposées planes, en supposant les propriétés physiques homogènes sur toute la surface de la paroi on peut considérer la propagation de la chaleur par conduction comme unidirectionnelle dans le sens de l'épaisseur (suffisamment petite devant les autres dimensions).

Afin de modéliser les différents matériaux qui constituent une paroi (par exemple du béton, un isolant et un enduit), celle-ci peut être discrétisée en un certain nombre de points, permettant la description des transferts conductifs (Figure 2.2).

En appliquant la méthode des volumes finis, la variation temporelle de la température au point i situé dans une couche homogène s'écrit :

$$\rho c_P V \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\lambda A}{\Delta x}(T_{i+1} - T_i) + \frac{\lambda A}{\Delta x}(T_{i-1} - T_i) \tag{2.1}$$

avec :

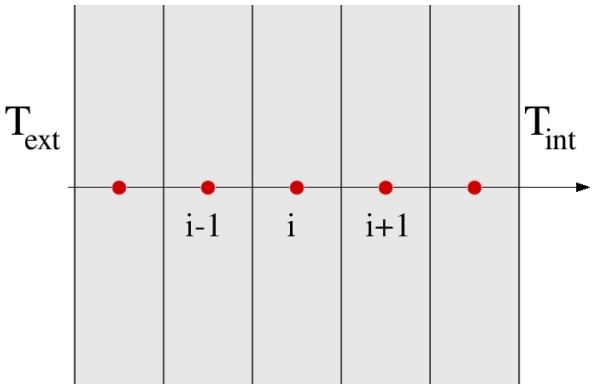


FIGURE 2.2 – Représentation d'une paroi homogène.

ρ	en $\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$	la masse volumique du matériau de la couche ;
c_P	en $\mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$	sa chaleur massique ;
λ	en $\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$	sa conductivité thermique ;
V	en $\mathrm{m^3}$	le volume de la cellule i ;
T_k	en K	la température au point k ;
A	en $\mathrm{m^2}$	la surface de matériau traversée par le flux ;
Δx	en m	l'épaisseur de chaque cellule.

En considérant l'unité de surface élémentaire et en notant :

$C = \rho c_P \Delta x$	la capacité de la cellule ;
$R = \dfrac{\Delta x}{\lambda} = \dfrac{1}{K}$	sa résistance.

on peut simplifier l'équation précédente par :

$$C\frac{\partial T_i}{\partial t} = K(T_{i+1} - T_i) + K(T_{i-1} - T_i) \tag{2.2}$$

El Mankibi (2003) explicite dans sa thèse les équations que l'on peut écrire pour chaque élément du bâtiment en considérant un système maillé. Nous retenons ici, en appelant « facette » chaque élément de la surface de paroi maillée et en numérotant les propriétés de la paroi de l'extérieur vers l'intérieur) :

— **le bilan pour un nœud en contact avec l'extérieur** représente les échanges convectifs, conductifs et radiatifs de la surface extérieure avec l'environnement extérieur s'écrit :

$$h_{ext}(T_{ext} - T_{surf}) + K_1(T_1 - T_{surf}) + S^* + L^* = 0 \tag{2.3}$$

avec

T_{surf}	en K	la température de surface extérieure de la paroi ;
T_{ext}	en K	la température de l'air extérieur ;
T_1	en K	la température au nœud 1 dans la paroi ;
h_{ext}	en $\mathrm{W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}}$	le coefficient de convection extérieure ;
$R_1 = \frac{\delta x}{2\lambda}$	en $\mathrm{m^2 \cdot K \cdot W^{-1}}$	la résistance entre la surface extérieure et le nœud 1, et donc
$K_1 = \frac{2}{R_1}$	en $\mathrm{W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}}$	la conductance entre T_{surf} et T_1 (qui est au milieu de la cellule 1) ;
S^*	$\mathrm{W \cdot m^{-2}}$	le flux net de rayonnement de courtes longueurs d'onde ;
L^*	en $\mathrm{W \cdot m^{-2}}$	le flux net de rayonnement de grandes longueurs d'onde.

dont la discrétisation en temps donne :

$$T_{surf}^{t+1} = \left(1 - \frac{\Delta t(h_{ext} + K_1)}{0,1C_1}\right) T_{surf}^{t} + \frac{\Delta t}{0,1C_1}\left(h_{ext}T_{ext}^{t} + K_1 T_1^{t} + S^* + L^*\right) \tag{2.4}$$

— **le bilan pour un nœud interne au sein d'une couche** ne se fait pas aussi aisément par analogie avec les lois électriques de type résistance-capacitance (RC) en raison de la disparité des matériaux de part et d'autre du nœud. En supposant que le milieu étudié présente des caractéristiques thermiques constantes et ne possède aucune source de chaleur interne, on peut écrire l'équation de la chaleur unidimensionnelle suivante :

$$\rho_i c_{Pi}\left(\frac{\partial T_{(x,t)}}{\partial t}\right)_i = \lambda_i \left(\frac{\partial^2 T_{(x,t)}}{\partial x^2}\right)_i \tag{2.5}$$

Comme El Mankibi (2003) le détaille, en additionnant les développements en séries de Taylor des températures T_{i-1} et T_{i+1} on obtient :

$$\left(\frac{\partial^2 T_{(x,t)}}{\partial x^2}\right)_i = \frac{T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}}{dx^2} - \frac{dx^4}{12}\left(\frac{\partial^4 T}{\partial x^4}\right)_i + O_{(dx^4)} \tag{2.6}$$

En introduisant cette expression dans l'équation de la chaleur, en négligeant les termes du 4^e ordre très petits devant les autres et en notant $C_i = \rho_i c_{Pi}\Delta x$ et $K_i = \frac{\lambda_i}{\Delta x}$, on peut écrire le bilan thermique pour un point situé dans une couche de l'enveloppe :

$$T_i^{t+1} = \left(1 - \frac{2K_i}{C_i}\right) T_i^t + \frac{K_i}{C_i}(T_{i-1} + T_{i+1}) \tag{2.7}$$

— **le bilan pour un nœud interne à la jonction de deux couches**

On définit c_{Pi-1}, ρ_{i-1}, λ_{i-1} et T_{i-1} les propriétés de la cellule en amont du point i considéré, et c_{Pi}, ρ_i, λ_i et T_{i+1} celles de la cellule en aval. On peut alors écrire les bilans thermiques de part et d'autre du point i :

$$c_{Pi-1}\rho_{i-1}dx\left(\frac{\partial T_{(x,t)}}{\partial t}\right)_i = \lambda_{i-1}\left(\frac{\partial^2 T_{(x,t)}}{\partial x^2}\right)_{i-1} \tag{2.8}$$

$$c_{Pi}\rho_i dx\left(\frac{\partial T_{(x,t)}}{\partial t}\right)_i = \lambda_i\left(\frac{\partial^2 T_{(x,t)}}{\partial x^2}\right)_i \tag{2.9}$$

On considère que les points $i-1$ et $i+1$ se trouvent aux milieux des cellules $i-1$ et i, et donc aux distances $\frac{\delta x_{i-1}}{2}$ et $\frac{\delta x_{i+1}}{2}$ du point i. La somme de ces deux équations nous donne ainsi, après discrétisation :

$$T_i^{t+1} = \frac{4\Delta t}{C_{i-1}+C_i}(K_{i-1}T_{i-1}+K_iT_{i+1}) + \left(1-\frac{4\Delta t(K_{i-1}+K_i)}{C_{i-1}+C_i}\right)T_i^t \tag{2.10}$$

— **le bilan du volume de l'air intérieur du bâtiment**, qui intègre l'ensemble des échanges thermiques qui s'opèrent entre l'air intérieur et l'enveloppe du bâtiment ou avec les multiples sources de chaleur interne, s'écrit :

$$\rho_{air}c_{Pair}V_{int}\frac{\partial T_{int}}{\partial t} = \sum_{facettes} A_i h_{int}(T_{si}-T_{int}) + \phi_{HVAC} + \phi_{ventil} + \phi_{gains} \tag{2.11}$$

avec :

h_{int}	en $\mathrm{W}\cdot\mathrm{K}^{-1}\cdot\mathrm{m}^{-2}$	le coefficient de convection intérieur ;
ϕ_{HVAC}	en W	les flux de chaleur dus aux systèmes de chauffage ou de climatisation ;
ϕ_{gains}	en W	les gains internes du bâtiment (notamment les gains solaires) ;
ϕ_{ventil}	en W	le flux de chaleur dû au renouvellement d'air.

2.2.2 Forme matricielle généralisée du modèle d'état

Si l'on considère la paroi homogène d'un bâtiment telle que représentée sur la Figure 2.2, on peut établir pour chaque maille le bilan de flux défini par l'équation (2.2). Dans le cadre d'une paroi non homogène, cette expression se généralise sous la forme :

$$C_i\frac{\partial T_i}{\partial t} = K_{i,i+1}(T_{i+1}-T_i) + K_{i-1,i}(T_{i-1}-T_i) \tag{2.12}$$

où les coefficients $K_{i,i+1}$ et $K_{i-1,i}$ sont les coefficients relatifs à la conduction entre le point i et les points i-1 et i+1 des mailles adjacentes (Roux (2012)).

Si l'on étend cette écriture à tous les points se situant au milieu de chaque maille, depuis la maille 1 en contact avec l'air extérieur jusqu'à la maille n en contact avec l'air intérieur du bâtiment, on peut établir la relation matricielle (Roux (2012)) :

$$C\dot{T} = AT + BU \tag{2.13}$$

avec T le vecteur d'état rassemblant ici les températures dans la paroi, U le vecteur des sollicitations et A, B et C les matrices qui rassemblent les coefficients reliant T à U. Notons que A et C sont indépendantes de U, qui prend en compte les températures de l'air intérieur et de l'air extérieur et peut comprendre d'autres sollicitations. Pour une paroi à trois couches (n=3) et en considérant uniquement les transferts conductifs, la forme matricielle de l'équation s'écrit :

$$\begin{pmatrix} C_1 & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & 0 \\ 0 & 0 & C_3 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \\ \dot{T}_3 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} -(K_{e,1} + K_{1,2}) & K_{1,2} & 0 \\ K_{1,2} & -(K_{1,2} + K_{2,3}) & K_{2,3} \\ 0 & K_{2,3} & -(K_{2,3} + K_{3,i}) \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{Bmatrix}$$

$$+ \begin{pmatrix} K_{e,1} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & K_{3,i} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} T_e \\ T_i \end{Bmatrix} \tag{2.14}$$

2.2.3 État de l'art sur les outils de modélisation du bâtiment

Après avoir étudié les aspects théoriques de la modélisation des parois de bâtiments, nous nous intéressons aux modèles existants que nous pourrions utiliser pour notre étude.

La recherche d'un modèle de bâtiment à coupler avec *Code_Saturne* a pour objectif la modélisation fine d'un quartier urbain aux bâtiments hétérogènes et non celle d'un seul bâtiment type reproduit autant de fois que nécessaire.

Nous avons besoin d'un modèle qui puisse donner des résultats suffisamment précis malgré un nombre de données d'entrée limité en raison du peu de données disponibles en situation réelle. Le choix du logiciel sera également déterminé par le compromis qu'il permet entre la précision et le coût de couplage. Nous privilégions les modèles permettant de représenter la complexité d'un quartier urbain réel tout en restant simplifiables pour conserver des temps de calculs raisonnables.

Les différents modèles de bâtiments envisagés sont présentés dans cette section. L'étude porte principalement sur les modèles de bâtiments les plus fréquemment trouvés dans la littérature, et donc ceux qui ont été fréquemment utilisés et qui sont reconnus. D'autre part il faut considérer pour chaque modèle la possibilité pratique

d'un couplage avec *Code_Saturne*. Pour cela, la préférence est donnée aux modèles dont les codes sources sont disponibles afin de pouvoir y apporter les modifications que le couplage requiert. D'autre part, *Code_Saturne* fonctionne avec Linux ; la portabilité des outils est donc un critère de sélection.

Un modèle de bâtiment peut considérer une seule ou plusieurs zones thermiques dans l'édifice modélisé. Il est dit monozone si la température de l'air homogène dans l'espace modélisé, ou bien multizone s'il est composé de plusieurs espaces aux températures différentes. L'avantage d'un modèle multizone est de prendre en compte les variations de température en fonction de la localisation dans un bâtiment. En effet des différences peuvent être observées entre les différents étages d'une construction (sous l'effet de la stratification thermique ou d'une exposition plus importante aux flux solaires pour l'étage supérieur), ou même entre les pièces d'un même niveau qui présenteront des caractéristiques variées d'orientation ou de surface en contact avec l'extérieur. L'occupation et la gestion d'un bâtiment engendrent également des différences thermiques entre ses différentes parties, ce que de nombreux modèles prennent en considération.

2.2.3.1 Les modèles de bâtiment autonomes

Deux modèles sont largement répandus : EnergyPlus et ESP-r sont parfois considérés comme les modèles de bâtiment les plus aboutis (Haak, 2012). Ce sont des modèles mondialement utilisés et ils ont figuré parmi les modèles que nous avons longtemps hésité à utiliser pour notre couplage. ESP-r et EnergyPlus sont assez proches dans leur structure, avec un programme central qui articule des modules permettant de complexifier l'étude selon les besoins.

EnergyPlus résulte de la fusion entreprise dès 1996 de DOE-2 et de BLAST, deux logiciels dont le développement était financièrement soutenu par le gouvernement des États-Unis (Crawley et al., 2001). Le premier a été conçu par le US Department of Energy à la fin des années 60, tandis que la réalisation du second dépendait du US Department of Defense au début des années 70. EnergyPlus a une structure modulaire, les systèmes de chauffage et de climatisation par exemple sont compris dans un module spécifique et il en est de même pour les volets et autres technologies d'ombrage ou pour les échanges énergétiques. Cette structure permet également de détailler la convection de l'air dans une pièce grâce à un module de CFD : la CFD est donc utilisée à l'intérieur du bâtiment pour y étudier les mouvements aérauliques. Le logiciel est écrit en Fortran 90, ce qui facilite l'utilisation conjointe de modules écrits avec différents langages (Crawley et al., 2001). Il peut également prendre en entrée

des données météorologiques, et il est relativement simple de créer de nouveaux modules. EnergyPlus est capable de calculer les besoins énergétiques d'un bâtiment, la consommation énergétique de ses systèmes de chauffage ou de climatisation en résolvant les équations de chaleurs latente et sensible du fluide en mouvement, et les rejets de chaleur de ces systèmes (Bueno et al., 2011). Le logiciel peut enfin retourner les températures de surfaces extérieures du bâtiment, ce qui le rend particulièrement intéressant pour notre étude.

ESP-r, présenté dans l'article de Bartak et al. (2002), est un outil de modélisation énergétique pour la simulation des performances thermiques et acoustiques des bâtiments, de l'utilisation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre, le tout associé à des systèmes de contrôle environnemental. Le système étudié est ainsi équipé de façon à modéliser les flux de chaleur, d'air, d'humidité et d'énergie consommée.
Le bâtiment est représenté comme un ensemble de nœuds représentant les pièces ou les connexions avec des systèmes de traitement de l'air (tels que le chauffage par exemple) et des connexions entre certains nœuds modélisant les éléments comme les portes, les fenêtres, la ventilation ou les infiltrations (Bartak et al. (2002)).
Dans l'article Bartak et al. (2002) est présenté un modèle de dynamique des fluides numérique intégré dans ESP-r. Ses résultats sont confrontés avec des données expérimentales obtenues dans une salle de test dont les conditions limites intérieures et extérieures sont contrôlées. L'auteur cite des imprécisions expérimentales, des incertitudes de mesures notamment en ce qui concerne le volume de la salle de test et des vitesses moyennes et non instantanées dans la modélisation CFD. Les résultats de la modélisation sont néanmoins en accord avec les mesures. Excepté pour les points proches du sol, les écarts entre températures simulées et températures mesurées ne sont pas supérieurs à $0,5°C$, ce qui correspond aux incertitudes de la mesure.

Cependant ces modèles ont été élaborés initialement pour calculer les consommations énergétiques des bâtiments et sont réputés pour cette modélisation, mais nous n'avons aucun élément concernant leur capacité à retourner des températures de surface extérieure comme le requiert le couplage avec *Code_Saturne*. En outre les codes sources d'EnergyPlus ne sont pas accessibles, ce qui serait problématique dans le cadre de notre travail.

TRNSYS est un outil de simulation dynamique des systèmes transitoires qui ne se limite pas à l'étude de la thermique du bâtiment. Capable de décrire les comportements transitoires des systèmes thermiques, TRNSYS est constitué de deux éléments (Brun et al., 2010). D'une part il possède un cœur de calcul qui permet de travailler avec des données importées et résout les systèmes, ce qui lui permet notamment d'intégrer des données météorologiques ou diverses fonctions dépendant

du temps. D'autre part il a une large bibliothèque de modules incluant de nombreux éléments de systèmes énergétiques thermiques ou électriques où il est possible de modifier ou créer des composants, décrits par des procédures en Fortran (Lucas et al. (2012), Brun et al. (2010)). L'utilisateur peut ainsi spécifier les éléments constituant le système et les liens entre chacun, et cette structure modulaire lui permet de s'adapter facilement et permet l'incorporation de nouveaux modèles mathématiques. En ce qui concerne la modélisation des bâtiments, TRNSYS est également capable de modéliser des constructions multizones et donne des prévisions de températures intérieures et des puissances de chauffage similaires à celles calculées par EnergyPlus (Brun et al. (2010)).

Cependant TRNSYS fonctionne sous Windows, ce qui rend difficile la possibilité d'un couplage avec *Code_Saturne*.

Pléiades+Comfie est un logiciel d'aide à la conception énergétique des bâtiments développé par le Centre Efficacité Énergétique des Systèmes de l'École des Mines de Paris avec le soutien de l'ADEME, écrit en langage Pascal et utilisable dans l'environnement Delphi (Brun et al., 2010).
La partie Pleiades a été développée par IZUBA énergies afin d'offrir un environnement de travail graphique aux utilisateurs. Pléiades+Comfie est optimisé pour l'analyse des performances du bâtiment et pour l'enseignement universitaire du comportement thermique des constructions et vise surtout à étudier les paramètres intérieurs au bâtiment (thermique, ambiances). On peut y étudier le comportement thermique de plusieurs zones thermiques d'un bâtiment en régime dynamique et intégrer la ventilation pour étudier son impact sur le confort thermique. Dans le cadre d'une analyse multizone, Comfie ne modélise cependant pas les échanges d'air entre les différentes zones ni les phénomènes de stratification thermique. Il s'agit d'un modèle aux différences finies qui permet également de modéliser le stockage de chaleur et les gains solaires et qui présente des modules pour vérifier la conformité de la construction aux règlementations thermiques.
Un bâtiment est décrit sous la forme d'une structure d'objets reliés par des pointeurs, et on peut choisir des scénarios d'occupation (Salomon et al., 2005). Pour modéliser les parois, Comfie regroupe les différents matériaux en une maille équivalente. Or une couche d'isolant et une couche de béton par exemple, n'auront pas les mêmes propriétés qu'une couche équivalente aux deux matériaux en ce qui concerne la diffusion de la chaleur dans la paroi. D'autre part les valeurs des coefficients de convection utilisés dans les calculs sont imposées. Ceci s'avère regrettable dans le cadre d'un couplage avec un logiciel de CFD qui permet le calcul de ces valeurs à un instant et un endroit donné. De plus les changements de phase ne sont pas pris en compte, les phénomènes d'humidité et de stockage par chaleur latente sont donc

négligés. Ce travail de thèse n'utilise pas le modèle de bâtiment choisi à un niveau de précision qui requiert la prise en compte de l'humidité, mais dans le cadre de travaux futurs cette limite pourrait se révéler problématique.

Enfin Pléiades+Comfie n'est pas open-source et ne permet pas d'accès aux codes du logiciel.

CODYBA a été développé afin d'optimiser l'enveloppe du bâtiment. Il s'agit d'un logiciel créé au CETHIL à Lyon en 1985 écrit en langage Pascal puis converti en C++. CODYBA est un outil de prévision du comportement thermique du bâtiment permettant d'en établir un bilan énergétique et d'étudier l'influence de paramètres propres au bâtiment, aussi bien relatifs à sa conception qu'à son utilisation (Duta et al., 1994). Les modèles de bâtiment sont constitués d'objets élémentaires représentant chaque composant (murs, fenêtres, systèmes de contrôle ou volumes d'air par exemple) entre lesquels on définit des connexions. On peut également le soumettre à des conditions intérieures et extérieures. Chaque volume est ainsi représenté par un nœud, et les flux s'opérant entre eux sont étudiés. Chaque entité, nœud ou arc, se définit en tant qu'entité élémentaire appelée ENET, de type massique ou énergétique. Sont également intégrés les concepts de matériau, élément respectant certaines propriétés physiques, et de table, qui permet de définir des lois de variations d'une variable. Cette méthode de modélisation est connue sous le nom de capacité-résistance, CODYBA pousse la logique à l'extrême en généralisant cette méthode à l'ensemble du bâtiment et à son environnement extérieur.

CODYBA est défini comme un outil de calcul des consommations en chauffage et en climatisation et est optimisé pour un nombre limité de zones thermiques (Duta et al., 1994). De plus il ne propose pas de modèle de ventilation à récupération de chaleur (Brun et al., 2010).

Pléiades+Comfie et CODYBA sont des outils dynamiques dits « monolithiques »(les différentes fonctions ne sont pas réparties en plusieurs modules) utilisant la réduction de modèles afin de réduire le temps de calcul.

CODYBA est également un logiciel fonctionnant sous le système d'exploitation Windows.

CODYRUN est un logiciel de modélisation créé au début des années 2000 par l'université de la Réunion. Il considère des systèmes à plusieurs zones (Boyer et al. (1996), Boyer et al. (2014)), et intègre la thermique du bâtiment, la ventilation naturelle et les transferts d'humidité et de polluants. Le bâtiment est modélisé comme un assemblage de composants, depuis les éléments constitutifs de ses parois jusqu'au

systèmes de climatisation (Boyer et al., 2014). Il est exclusivement dédié au comportement thermique des logements. Son utilisateur dispose d'un choix important de modèles de transferts de chaleur et peut y utiliser des modèles multizones (Lucas et al., 2012). Le logiciel résout un système décrivant les phénomènes thermiques et aérodynamiques. Son interface utilisateur est pensée pour l'environnement Windows Microsoft. Le bâtiment étudié est thermiquement discrétisé selon les équations présentées au paragraphe 2.2.1. Ces différentes équations s'expriment ensuite sous forme matricielle : $C\dot{T} = AT + B$ La discrétisation peut se faire en considérant une seule zone dans le bâtiment (les murs également peuvent être discrétisés), ou bien en le considérant comme multizone et en complexifiant les matrices. Dans ce dernier cas, il faut écrire les matrices des équations d'état pour chaque zone avant de les assembler. Pour deux zones 1 et 2 :

$$\begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{T}_1 \\ \dot{T}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix}$$

S'y ajoutent les échanges thermiques entre l'air ambiant intérieur et extérieur et les surfaces des parois, et les radiations infrarouges. Cette analyse nodale présente un intérêt potentiel si elle est associée à un programme créant un modèle thermique de bâtiment

La bibliothèque BuildSysPro est une bibliothèque développée par EDF R&D permettant de réaliser des modèles de bâtiment (Plessis et al. (2014)). Écrite en langage Modelica, elle est optimisée pour fonctionner sous l'environnement Dymola et fonctionne donc idéalement sous Windows. Néanmoins elle peut retourner des matrices représentant le système linéarisé que l'on peut ensuite utiliser librement dans un environnement Linux.

On définit des parois à partir de matériaux préexistants ou à renseigner dans la bibliothèque. Des connexions sont ensuite établies entre ces parois pour former des zones thermiques. Un bâtiment peut être défini comme monozone ou comme un ensemble de plusieurs zones thermiques. Lors de la création des parois, on peut définir pour chacune d'elles le nombre de couches qui la discrétisent afin de mieux suivre l'évolution des températures dans les matériaux.

Les variables d'entrée et de sortie sont choisies en fonction des besoins de la modélisation. Le logiciel est habituellement utilisé pour calculer les consommations énergétiques du bâtiment. La Figure 2.3 présente la modélisation des éléments du bâtiment avec BuildSysPro. Les paramètres d'entrée du modèle concernent aussi bien les données extérieures (conditions météorologiques, température extérieure)

que la gestion du bâtiment (renouvellement d'air, ouverture et fermeture des fenêtres et volets). Les parois du bâtiment sont modélisées séparément et sont toutes connectées au nœud d'air intérieur. Les ponts thermiques peuvent également être pris en considération dans le modèle.

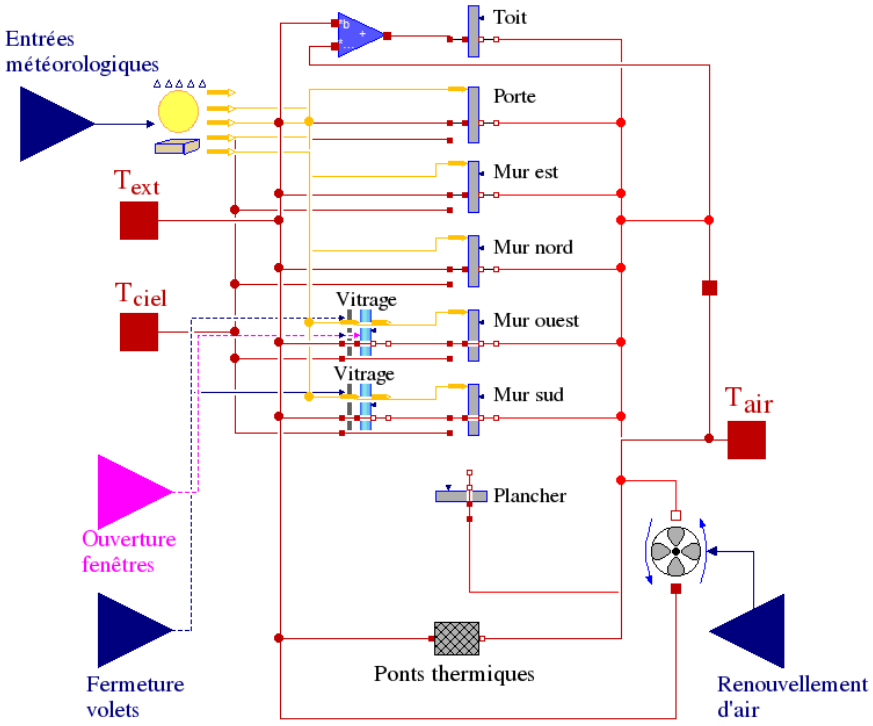


FIGURE 2.3 – Modélisation des composants d'un bâtiment monozone dans BuildSysPro.

La Figure 2.4 présente le modèle complet. Les éléments détaillés à la Figure 2.3 sont inclus dans l'ensemble « Mozart monozone ». La température de l'air intérieur permet alors de déterminer la mise en fonctionnement du chauffage ou de la climatisation selon la température de consigne. BuildSysPro peut alors calculer la consommation du bâtiment.

La propriété de BuildSysPro particulièrement intéressante pour notre étude est la possibilité d'extraire les modèles de bâtiments pour les utiliser en dehors de la plateforme Dymola : la librairie peut en effet retourner un modèle linéarisé du bâtiment simulé. C'est ce modèle qui répond particulièrement bien aux besoins de notre étude. On peut ainsi récupérer les matrices A, B, C et D décrivant l'évolution temporelle du comportement dynamique du bâtiment étudié.

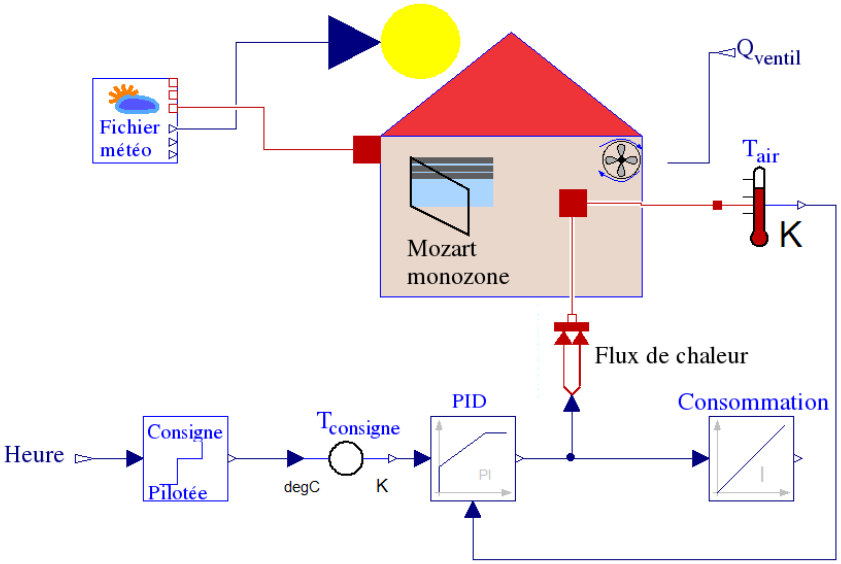


FIGURE 2.4 – Modélisation de la régulation thermique du bâtiment dans BuildSysPro.

2.2.3.2 Des modèles de bâtiment issus de couplage

Complémentarité des modèles de dynamique des fluides et d'énergétique du bâtiment Des modèles de dynamique et de thermique sont testés dans l'article de Negrao (1998) afin d'identifier les lacunes de chacun d'eux. Il s'agit ici d'une application pour l'intérieur du bâtiment, qui montre l'intêret d'étudier les phénomènes dynamiques même à l'intérieur d'une construction où les écoulements sont moindres que dans l'atmosphère. Le modèle Building Thermal and Mass Flow Simulation BSim et la CFD sont détaillés dans cet article afin d'analyser les avantages et les inconvénients de chaque outil, et l'intérêt que présente leur couplage.

BSim - Le bâtiment est composé de plusieurs espaces finis aux propriétés uniformes et aux différentes capacités connextés entre eux.
Les équations de conservation de la masse et de l'énergie sont détaillées pour chaque espace et le système est soumis aux conditions climatiques appropriées. Néanmoins, BSim ne prend pas en compte les gradients de vitesse et de turbulence de l'écoulement dans un espace simple et la surface de convection intérieure ne peut pas être correctement simulée. Les flux de chaleur au niveau des surfaces, le confort thermique local et la qualité de l'air peuvent ne pas être bien représentés, compromettant l'évaluation des performances de tout le système.

CFD - La technique de la CFD est similaire mais elle peut s'appliquer à de plus petites échelles, et elle ne présente pas les inconvénients de BSim détaillés précédemment. BSim s'applique plus généralement au système, tandis que la haute résolution de la CFD peut s'avérer trop restrictive.
Cependant, la représentation des conditions limites dynamiques fait défaut dans la CFD et le manque d'informations correctes aux bords peut limiter la précision de la modélisation des flux.
Les deux simulations peuvent ainsi se compléter : BSim fournit les conditions limites pour les calculs des flux locaux, et les gradients pour les flux évalués par CFD peuvent être utilisés par BSim pour améliorer la précision sur les prédictions de performance des bâtiments. Dans ce cas, la CFD est intégrée à Bsim pour étudier les écoulements intérieurs du bâtiment tandis que BSim calcule les échanges thermiques des zones du bâtiment entre elles et avec l'extérieur. Les expériences ont montré que la synergie des deux logiciels est satisfaisante si on garde leurs algorithmes bien séparés l'un de l'autre, en raison de leur complexité. La connexion entre leurs deux solutions respectives se fait à l'interface des systèmes où les lois de conservation doivent être respectées.
La solution générale s'obtient par itérations successives. Des applications de ce modèle prouvent que la combinaison des deux logiciels, par rapport à BSim seul, permet de prendre en compte les gradients de températures, qui affectent les réponses de la zone chauffée étudiée, mais également les températures de l'air des zones adjacentes.

De même, Zhai and Chen (2005) étudient différentes façons de coupler un logiciel de CFD avec un logiciel de simulation énergétique du bâtiment (ES). Les deux logiciels dialoguent par leurs conditions limites, chacun fixant celles de l'autre, et il s'agit ici d'un couplage où la CFD est utilisée pour modéliser les flux intérieurs du bâtiment et non son environnement extérieur.
La simulation énergétique du bâtiment ES peut fournir les informations relatives au chauffage et la climatisation du bâtiment ainsi qu'aux températures de surfaces intérieures, tandis que la CFD peut communiquer les flux convectifs au niveau des surfaces du bâtiment dont aura besoin l'ES. L'implémentation d'un de ces outils dans l'autre peut ainsi permettre d'éliminer les hypothèses de départ lors de simulations séparées, aboutissant ainsi à des prévisions plus précises des performances du bâtiment.
Sont distingués ici deux types de couplages qui permettent de gérer le temps de calcul de la simulation. Le couplage statique consiste à échanger des données à seulement un ou deux de pas de temps entre les programmes avec un nombre limité d'itérations et peut être réalisé manuellement. Il peut se justifier par exemple dans le

cadre d'écoulements atmosphériques faibles : dans ce cas les variations du coefficient de convection ou de la température extérieure n'auront pas d'impact notable sur les calculs de ES. Le premier pas de temps servirait donc seulement à ce que chacun des deux logiciels ait les conditions limites calculées par l'autre.
Le couplage dynamique échange les données à chaque pas de temps après convergence des résultats, il s'agit d'un couplage continu entre les deux programmes. Il peut lui-même être subdivisé en 3 catégories, en allant du couplage présentant les plus petits temps de calculs au couplage le plus précis :

- Couplage à un pas de temps spécifique, où on laisse la simulation converger vers une solution ;
- Couplage quasi-dynamique, réalisé à chaque pas de temps pendant une période donnée mais avec une unique itération par pas de temps ;
- Couplage complètement dynamique, où chaque pas de temps compte plusieurs itérations qui convergent vers une solution avant de passer au pas de temps suivant.

Le programme issu du couplage de l'ES et de la CFD a été validé par plusieurs expériences (Zhai and Chen, 2005). Si les résultats obtenus sans couplage sont proches des données mesurées, les résultats issus du couplage sont plus précis pour une pièce ventilée ou pour une pièce sans radiateur. La présence d'un radiateur dans la pièce complique l'expérience dont les résultats deviennent moins proches des valeurs mesurées, sans doute en raison de la difficulté de l'ES à modéliser le comportement dynamique du radiateur. De plus les coefficients de convection obtenus par la méthode couplée sont plus proches des valeurs théoriques que les méthodes séparées ; de façon générale le couplage fournit des prévisions plus précises que les logiciels utilisés séparément. Il est aussi important dans le cas de bâtiments présentant d'importants mouvements de l'air intérieur, et il donne des prévisions de la consommation énergétique des bâtiments très raisonnables. Les résultats sont encore plus précis lorsqu'on utilise le couplage dynamique, mais le temps de calcul peut s'avérer beaucoup trop long pour un modèle de bâtiment lorsque l'édifice modélisé présente un volume conséquent : les temps de convergence des modèles, notamment celui de la CFD qui compte pour la majorité du temps de simulation, reproduits à chaque pas de temps peuvent être conséquents. Ce bon fonctionnement du couplage CFD-ES tient principalement à cet échange de données entre les deux modèles qui se communiquent mutuellement leurs conditions limites thermiques pour l'un et dynamique pour l'autre. La CFD peut ainsi mieux prévoir les conditions de l'environnement intérieur dynamique et ainsi permettre une meilleure estimation de la qualité de l'air intérieur et du confort thermique. L'ES quant à elle peut prédire des estimations plus précises de la consommation énergétique du bâtiment et des comportements thermiques des enveloppes grâce à des échanges convectifs plus proches des données empiriques.

Si la modélisation des écoulements d'air dans un bâtiment peut permettre d'affiner les études thermiques du bâtiment, il en va de même pour la CFD appliquée à l'environnement extérieur du bâtiment. La suite de cette partie est ainsi consacrée aux modèles de bâtiments qui ont été développés dans cette optique.

Un modèle de bâtiment développé pour la météorologie urbaine : BEM BEM est un modèle développé par Météo France et le MIT pour être intégré dans TEB.

Le modèle de bâtiment BEM permet en particulier de calculer la consommation énergétique du bâtiment et les pertes de chaleur en étudiant les échanges radiatifs et convectifs, la diffusion de chaleur dans les parois, les facteurs de forme entre les différents éléments urbains et le ciel, ou le stockage de chaleur dans les bâtiments (Bueno et al., 2012b). Le modèle intègre également une ventilation forcée dans le bâtiment, les infiltrations ou encore les gains internes et solaires. Tout comme TEB, BEM utilise des principes géométriques simples. Les paramètres des bâtiments sont simplifiés autant que possible. Le sol des bâtiments y est considéré adiabatique et le modèle considère une unique zone thermique par bâtiment tout en représentant l'inertie thermique des matériaux constituant les différents étages par une masse thermique générique.

Ceci peut être source d'imprécisions lors d'études à l'échelle du quartier où la stratification thermique entre les étages est susceptible d'influencer le microclimat urbain, la morphologie urbaine et le pourcentage de surface vitrée sont homogènes (Bueno et al., 2012b). L'implémentation de BEM dans TEB est validée par le couplage entre le modèle de canopée et EnergyPlus.

Le modèle de paroi utilisé dans SOLENE Nous nous intéressons au modèle de paroi de SOLENE où chaque mur est modélisé par deux couches superposées, l'une en contact avec l'atmosphère et la deuxième avec le milieu intérieur, comme représenté sur la Figure 2.5.

Ce modèle est basé sur une analogie électrique et les échanges de chaleur se font entre les milieux intérieur et extérieur. Le logiciel prend aussi en compte les flux en fonction de la date, les données météorologiques, les conditions intérieures des bâtiments étudiés et la température du sol en profondeur. Il est ainsi plus abouti que les modèles utilisés dans *Code_Saturne* et nous est utile pour étudier l'influence de la modélisation de plusieurs couches dans la paroi étudiée.

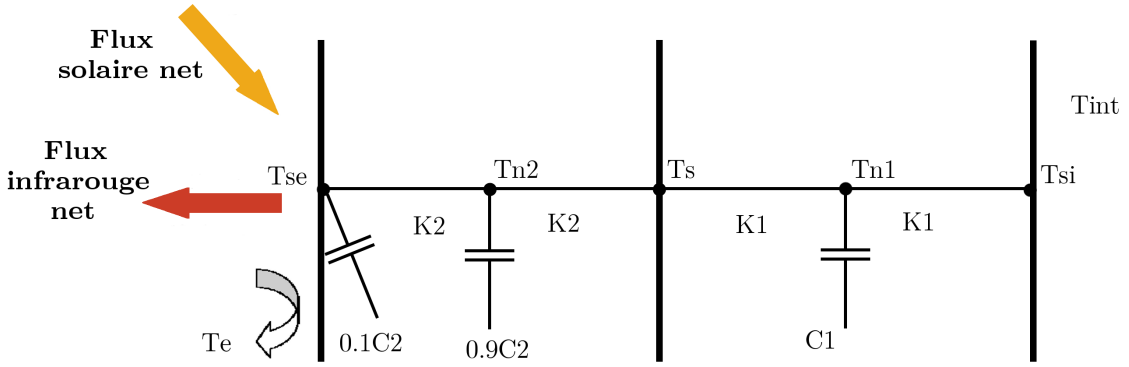


FIGURE 2.5 – Modèle de paroi utilisé dans SOLENE (d'après Qu (2011), d'après Antoine and Groleau (1998)).

Le système d'équations permettant de décrire l'évolution temporelle des températures de paroi attribue une faible capacité thermique de la couche extérieure de la paroi à sa surface extérieure $(0,1C_2)$ et s'écrit (Antoine and Groleau (1998), Qu (2011)) :

$$\begin{cases} 0,1C_2\frac{dT_{se}}{dt} + K_2(T_{se} - T_{n2}) + h_{ext}(T_{se} - T_e) = L^* + S^* \\ 0,9C_2\frac{dT_{n2}}{dt} + K_2(T_{n2} - T_{se}) + K_2(T_{n2} - T_s) = 0 \\ C_1\frac{dT_{n1}}{dt} + K_1(T_{n1} - T_s) + K_1(T_{n1} - T_{si}) = 0 \\ K_1(T_{si} - T_{n1}) + h_{int}(T_{se} - T_{int}) = 0 \end{cases} \tag{2.15}$$

avec

T_{int}	en K	la température d'air intérieur du bâtiment ;
T_e	en K	la température de l'air extérieur ;
T_{n1},T_{n1}, T_s	en K	les températures aux nœuds dans la paroi ;
h_{ext}	en $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$	le coefficient de convection extérieure ;
C_i	en $J \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$	la capacité thermique du matériau i ;
$K_i = \frac{2}{R_1}$	en $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}$	la conductance du matériau i ;
S^*	en $W \cdot m^{-2}$	le flux net de rayonnement de courtes longueurs d'onde ;
L^*	en $W \cdot m^{-2}$	le flux net de rayonnement de grandes longueurs d'onde.

2.2.4 Conclusion et choix d'un modèle de bâtiment

De multiples modèles de bâtiments ont été développés en s'appuyant sur différentes approches et conception du système à modéliser et en visant différentes applications en fonction de leur compromis entre rapidité de calcul et précision. Les résultats de simulations dépendent du modèle (Lucas et al. (2012), Brun et al. (2010)) dont le choix peut donc s'avérer important.

Notre choix de modèle de bâtiment est principalement orienté par nos besoins. Le modèle doit être compatible avec *Code_Saturne* en étant capable de retourner les températures de surfaces extérieures du bâtiment. Il doit également pouvoir prendre en conditions d'entrée les paramètres de l'atmosphère urbaine pour réaliser ses calculs.

Les modèles de bâtiments tels que Pléiades+Comfie, CoDyBa ou CODYRUN ont généralement une approche très centrée sur l'environnement intérieur et les besoins énergétiques des constructions, avec pour la plupart des données météorologiques simples (notamment avec un vent uniforme) en conditions d'entrée.

Certains modèles se prêtent cependant à une approche plus extérieure avec la posibilité d'étudier plus finement les échanges entre les bâtiments et leur environnement ; BEM en est l'exemple type. Nous nous intéressons donc plutôt à cette deuxième catégorie de logiciels.

Pour la réalisation de notre couplage, nous optons pour le modèle BuildSysPro, librairie développée par le laboratoire EnerBat de EDF R&D et dédiée à la modélisation du bâtiment. Tout d'abord, il s'agit d'un logiciel relativement rapide à prendre en main. Ensuite il présente l'intérêt de ne pas se centrer principalement sur la consommation énergétique du bâtiment. En effet, il est facile d'y définir les paramètres que l'on souhaite avoir en sortie, c'est-à-dire dans notre cas les températures de surfaces extérieures qui deviendront les conditions limites utilisées dans le logiciel de dynamique des fluides *Code_Saturne*. Enfin nous avons une opportunité de collaboration avec le laboratoire développant ce logiciel, lui-même intéressé par l'apport de la CFD dans les modélisations de bâtiments. Le choix de ce modèle permet également à EDF R&D de constituer une plateforme la plus complète et cohérente possible avec les logiciels développés par les différents laboratoires.

2.3 Conclusion du chapitre

En raison de l'interdépendance entre les bâtiments et l'atmosphère, les modèles de climat urbain affinent leurs modèles énergétiques pour le bâtiment et réciproquement les modèles de bâtiments précisent leurs modèles météorologiques.

De nombreux outils de modélisation atmosphériques et de simulation énergétique du bâtiment ont été développés au cours des dernières décennies.
Les premiers peuvent être des modèles de météorologie aussi bien que des outils permettant l'étude des écoulements dans un quartier urbain. Ils utilisent certaines propriétés thermiques des bâtiments, mais ces derniers sont souvent modélisés partiellement. Ainsi les résultats sont affinés en fonction des besoins des études menées, mais sans introduire les multiples aspects de la thermique du bâtiment.
Les seconds sont principalement utilisés pour déterminer les conditions intérieures du bâtiment et sa consommation énergétique. Les conditions extérieures qui leur sont imposées proviennent le plus souvent de stations météorologiques distante du lieu de l'étude et ne correspondent pas aux conditions observés en milieu urbain.
Il existe peu de logiciels permettant de modéliser simultanément et complètement ces deux systèmes. Pour pallier ce manque, plusieurs études ont porté sur le couplage d'un logiciel de CFD adapté à l'atmosphère avec un outil de simulation énergétique des bâtiments et ont ainsi obtenu de meilleurs résultats.
Il y a donc convergence des approches entre les deux domaines, chacun cherchant à affiner ses conditions limites qui peuvent être calculées par l'autre discipline. L'aspect original de notre travail est donc d'aller dans ce sens.

Afin d'affiner la modélisation des échanges énergétiques du code de dynamique des fluides *Code_Saturne*, nous allons à notre tour réaliser un couplage entre ces deux types de logiciels en choisissant la bibliothèque BuildSysPro comme outil de simulation du bâtiment.

Chapitre 3

Réalisation du couplage entre un outil de dynamique des fluides et un modèle de bâtiment

Sommaire

3.1 *Code_Saturne*, logiciel de dynamique des fluides intégrant des modèles de parois 70

3.1.1 La CFD pour l'étude de l'atmosphère urbaine 70

3.1.2 Présentation générale de *Code_Saturne* 71

3.1.3 Modélisation atmosphérique dans *Code_Saturne* 73

3.1.4 Lois de parois du logiciel 75

3.1.5 Les modèles de parois de *Code_Saturne* 76

3.1.6 Évolution de la température intérieure 77

3.1.7 Comparaison des modèles de paroi de *Code_Saturne* avec SOLENE 78

3.2 Choix du modèle de BuildSysPro et études préalables au couplage 79

3.2.1 BuildSysPro : Création d'un modèle sous BuildSysPro et exploitation des matrices 80

3.2.2 Gestion du format des matrices 82

3.2.3 Résultats obtenus avec les matrices issues de BuildSysPro 83

3.3 Réalisation du couplage entre *Code_Saturne* et BuildSysPro 84

3.3.1 Présentation des méthodes possibles pour coupler des logiciels de thermique du bâtiment et de CFD 84

3.3.2 Méthode de couplage de *Code_Saturne* avec BuildSysPro 86

3.4 Conclusion du chapitre 87

La suite de notre travail porte sur le couplage du code de CFD *Code_Saturne* et du modèle de bâtiment BuildSysPro. Nous présentons dans un premier temps les logiciels utilisés pour réaliser le couplage et leur utilisation dans le cadre de notre travail. Puis nous exposons la méthode mise en œuvre pour le couplage.

3.1 *Code_Saturne*, logiciel de dynamique des fluides intégrant des modèles de parois

3.1.1 La CFD pour l'étude de l'atmosphère urbaine

On distingue trois voies pour étudier les phénomènes atmosphériques à l'échelle locale. Tout d'abord, des informations peuvent être obtenues par campagne de mesures. Cette méthode procure des données très proches de la réalité, les incertitudes provenant principalement des imperfections des capteurs, de leur mise en œuvre ou de leur localisation. Cependant les informations obtenues sont ponctuelles, une campagne de mesures ne fournit pas de données exhaustives en tout point du domaine étudié.

Ensuite, des expériences en souffleries ou veines hydrauliques peuvent être réalisées sur une maquette du domaine étudié. Les obstacles ne sont donc pas à échelle réelle ce qui peut affecter les caractéristiques de l'écoulement et donc des résultats. Mais surtout, cette installation ne se prête pas à l'étude des flux lorsque le vent fluctue (Blackman et al. (2015)) et prennent encore mal en compte la stratification de l'atmosphère.

La troisième voie est la modélisation numérique. Pour étudier les écoulements à l'échelle du quartier à haute résolution, la CFD (dynamique des fluides numérique) est souvent utilisée.
La CFD requiert l'élaboration préalable d'un maillage du domaine étudié, auquel on fixe des conditions d'entrées pour le vent et des conditions limites aux bords du maillage. L'avantage de la CFD réside dans la possibilité de reproduire des phénomènes physiques avec moins de données d'entrée, d'étudier les phénomènes à échelle réelle et de fournir des valeurs aux paramètres en tout point du domaine. Contrairement à une expérience en soufflerie, la CFD peut prendre en entrée des profils de vent variables.
Cependant la CFD présente des limites en ce qui concerne le coût : il faut souvent trouver un compromis entre la précision souhaitée et le temps de calcul. Comme le

souligne Moonen et al. (2012), il faut apporter un soin particulier à la définition des conditions limites qui influeront sur le calcul et qui ne sont pas toujours connues (paramètres de rugosité ou profils météorologiques d'entrée par exemple). Enfin les choix de modélisation de la turbulence peuvent fortement influencer la précision des résultats. Il y a donc plusieurs points à considérer attentivement avant de faire une modélisation avec la CFD.

Plusieurs outils tels que ANSYS Fluent (logiciel commercial) ou OpenFoam (open source) permettent de modéliser la dynamique des fluides et peuvent être utilisés pour étudier les phénomènes atmosphériques. Notre travail porte sur le logiciel de CFD *Code_Saturne* développé par EDF R&D et par le CEREA (Centre commun entre EDF R&D et les Ponts et Chaussées) en ce qui concerne sa partie atmosphérique.

3.1.2 Présentation générale de *Code_Saturne*

Le logiciel *Code_Saturne* sur lequel porte ce travail de thèse, a été développé pour résoudre les équations de Navier-Stokes. Les volumes peuvent y être maillés de différentes façons selon l'étude.
Code_Saturne possède un module atmosphérique développé par le CEREA permettant de simuler les écoulements d'air, notamment en milieu urbain.

En tant que logiciel de CFD, *Code_Saturne* est capable de modéliser des géométries et des phénomènes physiques complexes (Qu, 2011), et il permet une résolution spatiale importante et ce pour de nombreux scalaires (vent, température, pression, humidité, etc.).

Code_Saturne sert principalement à simuler les écoulements en résolvant les équations détaillées par Milliez (2006) et Qu (2011). Contrairement aux CFD ordinaires et à l'instar de SOLENE, il ne considère pas seulement les bâtiments comme des obstacles à la circulation de l'air mais il intègre leurs influences notamment en termes de rayonnement (Athamena et al., 2011).
Il peut être couplé avec le modèle radiatif de SOLENE (Athamena et al. (2011)), il s'opère alors un échange d'informations entre les deux modèles à chaque pas de temps de la simulation. Ce couplage présente la particularité de pouvoir s'opérer avec deux maillages différents pour les deux logiciels. Les températures de surface sont calculées par l'équilibre thermo-radiatif de SOLENE et introduites dans *Code_Saturne* comme conditions limites. *Code_Saturne* effectue ensuite une simulation thermodynamique qui retourne la température de l'air et les coefficients d'échanges convectifs qui seront réintégrés dans SOLENE comme données d'entrée, et ainsi de suite jusqu'à l'obtention d'un critère de convergence préalablement établi.

Parallèlement, *Code_Saturne* a été développé avec les ajouts progressifs de différentes fonctionnalités. Un modèle de rayonnement atmosphérique tridimensionnel a été développé par Milliez (2006). Ce modèle prend en compte les transferts radiatifs dans *Code_Saturne* pour la modélisation de l'atmosphère urbaine, utilisant le maillage existant du code de CFD. Puis les échanges thermoradiatifs ont été étudiés par Qu (2011), et Zaïdi et al. (2013) a travaillé sur l'intégration de la végétation.

Si les travaux de Milliez (2006) et Qu (2011) visaient à améliorer le modèle de transferts thermiques entre les bâtiments et l'atmosphère, ils mettent également en évidence l'impact des températures, et notamment de la stratification thermique, sur les écoulements d'air. Dans Milliez (2006), les transferts thermiques dans les bâtiments et le sol est modélisé par un modèle de force-restore, initialement élaboré pour l'étude des variations de températures dans le sol. Dans Qu (2011), un modèle conductif à une dimension est implémenté pour les bâtiments. Qu (2011) compare le modèle de transferts radiatifs à celui du code SOLENE pour le cas de MUST (Mock Urban Setting Test, Biltoft (2001)), une ville artificielle de containers dans le désert de l'Utah. Les résultats des deux codes se sont révélés proches l'un de l'autre en ce qui concerne le rayonnement direct et de grandes longueurs d'onde. Pour le rayonnement diffus, il a fallu introduire dans *Code_Saturne* l'anisotropie de la radiation diffuse de SOLENE pour mieux comparer les différences entre les deux modèles radiatifs. Les résultats sont néanmoins différents, sans doute en raison des différentes méthodes numériques, en particulier de la méthode des ordonnées discrètes de *Code_Saturne* et de l'anisotropie qui est prise en compte différemment. Ensuite le couplage des modélisations radiative et convective est étudié, en raison de la relation non négligeable entre les deux phénomènes.
Enfin Qu (2011) simule les écoulements et la dispersion des polluants dans un quartier de Toulouse. Il valide les flux radiatifs et les températures simulées avec les données de la campagne de mesures CAPITOUL (Canopy and Aerosol Particle Interaction in TOulouse Urban Layer) réalisée à Toulouse. Les résultats se révèlent perfectibles, mais proche des observations.

Dans la continuité de ces travaux, nous cherchons ici à implémenter un modèle de bâtiment dans *Code_Saturne*. En effet, lors de sa thèse, Qu (2011) observe que la modélisation des parois des bâtiments est à améliorer. En effet, les lois thermiques utilisées actuellement dans *Code_Saturne* ne sont régies que par des équations simples entre les températures intérieures et extérieures. Qu (2011) remarque de même la forte sensibilité du modèle à la température intérieure des bâtiments.

3.1.3 Modélisation atmosphérique dans *Code_Saturne*

Afin de modéliser les écoulements dans un fluide et plus particulièrement dans la couche de surface atmosphérique, les logiciels de CFD en résolvent les équations fondamentales de la dynamique des fluides. *Code_Saturne* résout les équations de Navier-Stokes adaptées à cette partie de l'atmosphère. Nous notons pour les équations suivantes :

- ρ la masse volumique du fluide :
- i, j et k les trois directions d'un repère orthonormé ;
- u_i la composante i de sa vitesse instantanée ;
- x les coordonnées spatiales ;
- T et p la température et la pression de l'air ;
- g l'accélération gravitationnelle ;
- ν la viscosité cinématique ;
- λ et C les conductivité et capacité thermiques du fluide.

Tout d'abord, nous avons **l'équation de continuité** ou équation de conservation de la masse pour un fluide compressible :

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{3.1}$$

Ensuite on peut énoncer la **conservation de la quantité de mouvement** :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + g_i \tag{3.2}$$

Enfin, les équations de Navier-Stokes expriment la **conservation de l'énergie** :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\lambda}{\rho C}\frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \tag{3.3}$$

Les équations de Navier-Stokes pour un fluide turbulent ne sont pas linéaires et les logiciels de CFD doivent donc utiliser une méthode pour les résoudre.

Il existe ainsi trois principales approches numériques pour résoudre les écoulements turbulents :

- DNS (Direct Numerical Simulation)
- LES (Large Eddy Simulation)
- RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes)

L'approche DNS - Cette approche n'utilise pas de modèle de turbulence et résout les équations exactes de Navier-Stokes pour toutes les échelles de phénomènes

turbulents. Cette méthode est donc susceptible de simuler précisément les écoulements, mais elle est très coûteuse en termes de temps de calcul. En effet, de par la précision que cette approche nécessite au niveau du maillage et du temps de résolution, son temps de calcul est proportionel au cube du nombre de Reynolds de l'écoulement (Qu (2011)). Or lors d'une étude en milieu urbain, nous travaillons avec des nombres de Reynolds importants (supérieurs à 10^6) ce qui rend impossible l'utilisation de la DNS pour les écoulements à l'échelle atmosphérique.

L'approche LES (Large Eddy Simulation) - Cette approche de modélisation à grandes échelles résout explicitement les équations filtrées de Navier-Stokes pour des échelles de turbulence supérieures à un seuil, qui dépend en général de la dimension du maillage, et modélise par des modèles simples les plus petites échelles. Cette méthode n'est en outre pas adaptée pour étudier les flux proches des parois, et les temps de calcul restent importants (Qu, 2011).

L'approche RANS - Cette méthode consiste à décomposer les variables des équations en grandeurs moyennes et turbulentes et à modéliser par des fermetures turbulentes les termes non-linéaires qui apparaissent. On compte parmi les modèles de turbulence :

- les modèles $k-\varepsilon$ qui considèrent seulement l'énergie turbulente et le taux de dissipation turbulente ;
- les modèles $k-\omega$; ils sont plus précis que $k-\varepsilon$ mais également moins stables et plus coûteux en ressources informatiques.
- les modèles RSM (Reynolds Stress Models) à sept équations de transports qui intègrent l'anisotropie de la turbulence.

On distingue également l'approche RANS stationnaire, où l'on estime pour chaque paramètre un champ moyen autour duquel fluctuent les valeurs, et l'approche RANS instationnaire où l'on suppose une évolution temporelle des paramètres.

L'approche RANS est moins précise que les approches DNS et LES mais elle est également beaucoup moins coûteuse et son temps de calcul ne dépend pas du nombre de Reynolds de l'écoulement. En outre elle peut s'adapter à des modèles de géométries très variées. Il s'agit de la méthode la plus largement utilisée aussi bien pour des applications dans l'industrie qu'en ingénierie (Qu, 2011) et elle est réputée pour son efficience.

Pour nos simulations nous choisissons le modèle RANS stable avec l'approche $k-\varepsilon$ standard, qui est le plus adapté aux objectifs de notre étude qui porte principalement sur les phénomènes qui se produisent aux abords des parois des bâtiments.

3.1.4 Lois de parois du logiciel

Code_Saturne détermine les interactions entre les écoulements et les surfaces délimitant le domaine selon des lois de parois. Celles-ci décrivent les gradients de vitesse, de turbulence et de température en suivant une loi logarithmique (EDF R&D (2012)).

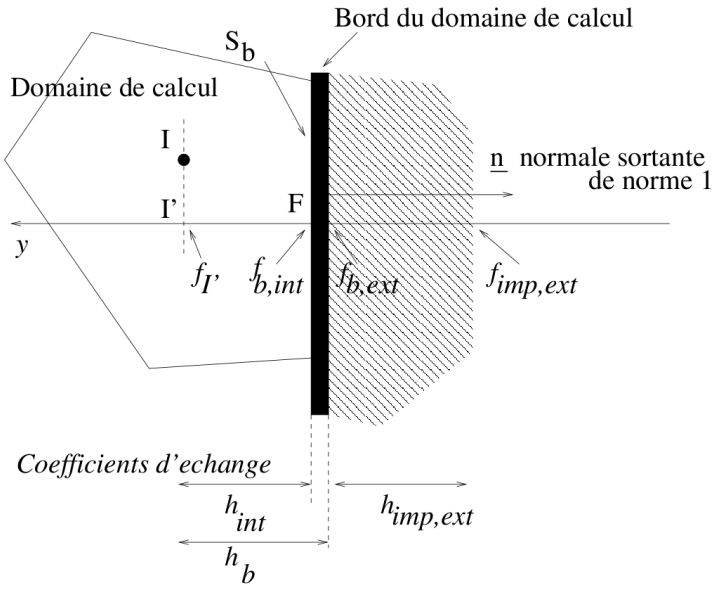


FIGURE 3.1 – Représentation schématique d'une cellule de bord dans *Code_Saturne* (EDF R&D (2012)).

En considérant une cellule de bord du domaine comme représentée Figure 3.1, et en prenant pour scalaire f la température, nous notons :

$u_{\tau,I'}$	en $\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$	la composante tangentielle de la vitesse par rapport à la paroi au point I' ;
u_*	en $\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$	la vitesse de friction ;
z_p	en m	la distance du point I' à la paroi ;
z_0	en m	la rugosité dynamique de la paroi ;
$f_{I'}$	en K	la température au point I' ;
$f_{b,ext}$	en K	la température de la surface à l'extérieur du domaine ;
f_*	en K	la température de friction ;
P_{rt}	-	le nombre de Prandtl turbulent ;
z_{0_T}	en	la rugosité thermique.

Le profil de vitesse s'écrit alors :

$$\frac{u_{\tau,I'}}{u_*} = \frac{1}{\kappa}\ln\left(\frac{z_p + z_0}{z_0}\right) \tag{3.4}$$

Pour un scalaire tel que la température, les conditions limites sont déterminées à

partir des coefficients d'échanges intérieur au domaine fluide (h_{int}) sur la Figure 3.1), de bord (h_b) et extérieur ($h_{imp,ext}$). Le gradient de température suit la loi :

$$\frac{f_{I'} - f_{b,ext}}{f_*} = \frac{P_{rt}}{\kappa} \ln\left(\frac{z_p + z_0}{z_0}\right) \tag{3.5}$$

3.1.5 Les modèles de parois de *Code_Saturne*

Notre étude portant sur les échanges thermiques ayant lieu au niveau du bâtiment, nous allons nous intéresser tout particulièrement à leur modélisation. Deux modèles de paroi sont implémentés dans *Code_Saturne* (Milliez (2006), Qu (2011)) :

— Un modèle de paroi simple appelé « Wall Thermal » décrit par l'équation :

$$\frac{\lambda}{e}(T_{se} - T_{int}) + h_{ext}(T_{se} - T_{ext}) = \varepsilon(L_a + L_e - \sigma T_{se}^4) + (1 - \alpha)(S_D + S_f + S_e)$$

où

λ	en $\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$	la conductivité thermique moyenne de la paroi ;
e	en m	son épaisseur ;
T_{int}	en K	la température intérieure du bâtiment ;
h_{ext}	en $\mathrm{W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2}}$	le coefficient de convection thermique extérieure.

Cette équation a été établie en négligeant les flux de chaleurs anthropogénique et latente dans l'équation d'équilibre énergétique (qui donne alors $Q_{cond} + Q_H = L^* + S^*$ avec Q_{cond} le flux de chaleur par conduction et Q_H le flux de chaleur sensible (en $W.m^{-2}$)).

— Le modèle « Force Restore » (Deardorf (1978)), initialement conçu pour modéliser le sol dans des modèles atmosphériques, peut s'étendre aux parois urbaines (Johnson et al. (1991)). Cette utilisation suppose cependant que la paroi modélisée est bien isolée et avec une température interne quasiment constante (Qu et al., 2010).
La paroi modélisée est représentée par deux couches supposées homogènes. La première est une couche de surface à température variable en fonction des conditions extérieures, et la seconde, une couche profonde à température fixe que nous nommons ici T_{int} par analogie avec le modèle précédent.

$$\frac{\partial T_{se}}{\partial t} = \frac{\sqrt{2\omega}}{\mu}(L^* + S^* + h_{ext}(T_{ext} - T_{se})) - \omega(T_{se} - T_{int})$$

avec

ω	en Hz	la fréquence angulaire de la Terre ;
μ	en $\mathrm{J \cdot m^{-2} \cdot s^{-0,5} \cdot K^{-1}}$	l'admittance thermique ;
T_{int}	en K	la température intérieure.

Cette équation reproduit la réponse au réchauffement périodique du sol (Milliez (2006), Qu (2011)).

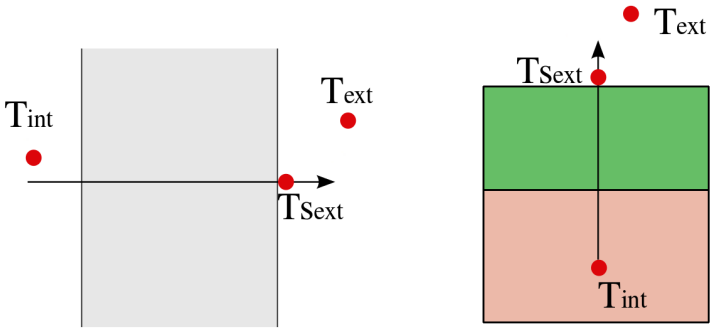


FIGURE 3.2 – Représentation schématique des modèles de paroi simple (à gauche) et Force Restore pour le sol (à droite).

En analysant ces deux équations, nous observons que seules trois températures interviennent : la température extérieure, la température intérieure (fixe ou non) et la température de surface extérieure de la paroi (Figure 3.2). L'évolution spatiale et temporelle de la température au sein de la paroi n'y est jamais prise en compte. Or elle influe sur les températures de surface tout d'abord en intégrant une évolution de température variable selon la profondeur du point de la paroi considérée, et d'autre part en modélisant l'hétérogénéité de la paroi qui est généralement constituée de plusieurs couches de différents matériaux aux propriétés thermiques variées.
Nous soulignons ainsi donc que ces modèles ne représentent pas à proprement parler des bâtiments, mais une paroi monocouche à propagation instantanée de la chaleur. De même, les caractéristiques du fonctionnement d'un bâtiment ne sont pas prises en compte (ventilation voire climatisation, ponts thermiques ou encore apports internes).

3.1.6 Évolution de la température intérieure

Pour une simulation dans *Code_Saturne*, on peut soit faire l'hypothèse d'une température intérieure constante (température de consigne), soit définir une évolution temporelle. Cette évolution est estimée à partir des valeurs précédentes de température intérieure et des températures de surface intérieures du bâtiment modélisé (Masson et al., 2002). Soient T_{int}^{n-1} et T_{int}^{n+1} les températures intérieures aux instants

n-1 et n+1, Δt le pas de temps, τ la période (durée égale à un jour en secondes) et $\bar{T_s}$ la température moyenne de toutes les surfaces du bâtiment à l'instant n, on calcule alors (Masson et al. (2002)) :

$$T_{int}^{n+1} = T_{int}^{n-1}\frac{\tau - \Delta t}{\tau} + \bar{T_s}\frac{\Delta t}{\tau} \tag{3.6}$$

3.1.7 Comparaison des modèles de paroi de *Code_Saturne* avec SOLENE

Les données de la campagne de mesures EM2PAU (présentée au Chapitre 4) dont nous disposons pour confronter les modèles à des valeurs mesurées ont été obtenues avec des parois de conteneurs, d'épaisseur inférieure au centimètre, de conductivité thermique élevée et de capacité thermique très faible. Les parois de conteneurs n'offrent donc pas les caractéristiques idéales pour comparer des modèles, les températures se propageant très rapidement à travers elles. La modélisation d'une paroi plus épaisse et moins conductrice thermiquement, où les variations de températures peuvent engendrer des gradients dans les parois, permet de mieux observer les variations entre ces modèles. Pour comparer les différents modèles, nous modélisons donc pour chacun d'eux une paroi constituée de 80 centimètres d'épaisseur de béton. Malgré l'intérêt qu'il y aurait eu à modéliser une paroi constituée de différents matériaux, une telle modélisation aurait posé problème pour les modèles à une seule couche. Il aurait alors fallu calculer des propriétés équivalentes des matériaux, ce qui s'éloignerait considérablement du comportement observable de la paroi multicouche ainsi modélisée.
Nous attribuons cependant à notre paroi modélisée l'émissivité et l'albédo de l'acier afin que son comportement au rayonnement soit plus proche des parois des conteneurs de la maquette EM2PAU.

Pour estimer l'évolution de la température intérieure, nous appliquons l'expression 3.6.

On étudie l'évolution des températures sur 24h simulée par les trois modèles de bâtiment. Le modèle de paroi de *Code_Saturne* a des variations plus rapides que celui de SOLENE ou le modèle de Force Restore. Son évolution est similaire aux variations de températures mesurées avec les parois de conteneurs. En effet, le fait de ne pas considérer l'évolution thermique dans la paroi affecte les périodes de régime transitoire, en estimant une évolution spatiale de la température linéaire alors que ce n'est pas le cas. Force Restore présente une amplitude des températures moins importante. La prise en compte de l'inertie terrestre, avec les facteurs $\frac{\sqrt{2\omega}}{\mu}$ et ω, atténue les influences des rayonnements solaires et des variations de température

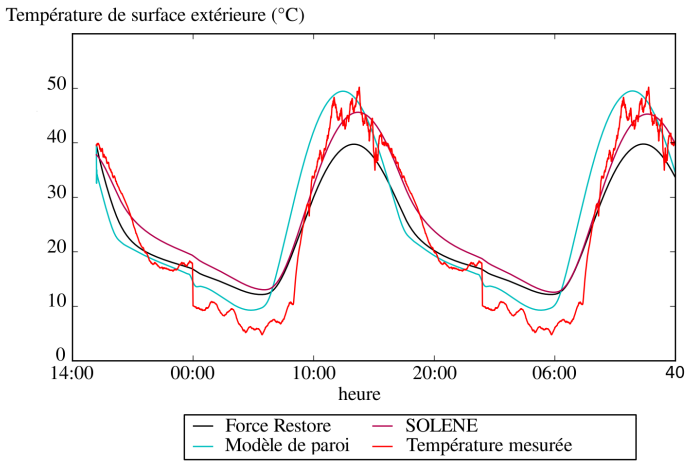


FIGURE 3.3 – Évolution de la température extérieure sur 24h simulée par les différents modèles.

extérieure.

On remarque ainsi que le modèle de paroi influe sur les résultats. L'utilisation d'un modèle de bâtiment plus complet et capable de discrétiser les parois en autant de couches que le niveau de précision de l'étude le requiert se justifie donc. BuildSysPro permet de considérer des parois de compositions diverses pour un même bâtiment et de les discrétiser en un nombre de couches qui peut être fixé par l'utilisateur.

3.2 Choix du modèle de BuildSysPro et études préalables au couplage

Nous avons présenté au paragraphe 2.2.3.1 la librairie BuildSysPro que nous avons choisie pour réaliser notre couplage de *Code_Saturne* avec un modèle de bâtiment. Cet outil est habituellement utilisé pour étudier la consommation énergétique du bâtiment. L'utilisation que nous souhaitons en faire est atypique, puisque nous voulons en extraire les températures de surface extérieures voire, à terme, les rejets de chaleur issus de la ventilation ou de la climatisation du bâtiment. Cette partie détaille la méthode élaborée pour modéliser les bâtiments avec BuildSysPro afin de réaliser le couplage avec *Code_Saturne*. Nous avons choisi de n'utiliser Dymola que pour générer les matrices décrivant le système de bâtiment, ce qui permet d'entreprendre le travail de couplage indépendemment de systèmes d'exploitation et de logiciels non libres.

3.2.1 BuildSysPro : Création d'un modèle sous BuildSysPro et exploitation des matrices

En définissant les caractéristiques de nos bâtiments sous l'environnement Dymola avec ce logiciel, nous pouvons extraire les matrices de coefficients relatives à ces bâtiments vérifiant la relation que nous rappelons ci-dessous :

$$\begin{cases} \dot{T} = AT + BU \\ Y = CT + DU \end{cases} \tag{3.7}$$

avec T le vecteur des températures dans la paroi, U le vecteur des sollicitations, Y le vecteur des sortie et A, B, C et D les matrices de coefficients propres au bâtiment modélisé.

Notre utilisation de BuildSysPro consiste à obtenir les équations ci-dessus afin de les utiliser pour le couplage avec *Code_Saturne*. Pour notre étude, nous avons besoin de matrices prenant en entrée les paramètres extérieurs qui sont fournis par *Code_Saturne*, et donnant les températures de surfaces en sortie afin qu'elles soient utilisées dans le logiciel de CFD.

Lors de l'élaboration du modèle, nous choisissons donc des paramètres spécifiques afin de favoriser les échanges de données entre ce modèle et le code de CFD. Ainsi, Y rassemble les températures de surface pour chaque paroi et les températures intérieures des différentes zones thermiques. Seules les températures de surfaces extérieures seront communiquées au logiciel de CFD, cependant les températures intérieures sont utilisées pour l'itération suivante du modèle de bâtiment. T contient toutes les valeurs de températures du bâtiment modélisé : les températures de surface des parois, les températures des noeuds dans parois et les températures intérieures des différentes zones thermiques. Enfin, U permet d'introduire pour chaque facette de paroi considérée des valeurs de températures extérieures, de flux solaires et de flux infrarouges provenant de l'environnement et de l'atmosphère et une température du sol. On peut également intégrer les systèmes de chauffage ou de climatisation du bâtiment.
En notant m le nombre de zones thermiques et n celui des surfaces extérieures, on a :

$$Y = \left\{ \begin{array}{l} T_{int_k} \text{pour } k \in [1, m] \\ Ts_{ext_i} \text{pour } i \in [1, n] \end{array} \right\} \tag{3.8}$$

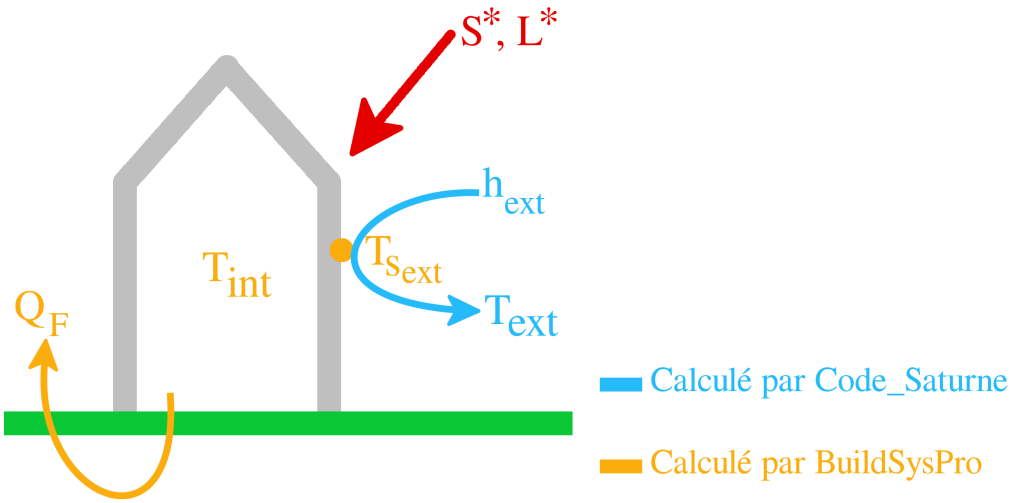


FIGURE 3.4 – Données échangées par *Code_Saturne* et BuildSysPro lors du couplage où les paramètres représentés en bleu sont calculés par *Code_Saturne* et en orange par BuildSysPro, avec

- T_{int} la température intérieure du bâtiment ;
- $T_{S\,ext}$ la température de surface extérieure des parois du bâtiment ;
- T_{ext} la température de l'air extérieur ;
- h_{ext} le coefficient de convection extérieure ;
- Q_F la chaleur anthropique issue du bâtiment que l'on peut on non considérer ;
- S^* et L^* les rayonnements de courtes et grandes longueurs d'onde, qui peuvent être calculés par *Code_Saturne*.

$$U = \left\{ \begin{array}{c} T_{ext_i} \text{pour } i \in [1,n] \\ S\downarrow_i \text{ pour } i \in [1,n] \\ L\downarrow_i \text{ pour } i \in [1,n] \\ HVAC_k \text{pour } k \in [1,m] \end{array} \right\} \tag{3.9}$$

A, B, C et D sont donc les matrices des coefficients calculés par BuildSysPro en fonction des paramètres et caractéristiques du bâtiment qui permettent de calculer les températures à l'instant considéré en fonction des données de U.

Le logiciel nous fournit un ensemble de données contenant ces matrices et des paramètres nous permettant de les exploiter. Nous avons ainsi accès au nombre d'états et aux noms des différentes sollicitations qui ont été incluses dans le vecteur U. La matrice est très variable en fonction des paramètres que l'on choisit en entrée (U) et en sortie (Y). Les données extraites de BuildSysPro nous permettent donc d'étudier et d'exploiter les matrices en étant indépendant des travaux réalisés préalablement sous Dymola.
A partir de ces données, il est nécessaire de traiter les matrices pour les mettre en

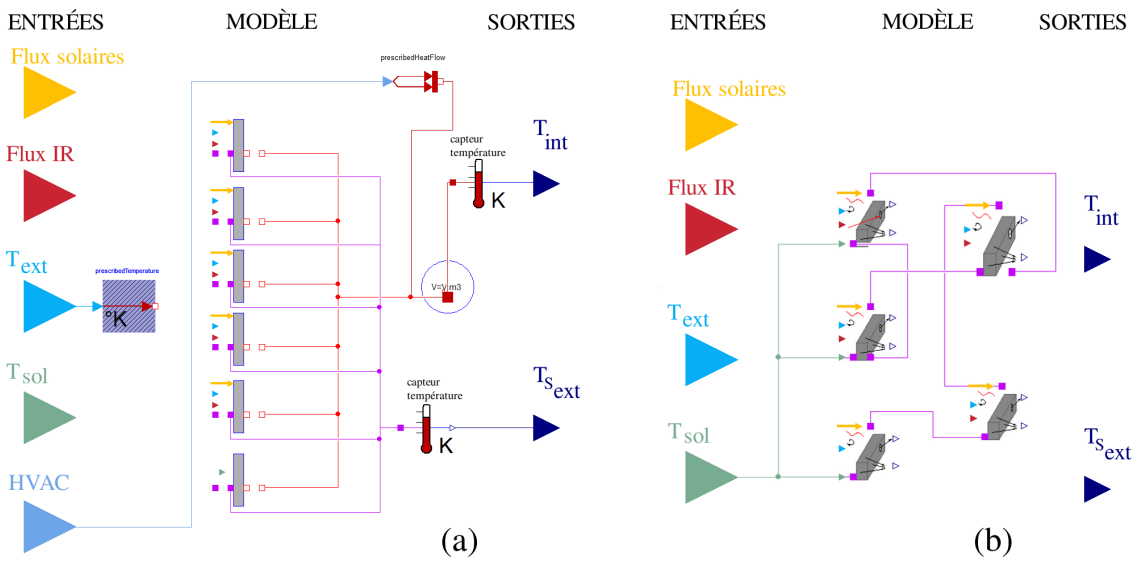


FIGURE 3.5 – Modèles BuildSysPro de bâtiments soumis aux rayonnements, à la température de l'air extérieur et à la température du sol : (a) monozone climatisé ou chauffé, (b) multizone.

forme pour le couplage, comme présenté ci-après.

3.2.2 Gestion du format des matrices

La partie plus complexe à gérer est la forme non définie des matrices obtenues, et plus exactement l'ordre d'apparition des sollicitations extérieures dans U et celui des coefficients associés dans les matrices B et D. En effet, celui-ci dépend de de l'élaboration même du modèle dans BuildSysPro, or notre travail requiert une connaissance exacte de la structure des matrices obtenues afin de savoir où appliquer les conditions limites au bâtiment qui auront été calculées par *Code_Saturne*.
On pourrait imposer cet ordre d'apparition des paramètres du modèle à la phase d'élaboration du modèle, mais l'intérêt de cette démarche reste très limitée. En effet elle supposerait qu'on ne pourrait pas utiliser de modèle déjà existant d'une part, et d'autre part le travail serait fastidieux et sa réussite non assurée.

Le premier travail réalisé sur ces matrices consiste donc à créer une matrice dans un format défini à intégrer à *Code_Saturne*, après en avoir identifié toutes les caractéristiques. L'identification des dimensions des matrices et l'étude numérique des noms des variables permettent d'obtenir les informations nécessaires sur le modèle de bâtiment telles que le nombre de zones thermiques ou de couches discrétisant les parois. À partir de là, on peut remonter à l'organisation des matrices mêmes et fixer plus facilement les conditions extérieures issues de *Code_Saturne*.

À cette fin nous réalisons un ensemble de programmes Python (un préprocesseur) qui retourne des matrices homogènes facilement utilisables par la CFD. Tout d'abord, tous les paramètres nécessaires de la matrice BuildSysPro sont extraits, à savoir les matrices A, B, C et D, leurs dimensions, et la liste des paramètres.
Dans un deuxième temps, la structure des matrices est étudiée à partir de ces paramètres et des motifs suivis par BuildSysPro (ordre des différentes zones thermiques, des parois selon leur orientation pour chaque zone et des couches dans les parois). Cette forme générale de la matrice varie notamment en fonction du nombre de zones total et de celles qui sont au niveau du sol (en raison de la discrétisation du sol au niveau de chaque zone en contact avec lui), de la présence ou non de systèmes HVAC dans les zones thermiques et de l'ordre de définition des éléments lors de l'élaboration des matrices. Il s'agit alors de fixer ces caractéristiques variables afin de pouvoir ensuite situer chaque paramètre au sein de la matrice.

Ce travail réalisé, il est alors relativement aisé d'initialiser les valeurs des paramètres et résoudre les équations descriptives du système.

3.2.3 Résultats obtenus avec les matrices issues de BuildSysPro

Un programme de résolution du modèle a ensuite été réalisé afin de pouvoir tester les résultats de notre traitement.

La Figure 3.6 représente l'évolution temporelle des températures de surface extérieure pour un bâtiment monozone dont les parois sont constituées de 20 cm de béton, 20 cm d'isolant thermique et 1 cm de plâtre. La couche de béton est divisée en 4 mailles, tandis qu'on impose un seul point de contrôle dans l'isolant et un dernier dans l'épaisseur du plâtre. Nous imposons ici les mêmes conditions extérieures à chacune des parois. Les valeurs de températures et de rayonnements extérieurs sont celles mesurées le 6 avril 2011 à 15h à Nantes (voir Chapitre 4) et on initialise les températures de surface avec les températures mesurées au même instant. Il s'agit d'une période ensoleillée avec un flux solaire incident de $616\,\mathrm{W}\cdot\mathrm{m}^{-2}$, un flux infrarouge de $318\,\mathrm{W}\cdot\mathrm{m}^{-2}$ et une température extérieure de 26 °C.
Les températures évoluent jusqu'à atteindre un régime stationnaire.

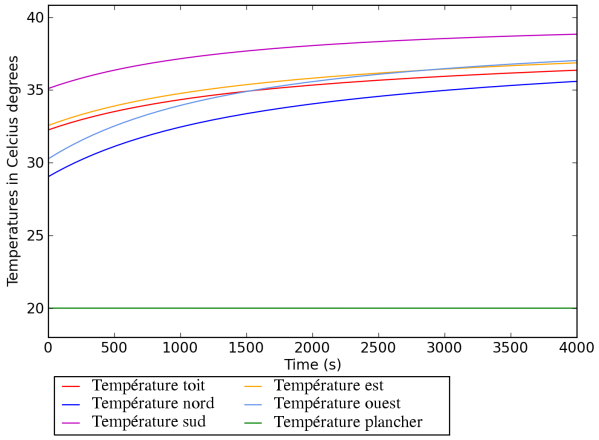


FIGURE 3.6 – Simulation par les matrices issues de BuildSysPro de l'évolution des températures de surfaces extérieures pour un bâtiment monozone soumis aux conditions météorologiques observées le 06/04/2011 à Nantes.

3.3 Réalisation du couplage entre *Code_Saturne* et BuildSysPro

3.3.1 Présentation des méthodes possibles pour coupler des logiciels de thermique du bâtiment et de CFD

3.3.1.1 Couplage direct ou par code interposé

L'objectif de notre travail est d'utiliser les matrices descriptives du bâtiment issues de BuildSysPro pour les coupler avec *Code_Saturne*. Plusieurs méthodes ont été envisagées. La première consiste à intégrer les matrices de BuildSysPro dans le code de *Code_Saturne*. Il s'agit d'une implémentation du modèle de bâtiment directement dans les fonctions de *Code_Saturne*, mais elle requiert une manipulation complexe des matrices avec le langage Fortran et nécessite une compatibilité avec la parallélisation existante de *Code_Saturne*. En effet, les calculs sous *Code_Saturne* sont réalisés sur plusieurs processeurs qui se répartissent les tâches et fonctionnent en parallèle. Dans le cadre de l'implémentation d'un modèle de bâtiment, il faut donc s'assurer que ce fonctionnement ne mette pas à mal la modélisation, ou bien qu'il soit réalisé par un unique processeur. En outre cette méthode demande à l'utilisateur de coder à chaque fois que l'on change de bâtiment.

La deuxième méthode consiste à coupler les deux codes à l'aide un logiciel spécifique

(de la plateforme Salome). Cette méthode nous éviterait la mise en place d'un code de couplage, néanmoins cet outil est en cours de développement et il est peut-être trop tôt pour l'utiliser dans notre cas. Un tel couplage sera envisagé en perspective de ces travaux.

La troisième enfin est la création d'un code particulier dédié au couplage entre BuildSysPro et *Code_Saturne*, ce qui permet d'en maîtriser toutes les étapes. De plus, nous envisageons d'écrire ce code en langage Python qui fonctionne par défaut sur un seul processeur, ce qui permet de mieux gérer les échanges de données entre les deux logiciels. Nous avons donc opté pour cette solution.

3.3.1.2 Échanges de données entre les logiciels couplés

On peut distinguer trois techniques de couplage entre un logiciel de CFD et un outil de simulation énergétique en fonction des données échangées, synthétisées dans le tableau 3.1 (Athamena (2012) d'après Zhai and Chen (2003)) :

Technique de couplage	ES vers CFD	CFD vers ES
Technique 1	températures de surfaces extérieures	h_{ext} et température extérieure
Technique 2	températures de surfaces extérieures	flux convectif
Technique 3	flux convectif	h_{ext} et température extérieure

TABLE 3.1 – Les différentes techniques d'échanges de données entre deux logiciels couplés.

La première technique s'est révélée plus stable que les autres et ses résultats convergent dans la plupart des cas tandis que les deux autres méthodes divergent plus fréquemment (Athamena, 2012). En outre elle est naturelle à mettre en place entre *Code_Saturne* et BuildSysPro, avec le coefficient de convection extérieure obtenu à partir des vitesses de vent calculées par la CFD. C'est donc cette méthode qui a été retenue pour le couplage.

3.3.1.3 Couplage dynamique réalisé à un intervalle régulier de pas de temps

Nous avons présenté au Chapitre 2 les différents types de couplages envisagés entre un logiciel de CFD atmosphérique et un logiciel de simulation du bâtiment. Les simulations de CFD ont des pas de temps de l'ordre de la seconde, voire plus petit, mais il n'est pas nécessaire de réaliser le calcul de thermique du bâtiment aussi fréquemment. Nous optons donc pour un échange de données peut avoir lieu toutes les demi-heures ou toutes les heures pour des simulations longues.
Le couplage est quasi-dynamique pour la CFD qui ne converge pas nécessairement avant l'étape de couplage suivante. Cependant il est dynamique de la part de BuildSysPro qui réalise un nombre d'itérations suffisant pour donner une solution convergée à *Code_Saturne*. Lors de nos simulations, nous tâchons cependant de laisser *Code_Saturne* converger avant de réaliser un nouveau calcul de thermique de bâtiment.

3.3.2 Méthode de couplage de *Code_Saturne* avec BuildSysPro

Nous choisissons donc de coupler les logiciels *Code_Saturne* et BuildSysPro en créant un code qui permet aux deux outils de communiquer comme présenté Figure 3.4.

La première partie de ce code, appelée « Lecture des matrices » sur la Figure 3.7, réalise l'exploitation des données obtenues sous Dymola comme présenté précedemment. Elle lit donc les informations provenant de BuildSysPro et en déduit la structure des matrices A, B, C, D, T, U et Y. Puis la phase de couplage à proprement parler est mise en place avec *Code_Saturne* et le code de résolution du modèle de bâtiment, écrit en Python, qui communiquent par fichiers interposés. Ces fichiers FIFO (First In First Out, représentés en bleu sur la Figure 3.7) sont des fichiers qui ne permettent qu'une lecture pour une écriture, et mettent les logiciels qui les utilisent en attente tant que les deux actions n'ont pas été réalisées. Ce système nous permet d'imposer aux deux programmes de s'attendre mutuellement et de réaliser simultanément les mêmes itérations.
Ainsi le code Python communique les températures de surfaces extérieures au logiciel de CFD, qui les lit depuis sa routine *cs_user_boundary_conditions* afin de les utiliser en conditions limites au niveau des bâtiments. *Code_Saturne* réalise alors ses calculs et écrit depuis la routine *cs_user_extra_operations* les paramètres extérieurs au niveau des parois des bâtiments tels que les vitesses de vent et les températures

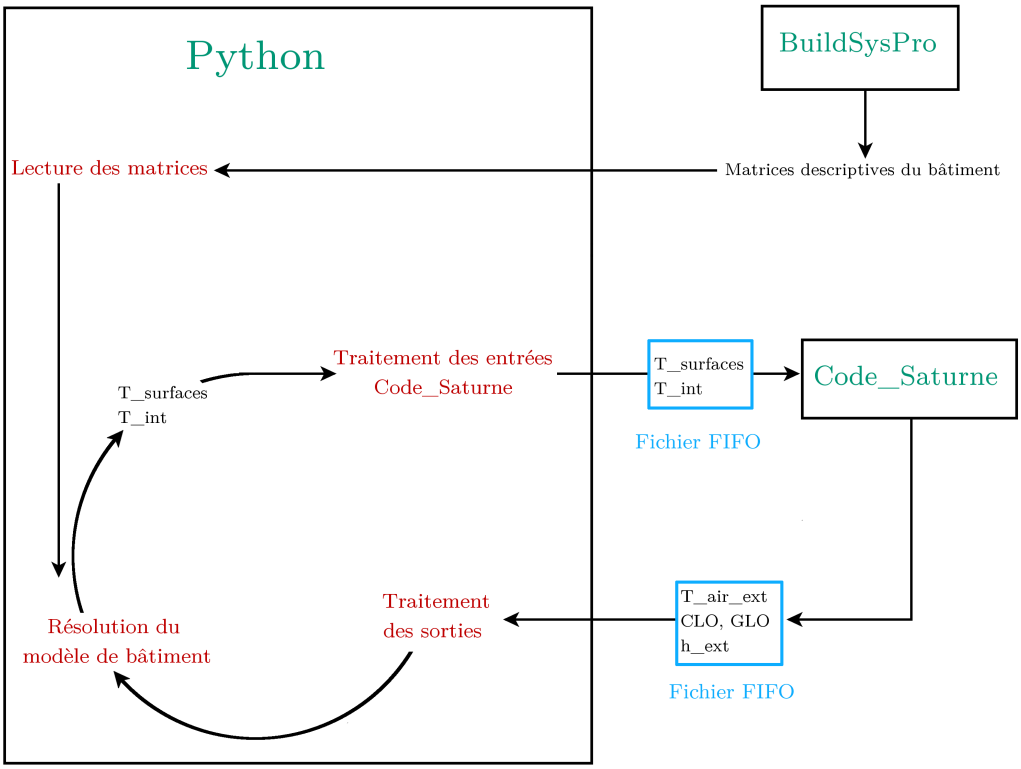


FIGURE 3.7 – Schéma du couplage entre *Code_Saturne* et BuildSysPro.

extérieures. Une présentation plus détaillée du couplage est disponible à l'Annexe C.

3.4 Conclusion du chapitre

Le logiciel de dynamique des fluides *Code_Saturne* offre la possibilité d'intégrer de nombreux éléments pour les modélisations atmosphériques, avec des outils calculant les rayonnements ou l'influence de la végétation. Il peut également prendre en compte les échanges thermiques qui ont lieu au niveau des parois de bâtiment grâce à un modèle de paroi simple et le modèle de force-restore. Cependant Qu (2011) met en évidence les limites de ces modèles pour la modélisation en milieu urbain.
Pour cette raison, nous avons choisi de faire fonctionner *Code_Saturne* avec un modèle de bâtiment complet, qui puisse modéliser finement les échanges énergétiques entre les bâtiments et l'atmosphère.
Nous avons ainsi mis en place une méthode de couplage entre BuildSysPro et *Code_Saturne* qui permet de nous affranchir de Dymola une fois les matrices générées par BuildSysPro. Nous avons pour cela développé un code rédigé en Python. Cet ensemble de programmes permet d'une part de préparer les matrices BuildSysPro au couplage. Pour cela, leur structure et donc les points d'entrée des données de *Code_Saturne* sont analysés, et les sorties sont identifiées afin de les

attribuer correctement aux conditions limites de *Code_Saturne*. D'autre part, il permet de résoudre le modèle de bâtiment lors du couplage. Des éléments de code sont également mis en place afin de permettre la communication entre les deux outils de calcul par fichiers interposés.

La partie suivante porte sur le dispositif expérimental avec lequel nous testons notre modèle couplé. Les résultats de simulation sont ensuite présentés au Chapitre 5.

Chapitre 4

La campagne de mesures EM2PAU : dispositif expérimental et analyse des données

Sommaire

4.1 Présentation de la campagne de mesures EM2PAU . . . 90

4.1.1 Contexte et environnement de EM2PAU 90

4.1.2 Le dispositif expérimental de EM2PAU 91

4.1.3 Simulations préparatoires de EM2PAU 94

4.2 Étude des mesures obtenues lors de la campagne 96

4.2.1 Étude des composantes horizontales du vent 97

4.2.2 La composante verticale du vent : information sur les effets dynamiques et thermiques dans le canyon 99

4.3 Conclusion du chapitre 112

De nombreuses campagnes de mesures ont été réalisées afin d'étudier le microclimat urbain. Certaines d'entre elles sont des maquettes (MUST, ville idéalisée représentée par des rangées de conteneurs dans l'Utah, Biltoft (2001)), tandis que d'autres sont réalisées en milieu urbain réel (CAPITOUL, dont les mesures ont été prises dans un quartier de Toulouse, Masson and al. (2008)). Cependant, peu de campagnes mesurent simultanément les écoulements d'air et les températures de paroi ou d'air. Pendant les campagnes MUST ou CAPITOUL qui portent sur la météorologie urbaine, les données thermiques et radiatives ont été relevées mais aucune mesure sur les écoulements de l'air dans le domaine étudié n'a été prise. Il en va de même avec l'installation ClimaBat de l'université de la Rochelle (Djedjig et al. (2015)). Mise en place pour étudier l'influence des revêtements des bâtiments sur le microclimat local et les performances thermiques des bâtiments, les températures d'air et de parois ainsi que l'humidité de l'air y sont mesurées.
À l'inverse, le projet Basel UrBan Boundary Layer Experiment (BUBBLE, Rotach et al. (2005)) porte sur l'impact de tours sur les écoulements. Des mesures sur le vent sont collectées grâce à un profileur de vent et un lidar, sans donnée sur les températures.
Pour cette raison, nous choisissons d'utiliser la campagne de mesures EM2PAU pendant laquelle les données thermiques et sur le vent ont été relevées.
Cette partie présente donc dans un premier temps le dispositif expérimental de EM2PAU et les mesures qui y ont été réalisées. Dans un deuxième temps, ces données sont analysées afin d'étudier l'influence que les températures des parois peuvent avoir sur les écoulements.

4.1 Présentation de la campagne de mesures EM2PAU

4.1.1 Contexte et environnement de EM2PAU

EM2PAU (Étude Micro Météorologique sur la Propagation Acoustique en milieu Urbain) est une campagne de mesures réalisée à la périphérie de Nantes par quatre laboratoires (Picaut (2012)) :

— l'IFSTTAR (Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux) ;
— le LHEEA (Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique) ;
— le CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment) ;

— le laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine.

Ce projet porte sur l'étude de l'effet thermique sur la propagation du bruit dans une rue canyon. Il s'appuie sur l'observation que le bruit est la pollution la plus fréquemment citée parmi les nuisances urbaines : 54% des ménages français se disent gênés par le bruit lorsqu'ils sont chez eux (Picaut (2012)). C'est dans ce cadre que l'Union Européenne a lancé l'établissement de cartes de bruit, qui ne prennent cependant pas en compte tous les phénomènes entrant en jeu dans la propagation acoustique. Parmi eux se trouvent les effets micro-météorologiques qui ont une influence très importante en milieu ouvert (dégagé d'obstacles ou de bâti) mais sont difficilement quantifiable en ville (IFSTTAR, 2012).

EM2PAU s'ancre dans un projet visant à étudier l'influence des effets micro-météorologiques sur la propagation acoustique en s'articulant autour de trois objectifs :

— établir un état des connaissances sur les aspects « micro-météorologie urbaine » et « bruit-météo » et définir les bases d'un vocabulaire commun entre les différentes disciplines impliquées ;
— évaluer expérimentalement l'influence des effets micro-météorologiques sur la propagation acoustique en milieu urbain en soufflerie et *in situ* avec EM2PAU ;
— intégrer ces effets micro-météorologiques dans les modèles de prévision acoustique et valider le comportement de ces modèles.

Les mesures *in situ* constituent donc une base de données sur les bruits et les conditions météorologiques.

4.1.2 Le dispositif expérimental de EM2PAU

Le dispositif expérimental a été installé sur un parking entouré de bois et de champs avec quelques bâtiments épars (Blackman et al., 2015). Elle représente un canyon urbain à l'échelle 1/2, constitué de deux rangées de chacune quatre conteneurs : deux dans la longueur et deux sur la hauteur. Elle modélise un canyon de 24 m de long et de 3,6 m de large, entouré de bâtiments de 2,45 m de large. Ceci donne donc un rapport d'aspect entre la hauteur et la largeur (W/H) du canyon de près de 0,7 et un rapport entre la hauteur et la longueur (L/H) de 4,6 : on se retrouve dans une configuration de rue idéalisée relativement étroite.
L'ensemble est placé sur un site plat végétalisé et parsemé de bâtiments de recherche, les plus proches se trouvant à environ 100 m du lieu d'étude (Athamena (2012)).



FIGURE 4.1 – Vue aérienne du site de EM2PAU (Athamena, 2012).

La campagne de mesures a duré plus de deux ans, de mars 2010 à juin 2012, avec plusieurs phases d'études. Nous nous intéressons aux deux premières semaines d'avril 2011 où toutes les mesures de températures et de vent dont nous avons besoin ont été prises.

4.1.2.1 La représentation des bâtiments dans l'installation

Les bâtiments sont modélisés par ces huit conteneurs dont les parois sont faites de tôle en acier galvanisé de $2,5\,\text{mm}$ d'épaisseur (Athamena (2012)). Un local technique est aménagé dans une moitié de conteneur, au Nord-Ouest du canyon. D'une longueur de $5,8\,\text{m}$ de long, il abrite les systèmes d'acquisition de données. Espace climatisé et isolé, sa paroi est renforcée d'une épaisseur de $45\,\text{cm}$ de polystyrène extrudé et d'une lame d'air de $15\,\text{cm}$ (Athamena (2012)).
De nombreuses mesures de températures, de vent et de rayonnement ont été prises lors de cette campagne grâce à des capteurs placés au milieu de la longueur du canyon.

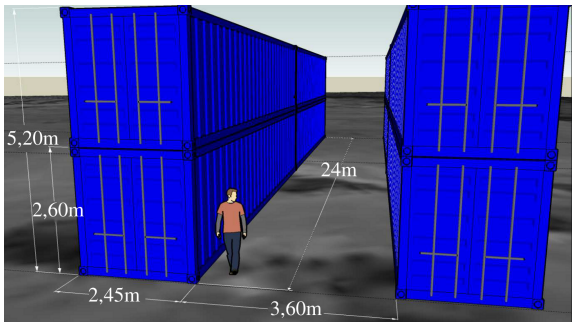


FIGURE 4.2 – Dimensions des bâtiments de EM2PAU (d'après Athamena (2012)).

Athamena (2012) liste également les paramètres physiques des matériaux utilisés pour les parois des conteneurs : la tôle en acier galvanisé qui constitue la structure des conteneurs aussi bien que les matériaux utilisés pour isoler le local technique.

Les données concernant le sol, composé de terre recouverte d'une couche d'asphalte, sont également fournies. Nous utilisons ces paramètres, exposés au Tableau 4.1, pour créer les modèles de bâtiment avec BuildSysPro.

Matériaux	Épaisseur e (cm)	Albédo α	Émissivité ε	Conductivité thermique λ ($W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}$)	Masse volumique ρ ($kg \cdot m^{-3}$)	Capacité thermique C_p ($J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}$)
Acier	2,5	0,6	0,8	52	7 830	500
Air	15	-	-	0,04	1,25	1 000
Polystyrène	45	-	-	0,032	35	1 450
Asphalte	5	0,17	0,91	2,4	1 600	950
Terre	70	-	-	1,3	1 600	1 100

TABLE 4.1 – Propriétés physiques des matériaux constituant les bâtiments et le sol (d'après Athamena (2012)).

4.1.2.2 Les mesures de températures

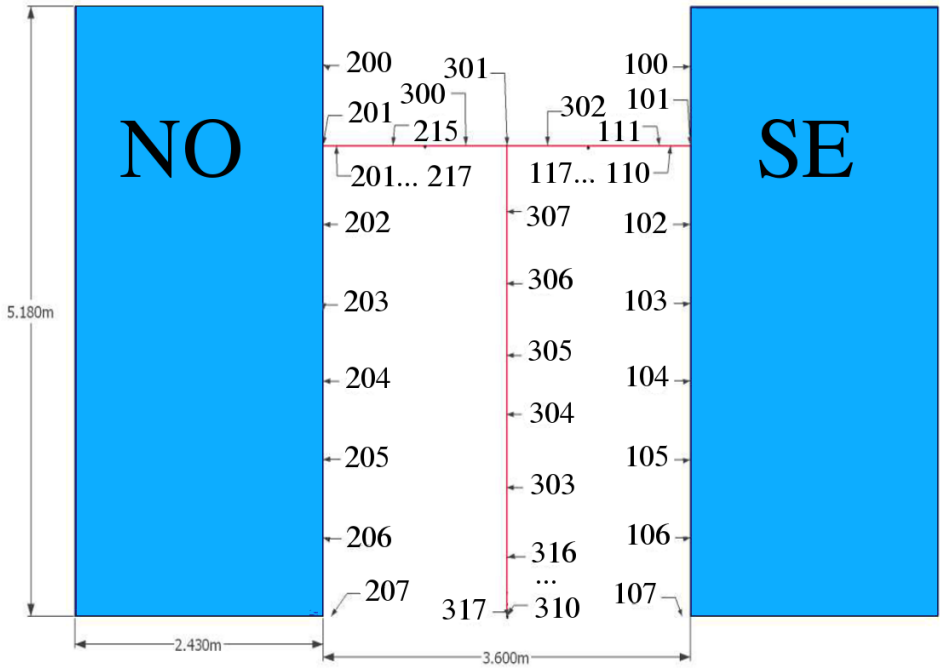


FIGURE 4.3 – Localisation des thermocouples dans le canyon (d'après Picaut (2012)).

Les thermocouples sont répartis à l'intérieur et sur les parois extérieures des conteneurs, ainsi que dans le sol et à différentes altitudes dans le canyon afin de mesurer la température de l'air. Un total de 76 thermocouples a été utilisé sur l'ensemble de la campagne (Athamena (2012)). L'acquisition de données se fait toutes les 6

secondes, et les mesures sont moyennées sur des périodes de 2 minutes. À partir de ces données on peut donc retracer une carte des températures dans le canyon à tout instant.

4.1.2.3 Les mesures de vent

Un anémomètre placé sur un mât de 10 m de hauteur à proximité des conteneurs mesure le vent de référence, tandis que six anémomètres ultra-soniques 3D positionnés dans un même plan vertical dans le canyon relèvent les caractéristiques des flux d'air entre les conteneurs (Figure 4.4). Ces anémomètres donnent accès aux trois composantes du vent ainsi qu'à la turbulence des écoulements. Ils sont répartis sur la largeur du canyon à des hauteurs de 1,95 m et 4 m. Ici les données, relevées à 20 Hz, sont moyennées sur 15 minutes.

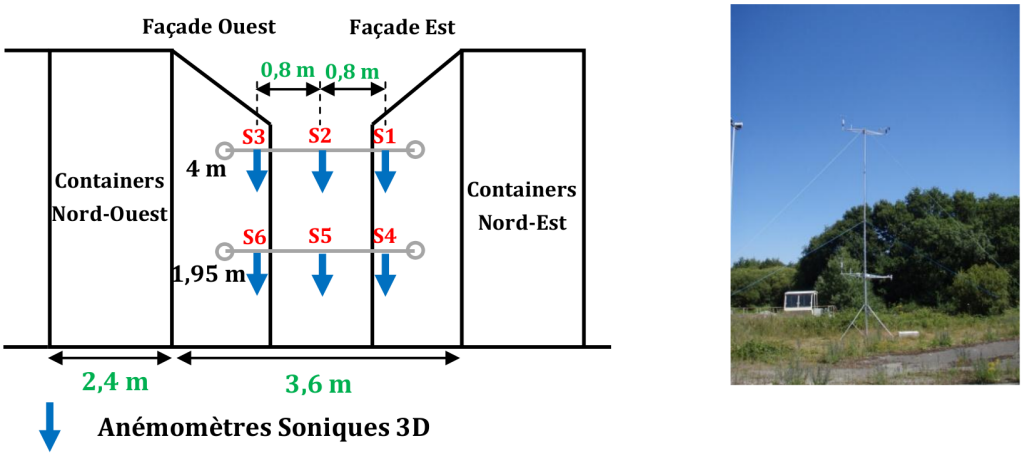


FIGURE 4.4 – Distribution des anémomètres dans le canyon (Athamena (2012)).

4.1.2.4 Les mesures de rayonnement

Les mesures de rayonnement sont réalisées à partir de trois appareils présentés Figure 4.5. Un pyranomètre et un pyrgéomètre, placés sur le toit des conteneurs afin d'éviter tout effet d'ombre, mesurent respectivement le flux global incident et le flux infrarouge provenant du ciel. Un second pyranomètre placé à l'écart de l'installation relève les radiations solaires diffuses (Athamena (2012)).

4.1.3 Simulations préparatoires de EM2PAU

À partir des données de EM2PAU, nous réalisons deux études principales.

La première étude (présentée au Chapitre 5) porte sur la modélisation préparatoire du domaine afin de pouvoir le mailler pour les simulations de dynamique des fluides



(a) Sur les toits des conteneurs. (b) Pyranomètre isolé.

FIGURE 4.5 – Distribution des pyrgéomètres et pyranomètre dans EM2PAU (d'après Athamena (2012)).

et le simuler avec le logiciel de bâtiment. Nous souhaitons réaliser une étude avec des bâtiments multizones, nous distinguons donc bien les différents conteneurs ou parties de conteneur dans notre modèle (cf. Figure 4.6).

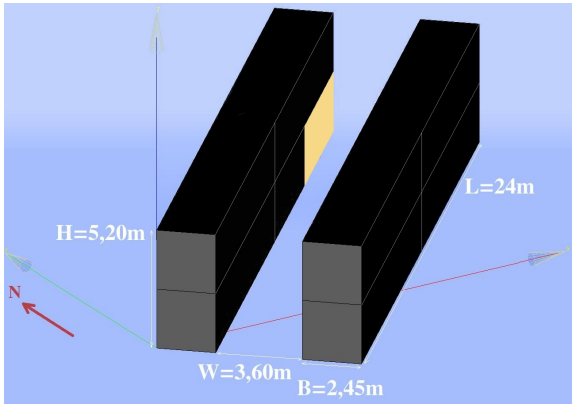


FIGURE 4.6 – Les bâtiments dans EM2PAU - La section jaune représente le local technique climatisé.

La deuxième étude, présentée à la section 4.2, consiste à analyser les données de la campagne dont nous disposons afin de localiser précisément les capteurs de température et de vent, dans un plan vertical pour les premiers et dans les plans vertical et horizontal pour les seconds. À partir de cela nous pouvons aisément visualiser graphiquement les mesures dans l'espace, comme représenté sur la Figure 4.7 où l'on retrace la carte des températures mesurées dans le canyon à un instant donné.

Cette partie de notre travail est également utile pour localiser les capteurs dans le maillage du domaine, afin d'obtenir de *Code_Saturne* les valeurs des paramètres

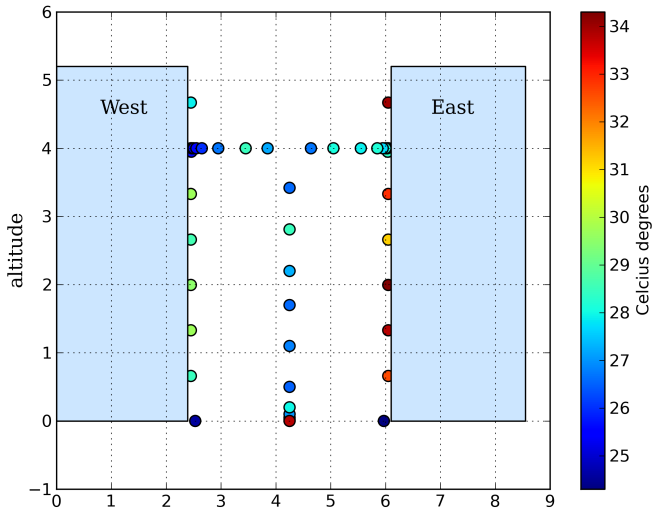


FIGURE 4.7 – Températures mesurées dans le canyon de EM2PAU le 06/04/2011 à 15h.

modélisés aux mêmes points que les mesures.

Nous pouvons ainsi procéder à l'analyse des résultats de la campagne de mesures.

4.2 Étude des mesures obtenues lors de la campagne

Afin d'analyser les mesures, nous nous concentrons plus particulièrement sur la période allant du 5 avril 2011 à 0h au 9 avril 2011 à 24h.

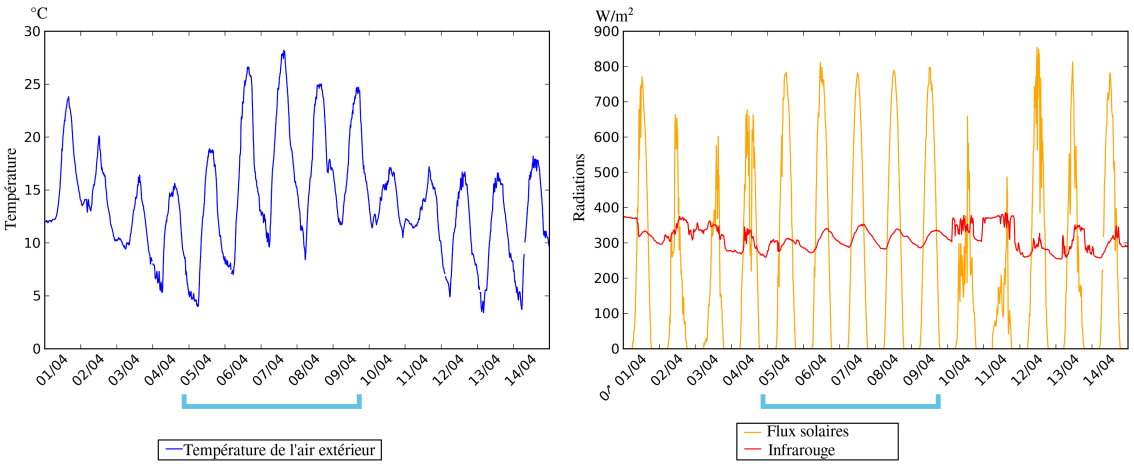


FIGURE 4.8 – Évolution de la température de l'air extérieur et des flux solaires et infrarouges entre le 1er et le 14 avril 2011.

Il s'agit d'une période où les variations de température extérieure et les flux solaires

sont similaires d'un jour à l'autre, et surtout d'une période ensoleillée où l'on espère pouvoir mieux visualiser les effets thermiques qui peuvent se dérouler dans le canyon (cf. Figure 4.8). En outre les vitesses de vents sont variables sur la semaine (IFSTTAR (2012)), allant de 0.4 à $3,10\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ (Athamena (2012)), ce qui nous offre des situations assez variées en termes de dynamique.

Pour chacune des représentations graphiques suivantes, le même code couleur est utilisé afin de distinguer les différents soniques en allant du rouge pour le Sud-Est au bleu pour le Nord-Ouest avec des couleurs plus claires pour les soniques du bas et des couleurs plus foncées pour ceux du haut (cf. Figure 4.9).

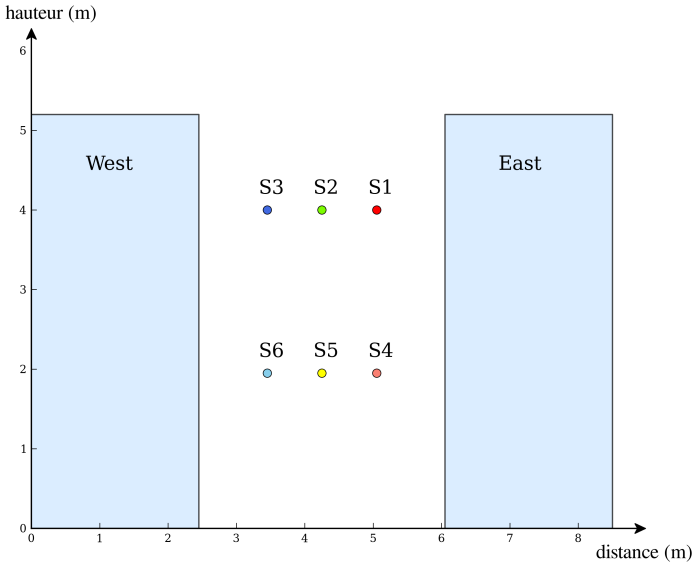


FIGURE 4.9 – Localisation des anémomètres soniques dans le canyon et code couleur utilisé.

4.2.1 Étude des composantes horizontales du vent

La période que nous étudions est relativement calme avec des vitesses de vents n'excédant pas les $4\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. En milieu sans obstacle et fréquemment en milieu urbain, les vitesses de vent sont plus importantes en altitude que proche du sol, où elles sont limitées par les forces de frottements avec ce dernier. Or en étudiant les mesures de vent horizontal dans le canyon nous faisons l'observation inverse déjà relevée par Athamena (2012). Si l'on étudie l'évolution des composantes verticales du vent sur la journée du 6 avril par exemple (Figures 4.10 et 4.11), on observe que pour toute la période diurne les soniques placés à 4 m mesurent des vitesses plus faibles que S4, S5 et S6 à 1,95 m. Nous pouvons supposer que cette observation est due notamment au phénomène décrit par Blocken et al. (2008). Le vent est canalisé entre les deux

obstacles, engendrant une accélération de la vitesse à proximité du sol tandis qu'à des hauteurs plus importantes une partie des flux passe au-dessus des bâtiments. Mais elle peut également être le résultat des recirculations d'air dans le canyon.

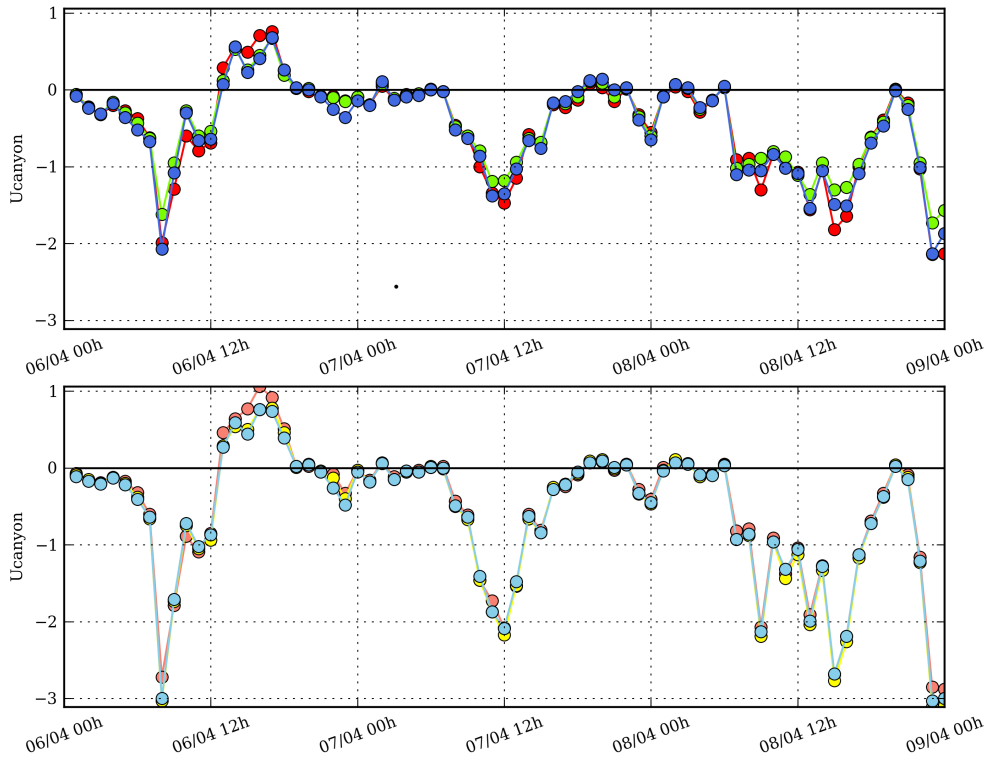


FIGURE 4.10 – Vent parallèle à l'axe du canyon de EM2PAU entre le 5 et le 9 avril 2011 ; code des couleurs tel que décrit Figure 4.9.

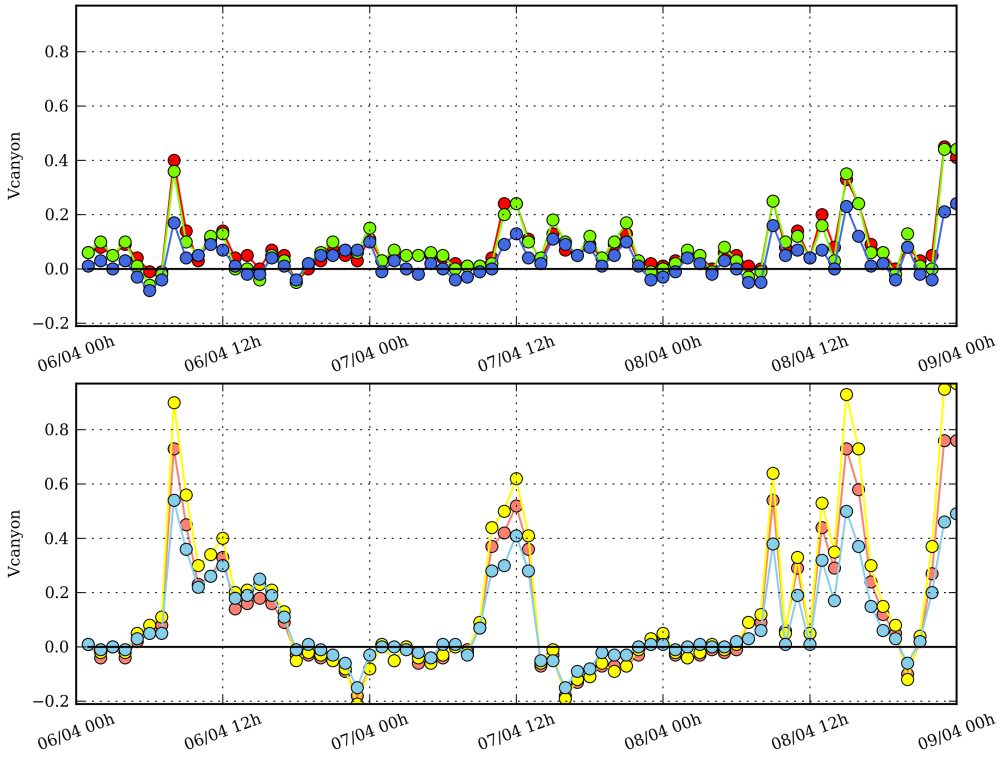


FIGURE 4.11 – Vent perpendiculaire à l'axe du canyon de EM2PAU entre le 5 et le 9 avril 2011 ; code des couleurs tel que décrit Figure 4.9.

4.2.2 La composante verticale du vent : information sur les effets dynamiques et thermiques dans le canyon

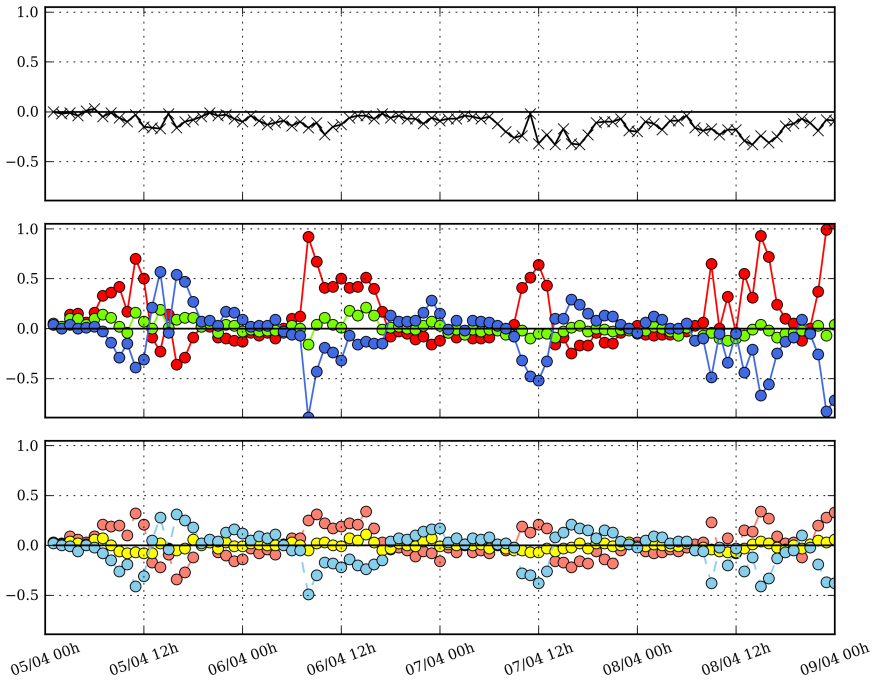


FIGURE 4.12 – Suivi de la vitesse verticale du vent au mât (première figure) et dans le canyon entre le 5 et le 9 avril 2011 ; code des couleurs tel que décrit Figure 4.9.

Nous nous intéressons maintenant à la composante verticale de la vitesse du vent, w. Au niveau du mât, w devrait fluctuer autour de $0\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$, or ici elle présente un biais négatif (Figure 4.12). Nous supposons donc que le capteur n'était pas placé bien droit sur le mât, engendrant certainement une erreur dans les profils créés à partir de ses données, dont l'effet dépendra de la direction du vent.
Nous observons que les soniques placés au centre du canyon mesurent une vitesse verticale de norme généralement proche de 0, tandis que celle mesurée par les soniques situés plus près des parois est plus importante. En outre, on remarque que pour une hauteur donnée, le sonique de droite donnera une valeur de w opposée à celle de gauche : on observe la structure d'une cellule de rotation dans le canyon, comme représenté sur la Figure 4.15.

4.2.2.1 Étude des effets dynamiques dans le canyon

Tout d'abord nous cherchons à identifier l'influence dynamique du vent à l'extérieur du canyon sur la recirculation du vent. Pour cela nous nous intéressons dans un premier temps à la direction du vent incident, mesurée au mât et représentée Figure 4.13, et à son impact sur la vitesse verticale du vent dans le canyon. Nous traçons sur la Figure 4.13 deux lignes horizontales pour les directions de 43° et 223°, c'est-à-dire les directions de l'axe du canyon, parallèle aux bâtiments, qui correspondent donc à des vents parallèles (vents du nord-est et du sud-ouest). Un vent de direction comprise entre 43° et 223° vient donc du côté sud-est du canyon, et inversement pour les autres directions de vent (Figure 4.17).

Nous soulignons par des lignes verticales les instants où la direction grande échelle du vent change de côté par rapport à l'axe du canyon. Nous définissons alors sept périodes : les périodes 1, 3, 5 et 7 correspondent à des vents venant du sud-est du canyon, et les périodes 2, 4 et 6 à des vents du nord-ouest (Figure 4.13).
Maintenant nous reportons ces périodes sur le graphique représentant l'évolution de la vitesse horizontale du vent pour les anémomètres du canyon placés à 4 m d'altitude (Figure 4.14).

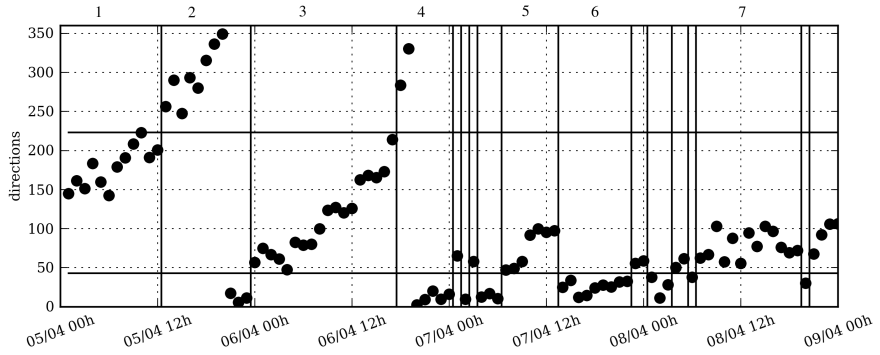


FIGURE 4.13 – Évolution temporelle de la direction du vent de référence du 5 au 9 avril 2011. Les lignes horizontales marquent les directions de 43° et 223° dans l'axe du canyon ; les lignes verticales soulignent les moments où la direction du vent passe par l'axe du canyon et donc change de côté du canyon.

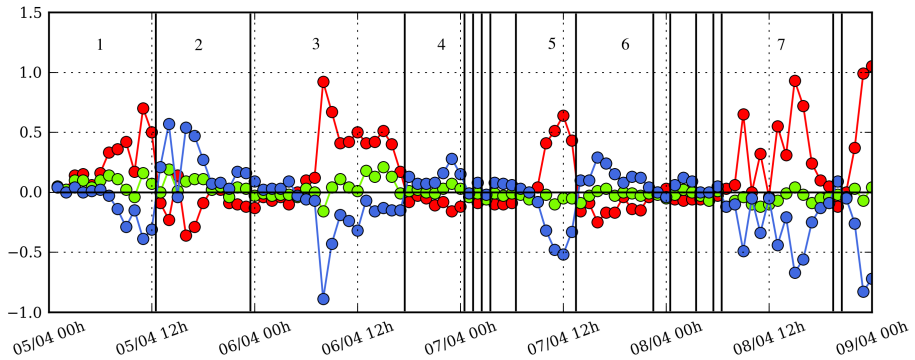


FIGURE 4.14 – Évolution temporelle de la composante verticale de la vitesse du vent dans le canyon entre le 5 et le 9 avril 2011.

L'observation de la composante verticale de la vitesse du vent permet de remarquer à nouveau la présence de cellule de recirculation du vent dans le canyon, ce qui est encore plus évident avec la représentation de cette composante dans un plan vertical (cf. Figure 5.35 Chapitre 5), avec une quasi-symétrie entre les mesures des soniques côté sud-est (S1 et S4) et ceux du nord-ouest (S3 et S6).
Si l'on considère maintenant cette composante pour les périodes correspondant à des vents du sud-est (périodes 1, 3, 5 et 7), on observe que l'air est dévié vers le bas contre la paroi nord-ouest du canyon (sonique représenté en bleu Figure 4.15) et remonte du côté sud-est (sonique représenté en rouge). De même on remarque le phénomène réciproque pour des vents de nord-ouest, lors des périodes 2, 4 et 6.

On en déduit donc que l'effet dynamique a un impact majeur sur les mouvements d'air dans le canyon, qui peut ensuite être limité ou amplifié par les phénomènes thermiques.

Nous pouvons également remarquer un effet de canalisation entre les bâtiments

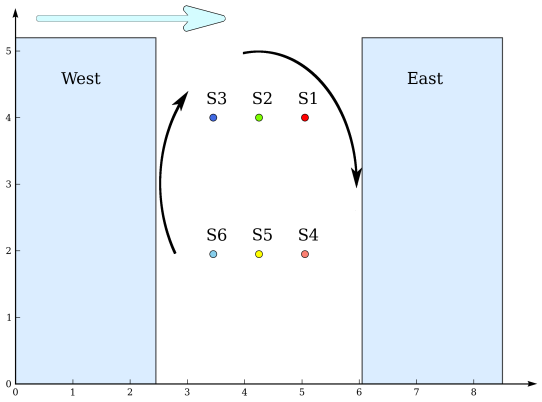


FIGURE 4.15 – Représentation de la convection engendrée dynamiquement dans le canyon par un vent provenant du côté Nord-Ouest du canyon.

lorsqu'on étudie les directions du vent mesurées par les soniques S1 à S6 du canyon (Figure 4.16). Si en soirée les valeurs des directions de vent s'éloigne de 43° ou de 223°, directions de l'axe du canyon, les valeurs mesurées en journée sont alignées avec le canyon.

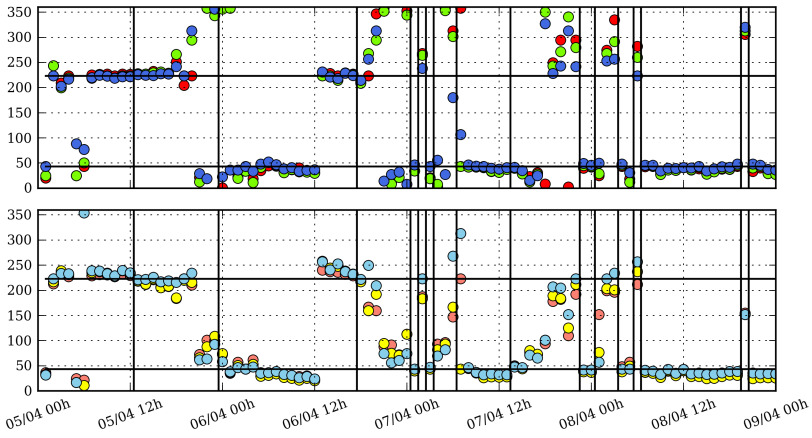


FIGURE 4.16 – Direction du vent mesurée par les soniques du canyon. En haut : mesures à 4 m d'altitude. En bas : mesures à 1, 95 m d'altitude.

Afin d'observer les mouvements d'air pour les instants moins affectés par les phénomènes dynamiques du vent global, nous représentons la vitesse verticale du vent en fonction de l'angle δ entre la direction du vent incident et l'axe du canyon pour les anémomètres S1 et S3 sur la Figure 4.18. $|\delta|$ est donc la plus faible valeur de l'angle entre l'axe du canyon et la direction du vent, comme illustré sur la Figure 4.17. Des valeurs négatives correspondent aux vents d'Ouest tandis que δ sera positif pour des vents d'Est.

Malgré une forte dispersion, on observe sur la Figure 4.18 une nette corrélation entre

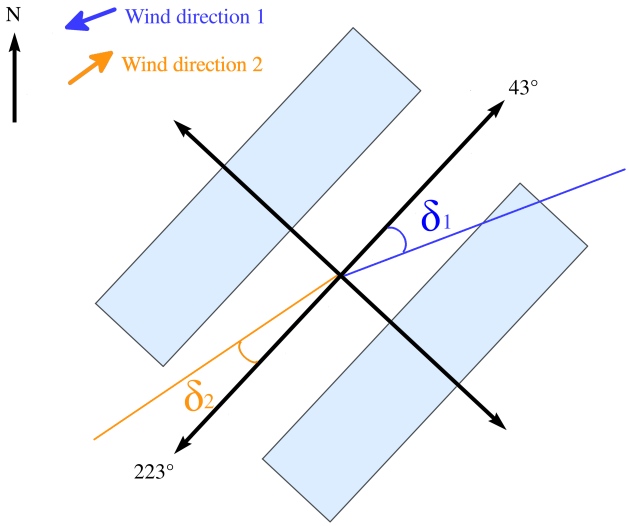


FIGURE 4.17 – Méthode de calcul de l'angle δ ; $\delta_1 = +25°$ et $\delta_2 = -12°$.

l'intensité de la vitesse verticale du vent et la direction du vent au mât : plus le vent est perpendiculaire au canyon, plus la rotation dans le canyon est importante.
La composante verticale du vent est ainsi plus proche de zéro pour de faibles valeurs de $|\delta|$, le vent aurait donc un écoulement principalement horizontal dans le canyon lorsque la direction du vent incident est presque parallèle au canyon.

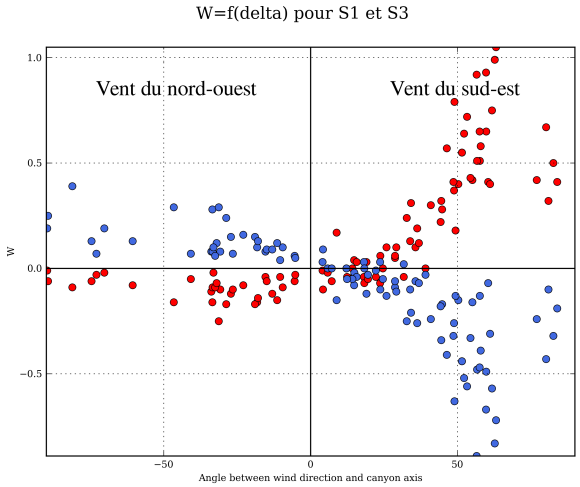
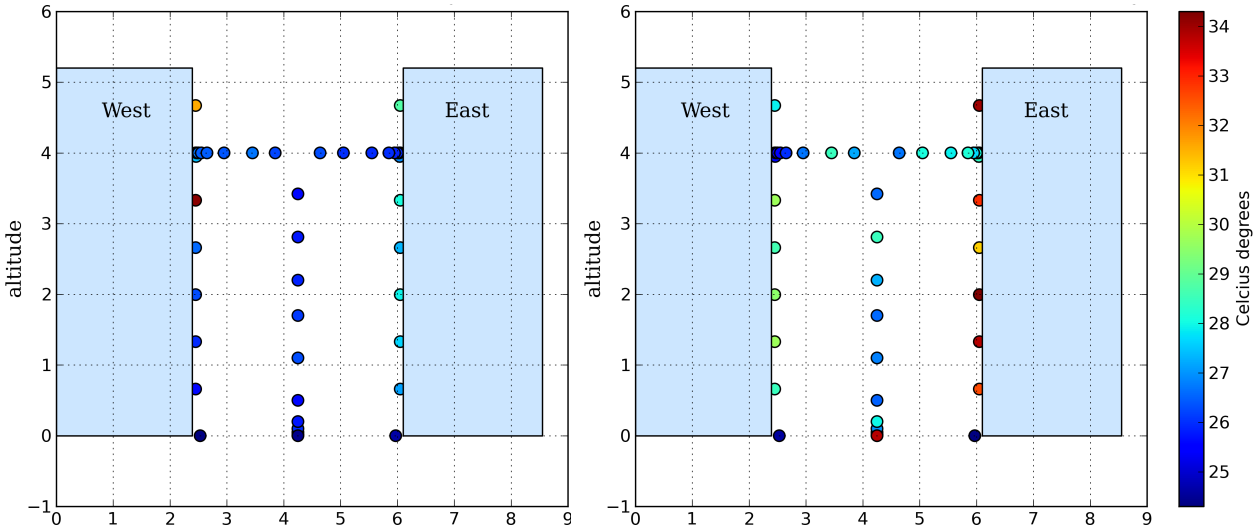


FIGURE 4.18 – Composante verticale de la vitesse du vent mesuré par les soniques S1 (en rouge) et S3 (en bleu) en fonction de δ, du 5 au 9 avril 2011.

4.2.2.2 Étude des effets thermiques des bâtiments sur l'écoulement d'air

L'analyse des températures dans le canyon met en évidence une disparité de ce paramètre aux différents points du canyon lorsque les parois ont été chauffées par le soleil. À 15h le 06/04/2011 les températures de l'air varient entre 24 °C et 29 °C, (d'après les données de la Figure 4.19b), en excluant les températures mesurées à

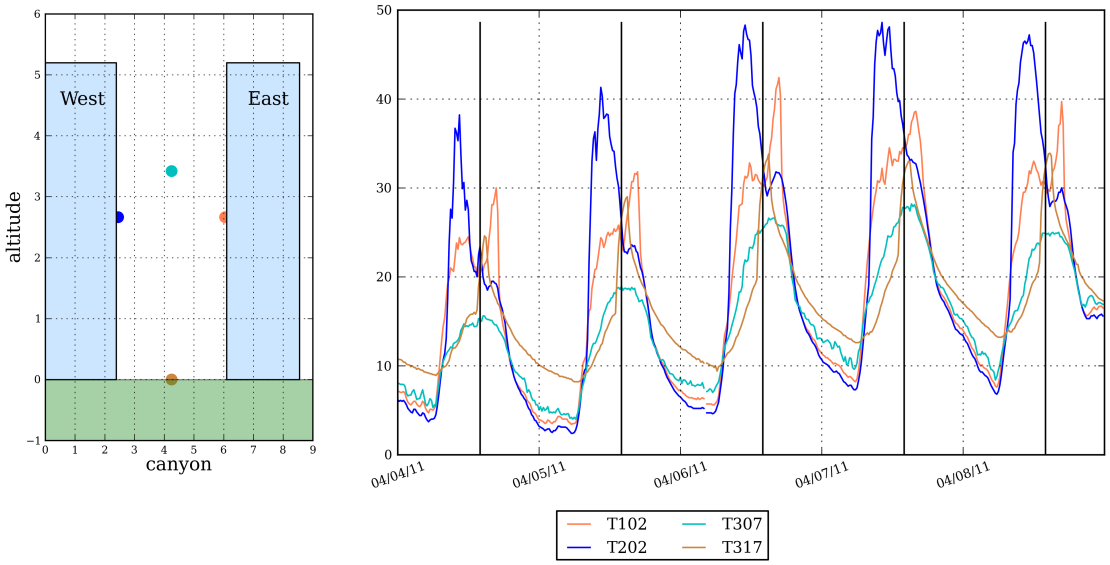
proximité des parois.



(a) Températures à 9h. (b) Températures à 15h.

FIGURE 4.19 – Carte verticale des températures mesurées dans le canyon le 06/04/2011.

Concernant les températures de surface des parois des conteneurs dans le canyon, la température moyennée pour chaque paroi, la température du sol et celle de l'air sont représentées sur la Figure 4.20b.



(a) Localisation des points de mesures. (b) Évolution des températures de parois, du sol et de l'air dans le canyon entre le 4 et le 9 avril 2011.

FIGURE 4.20 – Évolution des températures de parois, du sol et de l'air dans le canyon entre le 4 et le 9 avril 2011.

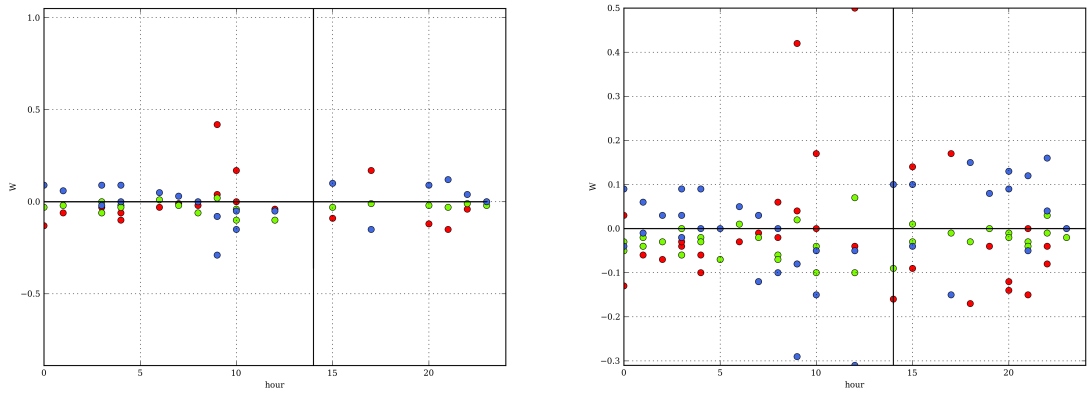
Nous observons dans un premier temps que la paroi exposée sud-est est bien chauffée le matin avec un pic de température vers 11h, et inversement pour celle exposée nord-

ouest dont la température maximale est atteinte autour de 16h. Nous remarquons également le phénomène décrit par Idczak et al. (2010) énoncé au paragraphe 1.2.3.2 : l'évolution diurne des températures dessine deux pics pour chaque paroi, l'un étant dû au rayonnement solaire direct qui vient la chauffer et l'autre aux réflexions de ce rayonnement par la paroi opposée. Ceci est observé très nettement le 8 avril où la paroi du conteneur Est monte à 33 °C à 11h pour redescendre sous les 30 °C à 14h avant d'atteindre plus de 39 °C à 16h. La température du sol augmente un peu avant que le soleil atteigne son zénith (à 14h heure locale) et décroît rapidement après.

Les bâtiments chauffant différentiellement selon leur orientation et la position du soleil dans le ciel, on s'attend à ce que l'air réchauffé au contact de la paroi exposée monte en raison de sa plus faible densité et inversement au contact d'une paroi froide. Dans le but d'étudier la relation entre les vitesses du vent dans le canyon et les effets thermiques, nous nous intéressons donc principalement à la composante verticale de la vitesse du vent.

Sélection des mesures en fonction de la direction du vent incident Nous utilisons à nouveau ici la notion de l'angle δ entre l'axe du canyon et la direction du vent de référence, comme présenté Figure 4.17. Nous isolons les mesures correspondant à des instants où la direction du vent était dans un intervalle d'amplitude 2δ centré sur la direction de l'axe du canyon, afin d'exclure les instants où le vortex du canyon est le plus sollicité par la dynamique. Dans un premier temps on filtre les données correspondant à l'intervalle $\delta \in [-15; 15]$ pour les représenter en fonction de l'heure de la journée (cf. Figure 4.21a) afin d'observer la cellule de recirculation dans le canyon lorsqu'elle n'est pas causée par la direction du vent grande échelle. Même pour ses valeurs extrémales (correspondant au 05/04/2011 à 9h), la composante w a de faibles valeurs quelle que soit l'heure de la journée pour $\delta \in [-15; 15]$. L'élargissement du filtre à $\delta \in [-25; 25]$ laisse apparaître deux instants où la composante verticale du vent a des valeurs supérieures à $0,4\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ pour S1 et à $0,3\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ pour S2. Ces valeurs correspondent aux données prises à 9h et à 12h le 5 avril où la vitesse du vent dépasse les $2,5\,\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ et où la direction du vent avoisine les 200-210° (cf. Figure 4.13). Cependant si les effets thermiques étaient la cause du vortex que ces mesures mettent en évidence, nous observerions des valeurs positives de la vitesse verticale au sonique S3 et négatives au sonique S1. En effet on s'attend à ce que S3, plus proche de la paroi exposée est chauffée par le soleil avant 14h, mesure des flux ascendants, or ici nous observons l'inverse. Nous supposons donc que c'est plutôt l'effet dynamique qui engendre les écoulements d'air dans le canyon.

Nous remarquons donc que les effets thermiques sont difficiles à observer indépendamment des effets dynamiques. Or nous avons sur cette figure les mesures effectuées



(a) Avec $|\delta| < 15\,°$.

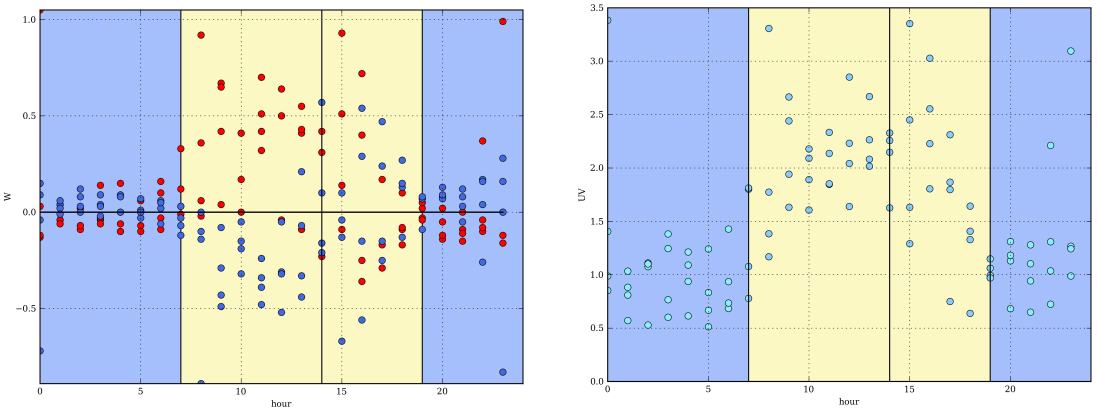
(b) Avec $|\delta| < 25\,°$.

FIGURE 4.21 – Composante verticale du vent mesuré par les anémomètres placés à $4\,m$ d'altitude dans le canyon filtrée selon δ en fonction de l'heure de la journée, du 5 au 9 avril 2011.

en condition de vent presque parallèle au canyon. Nous pouvons donc en déduire que d'autres facteurs, outre l'effet thermique, affectent également les mouvements d'air dans le canyon, et que filtrer les mesures où les effets dynamiques sont moindres ne suffit pas.

Étude des vitesses verticales du vent en fonction de l'heure de la journée

- Afin de mieux distinguer les données du matin de celles de l'après-midi à l'heure solaire, nous traçons sur nos représentations graphiques une ligne verticale représentant l'instant où le soleil atteint son zénith lors de la période d'étude, c'est-à-dire à 14h heure locale. Nous représentons de la même façon les heures de lever et de coucher du soleil, respectivement à 7h et 19h.



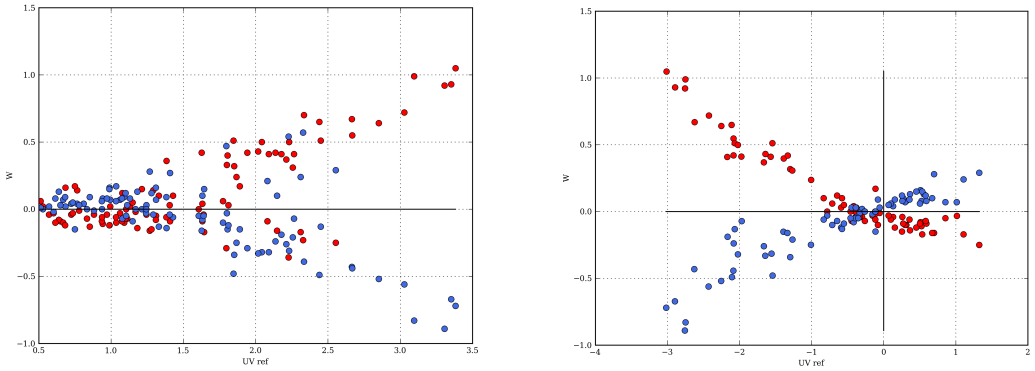
(a) Vitesse verticale du vent mesurée par S1 (en rouge) et S3 (en bleu).

(b) Module de la vitesse du vent mesurée au mât.

FIGURE 4.22 – Différences entre le jour et la nuit de la vitesse verticale dans le canyon et du module de la vitesse du vent du référence en fonction de l'heure de la journée sur 24 heures, du 05/04/2011 au 09/04/2011.

La représentation de la composante verticale du vent en fonction de l'heure de la journée nous permet d'observer des différences notables entre le jour et la nuit (cf. Figure 4.22a). En effet, les valeurs de w sont plus faibles pendant la nuit, surtout entre 0h et 7h, qu'en journée. Cependant nous observons également que le module du vent de référence, et donc la composante perpendiculaire au canyon, est lui aussi plus important durant la période diurne (Figure 4.22b).

Relation entre module du vent incident et vitesses verticales dans le canyon - Introduction de la vitesse verticale relative - Nous étudions à présent la relation entre la vitesse du vent incident mesuré au mât et les vitesses verticales mesurées dans le canyon Figure 4.23a. Pour cela nous nous intéressons tout d'abord à l'évolution de la vitesse verticale aux soniques du canyon en fonction d'une part du module de la vitesse du vent, et d'autre part en fonction de la composante perpendiculaire au canyon de ce vent. Nous obtenons ainsi respectivement la Figure 4.23a et la Figure 4.23b.



(a) Vitesse verticale en fonction du module de la vitesse du vent de référence.

(b) Vitesse verticale en fonction de la composante perpendiculaire du vent de référence.

FIGURE 4.23 – Vitesse verticale du vent mesurée aux soniques S1 et S3 entre le 05/04/2011 et le 09/04/2011 en fonction du vent de référence.

Nous observons effectivement une forte corrélation de la composante w du vent dans le canyon avec le module du vent incident, et plus particulièrement avec la composante perpendiculaire au canyon de ce vent. La composante verticale de la vitesse seule n'est donc pas un paramètre adapté pour étudier les phénomènes thermiques qui ont lieu dans le canyon. Nous utilisons donc par la suite une valeur relative des vitesses verticales de vent que l'on notera $w+$ telle que :

$$w+ = \frac{w}{||U_{\perp ref}||}$$

En raison d'une valeur très importante de w+ le 5 avril, qu'il serait intéressant

d'étudier plus en détail par la suite mais qui nuit à la lecture des représentations graphiques, nous ne représentons ci-dessous que la période allant du 6 au 9 avril 2011.

Afin d'étudier plus précisément les périodes où les mouvements d'air dans le canyon sont le moins affectés par la dynamique, nous distinguons les mesures où la composante perpendiculaire au canyon du vent de référence est inférieure à $1\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. Cependant l'analyse des vents relatifs dans le canyon met en évidence que les mesures respectant cette condition sont principalement des mesures nocturnes (Figure 4.24), alors qu'on s'intéresse à la période diurne où l'on observe les pics de température des parois.

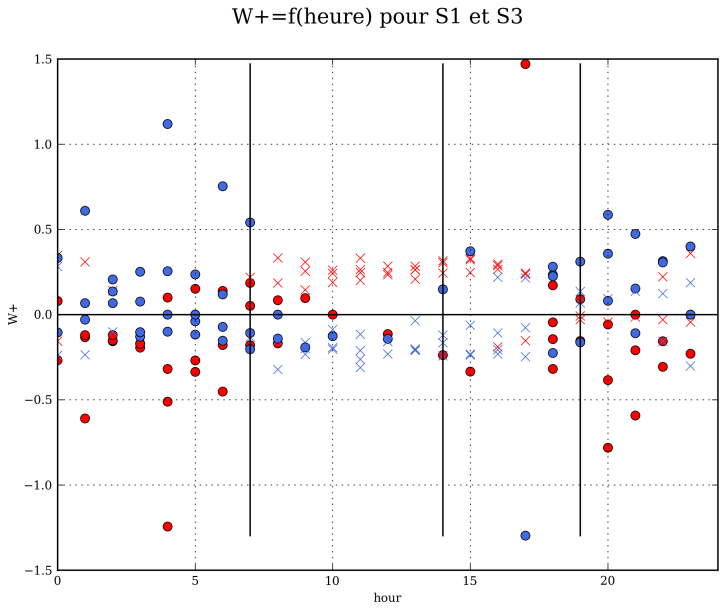


FIGURE 4.24 – Vitesse relative du vent en fonction de l'heure pour les soniques S1 (en rouge) et S3 (en bleu) du 6 au 9 avril 2011.
Croix : w quand la composante perpendiculaire au canyon du vent de référence est supérieure à $1\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$;
Cercle : w quand la composante perpendiculaire au canyon du vent de référence est inférieure à $1\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$

L'étude de la vitesse verticale relative nous permet de nous affranchir au mieux des effets dynamiques du vent sur l'écoulement dans le canyon. Ainsi nous pouvons nous attendre à noter des valeurs positives de w+ sur le flan du canyon chauffé par le soleil, soit aux soniques S1 (en rouge) l'après-midi et S3 (en bleu) le matin. Cependant nous distinguons plutôt une différence entre les périodes diurnes et nocturnes avec une période d'inversion entre 7h et 9h le matin quand w+ devient positif en S1, puis entre 14h et 19h l'après-midi. En raison de la diversité de ces instants, nous étudions cette évolution jour après jour Figure 4.25.

Nous pouvons remarquer une autre mesure présentant une valeur importante de

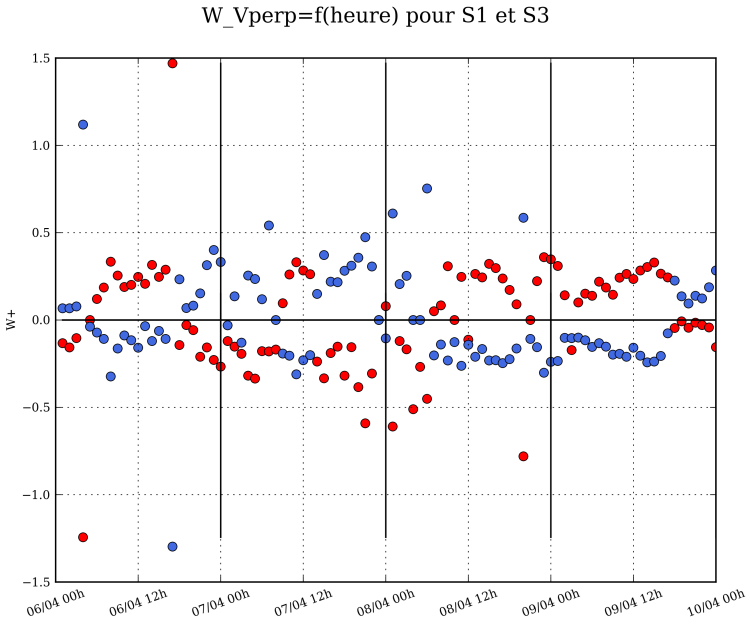


FIGURE 4.25 – Évolution temporelle de la vitesse relative du vent pour les soniques S1 (en rouge) et S3 (en bleu) du 6 au 9 avril 2011.

w+, et qui plus est conforme à ce que l'on attendrait dans le cadre d'un vortex engendré par les températures de parois. Le 06/04 à 17h, le sonique S1 plus proche de la paroi exposée Nord-Ouest mesure une valeur de w+ de près de 1,5 tandis qu'en S3 cette valeur est d'environ 1,3. Nous nous intéresserons plus particulièrement à cet instant par la suite.

Nous avons également filtré les valeurs de w+ en fonction de l'angle δ, mais cette opération ne donne pas plus d'information sur la tendance de w+.

Lien entre l'écart des températures de parois à leur valeur moyenne et la vitesse verticale du vent - N'observant aucun lien entre les températures de paroi et les vents verticaux mesurés au niveau des soniques, nous nous intéressons aux écarts de températures dans le canyon. Pour chaque paroi, nous calculons la différence entre sa température et la température moyenne des parois du canyon à partir des mesures du 5 au 8 avril inclus.

Comme attendu, on observe Figure 4.26 que la paroi exposée sud-est du canyon présente des valeurs de températures supérieures le matin (graphiques de gauche), tandis que la paroi qui lui fait face atteindra des températures très supérieures à la moyenne après 14h. On note également que la température de l'air est inférieure à la moyenne des températures de parois juste après le lever du soleil jusqu'à 21h-22h : les conteneurs sont alors chauffés par l'énergie solaire qu'ils reçoivent ou bien restitue encore en soirée ce qu'ils ont reçu dans la journée et la température de leurs

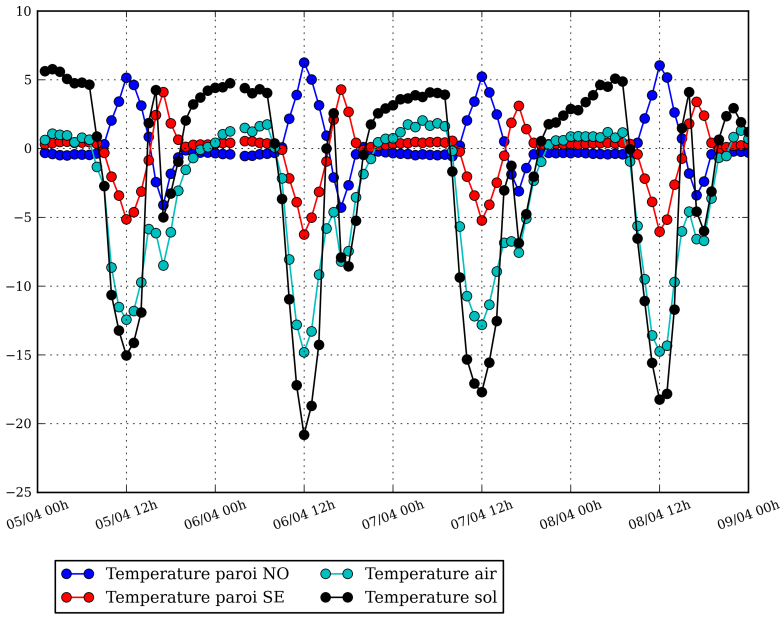


FIGURE 4.26 – Écart des températures de parois à la moyenne de toutes les températures de paroi.

parois est plus élevée que la température de l'air.
À présent on représente ces écarts de température en fonction de l'emplacement dans le canyon Figure 4.27, en faisant varier la distance aux parois et l'altitude.

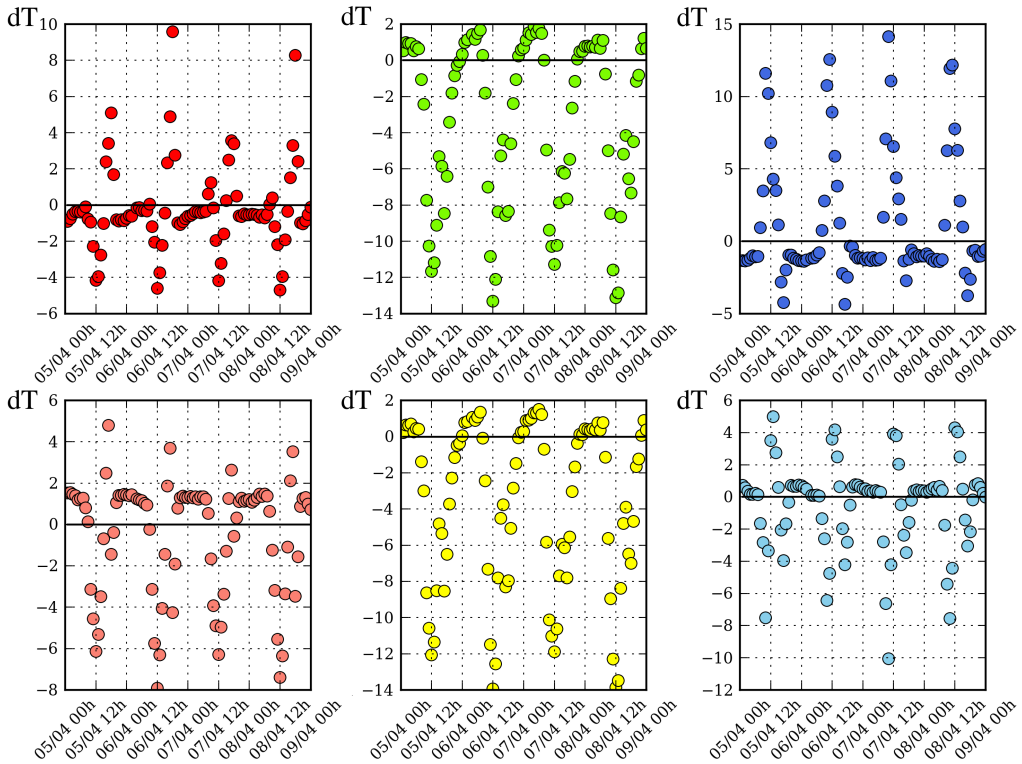


FIGURE 4.27 – Écart de températures au niveau des parois et dans le canyon par rapport à la moyenne des températures de parois - Code des couleurs tel que décrit Figure 4.9.

Cette méthode de représentation nous permet de remarquer des disparités entre les points situés sur la moitié supérieure des façades et les autres. Tout d'abord, les points situés sur les conteneurs du haut auront des températures plus importantes que ceux des conteneurs du bas pendant la période diurne. En effet ce sont eux qui reçoivent le plus longtemps le rayonnement solaire direct. Ainsi on observe que les points supérieurs de la paroi exposée sud-est présentent des écarts à la moyenne pouvant atteindre 14°C tandis que les autres points de cette façade auront un écart inférieur à 5°C.

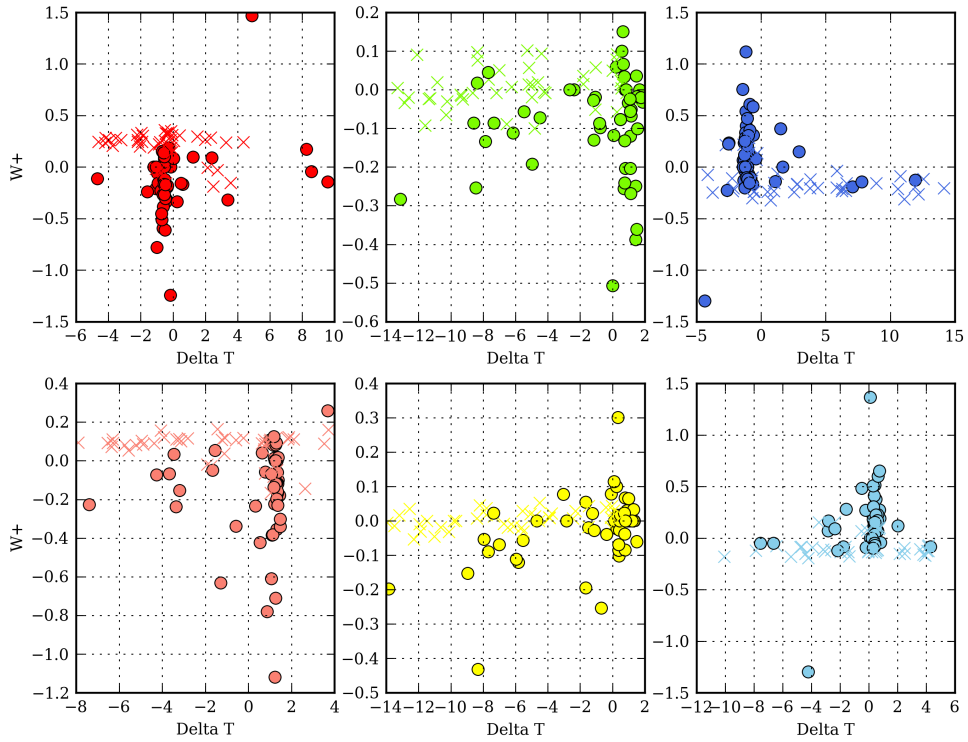


FIGURE 4.28 – Vitesse verticale relative du vent en fonction des écarts de température pour les différents soniques du canyon.

Cependant on observe l'effet inverse de nuit, quand les points des conteneurs au sol ont des températures supérieures à la moyenne tandis que les points situés plus en hauteur la minorent. De plus on remarque que la température du sol est, entre les températures des parois et de l'air, la plus élevée en période nocturne (Figure 4.26). On peut donc supposer que les parois des conteneurs situés en bas refroidissent moins que celles des autres conteneurs en raison d'une part des échanges de chaleur qui ont lieu entre le sol et les conteneurs sus-jacents, et d'autre part car ils ont plus d'échanges radiatifs avec le sol et moins avec le ciel que les conteneurs placés au-dessus. En outre, les conteneurs du haut perdent de la chaleur par conduction au niveau de leurs toits tandis qu'ils contribuent à limiter les pertes des conteneurs du bas. L'air intérieur dans un conteneur inférieur se refroidirait moins pendant la

nuit et contribuerait ainsi à réchauffer les parois.

La vitesse verticale relative du vent à un point donné ne semble pas être dépendante de l'écart entre la température de la paroi proche de ce point et la température moyenne des parois du canyon. Cette observation peut être due au fait que l'influence des températures de parois n'affecte pas un point éloigné comme l'emplacement des soniques

4.3 Conclusion du chapitre

La campagne de mesures EM2PAU modélise un canyon urbain par deux rangées de conteneurs. Son principal intérêt réside dans les mesures simultanées des vitesses du vent et des températures de l'air et des parois dans le canyon, ce qui nous permet d'étudier les relations entre les écoulements atmosphériques dans le canyon et les températures des parois des bâtiments.
L'analyse des données de EM2PAU montre que les effets thermiques ne sont pas aisément observables à partir des données mesurées. Nous avons pu isoler des instants qu'il nous semble intéressant d'étudier, soit en raison de conditions thermiques particulières car l'une des températures de paroi est à son maximum, soit car les effets dynamiques du vent sur les recirculations dans le canyon sont minimaux. Ces différentes conditions permettent de supposer que les effets thermiques ont un impact plus important sur les circulations d'air dans le canyon aux instants relevés. Nous étudierons donc au chapitre suivant des nombres caractéristiques de l'écoulement pour les instants choisis afin de vérifier l'importance relative de la vitesse du vent incident et de la flottabilité.
Les données de la campagne de mesures EM2PAU nous permettent ensuite de valider nos simulations. Nous procédons alors à la modélisation de ce domaine et à la simulation numérique des écoulements atmosphériques sous différentes conditions thermiques au niveau des parois afin de mettre en évidence l'influence des températures de parois sur les flux d'air.

Chapitre 5

Résultats des simulations et analyses

Sommaire

5.1 Les choix de modélisation 115

5.1.1 Création des maillages 115

5.1.2 Estimation des paramètres numériques 118

5.1.3 Paramètres de modélisation de *Code_Saturne* 120

5.1.4 Élaboration des profils météo 121

5.1.5 Sélection de situations propices aux effets thermiques . . 121

5.2 Étude des effets énergétiques des bâtiments sur les écoulements 124

5.2.1 Influence de la température des parois de bâtiment sur la température de l'air 125

5.2.2 Températures des parois et recirculation de l'air dans le canyon 128

5.2.3 Conclusion 136

5.3 Validation du couplage entre *Code_Saturne* et BuildSysPro : comparaison avec les simulations réalisées avec les températures de parois mesurées 137

5.3.1 Des températures de parois surestimées par le modèle couplé 137

5.3.2 Analogies entre les simulations avec températures mesurées et couplage 139

5.3.3 Des phénomènes de recirculation de l'air similaires entre les simulations avec températures de surface forcées et couplage 142

5.4 Bilan des simulations et comparaison détaillée avec les mesures 143

5.5 Études de sensibilité complémentaires 146
5.5.1 Opposition des effets dynamiques et thermiques dans un cas idéalisé, avec un vent perpendiculaire au canyon . . . 146
5.5.2 Cas théorique avec un vent incident oblique 149
5.6 Conclusion du chapitre 151

5.1 Les choix de modélisation

5.1.1 Création des maillages

Le maillage du domaine, a été créé avec Salome, logiciel développé par le CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique), EDF R&D et Open Cascade. Contenant un outil de conception assistée par ordinateur et mailleur, Salome permet à l'utilisateur de travailler avec une interface graphique ou avec des scripts Python selon ses besoins. L'élaboration d'un maillage se divise en trois étapes. Dans un premier temps on modélise la géométrie du domaine. Ensuite on choisit nos critères de maillage tels que la forme des cellules et leurs dimensions. Enfin on définit des « couleurs » qui serviront par la suite à identifier les parois et bords du domaine pour les conditions limites sous *Code_Saturne*.

Lors de la création d'un maillage il faut respecter au mieux plusieurs recommandations en ce qui concerne les dimensions du domaine et des mailles.
Tout d'abord, les dimensions du domaines dépendent des dimensions de la zone étudiée (Franke et al., 2007). En notant H la hauteur maximale de nos bâtiments, la hauteur du domaine doit être d'au moins 5 H afin d'éviter un accélération artificielle de l'écoulement au-dessus des bâtiments. En ce qui concerne les dimensions au sol du domaine, on distingue l'axe perpendiculaire à la direction du vent incident et l'axe longitudinal. Pour le premier, les distances latérales minimales requises sont également de 5 H. Dans l'autre direction, il est recommandé de garder une distance de 5 H en amont et de 15 H en aval afin de laisser la circulation de l'air se redévelopper après avoir dépassé les bâtiments.

Dans notre cas, la direction du vent n'est pas définie en raison de la longue période d'étude, nous centrons donc le domaine sur la zone étudiée. Nous fixons les dimensions du domaine à 144 m de long et 128 m de large, ce qui correspond à des espaces de 12 fois la hauteur des conteneurs entre la maquette et les bords du domaine.

Il faudrait également que tout bâtiment de hauteur maximale H_m qui soit situé à moins de $6H_m$ de la zone étudiée devrait être représenté (Franke et al., 2007). Or nous n'avons pas d'information concernant les bâtiments dispersés autour du site. Athamena (2012) ne les représente pas physiquement dans son maillage non plus mais il définit plusieurs rugosités au sol qui prennent ces obstacles éventuels en compte (Figure 5.1). Nous appliquons donc également au sol ces valeurs de rugosité. Nous pouvons souligner que les arbres et bâtiments situés à moins de 200,m de la



FIGURE 5.1 – Rugosité du sol autour des conteneurs de EM2PAU (Athamena, 2012).

maquette ne sont ainsi pas explicitement modélisés, puisqu'on ne les intègre qu'avec les valeurs de rugosité du sol. Il est donc possible que les résultats soient influencés par ces obstacles aux écoulements.

Nous optons pour un maillage orienté dans le même sens que les bâtiments modélisés et non aligné avec le nord. Nous choisissons de le diviser en cellules hexaédriques, plus stables que des cellules tétraédriques en ce qui concerne les calculs de diffusion des écoulements entre les différentes mailles.

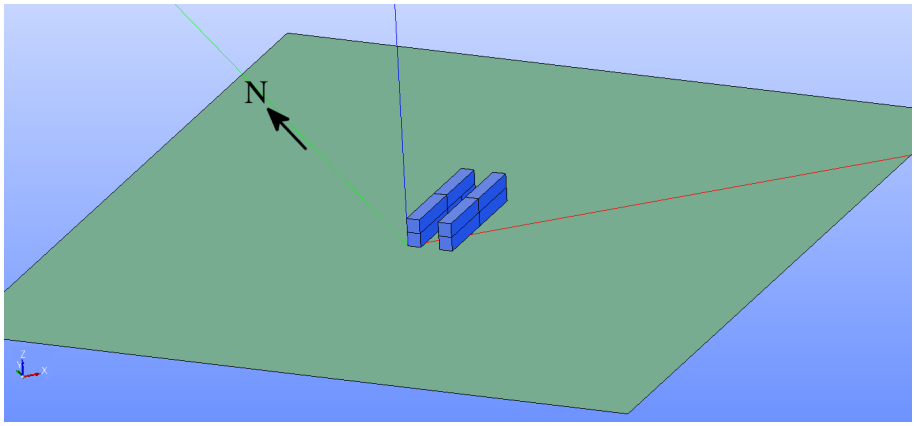


FIGURE 5.2 – Géométrie du domaine modélisé autour des conteneurs de EM2PAU avant maillage.

Nous créons deux maillages différents en tâchant de respecter un rapport entre les tailles des côtés de deux mailles adjacentes inférieur à 20%. Cependant chacun des maillages testés présente des défauts :

— Le maillage structuré rectangulaire, avec plus de 1,5 million de cellules, a l'inconvénient d'avoir des mailles plus resserrées à des endroits éloignés de

la zone d'intérêt (maillage en croix). En outre ces mailles, qui s'allongent en s'éloignant du centre, on un rapport entre les arêtes les plus longues et les plus courtes très important (supérieur à 5 aux bords du domaine) alors que la valeur recommandée est 1.

— La forme de parallélogrammes étirés du maillage à diagonales peut poser problème pour la résolution en raison de la non-orthogonalité des faces. Si ce maillage, de plus de un million de cellules, réduit le rapport de taille entre les arêtes des mailles les plus excentrées, celui-ci reste bien supérieur à 1.

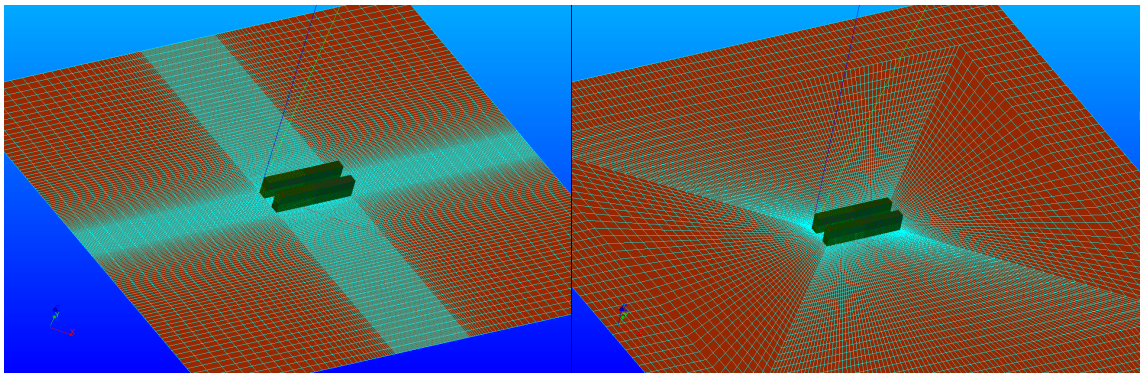


FIGURE 5.3 – Maillage du sol respectivement pour les maillages rectangulaire et construit sur les diagonales.

Nous réalisons également un maillage aux cellules tétrahédriques plus simple et constitué d'à peine huit cent mille cellules et nous comparons les résultats des trois maillages, notamment en observant la direction qu'ils donnent au vent dans le plan vertical où se trouvent les soniques de EM2PAU Figure 5.5.

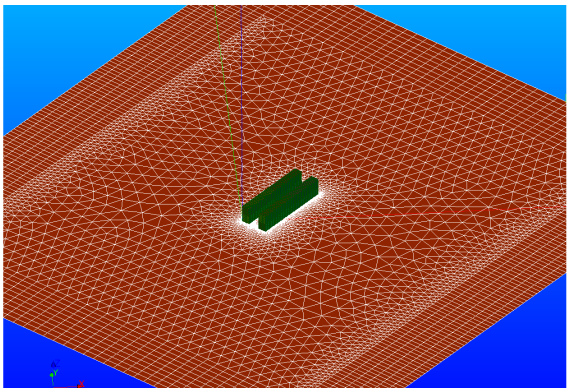


FIGURE 5.4 – Maillage du sol pour le maillage tétrahédrique.

Ce dernier maillage donne des résultats différents des deux précédents. Cependant les maillages rectangulaire et en parallélogrammes sont très proches et les résultats

obtenus convergent de façon similaire. Ce dernier étant moins lourd que le précédent avec un million de cellules au lieu de 1,5 million, nous le privilégions pour nos calculs.

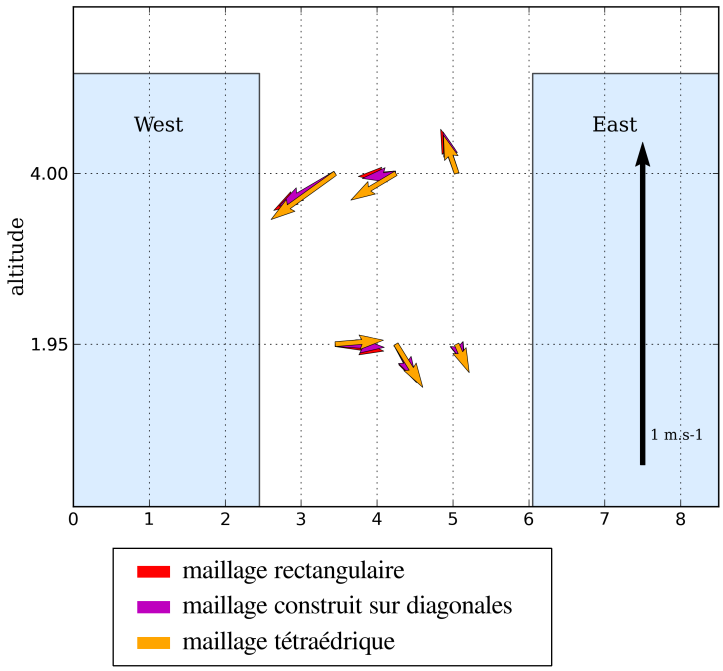


FIGURE 5.5 – Résultats obtenus pour la simulation du 16h le 06/04/2011 pour les différents maillages.

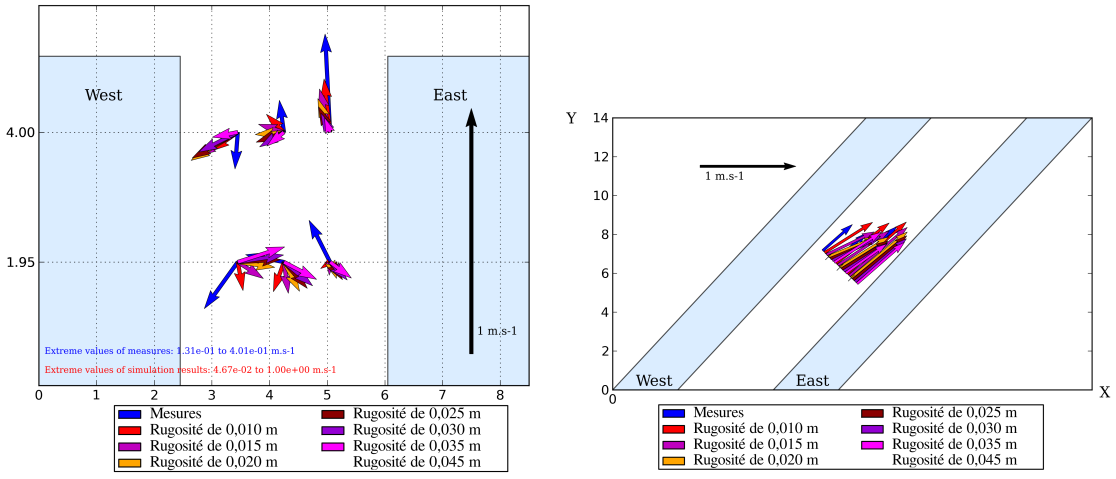
5.1.2 Estimation des paramètres numériques

Comme expliqué précédemment, nous découpons le sol en quatre zones de rugosités différentes en suivant la méthode de Athamena (2012). Nous n'avons pas la donnée précise en ce qui concerne la rugosité des conteneurs. À partir de la table (Athamena (2012) d'après Wieringa (1993)) nous l'estimons entre 0,01 et $0,05\,\mathrm{m}$:

Type de surface	Longueur de rugosité (m)
Mer, champ de neige, désert sablonneux	0,0005
Mer par vent très fort	0,005
Herbe rase	0,01
Champs ouverts et cultivés	0,05
Culture haute, rase campagne	0,10
Bocage et habitat dispersé	0,30
Bocage dense, zone périurbaine	0,50
Centre des villes moyennes, forêt	1,00
Centre des mégalopoles, forêt tropicale	4,00

TABLE 5.1 – Valeurs expérimentales de longueurs de rugosité obtenues sur des sites homogènes de grande extension horizontale (Wieringa, 1993).

Nous testons donc l'influence de la rugosité des bâtiments sur l'écoulement de l'air dans le canyon (Figure 5.6). Les résultats les plus proches des mesures aussi bien pour la force du vent que pour sa direction sont obtenus avec une longueur de rugosité des bâtiments de $0,01\,\mathrm{m}$: nous choisissons donc cette valeur de rugosité pour nos simulations.



(a) Projection de la vitesse du vent dans le plan vertical des soniques.

(b) Vitesses dans le plan horizontal à 4m de hauteur.

FIGURE 5.6 – Comparaison des résultats obtenus avec différentes valeurs de rugosités - simulation du 06/04/2011 à 11h.

5.1.3 Paramètres de modélisation de *Code_Saturne*

Pour nos simulations, nous utilisons l'approche RANS (Reynolds-averaged Navier-Stockes, présentée au paragraphe 3.1.3) avec le modèle $k-\varepsilon$ qui permet de modéliser les phénomènes qui se produisent au niveau des parois tout en garantissant des temps de calcul acceptables. Nous avons un maillage aux cellules de dimensions irrégulières, or le pas de temps temporel doit être cohérent avec le pas de temps spatial. Afin de s'assurer de la convergence d'un calcul, on définit le nombre de Courant :

$$C = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \tag{5.1}$$

avec u le module de la vitesse du vent, Δt le pas de temps et Δx la longueur d'une maille.

Il convient de maintenir ce nombre de Courant à une valeur proche de 1 grâce à un pas de temps cohérent avec l'échelle spatiale et la vitesse du vent. *Code_Saturne* présente une option permettant de réaliser des calculs avec des pas de temps variables dans le temps et dans l'espace, et adapte ainsi le pas de temps à la taille des cellules. Nous utilisons donc un pas de temps variable dans le temps et dans l'espace pour nos modélisations, c'est-à-dire que le modèle adapte le pas de temps à la taille de la cellule et aux données de l'instant calculé, et nous nous assurons de la convergence des simulations.

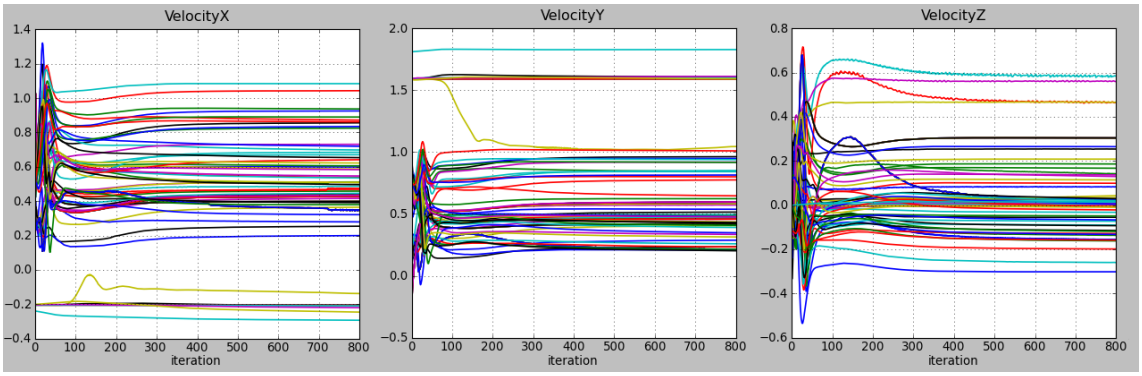


FIGURE 5.7 – Convergence des composantes du vent sur 800 itérations pour la simulation du 16h le 06/04/2011.

Dans le cadre d'une simulation avec des conditions d'entrée stationnaire, telles que l'un de nos fichiers météo avec un unique profil, nos résultats convergent rapidement (Figure 5.7).

D'autre part, nous fixons les conditions limites manuellement dans la routine Fortran *cs_user_boundary_conditions* ce qui nous permet de spécifier une température et une rugosité propre à chaque surface, et même plusieurs rugosités au niveau du sol

comme présenté Figure 5.1. Lors de simulations réalisées sans couplage, les températures de paroi sont imposées à partir des données météorologiques de température de l'air ou bien des températures de paroi mesurées lors de la campagne de mesures.

5.1.4 Élaboration des profils météo

Afin de modéliser les écoulements d'air et les températures dans le domaine de EM2PAU, les données de la campagne de mesures sont utilisées comme conditions d'entrées et conditions initiales. Cependant ces données sont ponctuelles, notamment les données concernant le vent de référence qui ont été mesurées par le sonique placé sur le mât à 10 m d'altitude. Il nous faut donc créer des profils d'entrées pour les différents paramètres du vent comme sa vitesse et son énergie cinétique turbulente ainsi que pour la température de l'air à partir des données disponibles. Les équations utilisées sont celles introduites section 1.1 et détaillées Annexe A. Les profils ainsi obtenus sont appliqués en entrée du domaine, les faces d'entrée peuvent changer en fonction de la direction du vent.
Le profil météo donne donc pour plusieurs altitudes (de 0 à 85 m dans notre cas, avec des points de plus en plus rapprochés au niveau du sol) les valeurs des différentes composantes de la vitesse du vent, la turbulence, la température réelle et l'humidité relative de l'air. Ce fichier est directement lu dans *Code_Saturne* qui utilise ses valeurs lors de simulations.
Il est également possible d'élaborer un fichier contenant une séquence de profils météo afin de réaliser des études sur plusieurs heures, avec par exemple un profil par heure.

5.1.5 Sélection de situations propices aux effets thermiques

Nous avons relevé quatre instants à étudier à partir des mesures de la campagne EM2PAU choisis pour avoir a priori des effets thermiques qui puissent supplanter les effets dynamiques. À 10h le 5 avril et à 17h le 6 avril, les valeurs de vent vertical relatif (w+) sont importantes. Si les écoulements d'air dans le canyon ne semblent que peu découler du vent incident, ils sont peut-être engendrés par les effets thermiques. Le 6 avril à 11h et à 16h sont des moments correspondant à des pics de températures sur l'une ou l'autre des parois, et donc des instants où les effets thermiques seraient les plus prononcés et pourraient avoir une influence notable sur les écoulements. Afin d'étudier les effets thermiques des parois à ces instants, nous réalisons pour chacun d'eux trois simulations avec des températures de paroi de bâtiment différentes et nous comparons leurs résultats. Pour la première simulation, les températures des parois ont été fixées à la température de l'air mesurée

pendant la campagne de mesures EM2PAU afin de modéliser un cas où presque aucun échange thermique n'a lieu (calculs dont le nom est de la forme TAIR-XXXX). Pour la deuxième simulation en revanche, nous imposons aux parois les températures qui y ont été mesurées pendant EM2PAU (calculs TMES-XXXX). Enfin, la troisième simulation correspond au couplage entre *Code_Saturne* et BuildSysPro, les températures de surface sont donc calculées par le modèle de bâtiment (calculs TBSP-XXXX).

Date de la simulation	Température de l'air extérieur	Températures mesurées aux parois	Températures calculées par BuildSysPro
05/04/2011 à 10h	TAIR-0510	TMES-0510	TBSP-0510
06/04/2011 à 11h	TAIR-0611	TMES-0611	TBSP-0611
06/04/2011 à 16h	TAIR-0616	TMES-0616	TBSP-0616
06/04/2011 à 17h	TAIR-0617	TMES-0617	TBSP-0617

TABLE 5.2 – Noms des simulations réalisées à quatre instants différents avec trois méthodes de détermination des températures de paroi des conteneurs.

Pour chaque simulation, nous fixons les conditions d'entrée par le profil météo qui a été préalablement élaboré à partir des mesures de EM2PAU.
Les simulations où les températures aux parois sont imposées soit à la température de l'air, soit aux températures mesurées lors de la campagne de mesures, n'utilisent pas les rayonnements solaires et infrarouges. Dans le premier cas, où l'objectif est de n'avoir aucun échange thermique entre les bâtiments et l'air, le chauffage d'une paroi par rayonnement n'est pas souhaitable. En ce qui concerne le deuxième cas, cette augmentation des températures de surface liée aux rayonnements est prise en compte par l'usage des températures mesurées alors que les parois étaient soumises à ces rayonnements.
En revanche le modèle de bâtiment requiert les valeurs des rayonnements en conditions d'entrée. Dans le cadre de notre travail, nous imposons les flux solaires et infrarouges mesurés à l'instant étudié lors de EM2PAU.

Il convient de préciser que les simulations sans échange thermique présentent de très légères variations de température dans l'espace (au maximum de l'ordre d'un demi degré). En effet, bien que la température des surfaces soit fixée à la température de l'air mesurée lors de la campagne, le profil météo imposé en entrée considère une température de l'air variable selon l'altitude. Si nous prenons l'exemple du profil météo du 6 avril à 11h, la température varie de 21,8°C à 20,9°C entre 0 et 5m de hauteur.

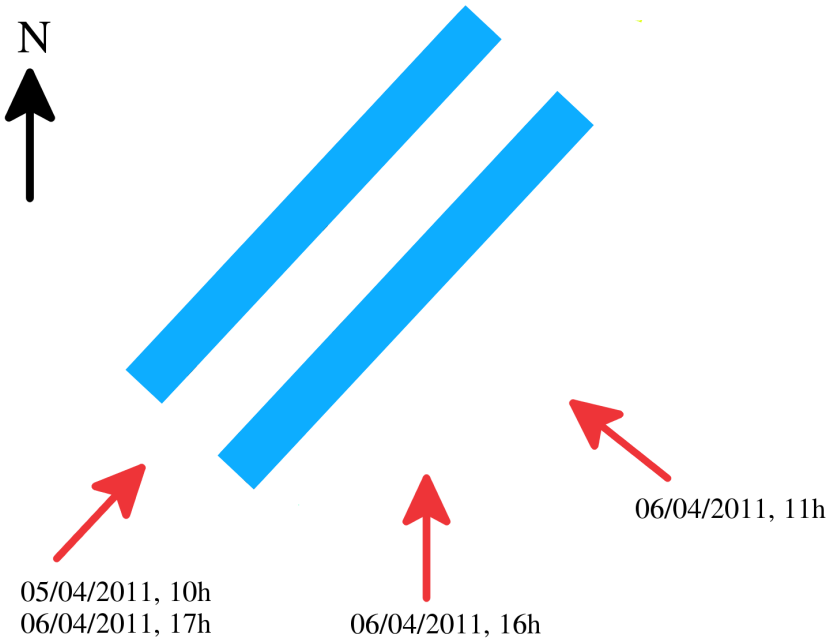


FIGURE 5.8 – Direction du vent aux instants étudiés.

Nous avons trois orientations de vent variées pour les instants étudiés, avec des vents incidents parallèles et perpendiculaires au canyon (cf. Figure 5.8) :

- le 05/04/2011 à 10h : vent du sud-ouest ;
- le 06/04/2011 à 11h : vent du sud-est ;
- le 06/04/2011 à 16h : vent du sud ;
- le 06/04/2011 à 17h : vent du sud-ouest.

Les nombres de Reynolds pour les différents instants étudiés est de l'ordre de 10^5 à 10^6, valeurs habituelles des écoulements atmosphériques.
Nous calculons pour chaque instant le nombre de Richardson et le nombre de Froude. Ces nombres donnent le rapport entre l'énergie gravitationnelle et l'énergie cinétique de l'air, ils permettent ainsi de déterminer les régimes d'écoulement et l'influence relative des effets thermiques par rapport aux effets dynamiques. Avec :

- v le module de la vitesse du vent ($\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$)
- L la longueur caractéristique de l'écoulement (on prend ici la hauteur du canyon de 5,20 m)
- β le coefficient d'expansion thermique (K)

nous avons les équations :

$$Ri = g\beta \frac{(T_{surface} - T_{air})L}{v^2} \tag{5.2}$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g\frac{T_{surface}-T_{air}}{T_{air}}L}} \tag{5.3}$$

Date de la simulation	Nombre de Richardson	Nombre de Froude
05/04/2011 à 10h	0,66	1,23
06/04/2011 à 11h	0,68	1,22
06/04/2011 à 16h	0,76	1,17
06/04/2011 à 17h	2,8	0,60

TABLE 5.3 – Nombre de Richardson et nombre de Froude pour les quatre instants étudiés.

Les nombres de Richardson et de Froude permettent d'étudier le rapport entre les forces de flottabilité et la convection forcée. Ils maintiennent que les quatre cas choisis ont des effets thermiques comparables aux effets dynamiques.

Nous allons premièrement étudier dans la suite les effets de l'énergétique des bâtiments sur les écoulements en comparant les simulations réalisées sans échanges thermiques (avec des températures de parois égales à la température de l'air) et les résultats du couplage avec le modèle de bâtiment.
Puis nous comparons les résultats du couplage avec ceux de la simulation où les températures de parois mesurées sont appliquées, afin de valider le couplage.
Nous complétons enfin par des études de sensibilité où l'on s'intéresse à l'influence des effets thermiques des parois en fonction du module du vent incident.

5.2 Étude des effets énergétiques des bâtiments sur les écoulements

Allegrini et al. (2013) ont réalisé des expériences en soufflerie afin d'étudier les effets de la flottabilité, dus au chauffage des parois d'un canyon, sur les écoulements d'air dans cette cavité. Ils distinguent trois conséquences de la flottabilité sur l'écoulement dans le canyon :

— une augmentation de la vitesse des écoulements lorsque le sol ou la paroi intérieure amont sont chauffés, sauf si la paroi face au vent est chauffée (ce

qui ralentit l'air et engendre la mise en place de deux vortex circulant en sens inverse dans le canyon) ;
— le déplacement du centre du vortex principal, en particulier lorsque le sol est chauffé ou lorsque toutes les surfaces sont chauffées ;
— le réarrangement complet de la structure des vortex lorsque le mur aval est chauffé dans le canyon.

Nous n'avons pas été en mesure de mettre en évidence de manière non-ambigue les effets thermiques du bâtiment sur l'atmosphère mentionnés par Allegrini et al. (2013) avec les données de EM2PAU. L'objectif de cette partie est donc d'étudier comment les températures des parois des bâtiments peuvent influer sur les écoulements d'air autour de ces obstacles par l'intermédiaire d'outils numériques, tout en gardant in fine une comparaison avec les mesures.

Afin d'étudier les effets des échanges thermiques entre les bâtiments et l'atmosphère sur les écoulements de l'air lors de simulations CFD , nous comparons les résultats des simulations réalisées en imposant la température de l'air aux parois des conteneurs de EM2PAU (TAIR) et les résultats du couplage (TBSP).

Sont étudiés les effets des échanges énergétiques aussi bien sur les écoulements observés dans le canyon qu'autour des bâtiments : dans un contexte urbain, les recirculations provoquées par un canyon dans son voisinage présentent autant d'intérêt que celles qui ont lieu dans le canyon même.

5.2.1 Influence de la température des parois de bâtiment sur la température de l'air

La température de l'air est plus élevée dans le sillage du canyon sur la Figure 5.9, et principalement dans le prolongement des bords du canyon où les écoulements étaient plus importants. L'augmentation de température s'observe moins derrière la zone centrale du canyon où les échanges entre l'air et les parois étaient moins conséquents. C'est dans la zone comprise entre les deux bâtiments que la température de l'air est la plus importante, mais selon les conditions de vent et les températures des parois, le canyon influe sur les températures d'air dans son environnement immédiat. Ainsi il peut affecter des zones relativement éloignées : à 16h le 6 avril 2011, on observe des températures d'air de près de 1°C au-dessus de la température de l'air environnant 10 m en aval du canyon.

Pour les simulations intégrant les échanges thermiques, l'air est fortement chauffé à proximité des parois pour les deux cas étudiés, mais le centre du canyon peut n'être

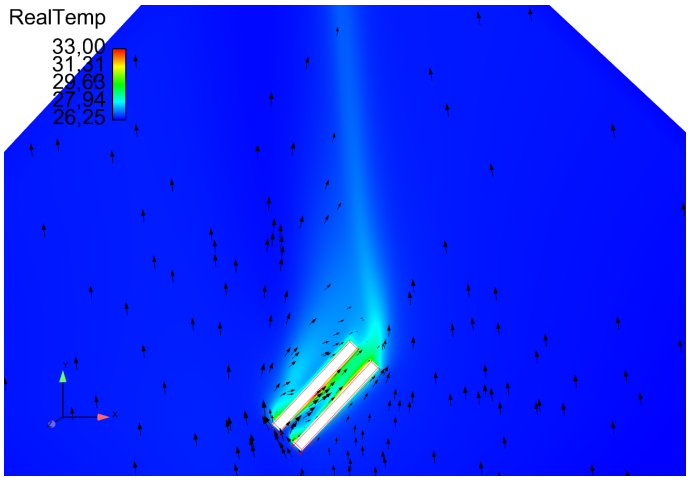
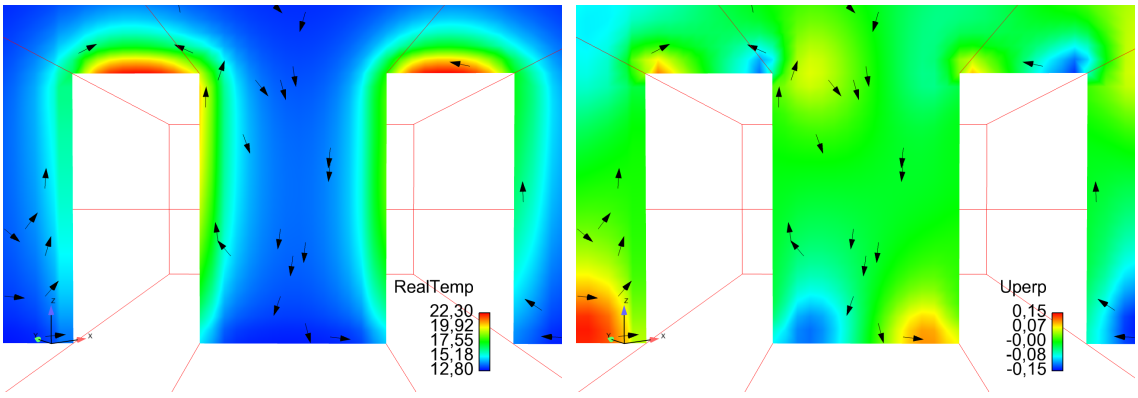
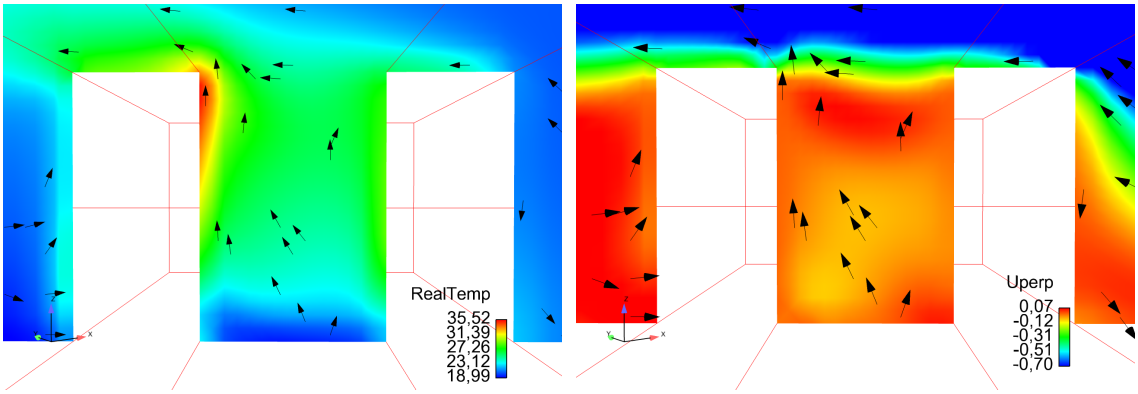


FIGURE 5.9 – Température de l'air dans le sillage du canyon à 2m de hauteur obtenue avec couplage le 06/04/2011 à 16h - TBSP-0616.



(a) TBSP-0510. (b) TBSP-0510.



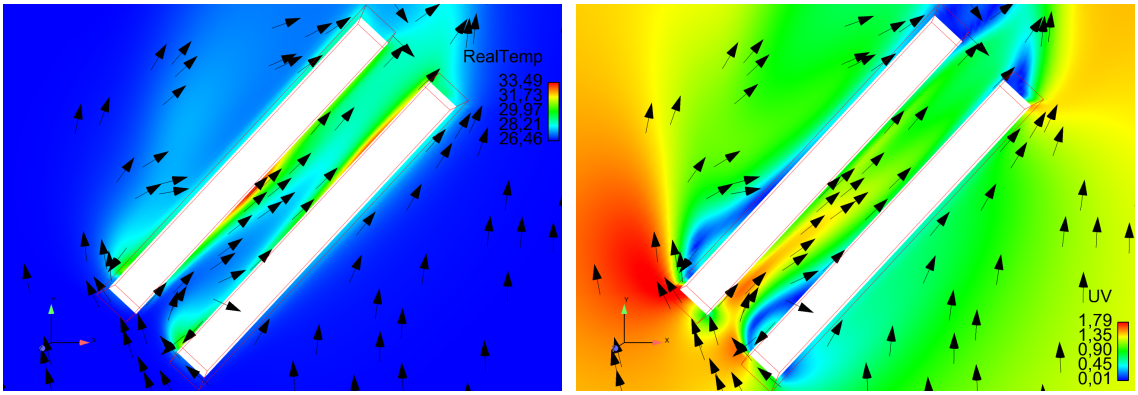
(c) TBSP-0611. (d) TBSP-0611.

FIGURE 5.10 – Répartition inhomogène de la température dans le canyon (RealTemp, 5.10a et 5.10c) et composante de la vitesse du vent perpendiculaire au canyon (Uperp, 5.10b et 5.10d) obtenues avec le couplage à 10h le 05/04/2011 et à 11h le 06/04/2011 .

que peu affecté par ce phénomène. En considérant la Figure 5.10a représentant la température dans une coupe verticale du canyon le 5 avril à 10h, nous observons

que les températures de l'air dépassent les 17°C à proximité des parois. Cependant au milieu du canyon l'air reste à une température proche de 13,5°C lorsque la température minimale de l'air est de 12,8°C. Ainsi l'air est chauffé près des parois mais cette chaleur reste proche des surfaces et se diffuse relativement peu dans le canyon. On a l'apparition d'un halo de chaleur localisé autour des bâtiments. Ce phénomène s'observe alors que le vent perpendiculaire au canyon est très faible, avec des valeurs dont la norme ne dépasse pas $0{,}5\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.
En revanche, lorsque cette composante du vent est plus importante, la chaleur émise par les parois affecte plus significativement l'ensemble de l'air du canyon. Ainsi à 11h le 6 avril la température au centre du canyon dépasse 26°C pour une température de l'air environnant de l'ordre de 20°C (Figure 5.10c).

Les températures de l'air à proximité des parois sont également variables en fonction de leur emplacement sur la longueur du canyon. On remarque une coïncidence entre les zones plus chaudes et celles où les vitesses de vent sont moins importantes (Figure 5.11). Les zones présentant des vitesses plus faibles ont ainsi des coefficients de convection extérieure plus faibles. La chaleur qui s'émane de la paroi reste donc relativement localisée.

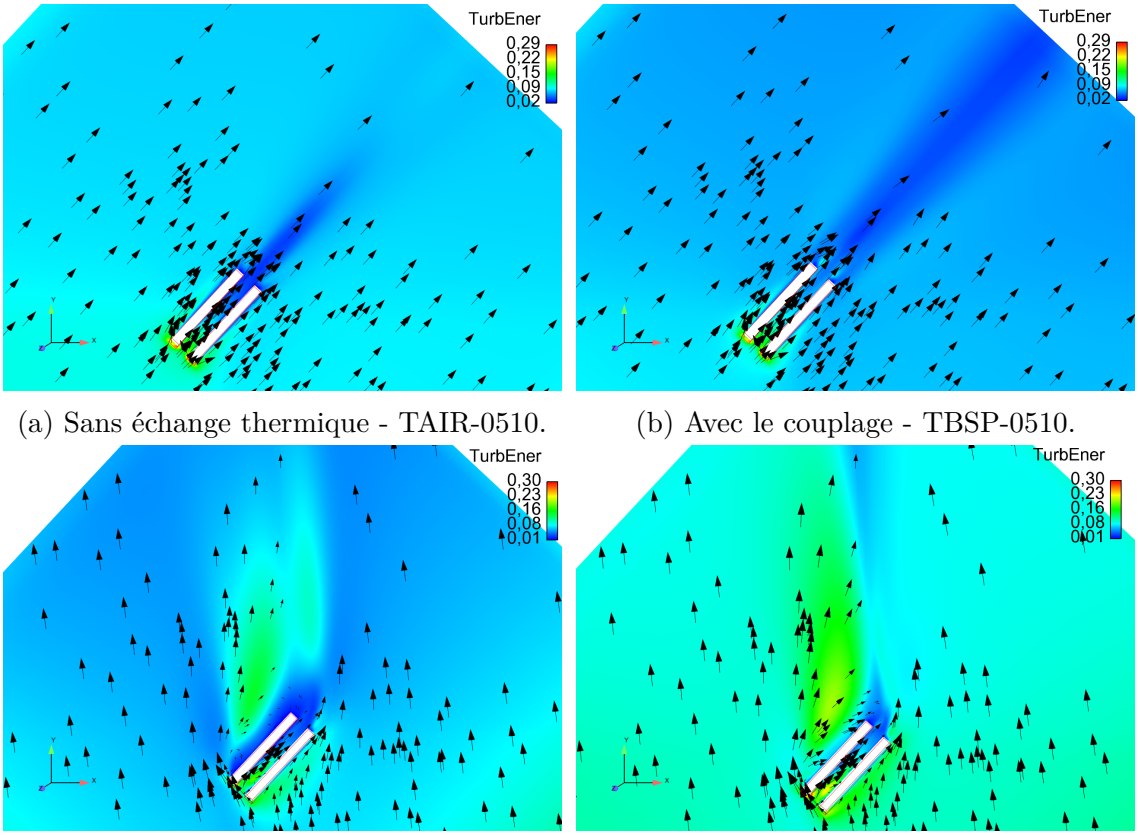


(a) Température de l'air. (b) Vitesse horizontale.

FIGURE 5.11 – Températures hétérogènes et vitesses des écoulements dans le canyon obtenues avec le couplage à 16h le 06/04/2011 - TBSP-0616.

5.2.2 Températures des parois et recirculation de l'air dans le canyon

5.2.2.1 Impact des températures de paroi sur la turbulence et le vent au voisinage du canyon



(a) Sans échange thermique - TAIR-0510.

(b) Avec le couplage - TBSP-0510.

(c) Sans échange thermique - TAIR-0616.

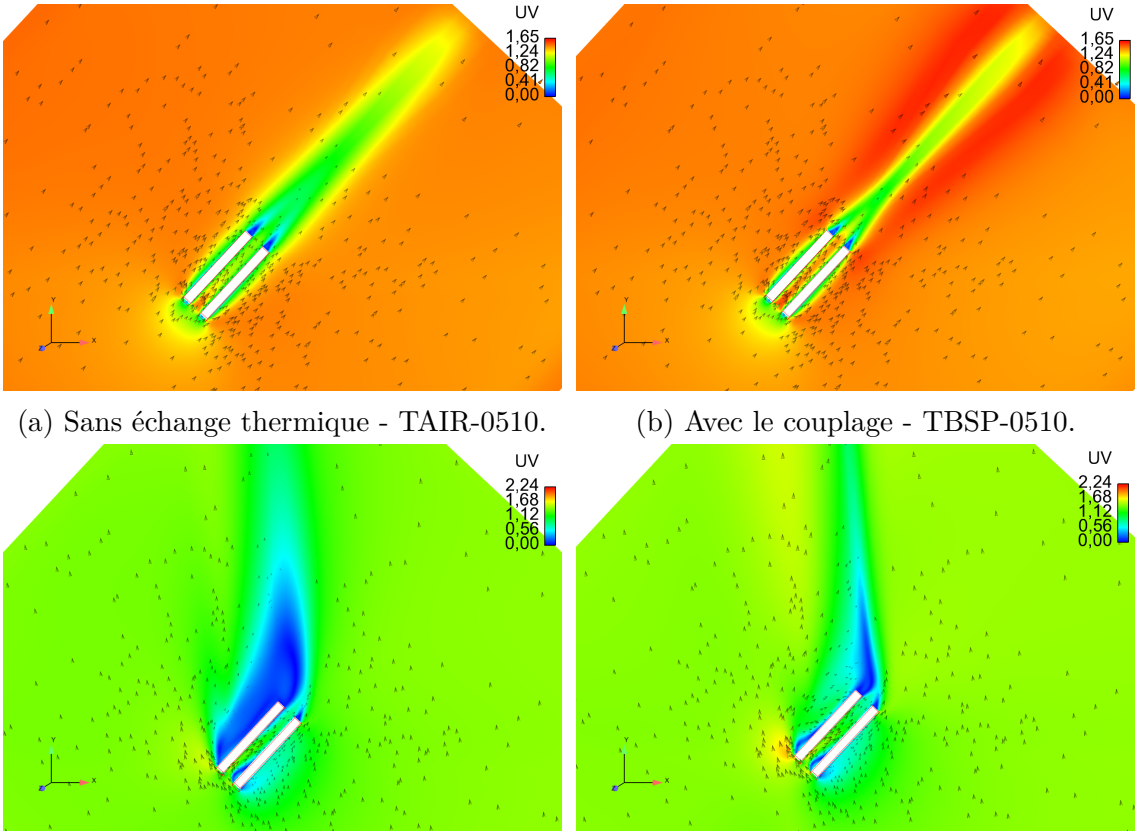
(d) Avec le couplage - TBSP-0616.

FIGURE 5.12 – Champs d'énergie cinétique turbulente à 2m de hauteur obtenus sans échange thermique et avec le couplage, à 10h le 5 avril et à 16h le 6 avril 2011.

La turbulence augmente à l'abord de l'obstacle, où les écoulements sont déviés par la paroi amont du canyon (Figure 5.12). On observe une zone juste en aval de l'obsacle où la turbulence est faible, puis la zone de retour où se mettent en place les recirculations caractérisée par une turbulence plus importante. À 16h le 6 avril, la zone de diminution de la turbulence en aval des bâtiments est moins importante lorsque les effets thermiques sont intégrés à la simulation.

Dans le cas d'un vent incident perpendiculaire au canyon, les effets thermiques engendrent la formation d'une zone juste en aval des bâtiments où la turbulence est plus importante (Figure 5.12).

L'étude des champs de vitesses permet de mieux appréhender les phénomènes expliquant ces observations.



(a) Sans échange thermique - TAIR-0510.

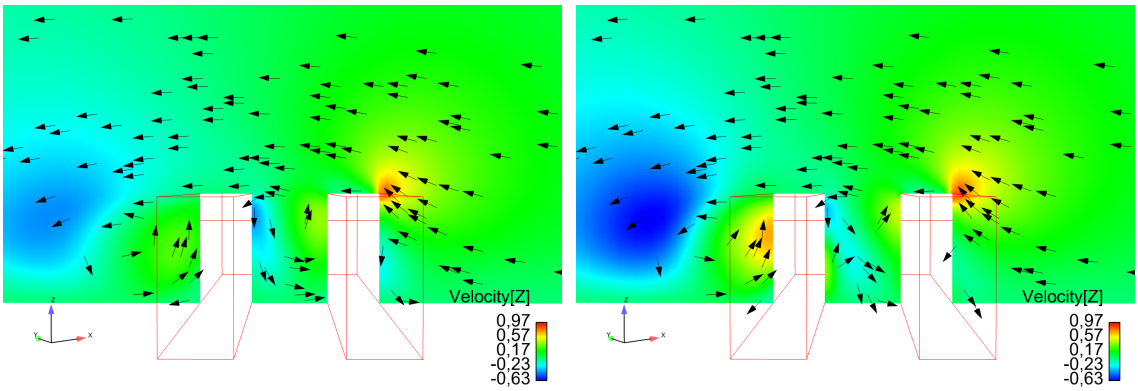
(b) Avec le couplage - TBSP-0510.

(c) Sans échange thermique - TAIR-0616.

(d) Avec le couplage - TBSP-0616.

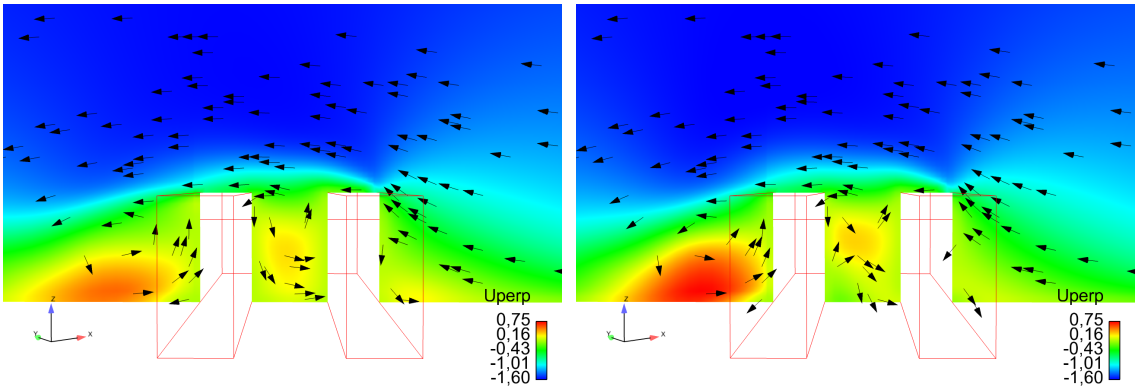
FIGURE 5.13 – Influence des températures de paroi du canyon sur la vitesse horizontale dans le sillage du canyon à 2m de hauteur, à 10h le 5 avril et à 16h le 6 avril 2011 - simulations sans échange thermique et avec le couplage.

L'impact du canyon sur les vitesses dans la zone aval diffère selon les effets thermiques. On observe nettement la diminution de la vitesse horizontale du vent derrière l'obstacle sur les Figures 5.13. Cependant, la zone affectée est plus étroite lorsque les parois du canyon sont chauffées. De plus, cette composante de la vitesse est plus importante autour du canyon et de la zone de ralentissement des écoulements. En effet, les parois externes du canyon sont également chauffées dans notre simulation et cette paroi étant exposée nord-ouest, elle est chauffée par le rayonnement solaire à 16h. Sur la Figure 5.14, la vitesse verticale en aval du canyon est plus importante le long de la paroi lorsque celle-ci est chauffée avec une vitesse maximale qui passe de $0{,}21\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ à $0{,}63\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. Ce phénomène favorise la recirculation en aval du canyon avec des vitesses plus importantes. En effet, la vitesse perpendiculaire au canyon marque un retour de l'écoulement d'air plus marqué vers les bâtiments en aval du canyon (Figure 5.15).



(a) Sans échange thermique - TAIR-0616. (b) Avec le couplage - TBSP-0616.

FIGURE 5.14 – Vitesse verticale dans et en aval du canyon lors des simulations obtenus sans échange thermique et avec le couplage le 6 avril 2011 à 16h.



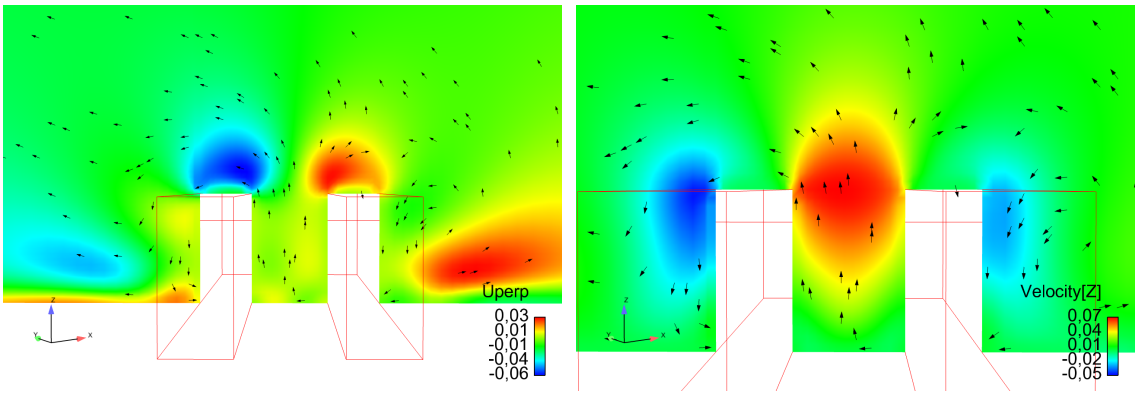
(a) Sans échange thermique - TAIR-0616. (b) Avec le couplage - TBSP-0616.

FIGURE 5.15 – Vitesse perpendiculaire au canyon lors des simulations sans échange thermique et avec le couplage le 6 avril 2011 à 16h.

5.2.2.2 Modification des recirculations d'air dans le canyon par les échanges thermiques

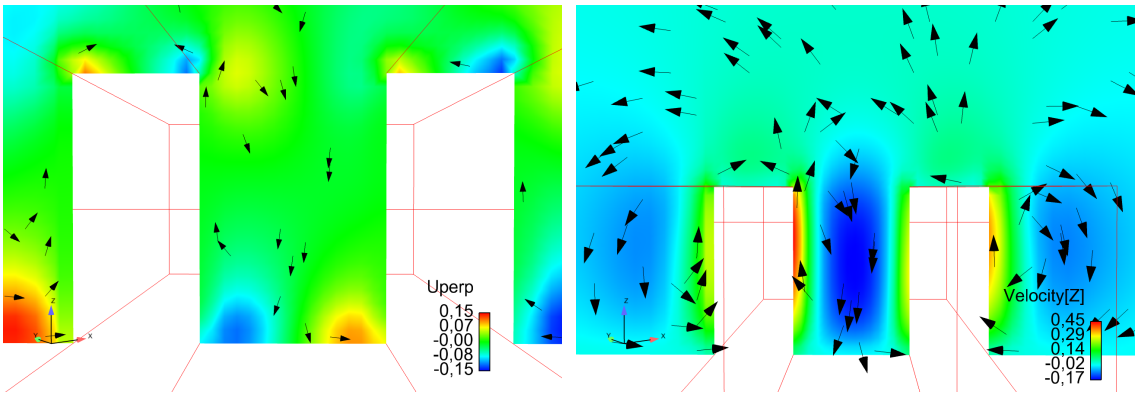
Situation dont le vent incident est dans l'axe du canyon Pour la simulation du 5 avril à 10h sans échange thermique, la vitesse perpendiculaire du vent est très faible (Figure 5.16a). Sa valeur reste comprise dans un intervalle allant de -0,06 à 0,03 $\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}$ dans la section représentée sur la figure. De plus, ses valeurs extrémales sont observées au-dessus des bâtiments, où l'air passe de part et d'autre du canyon. En outre la vitesse verticale (Figure 5.16b) est plus importante entre les deux bords du canyon, de la mi-hauteur des bâtiments jusqu'à environ 7m de hauteur : l'air est donc ascendant dans la partie supérieure du canyon et s'en échappe en passant au-dessus des bâtiments. On observe ainsi le phénomène dit « Venturi » [1] décrit par Blocken et al. (2008).

1. Voir la note p.34



(a) Vent perpendiculaire. (b) Vent vertical.

FIGURE 5.16 – Vent horizontal perpendiculaire au canyon et vent vertical à 10h le 5 avril 2011 sans effet thermique - TAIR-0510.



(a) Vent perpendiculaire. (b) Vent vertical.

FIGURE 5.17 – Vent horizontal perpendiculaire au canyon et vent vertical obtenus avec le couplage à 10h le 5 avril 2011 - TBSP-0510.

Néanmoins, les résultats de simulation sont très différents lorsque l'on intègre les effets thermiques. On observe au niveau du sol et aux arêtes supérieures des bâtiments des valeurs de la composante perpendiculaire du vent plus importantes avec une norme de $0{,}10\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ (Figure 5.17a). Les écoulements se dirigent vers les parois verticales au niveau du sol et passent au-dessus des bâtiments. Parallèlement, la vitesse verticale du vent (Figure 5.17b) est positive près des parois et négative au milieu du canyon. On observe donc deux cellules de convection dans le canyon où les écoulements d'air sont descendants au milieu du canyon pour se diriger vers les parois verticales après l'obstacle du sol et remonter ensuite le long de ces parois, comme représenté sur la Figure 5.18.

Ce phénomène s'observe beaucoup moins nettement à 17h le 6 avril, alors que le vent vient légèrement du sud-est de l'axe du canyon. On remarque cependant bien la formation des deux vortex Figure 5.19 avec la modélisation des échanges thermiques.

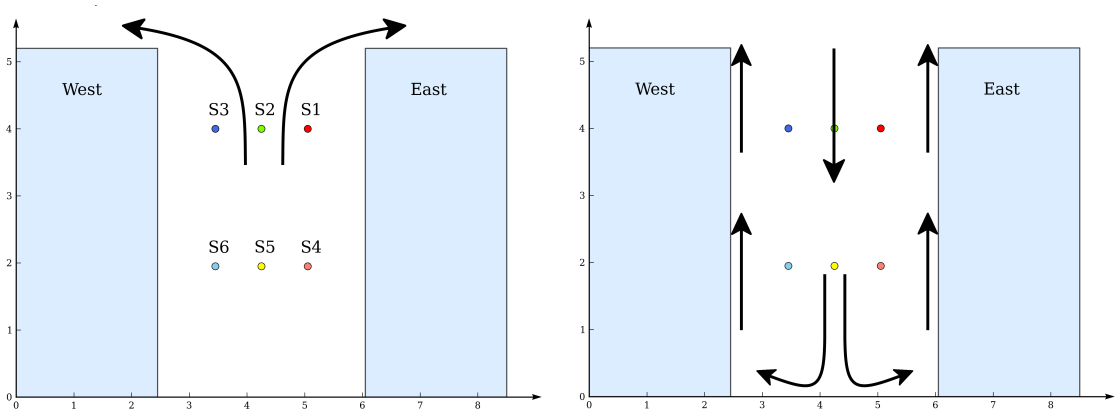
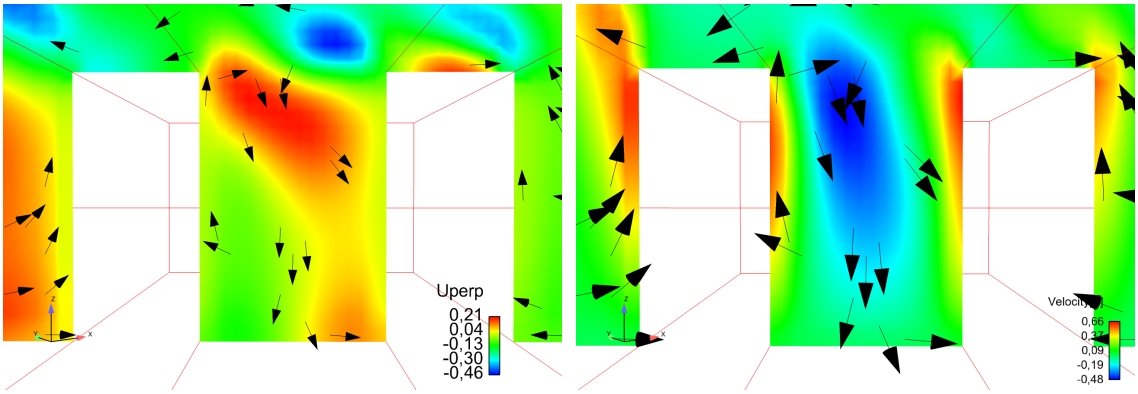


FIGURE 5.18 – Représentation schématique des écoulements observés dans le canyon sans et avec effets thermiques à 10h le 5 avril 2011.



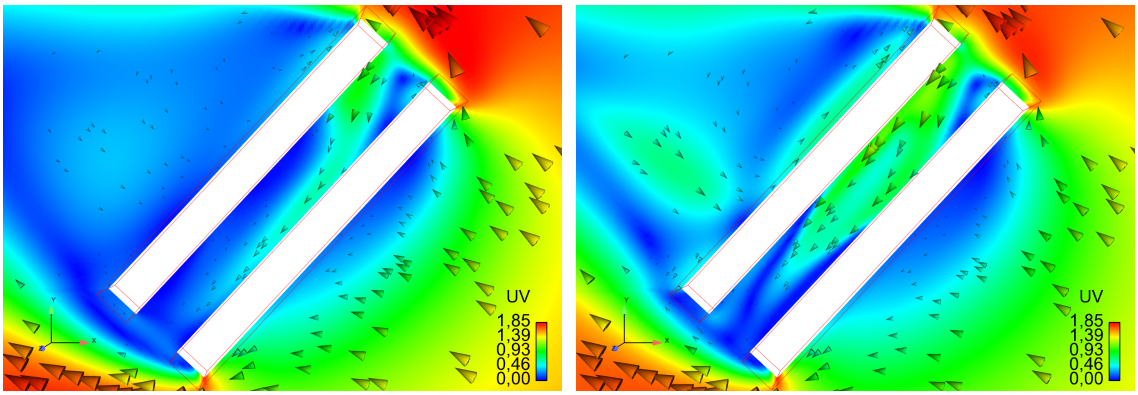
(a) Vent perpendiculaire. (b) Vent vertical.

FIGURE 5.19 – Vent horizontal perpendiculaire au canyon et vent vertical obtenus avec le couplage à 17h le 6 avril 2011 - TBSP-0617.

Dans les situations où les effets dynamiques sont faibles en raison d'un vent incident parallèle au canyon, l'influence de la thermique des bâtiments a donc des effets notables sur les recirculations. Elle change radicalement les motifs d'écoulement dans le canyon.

Modification des écoulements horizontaux dans le canyon - À 11h le 6 avril, l'air qui entre par les extrémités du canyon est redirigé depuis la paroi aval à la paroi amont du canyon (Figure 5.20a). Si l'on considère également les échanges thermiques dans la simulation, un deuxième écoulement qui longe la paroi aval se met en place (Figure 5.20b). De plus les vitesses horizontales du vent dans le canyon sont plus importantes que sans échange thermique.

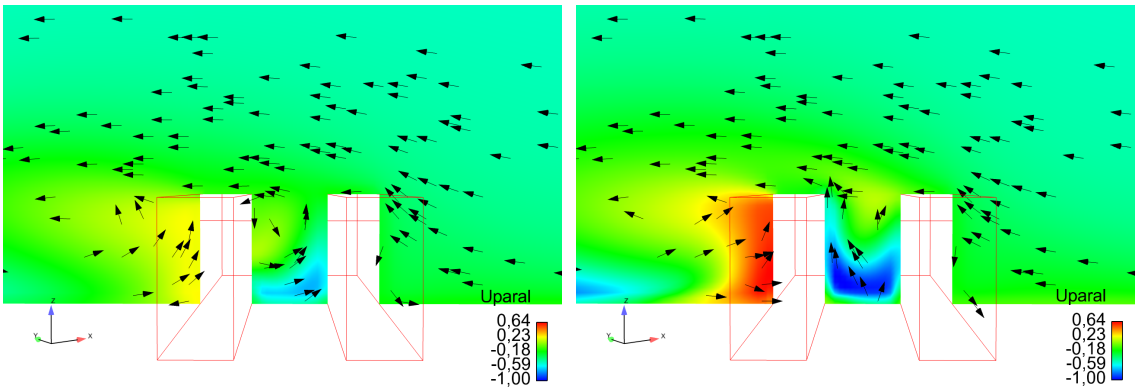
Si l'on s'intéresse à la zone de retour, la recirculation s'effectue avec deux vortex horizontaux. L'introduction des effets thermiques ne change pas la structure de



(a) Sans échange thermique - TAIR-0611. (b) Avec le couplage - TBSP-0611.

FIGURE 5.20 – Écoulements horizontaux de l'air dans le canyon sans échange thermique et avec le couplage à 11h le 06/04/2011.

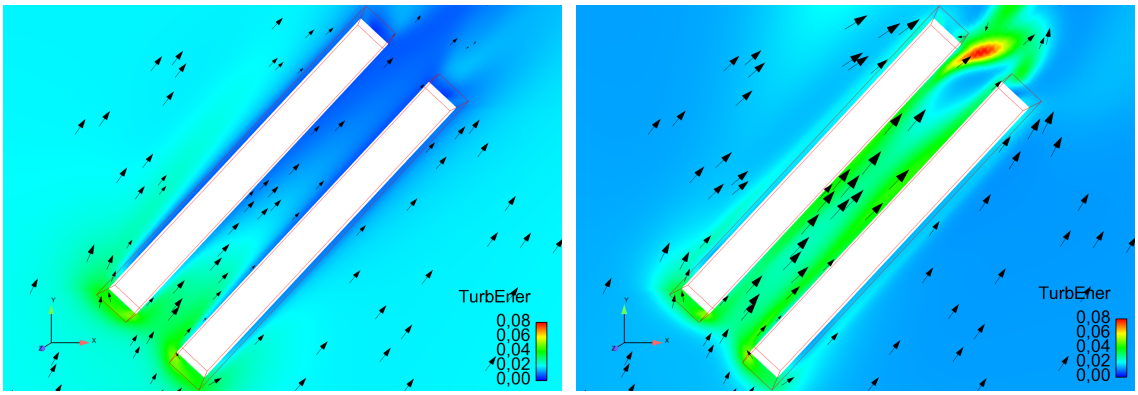
ces recirculations, mais les vitesses y sont plus importantes. Les températures plus élevées des parois favorisent ainsi un écoulement de retour vers le bâtiment aval, comme nous pouvons le voir sur la Figure 5.21.



(a) Sans échange thermique - TAIR-0611. (b) Avec le couplage - TBSP-0611.

FIGURE 5.21 – Écoulements parallèles au canyon entre les bâtiments sans échange thermique et avec le couplage à 11h le 06/04/2011.

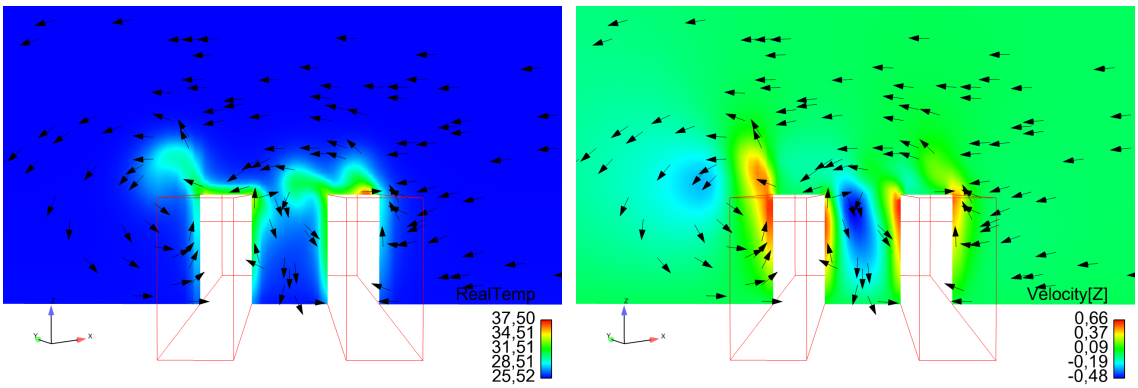
L'étude de la composante du vent parallèle au canyon met en évidence deux écoulements en sens inverse dans le canyon : les écoulements se dirigent vers le sud-ouest dans la moitié inférieure du canyon à une vitesse de 0,70 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ et dans la direction opposée dans la moitié supérieure du canyon (Figure 5.21). Ces écoulements présentent des vitesses plus importantes lorsque les échanges thermiques sont inclus dans la simulation.



(a) Sans échange thermique - TAIR-0617. (b) Avec le couplage - TBSP-0617.

FIGURE 5.22 – Énergie cinétique turbulente dans le canyon à 2 m de hauteur sans échange thermique et avec le couplage à 17h le 06/04/2011.

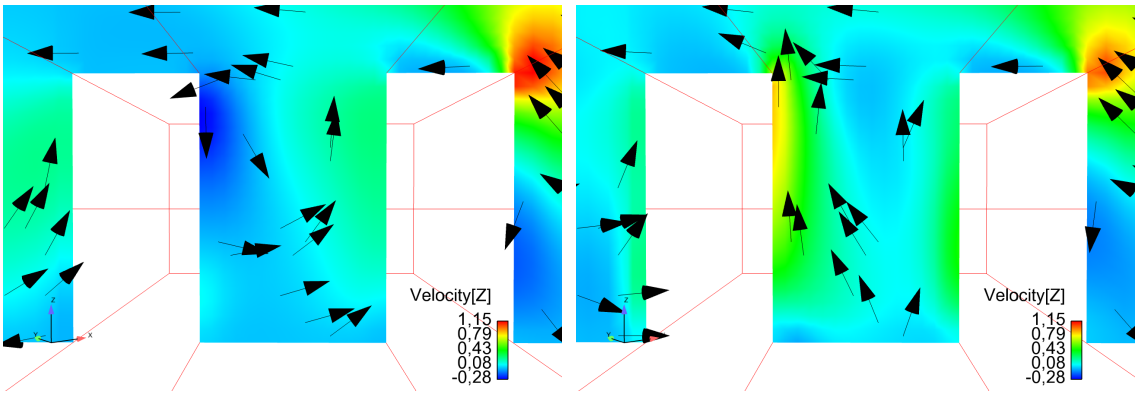
Les échanges thermiques entre les bâtiments et l'atmosphère contribuent à des écoulements plus turbulents et plus rapides dans le canyon, comme représenté sur la Figure 5.22.



(a) TBSP-0617. (b) TBSP-0617.

FIGURE 5.23 – Vitesse verticale du vent et températures des parois des bâtiments simulées par le modèle couplé à 17h le 06/04/2011.

Modification des écoulements verticaux dans le canyon - Des températures de parois plus élevées que la température de l'air favorise les écoulements verticaux ascendants. Ainsi à 17h le 6 avril, nous remarquons des corrélations entre les températures de l'air le long des parois du canyon et les vitesses verticales des écoulements (Figure 5.23). Une température de paroi plus élevée engendre des mouvements ascendants de l'air plus marqués que pour le cas sans échange thermique. Ainsi des écoulements ascendants importants en amont du canyon et le long de la paroi aval dans le canyon sont observable.

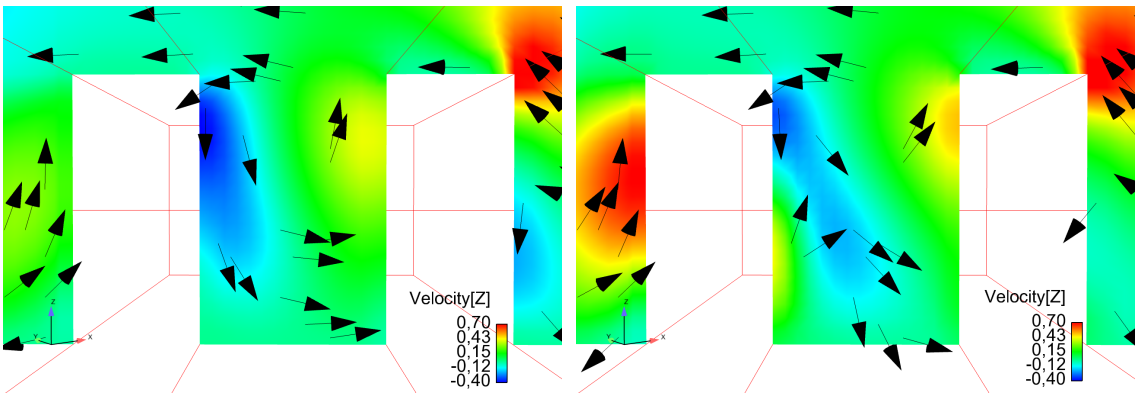


(a) Sans échange thermique - TAIR-0611. (b) Avec le couplage - TBSP-0611.

FIGURE 5.24 – Vitesse horizontale du vent dans le canyon sans échange thermique et avec le couplage à 11h le 06/04/2011.

Sans effet thermique, l'air a un mouvement descendant contre la paroi nord-ouest (donc exposée sud-est) sur la Figure 5.24. Or il s'agit de la paroi chauffée par le soleil à 11h, et l'on observe un vent vertical ascendant le long de cette paroi dans le cas où l'on impose les températures de surface.
On remarque que la recirculation de l'air dans le cas sans thermique forme un vortex dans le canyon Figure 5.24a. L'introduction des effets thermiques en revanche modifie cet écoulement en engendrant ce mouvement vertical de l'air le long de la paroi nord-ouest du canyon. La cellule de recirculation n'est plus aussi nette et le mouvement est principalement ascendant dans le canyon.

Les échanges thermiques influent donc sur l'écoulement le long de la paroi et perturbent par là même l'écoulement dans toute la largeur du canyon. Le vortex qui se dessine Figure 5.24a est ainsi contré par le mouvement ascendant qui s'établit au niveau de la paroi nord-ouest.



(a) Sans échange thermique - TAIR-0616. (b) Avec le couplage - TBSP-0616.

FIGURE 5.25 – Vitesse horizontale du vent dans le canyon sans échange thermique et avec le couplage à 16h le 06/04/2011.

Les effets thermiques contribuent à renforcer les effets dynamiques lorsque la paroi aval du canyon est chauffée. Ainsi à 16h le 6 avril 2011, la paroi nord-ouest est chauffée tandis que le vent perpendiculaire au canyon va du sud-est au nord-ouest. Les simulations avec et sans échanges thermiques présentent alors des différences moins marquées que pour les autres instants (Figure 5.30). Dans les deux cas de simulation, la recirculation en vortex dans le canyon est clairement visible et va dans le même sens. À cet instant. Nous remarquons néanmoins une structure légèrement différente sur les vortex entre les deux simulations. Le cas sans thermique voit le vortex plus localisé vers la paroi nord-ouest du canyon tandis qu'il est décalé vers le centre du canyon lorsque les effets thermiques sont pris en compte.

5.2.3 Conclusion

Ainsi que le soulignaient Allegrini et al. (2013), nous observons des vitesses de vent plus importantes lorsque les effets thermiques du bâtiment interviennent dans la simulation.
Cependant, la seule situation où les effets thermiques modifie la position du vortex principal citée par Allegrini et al. (2013) est le 6 avril à 16h. Pour les autres instants étudiés, la structure des écoulements dans le canyon est complètement modifiée et la recirculation en vortex n'apparaît pas systématiquement. La simulation sans thermique ne prévoit pas de formation de vortex dans le canyon pour le 5 avril à 10h, où le vent incident est parallèle à l'axe du canyon. Cependant, le vortex de 11h le 6 avril fait place à des écoulements moins structurés dans le canyon avec un mouvement ascendant marqué le long de la paroi chauffée.

Les simulations des quatre instants choisis mettent effectivement en évidence une influence notable de la thermique des bâtiments sur les écoulements d'air dans le canyon et autour de lui.
À présent, nous comparons les résultats du couplage avec ceux obtenus lorsque les températures de parois sont fixées aux températures de surface mesurées lors de EM2PAU afin d'étudier la capacité du couplage de *Code_Saturne* à reproduire ces valeurs.

5.3 Validation du couplage entre *Code_Saturne* et BuildSysPro : comparaison avec les simulations réalisées avec les températures de parois mesurées

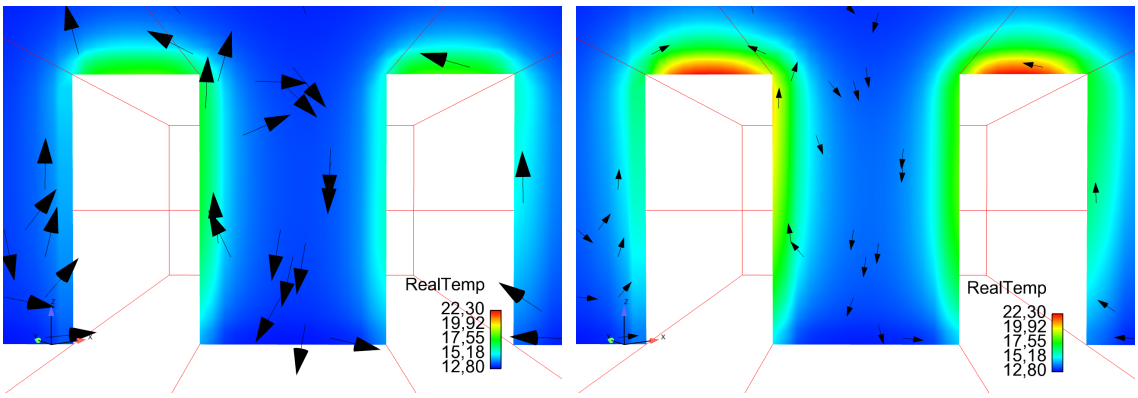
Afin d'étudier les résultats obtenus avec le couplage de BuildSysPro et *Code_Saturne*, nous étudions les résultats de ces simulations (TBSP) et celles réalisées avec les températures de parois mesurées imposées en conditions limites de *Code_Saturne* (TMES).

Les différences entre les deux types de simulations sont d'une part l'évolution de la température intérieure modélisée par BuildSysPro alors que ce paramètre n'est pas pris en compte lorsque les températures de surface sont fixées, et bien sûr la confrontation entre un modèle et des températures mesurées.

L'objectif est ici de montrer que les différences de températures de surface entre le couplage et les températures mesurées ne sont pas trop grandes et que les circulations sont équivalentes pour les deux situations.

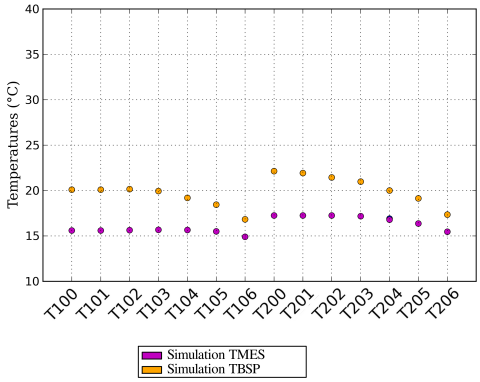
5.3.1 Des températures de parois surestimées par le modèle couplé

Pour toutes les simulations, la température de surface calculée par le modèle de bâtiment est supérieure aux températures de parois mesurées (Figure 5.26), les écarts pouvant aller de 2 à 6°C (à 11h le 6 avril 2011).

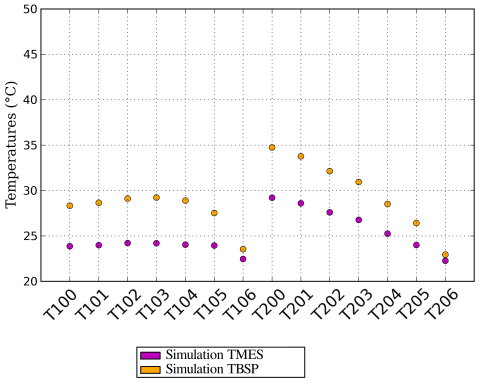


(a) Températures imposées - TMES-0510. (b) Avec le couplage - TBSP-0510.

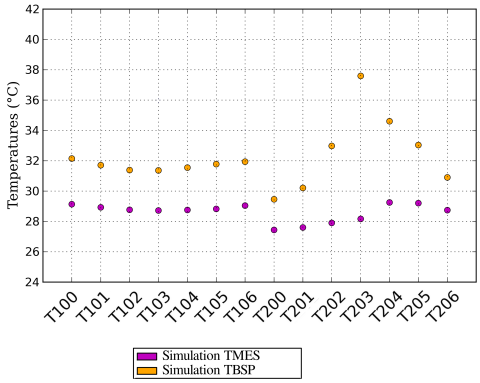
FIGURE 5.26 – Températures proches des parois du canyon avec les températures mesurées et avec le couplage à 10h le 5 avril 2011.



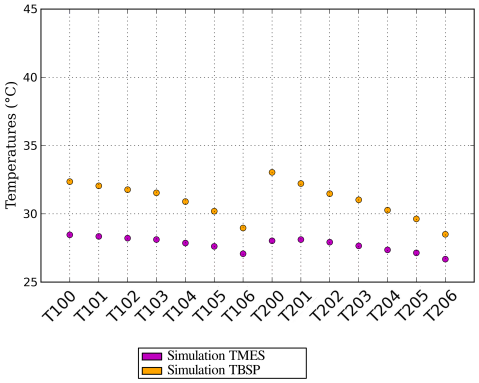
(a) À 10h le 05/04/2011.



(b) À 11h le 06/04/2011.



(c) À 16h le 06/04/2011.



(d) À 17h le 06/04/2011.

FIGURE 5.27 – Températures proches des surfaces du canyon aux quatre instants étudiés calculées par le couplage et avec les températures de surfaces imposées aux valeurs mesurées.

Date de la simulation	Température mesurée au sol	Température de l'air extérieur (mesurée dans le canyon)
05/04/2011 à 10h	11,6°C	13,2°C
06/04/2011 à 11h	15,9°C	21,0°C
06/04/2011 à 16h	26,9°C	23,7°C
06/04/2011 à 17h	24,6°C	25,6°C

TABLE 5.4 – Températures de l'air et du sol mesurées aux quatre instants étudiés et utilisés pour les simulations.

La Figure 5.27 représente les températures obtenues dans les faces de bord près des parois (voir le paragraphe 3.1.4) pour les simulations avec les valeurs mesurées des températures de parois et pour le couplage.
Tout d'abord, les simulations TMES et TBSP donnent des températures plus importantes pour les points situés plus en hauteur sur les parois (correspondant aux

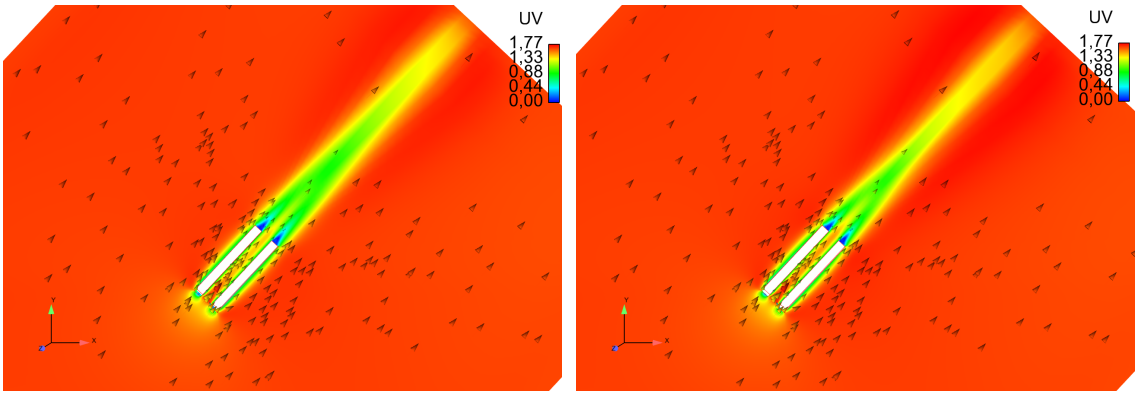
capteurs 100 à 103 et 200 à 203), sauf en ce qui concerne la simulation de 16h. Le couplage ne prenant pas en compte les masques solaires d'un bâtiment sur l'autre, ces variations ne sont pas dues à des différences d'ensoleillement. Les simulations présentant cette caractéristique correspondent aux instants où la température du sol est moins élevée que la température de l'air (Tableau 5.4). Nous pouvons supposer que les températures au niveau des parois du bâtiment sont influencées par la température du sol via les écoulements convectifs qui ont lieu dans le canyon.

D'autre part, les températures à proximité des parois sont plus importantes avec le modèle couplé qu'avec l'utilisation des mesures de températures de parois. Or, la principale différence entre ces simulations porte précisément sur l'établissement des températures de parois, calculées dans un cas et mesurées dans l'autre. Les écarts de températures observés proviennent donc de températures de parois surestimées par le couplage.

Cette observation pourrait être due au calcul des températures même du modèle qui pourraient y être surestimées. Cependant il s'agit d'un modèle ayant déjà fait l'objet de validations. L'hypothèse la plus probable concerne les rayonnements, notamment solaires. En effet, lors du couplage, les deux rangées de conteneurs sont modélisées par BuildSysPro comme deux bâtiments distincts sans interactions entre eux. Les bâtiments sont ainsi considérés de façon totalement indépendante, or en réalité chacun d'eux constitue un masque solaire pour l'autre. De ce fait, les masques solaires qu'ils exercent l'un sur l'autre ne sont pas pris en compte. Les rayonnements solaires reçus par chaque surface sont donc surestimés, ce que le modèle ne prend pas en compte.

5.3.2 Analogies entre les simulations avec températures mesurées et couplage

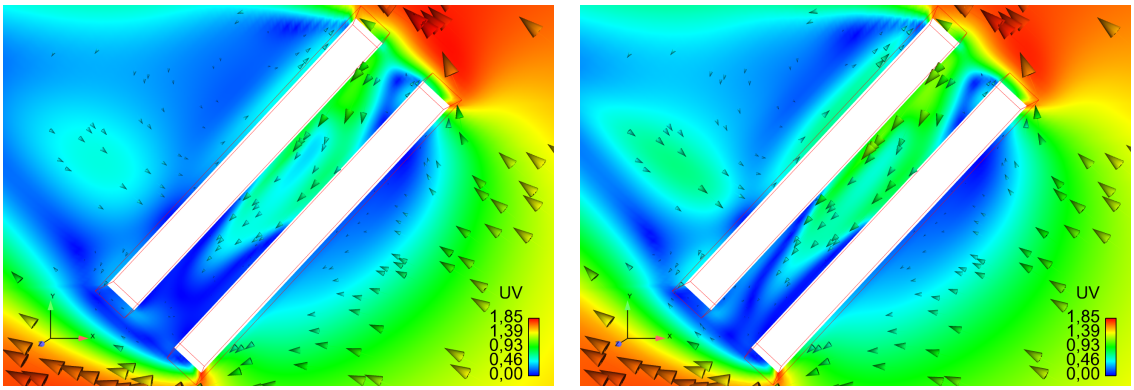
De même que nous l'avions observé entre les simulations sans échanges thermiques et les résultats du couplage, l'augmentation des températures de surfaces engendrent des vitesses de vent plus élevées aux abords et dans le canyon tout en réduisant la largeur de la zone aval où les températures horizontales sont réduites (Figure 5.28). Dans le cas d'un vent parallèle au canyon cependant, aucune différence concernant les recirculations n'est observable, l'écoulement autour et dans le canyon est similaire pour les deux simulations.
Nous observons également des vitesses de vent plus importantes dans le canyon pour les simulations où les températures de surfaces sont plus importantes, soit



(a) Températures imposées - TMES-0510. (b) Avec le couplage - TBSP-0510.

FIGURE 5.28 – Vitesse horizontale du vent dans le sillage du canyon avec les températures mesurées et avec le couplage à 10h le 5 avril 2011.

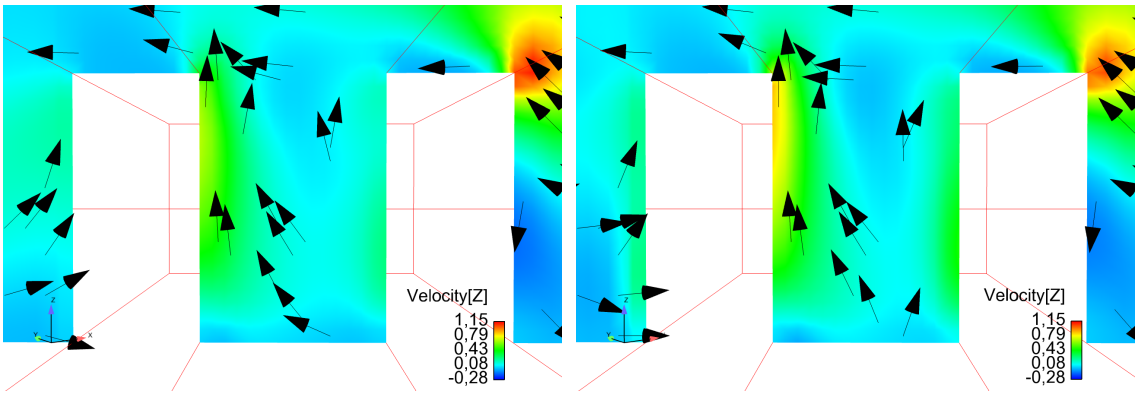
pour la simulation couplée, tel que représenté à la Figure 5.29. Cependant, ainsi que pour le cas précédent, les motifs des écoulements reste inchangés. On observe bien la répartition de l'écoulement le long des deux parois du canyon propre à l'introduction des effets thermiques. De même, pour les deux hypothèses de modélisation, les recirculations assymétriques en aval du canyon avec des écoulements dans le plan horizontal formant un vortex de grand diamètre vers le nord et un phénomène de retour plus rapide côté sud, sont reproduites.



(a) Températures imposées - TMES-0611. (b) Avec le couplage - TBSP-0611.

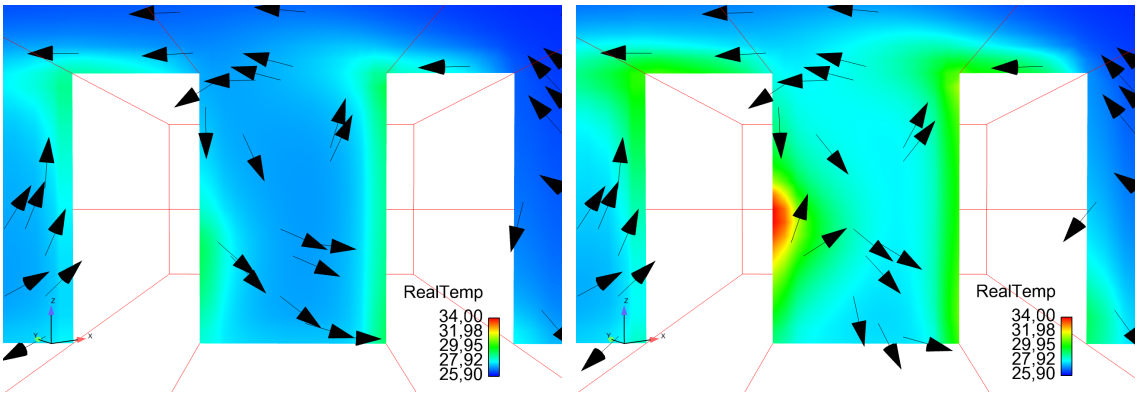
FIGURE 5.29 – Vitesse horizontale du vent dans le canyon avec les températures mesurées et avec le couplage à 11h le 6 avril 2011.

L'étude du vent vertical dans une coupe du canyon mène à la même observation (Figure 5.30). Malgré un accélération plus marquée sur la façade nord-est, les écoulements dans le canyon restent très semblables entre les deux simulations avec des mouvements d'air qui se dirigent vers la paroi chauffée et principalement ascendants.



(a) Températures imposées - TMES-0611. (b) Avec le couplage - TBSP-0611.

FIGURE 5.30 – Vitesses verticales du vent avec les températures mesurées et avec le couplage à 11h le 6 avril 2011.

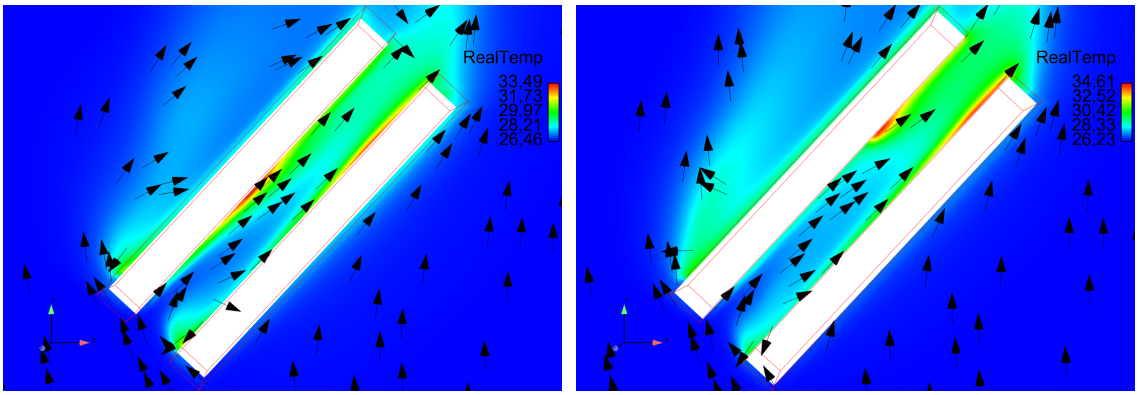


(a) Températures imposées - TMES-0616. (b) Avec le couplage - TBSP-0616.

FIGURE 5.31 – Température dans le canyon avec les températures mesurées et avec le couplage à 16h le 6 avril 2011.

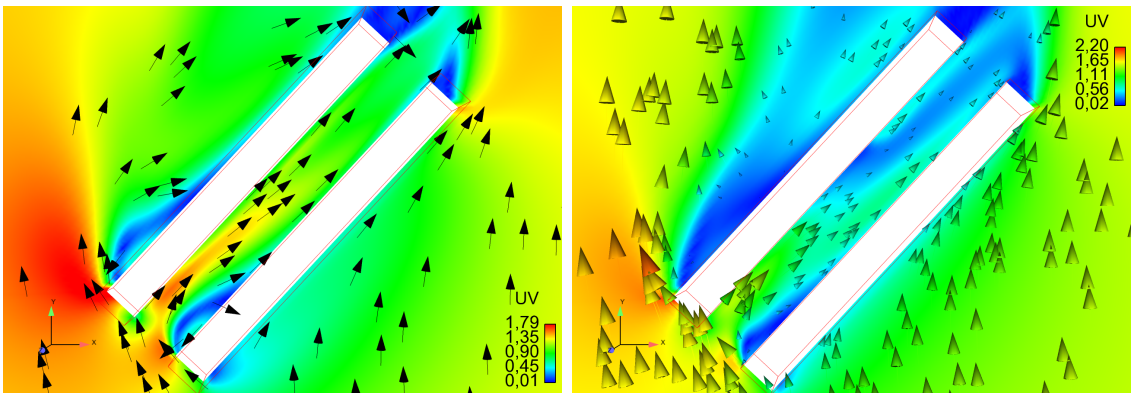
À 16h se profile un pic de température sur la paroi nord-ouest du canyon (Figure 5.31). Ce phénomène est de même plus prononcé pour le couplage, cependant il est également visible dans une moindre mesure lorsqu'on impose les températures de parois mesurées dans la simulation. Les Figures 5.32 représentent les températures de l'air dans le canyon à 2 m et à 4 m de hauteur. Elles mettent en effet en évidence des hétérogénéités de la température de l'air aux abords des parois, qui se retrouvent également pour les deux hypothèses de simulation.

On oppose à ces images la répartition des vitesses verticales du vent dans le canyon (Figure 5.33). Ces zones aux températures d'air plus importantes correspondent aux endroits où les vitesses de vent sont moins importantes. L'observation de cette zone de température plus élevée à la Figure 5.31 est liée à une zone où les écoulements sont moins rapides. Malgré des valeurs de température de l'air et de vitesse de vent différentes, les motifs des écoulements dans le canyon calculés par le couplage sont comparables à ceux obtenus avec les températures de surface mesurées.



(a) À 2 m de hauteur. (b) À 4 m de hauteur.

FIGURE 5.32 – Températures sur des coupes horizontales dans le canyon obtenues avec le couplage à 16h le 6 avril 2011 - TBSP-0616.



(a) À 2 m de hauteur. (b) À 4 m de hauteur.

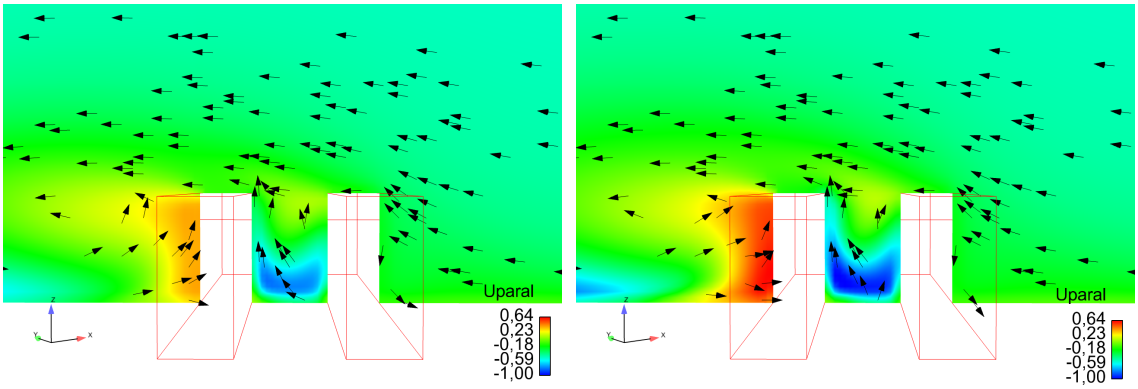
FIGURE 5.33 – Vitesse horizontale dans le canyon obtenue avec le couplage à 16h le 6 avril - TBSP-0616.

5.3.3 Des phénomènes de recirculation de l'air similaires entre les simulations avec températures de surface forcées et couplage

Les simulations réalisées avec le couplage donne des résultats proches de celles réalisées avec les températures de parois fixées aux valeurs mesurées. Pour chaque instant étudié, le couplage reproduit les mêmes recirculations du vent que la première série de simulation, malgré une tendance à surestimer légèrement les différentes composantes de la vitesse du vent.

Ainsi l'air qui entre dans le canyon et les écoulements dans la zone de retour sont similaires entre le couplage et la simulation où les températures de parois sont imposées. Sur les Figures 5.34, on observe également des écoulements semblables aussi bien dans le canyon, avec des flux allant en direction du sud-ouest dans la moitié inférieure du canyon et remontant le long de la paroi nord-ouest, qu'en aval avec un

retour des flux vers le bâtiment nord-ouest.



(a) Températures imposées - TMES-0611. (b) Avec le couplage - TBSP-0611.

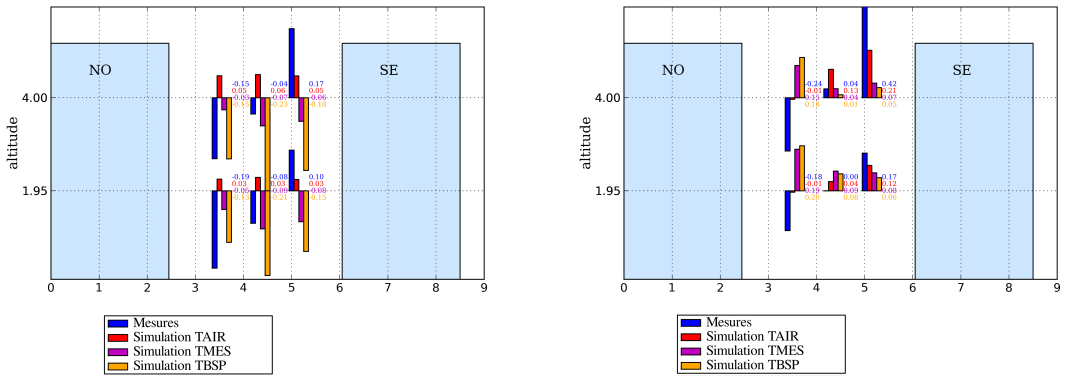
FIGURE 5.34 – Vent horizontal parallèle au canyon avec les températures mesurées et avec le couplage à 11h le 6 avril 2011.

Les motifs d'écoulements en aval du canyon étant principalement gouvernés par les effets dynamiques du canyon sur le vent incident, il est normal de les voir peu affectés par la modélisation des températures de surfaces. Nous avons vu cependant que les écoulements dans le canyon étaient plus sensibles aux températures de paroi ; la concordance entre les résultats des deux options de modélisation est donc positive quant à la faculté du couplage à simuler les écoulements de l'air.

5.4 Bilan des simulations et comparaison détaillée avec les mesures

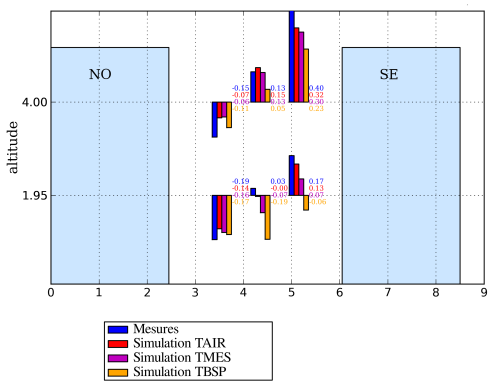
Nous synthétisons les résultats obtenus pour différentes simulations et nous les comparons aux mesures de EM2PAU.
Si la recirculation en vortex apparaît distinctement avec les mesures, les simulations réalisées ne parviennent à reproduire ce phénomène que pour les simulations du 6 avril 2011 à 16h (Figure 5.35).
Le modèle reproduit cependant les écoulements horizontaux (Figure 5.36)

Sur les différentes simulations, aucune n'est fidèle aux données mesurées. Les vitesses sont généneralement faibles dans le canyon, pour nos quatre cas d'étude la vitesse verticale maximale est de $0,4\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. D'autre part, la simulation réalisée avec le couplage donne des valeurs de vitesse verticale du vent plus importante que la simulation sans échange thermique ou que la simulation avec les températures de paroi imposées.

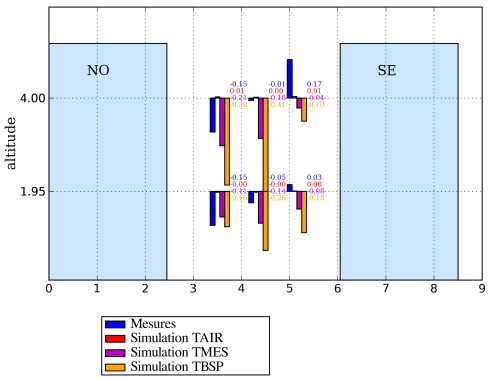


(a) À 10h le 05/04/2011.

(b) À 11h le 06/04/2011.



(c) À 16h le 06/04/2011.



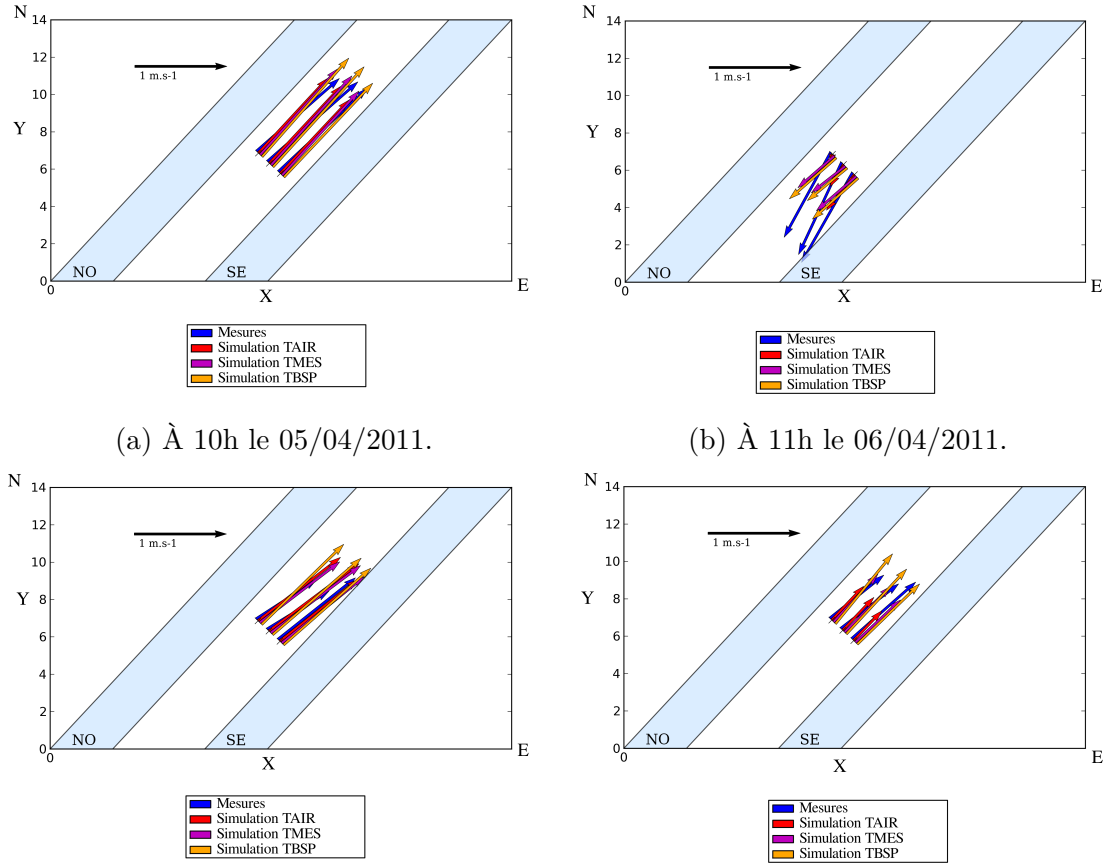
(d) À 17h le 06/04/2011.

FIGURE 5.35 – Vitesses verticales dans le canyon pour les différentes simulations aux quatre instants étudiés.

Nous observons des différences non négligeables entre les mesures et les simulations. Le maillage pourrait tout d'abord être remis en question. Peut-être n'est-il pas assez fin aux abords des bâtiments et les angles peuvent être trop distordusF pour la simulation. Il mériterait donc d'être étudié à nouveau.

D'autre part, deux caractéristiques concernant la CFD et le modèle RANS $k - \varepsilon$ peuvent être avancées pour expliquer ces divergences entre les mesures et les simulations.

Nous pouvons supposer que le modèle RANS k-ε n'est pas suffisant pour simuler avec précision les recirculations dans le canyon. Lors de nos simulations où la direction du vent est proche de la normale au canyon, nous pouvons nous attendre à observer la formation d'un vortex principal entre les bâtiments, et deux petits vortex dans les angles près du sol (Allegrini et al. (2013)). Or ces simulations ne permettent pas de mettre en évidence ces deux vortex secondaires.



(a) À 10h le 05/04/2011.

(b) À 11h le 06/04/2011.

(c) À 16h le 06/04/2011.

(d) À 17h le 06/04/2011.

FIGURE 5.36 – Vitesses horizontales dans le canyon pour les différentes simulations aux quatre instants étudiés.

En ce qui concerne les simulations de CFD, Allegrini et al. (2013) soulignent les écarts entre les mesures et les simulations lors d'études portant sur les effets thermiques. Lors de campagnes de mesures, Louka et al. (2002) observent un flux ascendant fort à proximité des parois chauffées par le soleil. Or ce flux n'affecte qu'une fine couche d'air près des murs, tandis que les simulations de CFD prédisent des effets sur la flottabilité sur des zones plus importantes (Allegrini et al. (2013)). Les auteurs précisent que la flottabilité a un impact important sur les flux de chaleur convectifs au niveau des parois des bâtiments, mais de ce fait la CFD ne reproduit pas précisément les écoulements induits.

Ceci pourrait être une raison de la difficulté de nos modèles à reproduire les recirculations dans le canyon. Si aucune hypothèse de modélisation ne parvient à prévoir la formation de vortex dans les situations où la direction du vent incident est parallèle à l'axe du canyon, les simulations TAIR sont capables de modéliser un vortex à 11h et à 16h le 6 avril, alors que le vent arrive latéralement sur le canyon.

5.5 Études de sensibilité complémentaires

5.5.1 Opposition des effets dynamiques et thermiques dans un cas idéalisé, avec un vent perpendiculaire au canyon

On crée un cas idéalisé où le vent est parfaitement perpendiculaire au canyon. En utilisant les valeurs des températures de paroi observées à 16h le 6 avril et en s'assurant que les effets thermiques et dynamiques s'opposent (la paroi la plus chaude dans le canyon est la paroi aval), on observe l'influence de la force du vent sur la circulation de l'air.

Tout d'abord nous réalisons la simulation sans effet thermique afin d'observer la structure des écoulements dans le canyon. Nous observons la présence d'un vortex dans le canyon engendré par l'effet dynamique du vent incident sur la Figure 5.37.

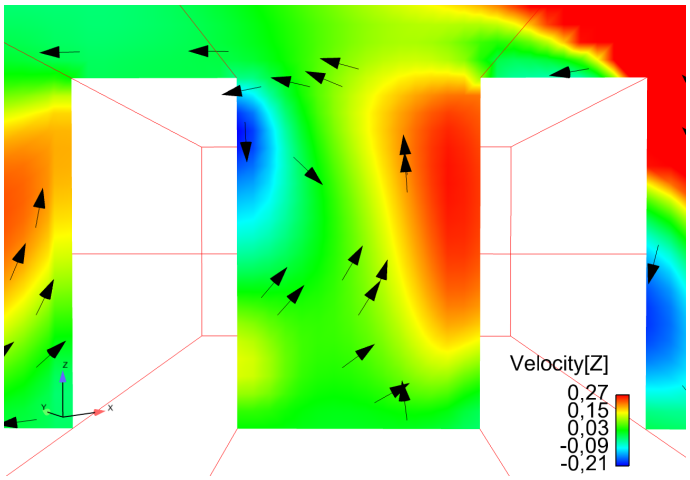
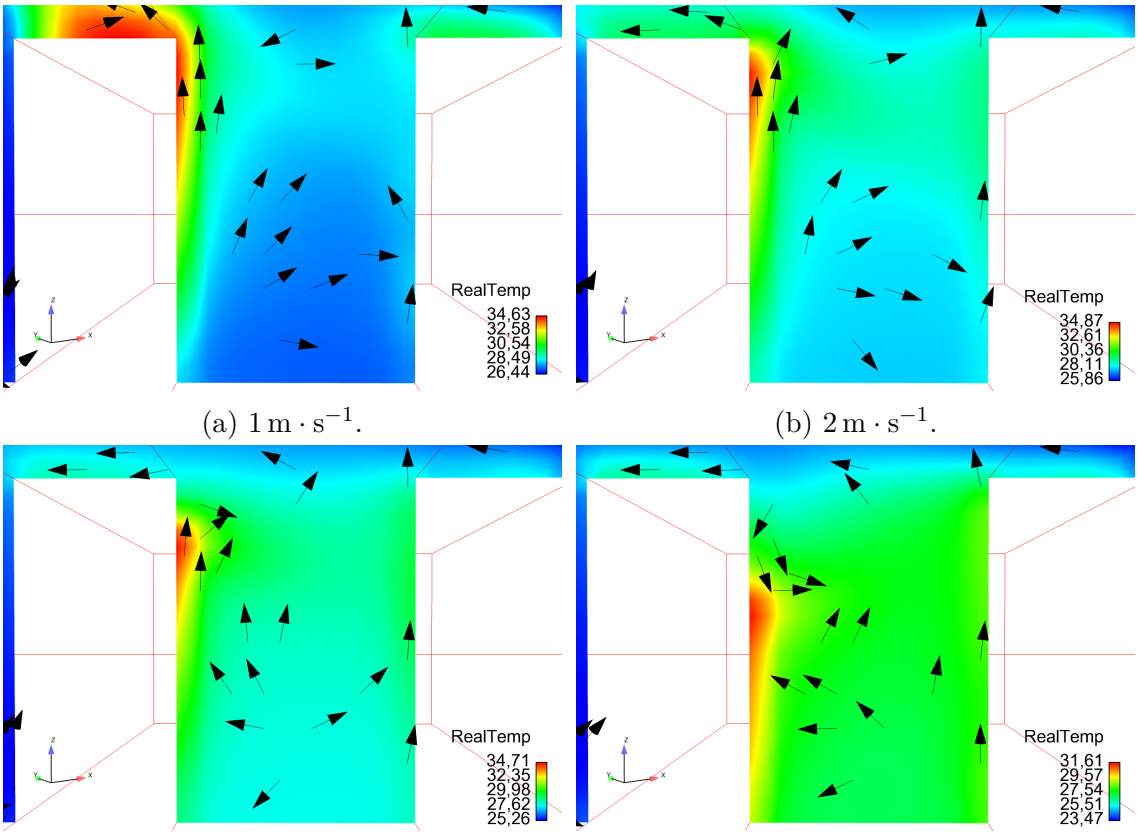


FIGURE 5.37 – Vent vertical dans le canyon pour un vent incident perpendiculaire au canyon d'une force de $2\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

Ensuite nous réalisons les simulations en imposant la température de la paroi nord-ouest du canyon à 38°C et celle de la paroi sud-est à 30°C.

Plus le vent est fort, plus la zone affectée par les effets thermiques dans le canyon est réduite, ses limites repoussées vers la paroi chauffée (Figure 5.38). Entre 1 et $2\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$, les vitesses verticales laissent voir une circulation produite par l'effet thermique qui domine avec des valeurs moins importantes pour 2 $\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ (Figure 5.39).

À 3 $\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ déjà, l'effet thermique est dominé par l'effet dynamique. Contre une vitesse verticale du vent ascendant de $0{,}48\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ pour une force de $2\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ du vent incident, on passe à une vitesse verticale inférieure à $0{,}35\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ (Figure 5.39). Le mouvement de l'air reste ascendant le long de la paroi jusqu'à plus de 4 m de



(a) $1\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. (b) $2\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

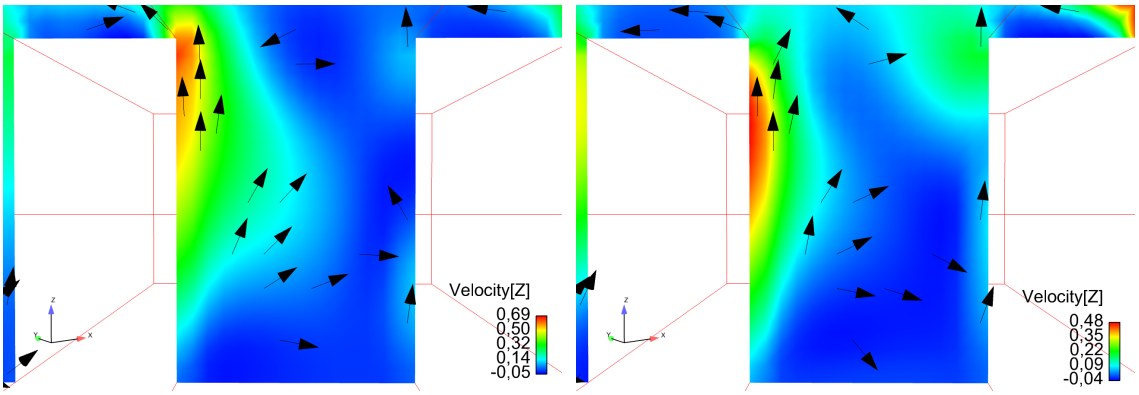
(c) $3\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. (d) $5\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

FIGURE 5.38 – Températures dans le canyon pour des vents incidents perpendiculaires aux bâtiments de forces comprises entre 1 et $5\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

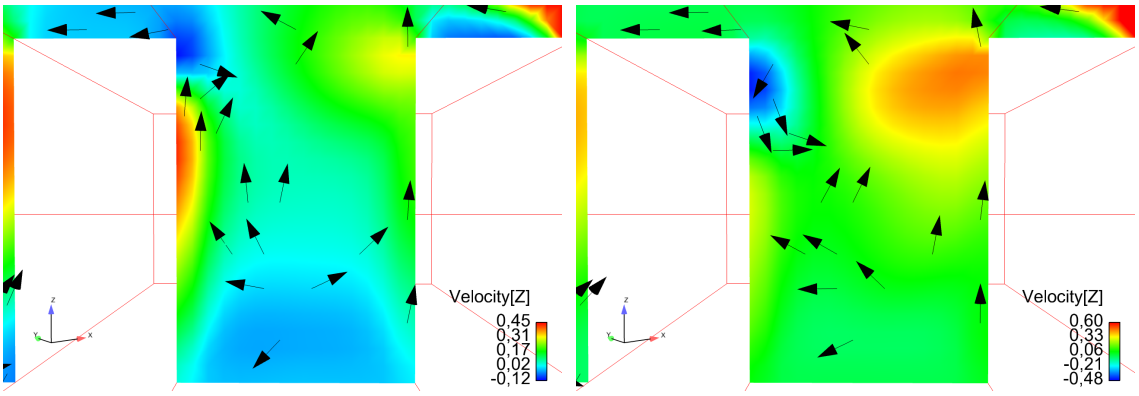
haut, il est négatif au niveau de l'arête supérieure amont du bâtiment. La vitesse du vent incident est suffisante pour que l'air s'introduise dans le canyon en dépit du flux ascendant. Il se forme alors un vortex dans cette partie supérieure du canyon.

On remarque cependant que même pour des valeurs de vitesse du vent plus importantes, on n'observe pas clairement de cellule de recirculation dans le canyon sur les représentations 2D (Figure 5.39d). L'observation des écoulements dans le canyon dans un plan horizontal révèle que le vent s'introduit entre les bâtiments à chaque extrémité, comme représenté sur la Figure 5.41. Au milieu du canyon où se trouve la coupe verticale, les deux flux inverses se rencontrent (Figure 5.40). D'après les vitesses horizontales du vent observées sur cette coupe, l'air remonte à cet endroit. Il remonte aussi à 6 m du bord du canyon.

L'entrée de l'air dans le canyon se fait avec des écoulements descendants. L'étude de la pression en entrée du canyon ne permet pas d'expliquer ce phénomène. Les vitesses des écoulements qui contournent le canyon par le haut et les côtés sont beaucoup plus importantes que les vitesses dans le canyon ; l'air qui entre dans le canyon serait donc dynamiquement poussé vers le bas par les flux plus rapides. La



(a) $1\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. (b) $2\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.



(c) $3\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. (d) $5\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

FIGURE 5.39 – Vitesses verticales dans le canyon pour des vents incidents perpendiculaires aux bâtiments de forces comprises entre 1 et $5\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

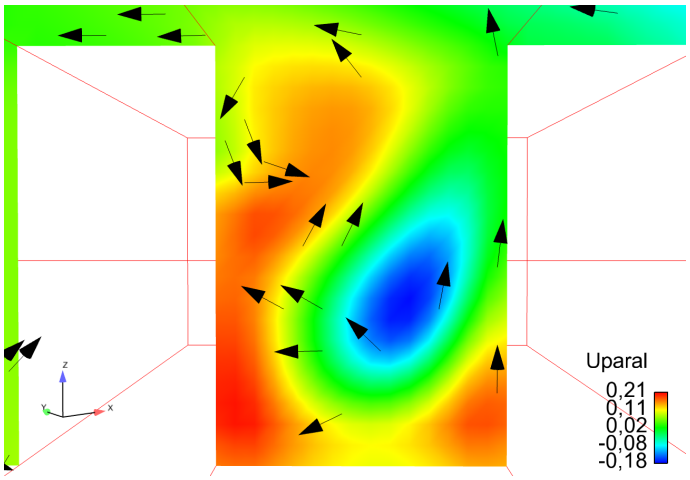


FIGURE 5.40 – Vent horizontal parallèle au canyon sur une coupe verticale pour un vent incident perpendiculaire au canyon d'une vitesse de $5\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

rencontre de ces flux engendrent un mouvement ascendant de l'air, intensifié par les températures de parois supérieures à la température de l'air.

En raison de la géométrie particulière des écoulements induits par un vent incident perpendiculaire au canyon, nous choisissons de réaliser un cas théorique également

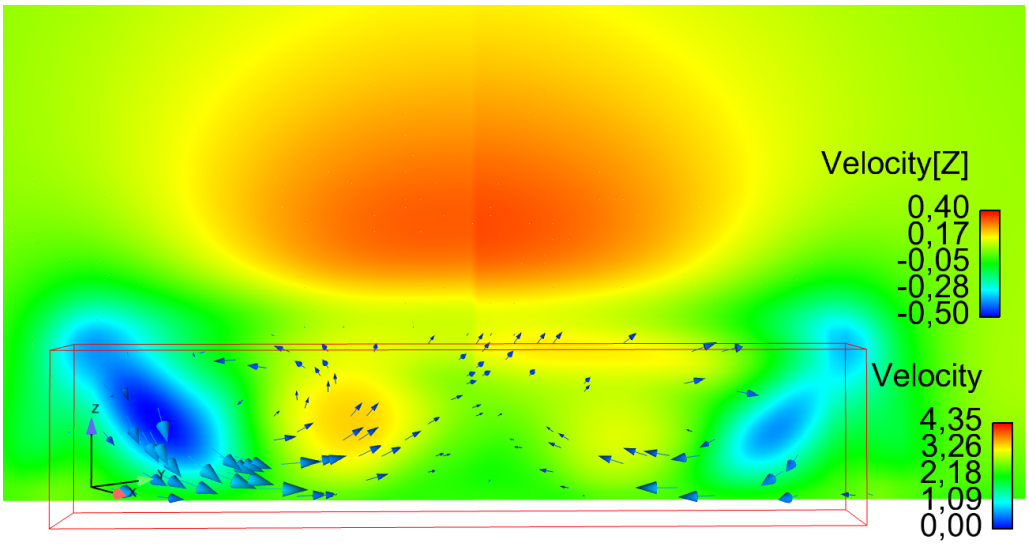


FIGURE 5.41 – Vent vertical sur une coupe parallèle aux bâtiments dans le canyon pour un vent incident perpendiculaire au canyon de $5\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

où le vent présente un angle d'incidence légèrement supérieur. L'objectif est de conserver une situation où cet angle engendre des recirculations dans le canyon qui s'apparentent à des vortex, tout en s'assurant un flux horizontal unidirectionnel entre les bâtiments.

5.5.2 Cas théorique avec un vent incident oblique

Pour cette série de simulations, nous fixons la direction du vent incident à 155° comme représenté sur la Figure 5.42. Dans cette situation, l'écoulement dans le canyon s'effectue dans une seule direction (Figure 5.43

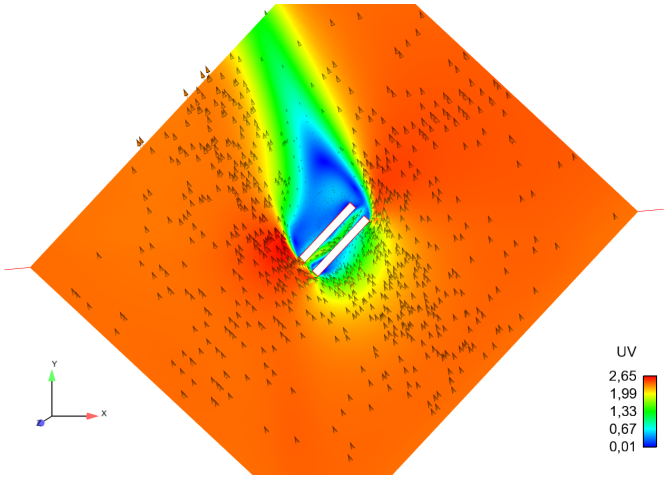


FIGURE 5.42 – Canyon de EM2PAU soumis à un vent incident à 155°.

Cette direction est suffisamment proche de la perpendiculaire pour permettre la formation d'un vortex dans le canyon lorsque les effets thermiques ne sont pas pris

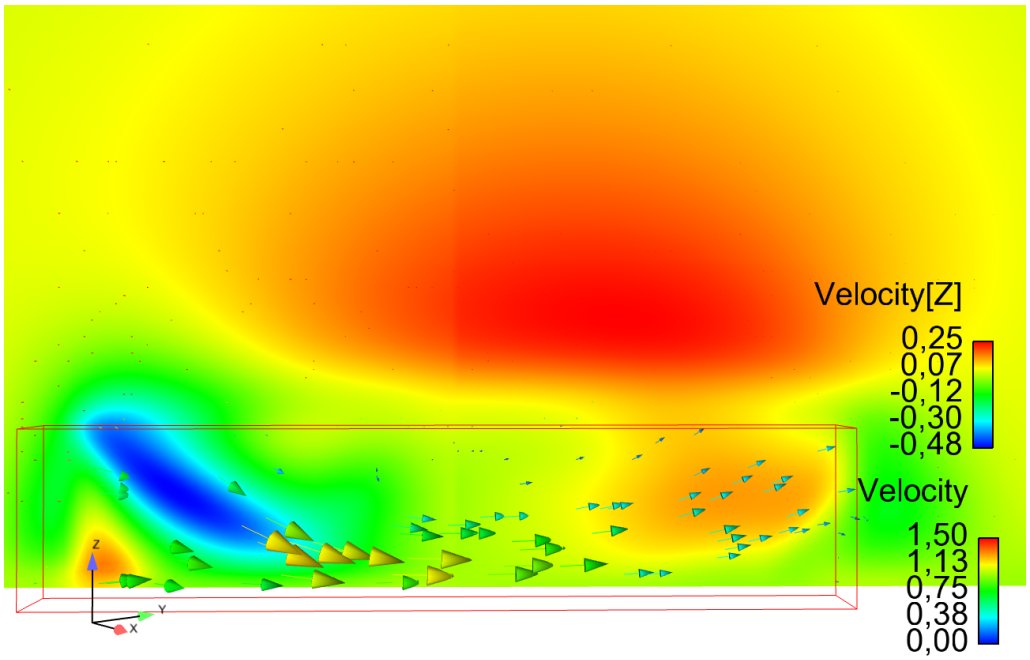


FIGURE 5.43 – Vent vertical sur une coupe parallèle aux bâtiment dans le canyon pour un vent incident à 155° de $2\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

en compte (Figure 5.44).

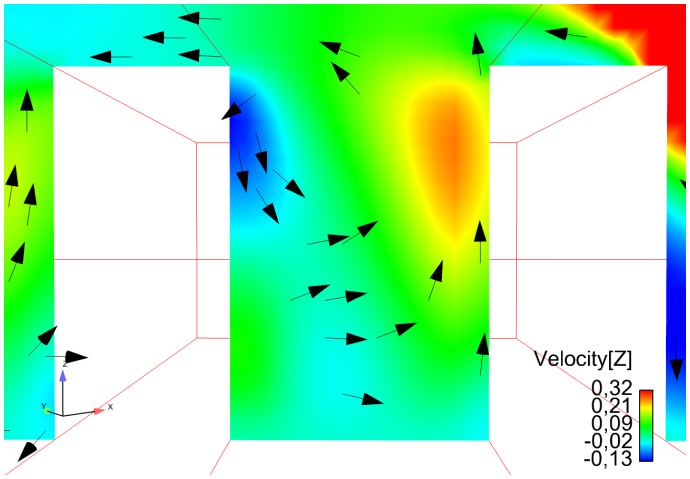
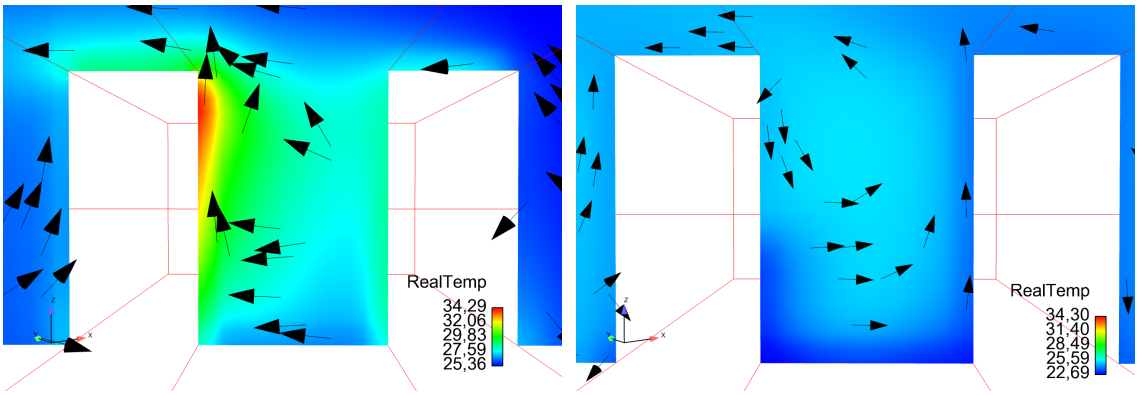


FIGURE 5.44 – Vitesse verticale du vent dans le canyon pour un vent incident présentant une force de $2\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

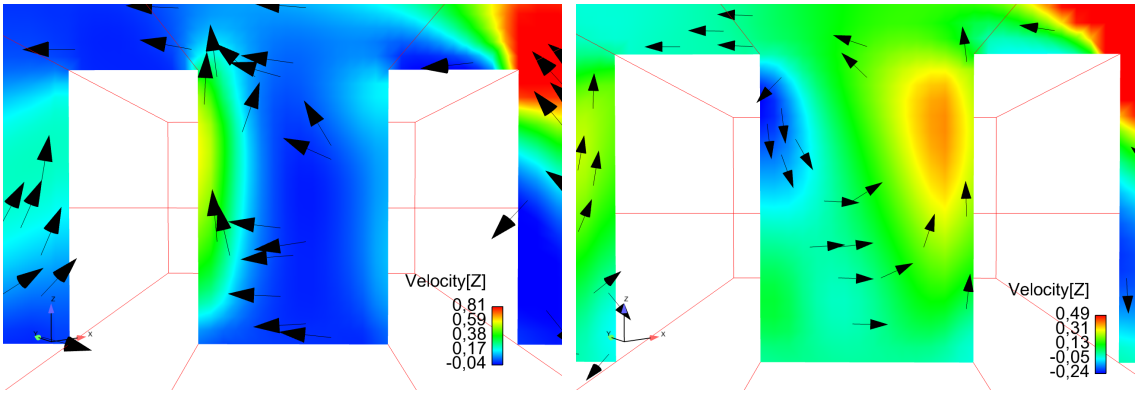
De même que précédemment, c'est pour une vitesse de vent incident supérieure à $2\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ que les effets thermiques sont annulés par les effets dynamiques. Néanmoins, dans cette configuration, nous observons dès $3\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ la mise en place d'un vortex bien défini, dû aux effets dynamiques (Figure 5.46). Nous observons de même que les températures sont beaucoup mieux réparties dans le canyon lorsque le module du vent incident est de $3\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. L'intervalle entre les valeurs extrémales de température est de moins de 3°C alors que dans les cas étudiés précédemment, il est supérieur

à 8°C. Cette répartition plus homogène des températures dans le canyon contribue sans aucun doute à limiter l'influence des effets thermiques sur les recirculations dans le canyon.



(a) $2\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. (b) $3\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

FIGURE 5.45 – Températures dans le canyon pour des vents incidents à 155° avec des forces de 2 et $3\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.



(a) $2\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. (b) $3\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

FIGURE 5.46 – Vitesses verticales dans le canyon pour des vents incidents à 155° avec des forces de 2 et $3\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

Cette configuration permet ainsi de mettre en évidence la disparition de la recirculation en vortex dans le canyon pour des valeurs de vent incident inférieures à $3\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$ provoquée par les effets thermiques. De même, la mise en place de ce vortex en présence d'échanges thermiques avec les bâtiments dépend de l'angle d'incidence du vent.

5.6 Conclusion du chapitre

À partir de l'analyse des données de EM2PAU réalisée au chapitre précédent, nous avons sélectionné quatre instants à étudier en détail. Ce choix a été orienté par les

conditions thermiques et dynamiques de ces instants qui semblent les plus propices à l'étude des effets thermiques des bâtiments.

Les simulations réalisées lors de ce travail ne reproduisent pas fidèlement les données issues lors de la campagne de mesures EM2PAU. Cependant, seules les hypothèses portant sur les températures de parois varient entre les différentes simulations réalisées pour un instant donné. Ainsi, la comparaison des simulations entre elles permet d'étudier l'influence des échanges thermiques entre les bâtiments et l'atmosphère urbaine sur les écoulements. Cette influence se manifeste aussi bien sur les valeurs des vitesses et de la turbulence. Elle modifie également sensiblement la géométrie même des recirculations.

Les températures de parois simulées par BuildSysPro donnent des valeurs supérieures à celles mesurées lors de EM2PAU. Néanmoins, le couplage est en mesure de reproduire les écoulements. Nous remettons principalement en cause la gestion des rayonnements solaires et infrarouges. Il serait intéressant de réaliser et de comparer des simulations en période nocturne afin d'observer l'impact de ce facteur. Ce travail a été réalisé dans l'optique d'ajouter le modèle radiatif de *Code_Saturne*. Lors des simulations exposées précédemment, les ombres des bâtiments ne sont pas prises en compte.

L'analyse des données de la campagne de mesures EM2PAU ne nous avait pas permis de conclure quant aux effets de la thermique des bâtiments sur les écoulements d'air dans le canyon. Néanmoins, les simulations permettent de noter des différences selon qu'on utilise ou non les échanges thermiques dans les modélisations, et ce grâce à des conditions limites identiques entre les différents calculs.

Conclusion et perspectives

Synthèse du travail

La couche limite atmosphérique est un milieu complexe fortement influencé par la surface terrestre et par les activités humaines. Lieu de rejet de polluants et de leur dispersion, c'est également le milieu où évoluent les populations humaines et les êtres vivants. Ces caractéristiques en font un élément dont les propriétés physico-chimiques influence aussi bien l'environnement que la santé humaine et dont l'étude s'avère cruciale.
En milieu urbain, la couche limite atmosphérique est affectée par les différents éléments qui constituent la canopée. Parmi ces éléments, nous nous intéressons plus particulièrement aux bâtiments dont le bilan énergétique est fortement dépendant des conditions atmosphériques.
Si de nombreux modèles numériques de climat urbain intègrent de manière moyennée l'énergétique du bâtiment afin d'affiner leurs prévisions, cet aspect est souvent appréhendé partiellement. Ces choix de modélisation permettent de garantir des temps de calculs envisageables pour des résultats de précision satisfaisante à l'échelle d'une ville.

Parallèlement, lors de l'étude du bilan énergétique d'un bâtiment, les propriétés de l'atmosphère urbaine constituent les conditions limites des modèles. Les données météorologiques sont alors généralement utilisées mais ne reflètent pas précisement les conditions observées en milieu urbain et peuvent engendrer des erreurs dans les simulations.

Ce travail s'ancre dans ce contexte où les deux disciplines tendent à se rejoindre et où l'idée de coupler des outils de dynamique des fluides atmosphérique et de modélisation du bâtiment se répand. Un tel couplage permet de réaliser des simulations capables de modéliser finement les échanges énergétiques qui s'opèrent entre les deux systèmes.
Dans cette thèse nous avons réalisé le couplage entre un logiciel de CFD atmosphérique et un modèle de bâtiment, afin d'étudier les effets de l'énergétique des bâtiments sur les écoulements urbains.
Utilisant le logiciel de CFD *Code_Saturne*, le choix d'un modèle de bâtiment qui puisse être couplé avec ce code s'est porté sur BuildSysPro.

Une méthode de couplage entre les logiciels de CFD et de bâtiment a ainsi été

développée. L'élaboration du couplage se divise en deux voir trois étapes. Dans un premier temps, il s'agit de modéliser les bâtiments du domaine étudié avec BuildSysPro. La première phase du travail de couplage consiste alors à traiter les sorties de BuildSysPro pour obtenir des matrices dans un format défini et plus aisé à manipuler par la suite.
La deuxième étape est le couplage en lui-même ou l'on met en place une méthode de communication entre les deux outils.

Afin de pouvoir valider notre modèle avec des mesures réelles, nous avons utilisé les données de la campagne de mesures EM2PAU. Réalisée à Nantes en 2011, ce dispositif présente pour particularité de fournir des données concernant aussi bien les vitesses de vent que les températures d'air et de parois dans une rue canyon modélisée par deux rangées de conteneurs.

L'analyse des mesures ne permet pas d'isoler distinctement les effets thermiques des parois de bâtiments sur les écoulements d'air en raison des effets dynamiques importants dus aux vents incidents. Afin de mieux mettre ces effets thermiques en évidence, nous choisissons des instants particuliers où les effets thermiques paraissent plus susceptibles d'influer sur les recirculations. Pour chacun d'eux, nous avons réalisé trois simulations entre lesquelles nous faisons varier les températures des parois des conteneurs. Pour la première simulation, cette température est fixée à la température de l'air : il s'agit du cas où l'on estime qu'aucun échange thermique ne se met en place entre les bâtiments et l'atmosphère. La deuxième simulation est réalisée en imposant aux parois les températures de surface qui ont été mesurées lors de EM2PAU. La troisième simulation enfin consiste à coupler le modèle de bâtiment avec *Code_Saturne*, les températures des parois sont donc calculées par BuildSysPro.

La comparaison des différentes simulations à un instant donné nous permet d'observer les effets de la thermique des bâtiments sur les écoulements d'air. Ainsi, des températures de parois plus élevées engendrent des vitesses de vent plus importantes et peuvent modifier la structure mêmes des recirculations dans le canyon.

Néanmoins, la comparaison des simulations pour lesquelles nous imposons les températures de surface mesurées lors de la campagne EM2PAU avec les résultats du couplage met en évidence une surestimation des températures par le couplage. Si cette observation nous semble liée aux flux solaires, il convient cependant de tes-

ter cette hypothèse. En dépit de ces écarts de températures, les recirculations de l'air observées avec les deux simulations sont similaires. À défaut de reproduire avec précision les températures de surface, le couplage peut toutefois reproduire les écoulements observés lorsque les températures de surface mesurées sont imposées en conditions limites de *Code_Saturne*.

Perspectives

Ce travail de thèse ouvre sur de nombreuses perspectives afin d'améliorer le code développé. Tout d'abord, les simulations réalisées ne sont pas encore satisfaisantes. Que les températures de surface soient les températures mesurées lors de EM2PAU ou bien qu'elles soient calculées par le modèle de bâtiment, les écoulements qui en résultent sont similaires. Cependant, ils ne reproduisent pas précisément les vitesses de vent mesurées. En outre, d'après la comparaison des résultats de modélisation (avec ou sans le couplage) avec les mesures, les recirculations de l'air dans le canyon ne sont pas correctement simulées. Cette observation pourrait être liée à un paramètre ou une hypothèse de modélisation dans *Code_Saturne* qui n'est pas judicieusement choisi. Il conviendrait de l'identifier pour affiner les résultats. De même, l'utilisation d'un autre modèle de turbulence telle que le Reynolds Stress Model (RSM, ou Rij dans *Code_Saturne*) pourrait être une perspective d'amélioration afin de modéliser les recirculations dans le canyon.

Ensuite, il serait intéressant d'intégrer au couplage le modèle thermo-radiatif de *Code_Saturne* développé par Milliez (2006). Ce modèle permet de prendre en considération les phénomènes radiatifs, aussi bien atmosphériques que dus aux multiples réflexions entre les surfaces du canyon. Il présente donc un intérêt notable dans le cadre de l'étude d'une rue canyon ou, plus largement, d'un quartier urbain comme l'a mis en évidence Qu (2011).
Le modèle de bâtiment peut également être complexifié. L'usage habituel de BuildSysPro étant le calcul de la consommation énergétique du bâtiment, il est possible de calculer les rejets de chaleur issue de la ventilation ou de la climatisation.

Enfin, nous pouvons envisager le couplage d'études entre la qualité de l'air extérieur et celle de l'air intérieur des bâtiments. Ce travail prendrait en compte les transferts qui peuvent avoir lieu à travers les parois, les ouvertures et les systèmes de ventilation des bâtiments, ainsi que les sources de polluants internes.

Il manque encore à cette étude le suivi de l'évolution temporelle des températures et des écoulements. Une fois que les éléments cités ci-dessus seront pris en compte,

il serait donc pertinent d'étudier le couplage sur une période de plusieurs jours afin d'analyser sa capacité à modéliser les températures et les écoulements avec pour seules conditions d'entrée les profils météorologiques.

Jusque ici nous avons travaillé sur un modèle simple de rue canyon. Pour l'étude d'un quartier urbain, l'élaboration des matrices de chaque bâtiment, leur traitement et leurs échanges de données avec *Code_Saturne* pourraient s'avérer fastidieux. Cependant, le laboratoire EnerBat de EDF R&D travaille sur un projet complexe de modélisation d'un quartier urbain constitué de différents bâtiments et où les masques solaires seront inclus dans l'assemblage de ces bâtiments (Plessis et al. (2006), Bouquerel et al. (2015)). L'utilisation de ce futur programme permettrait un modèle plus complet et aisément applicable à l'échelle de tout un quartier. L'outil qui résultera de ce travail serait donc à envisager pour modéliser les bâtiments d'un quartier urbain. Le couplage avec cette utilisation de BuildSysPro serait appréciable pour l'élaboration d'un outil destiné à modéliser in fine des zones urbaines plus complexes que la rue canyon sur laquelle porte notre étude.
L'ajout de la modélisation d'autres éléments dans les simulations, tels que la végétation ou l'impact des polluants atmosphériques, permettrait alors d'aboutir à un logiciel de simulation du microclimat urbain relativement complet.

Annexe A

Calculs de physique atmosphérique de la VDI

Profils verticaux de vitesse de vent et de température

Pour la suite nous posons $\zeta = \dfrac{z}{L_{MO}}$. L'atmosphère est stable quand $\zeta > 0$ et instable si $\zeta < 0$.

Nous nous appuyons sur la théorie de similarité de Monin-Obukhov (Stull, 1988) qui établit que :

$$\frac{\kappa z}{u_*}\frac{\partial \overline{u}}{\partial z} = \phi_m(\zeta) \tag{A.1}$$

$$\frac{\kappa z}{\theta_*}\frac{\partial \overline{\theta}}{\partial z} = \phi_h(\zeta) \tag{A.2}$$

avec

- κ la constante de Karman, entre 0,35 et 0,41 ;
- $\overline{u}$ la vitesse horizontale ;
- u_* la vitesse de frottement ;
- $\overline{\theta}$ la température potentielle ;
- ϕ_m le cisaillement du vent (sans dimension) ;
- ϕ_h lapse rate (dimensionless).

D'autre part, ϕ_m et ϕ_h peuvent s'exprimer en fonction de ζ. Pour chacune de ces fonctions, on a cinq expressions différentes selon la stabilité de l'atmosphère, dont

l'intégration permettra ensuite de calculer les profils de vent et de température (Stull, 1988).

$$\phi_{m(\zeta)} = \begin{cases} (1-15\zeta)^{-\frac{1}{4}} & \text{pour } \zeta < 0 \\ 1 & \text{pour } \zeta = z = 0 \\ 1+5\zeta & \text{pour } \zeta \in]0;0,5[\\ 8-4,25\dfrac{1}{\zeta}+\left(\dfrac{1}{\zeta}\right)^2 & \text{pour } \zeta \in [0,5;10[\\ 0,7585\zeta & \text{pour } \zeta \geq 10 \end{cases} \tag{A.3}$$

donne après intégration entre la longueur de rugosité z_0 et l'altitude z :

$$\overline{u}_{(z)} = \begin{cases} \dfrac{u_*}{\kappa}\left[\ln\dfrac{z}{z_0} - 2\ln\dfrac{1+X}{1+X_0} - \ln\dfrac{1+X^2}{1+X_0^2} + 2\arctan X - 2\arctan X_0\right] & \text{pour } \zeta < 0 \\ \dfrac{u_*}{\kappa} ln\dfrac{z}{z_0} & \text{pour } \zeta = z = 0 \\ \dfrac{u_*}{\kappa}\left[\ln\dfrac{z}{z_0} + 5\dfrac{z-z_0}{L_{MO}}\right] & \text{pour } \zeta \in [0;0,5[\\ \dfrac{u_*}{\kappa}\left[8\ln\dfrac{2z}{L_{MO}} + 4,25\left(\dfrac{z}{L_{MO}}\right)^{-1} - 0,5\left(\dfrac{z}{L_{MO}}\right)^{-2} - \ln\dfrac{2z_0}{L_{MO}} - 5\dfrac{z_0}{L_{MO}} - 4\right] & \text{pour } \zeta \in [0,5;1[\\ \dfrac{u_*}{\kappa}\left[0,7585\dfrac{z}{L_{MO}} + 8\ln 20 - 11,165 - \ln\dfrac{2z_0}{L_{MO}} - 5\dfrac{z_0}{L_{MO}}\right] & \text{pour } \zeta \geq 10 \end{cases} \tag{A.4}$$

en posant :
$X = \left(1-15\dfrac{z}{L_{MO}}\right)^{-\frac{1}{4}}$ pour $z \geq z_0$ et $X_0 = \left(1-15\dfrac{z_0}{L_{MO}}\right)^{-\frac{1}{4}}$.

On remarquera qu'en stratification thermique neutre on a le profil logarithmique :

$$\overline{u}_{(z)} = \frac{u_*}{\kappa}\ln\frac{z}{z_0}$$

Quant aux températures, on a :

$$\phi_h(\zeta) = \begin{cases} 0,74(1-9\zeta)^{-\frac{1}{2}} & \text{pour } \zeta < 0 \\ 1 & \text{pour } \zeta = 0 \\ 0,74 + 5\zeta & \text{pour } \zeta > 0 \end{cases} \tag{A.5}$$

ce qui donne après intégration entre la rugosité thermique z_{0_T} et l'altitude z :

$$\overline{\theta}_{(z)} = \begin{cases} T_0 - \dfrac{g}{c_p}z + \dfrac{u_*^2(z)}{\kappa g L_{MO}} T_0 \left[0,74 ln \dfrac{z}{z_{0_T}} + 2ln \dfrac{1+Y}{1-Y_0}\right] & \text{pour } \zeta < 0 \\ T_0 - \dfrac{g}{c_p}z & \text{pour } \zeta = 0 \\ T_0 - \dfrac{g}{c_p}z + \dfrac{u_*^2(z)}{\kappa g L_{MO}} T_0 \left[0,74 ln \dfrac{z}{z_{0_T}} + 5\dfrac{z - z_{0_T}}{L_{MO}}\right] & \text{pour } \zeta > 0 \end{cases} \tag{A.6}$$

en posant :
$Y = 0,74\left(1 - 9\dfrac{z}{L_{MO}}\right)^{-\frac{1}{2}}$ pour $z \geq z_0$ et $Y_0 = 0,74\left(1 - 9\dfrac{z_0}{L_{MO}}\right)^{-\frac{1}{2}}$.

Kerschgens et al. (2000) donnent les expressions des déviations standard des composantes du vent, c'est-à-dire des écarts-types des composantes du vents issus des effets de la turbulence :

— pour une stratification instable ou neutre de l'atmosphère, on choisit plutôt une paramétrisation de la tubulence fondée sur les paramètres de couche limite u_*, w_* et z_i :

$$\begin{aligned} \sigma_u &= \left[(2,4u_*)^3 + (0.59w_*)^3\right]^{\frac{1}{3}} \exp\left(-\frac{z}{z_i}\right) \\ \sigma_v &= \left[(1,8u_*)^3 + (0.59w_*)^3\right]^{\frac{1}{3}} \exp\left(-\frac{z}{z_i}\right) \\ \sigma_w &= \left[\left(1,3u_* \exp\left(-\frac{z}{z_i}\right)\right)^3 + \left(1,3\left(\frac{z}{z_i}\right)^{\frac{1}{3}}\left(1 - 0,8\frac{z}{z_i}\right)w_*\right)^3\right]^{\frac{1}{3}} \end{aligned} \tag{A.7}$$

— pour une stratification stable :

$$\sigma_u = 2,4u_* \exp\left(-\frac{z}{z_i}\right)$$

$$\sigma_v = 1,8u_* \exp\left(-\frac{z}{z_i}\right) \tag{A.8}$$

$$\sigma_w = 1,3u_* \exp\left(-\frac{z}{z_i}\right)$$

Les forces mécaniques et les forces thermiques ascendantes engendrent de la turbulence dans la couche limite atmosphérique. On peut exprimer l'énergie cinétique turbulente e en fonction des variances des composantes du vent $\overline{u'^2}$, $\overline{v'^2}$ et $\overline{w'^2}$ (Kerschgens et al., 2000) :

$$\overline{e} = \frac{1}{2}\left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}\right) \tag{A.9}$$

Conditions neutres ou instables :

$$\varepsilon = \max\left[\frac{u_*^3}{\kappa z}\left[\left(1-\frac{z}{z_i}\right)^2 + 2,5\kappa\frac{z}{z_1}\right] + \frac{w_*^3}{z_i}\left[1,5 - 1,3\left(\frac{z}{z_i}\right)^{\frac{1}{3}}\right], \frac{u_*^3}{\kappa z}\right] \tag{A.10}$$

Conditions stables :

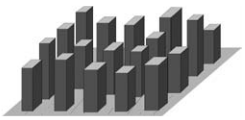
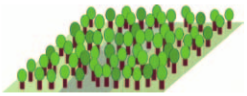
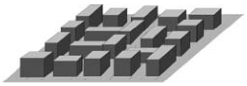
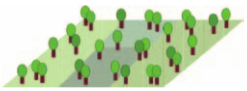
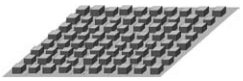
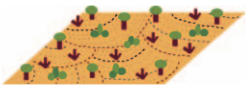
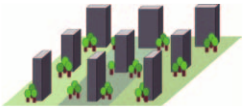
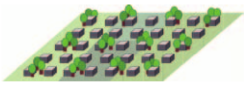
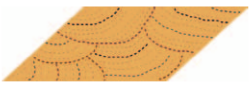
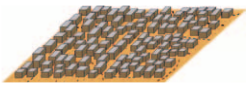
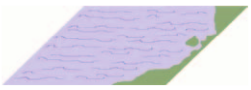
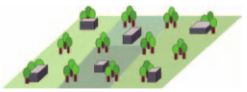
$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z}\left(\Phi_m - \frac{z}{L_{MO}}\right) \tag{A.11}$$

avec $\Phi_m = 1 + 5\dfrac{z}{L_{MO}}$ dans ces conditions.

Annexe B

Local Climate zone LCZ (Stewart and Oke, 2012)

Table 2. Abridged definitions for local climate zones (see electronic supplement for photographs, surface property values, and full definitions). LCZs 1–9 correspond to Oke's (2004) urban climate zones.

Built types	Definition	Land cover types	Definition
1. Compact high-rise 	Dense mix of tall buildings to tens of stories. Few or no trees. Land cover mostly paved. Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	A. Dense trees 	Heavily wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
2. Compact midrise 	Dense mix of midrise buildings (3–9 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	B. Scattered trees 	Lightly wooded landscape of deciduous and/or evergreen trees. Land cover mostly pervious (low plants). Zone function is natural forest, tree cultivation, or urban park.
3. Compact low-rise 	Dense mix of low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Stone, brick, tile, and concrete construction materials.	C. Bush, scrub 	Open arrangement of bushes, shrubs, and short, woody trees. Land cover mostly pervious (bare soil or sand). Zone function is natural scrubland or agriculture.
4. Open high-rise 	Open arrangement of tall buildings to tens of stories. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	D. Low plants 	Featureless landscape of grass or herbaceous plants/crops. Few or no trees. Zone function is natural grassland, agriculture, or urban park.
5. Open midrise 	Open arrangement of midrise buildings (3–9 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Concrete, steel, stone, and glass construction materials.	E. Bare rock or paved 	Featureless landscape of rock or paved cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert (rock) or urban transportation.
6. Open low-rise 	Open arrangement of low-rise buildings (1–3 stories). Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees). Wood, brick, stone, tile, and concrete construction materials.	F. Bare soil or sand 	Featureless landscape of soil or sand cover. Few or no trees or plants. Zone function is natural desert or agriculture.
7. Lightweight low-rise 	Dense mix of single-story buildings. Few or no trees. Land cover mostly hard-packed. Lightweight construction materials (e.g., wood, thatch, corrugated metal).	G. Water 	Large, open water bodies such as seas and lakes, or small bodies such as rivers, reservoirs, and lagoons.
8. Large low-rise 	Open arrangement of large low-rise buildings (1–3 stories). Few or no trees. Land cover mostly paved. Steel, concrete, metal, and stone construction materials.	**VARIABLE LAND COVER PROPERTIES**	
		Variable or ephemeral land cover properties that change significantly with synoptic weather patterns, agricultural practices, and/or seasonal cycles.	
9. Sparsely built 	Sparse arrangement of small or medium-sized buildings in a natural setting. Abundance of pervious land cover (low plants, scattered trees).	*b. bare trees*	Leafless deciduous trees (e.g., winter). Increased sky view factor. Reduced albedo.
		s. snow cover	Snow cover >10 cm in depth. Low admittance. High albedo.
10. Heavy industry 	Low-rise and midrise industrial structures (towers, tanks, stacks). Few or no trees. Land cover mostly paved or hard-packed. Metal, steel, and concrete construction materials.	*d. dry ground*	Parched soil. Low admittance. Large Bowen ratio. Increased albedo.
		w. wet ground	Waterlogged soil. High admittance. Small Bowen ratio. Reduced albedo.

Annexe C

Structure détaillée du couplage

C.1 Initialisation du couplage

C.1.1 Étapes préalables

On commence par définir les bâtiments avec BuildSysPro pour récupérer les matrices descriptives.
On crée le maillage du domaine étudié et à préparer les scripts de *Code_Saturne* pour le couplage (entrées dans *cs_user_boundary_conditions* et sorties dans *cs_user_extra_parameters*).

C.1.2 Définition des paramètres utilisés par la suite

Un certain nombre de paramètres sont à rentrer manuellement afin que la suite du programme puisse s'exécuter. Il s'agit aussi bien du chemin d'accès à la matrice que des noms des variables utilisées dans la matrice . L'objectif de cette étape est de ne pas imposer trop de contraintes lors de la création de la matrice sous BuildSysPro et ainsi de pouvoir aisément travailler sur des matrices déjà existantes : on définit en début de code les noms des états, des entrées et des sorties du système d'équations ou bien la température de consigne dans la fonction *Main_matrices.variablesBSP*.

C.1.3 Lecture générale des matrices

On procède ensuite à l'extraction des matrices A, B, C et D et du nombre d'états du système. À partir de là on peut lire directement les autres paramètres dans les matrices, avec notamment le nombre d'entrées et de sorties et la liste des noms des variables de T et U. Ceci est réalisé dans la fonction *fns_matrices.extraction*.

Puis on lit ou on déduit des données propres à la structure du bâtiment modélisé, notamment le nombre de zones thermiques du système, le nombre de parois de chaque zone et même le nombre de couches considérées dans chaque paroi. De même on établit la liste des sollicitations, identifiées grâce à la définition des paramètres réalisée lors de l'étape précédente. On recherche également quelles surfaces seront en contact avec l'air extérieur, et donc auxquelles il faudra appliquer les sorties des *Code_Saturne* en conditions limites, et quelles zones sont en contact avec le sol (dans notre cas, on identifie ici les conteneurs représentant le rez-de-chaussée). BuildSysPro décompose également le sol en plusieurs couches, nous trouvons de même ce nombre en analysant la matrice. Ensuite nous recherchons et mettons en forme les paramètres de la matrice qui seront nécessaires pour le couplage.
Toutes ces opérations sont réalisées par les fonctions *fns_matrices.donnees_matrices* et *fns_matrices.parametres_entrees*.

C.1.4 Repérage des positions des variables dans les matrices T, U et Y

Les matrices BuildSysPro ne font pas systématiquement apparaître les paramètres dans un ordre prédéfini. Ceux-ci s'organisent en fonction de leur ordre de définition lors de l'élaboration du modèle, d'où le besoin de repérer leur localisation dans les matrices.
Les fonctions *fns_matrices_plus.indicesT*, *indicesU* et *indicesY* génèrent des dictionnaires Python associant au nom de variable (clef) l'indice dans la matrice (valeur). À partir de là, l'extraction des valeurs à communiquer à *Code_Saturne* et l'insertion de celles calculées par le logiciel de CFD deviennent beaucoup plus simples.

C.1.5 Création des fichiers temporaires

Nous profitons de cette phase d'initialisation des calculs pour créer les fichiers FIFO par lesquels *Code_Saturne* et BuildSysPro communiquent. Ces fichiers ont pour spécificité de bloquer le programme qui les écrit tant qu'ils n'ont pas été lus par un autre programme, et inversement. Ceci permet de maintenir les deux logiciels couplés en tout instant à la même itération, aucun ne peut prendre le pas sur l'autre.
Nous choisissons d'avoir un fichier pour chaque modèle et à chaque pas de temps. Ainsi chaque fichier ne sera écrit que par un seul des deux modèles et lu par le deuxième une unique fois : aucun décalage n'est possible entre les itérations de

chaque code.
Pour des raisons de rapidité de calcul, nous générons également autant de fichiers pour une itération donnée qu'il y a de processeurs actifs dans *Code_Saturne*. De cette façon la dynamique des fluides peut être calculée en multi-processeur sans troubler le couplage. Le modèle de bâtiment sommera donc les données des différents fichiers afin d'avoir accès aux valeurs finales des variables. Nous précisons ici que par défaut Python fonctionne en mono-processeur, ce que nous n'avons pas modifié.

C.1.6 Bilan de la phase d'initialisation

La lecture et l'exploitation complète des matrices demande à l'utilisateur de rentrer au préalable certaines informations, ce qui peut s'avérer fastidieux selon la structure du modèle et le nombre de paramètres impliqués. Cependant cette démarche nous permet par la suite de réaliser le couplage sans être bloqué dans notre démarche par des incertitudes. Elle peut en outre gérer un grand nombre de matrices aux structures différentes qui auront pu être élaborées avec un minimum de contraintes dans la perspective du couplage.

C.2 La boucle du couplage

On réalise le couplage à proprement parler en lançant les deux modèles en background.

C.2.1 Résolution des équations du modèle de bâtiment

Nous n'avons pas forcément recours au calcul du modèle de bâtiment à chaque itération. Dans notre cas d'étude nous avons des vitesses de vent relativement faibles, nous pouvons choisir de réaliser les calculs toutes les demies-heures ou toutes les heures. Avant chaque calcul, le script lit le fichier écrit par *Code_Saturne* et modifie avec ses données le vecteur U qui sera utilisé pour la suite.
Nous avions tout d'abord comparé deux méthodes de résolution dont les résultats se sont révélés identiques. La première est la fonction odeint de scipy.integrate qui permet de résoudre notamment des systèmes d'équations différentielles. La deuxième est une fonction établie selon la méthode implicite, appelée resol et qui nous permet une plus grande flexibilité sur les données d'entrées du système. À partir de l'équation $\dot{T} = AT + BU$ on trouve l'expression temporelle de T : $T = (T_0 + A^{-1}BU)e^{At} - A^{-1}BU$ sur laquelle s'appuie notre résolution. Les deux

méthodes donnant les mêmes résultats, nous gardons la fonction resol pour le couplage. Les valeurs obtenues pour chaque variable sont alors écrites dans le fichier FIFO destiné à *Code_Saturne*.

C.2.2 Le couplage dans *Code_Saturne*

Le couplage dans *Code_Saturne* est réalisé avec pour porte d'entrée, la routine *cs_user_boundary_conditions*, et pour porte de sortie, *cs_user_extra_operations*. Les calculs de dynamique des fluides sont réalisés entre ces deux étapes.

cs_user_boundary_conditions

Le fichier FIFO provenant des scripts Python est ouvert dans cette fonction qui le lit ligne par ligne. Les températures pour chaque face sont alors assignées aux bords du domaine qui sont distingués grâce à leurs couleurs, définies dès la création du maillage.

cs_user_extra_operations

On récupère pour chaque facette d'une couleur donnée les paramètres physiques de la cellule de bord. Après avoir moyenné sur l'ensemble des facettes d'une couleur donnée, *Code_Saturne* écrit le résultat dans le fichier destiné au script Python.

C.2.3 Bilan

L'utilisation des fichiers FIFO est sans doute une spécificité de ce couplage entre un logiciel de CFD et un modèle de bâtiment. Déjà mise en œuvre dans le cadre d'un travail antérieur portant sur le couplage entre *Code_Saturne* et le code de thermique SYRTHES, elle avait pu faire ses preuves dans ce contexte. Elle est particulièrement adaptée à notre cas en raison du contrôle mutuel qu'elle implique entre les logiciels et elle permet de réaliser des calculs en multi-processing.

Annexe D

Liste des logiciels utilisés

Logiciel de CAO et de maillage
Salome 7.2.0 (CEA, EDF R&D, Open Cascade ; open source) : création du domaine et de son maillage.

Logiciel de CFD
Code_Saturne 2.0 puis 3.0.5 (EDF R&D, CEREA ; open source), interface utilisateur et routines en Fortran 90 : simulations de dynamique des fluides.

Modèle de bâtiment
BuildSysPro (EDF R&D ; open source) sous Dymola 2014 (Dassault Systemes) : création des matrices descriptives du bâtiment ;
Programmes écrits en Python 2.6 pour traiter et résoudre les matrices.

Post-traitement
Ensight 9.0.0 et 10.0 (CEI Inc.) : visualisation 3D des simulations ;
Python 2.6 : post-traitement, graphiques ;

Traitement d'images
The Gimp 2.6 (open source) ;
Inkscape 0.91 (open source).

Table des figures

1.1 Représentation schématique des couches de l'atmosphère. 9
1.2 Évolution de la couche limite atmosphérique au cours du cycle diurne. 10
1.3 Profil horizontal des températures lors d'un phénomène d'îlot de chaleur urbain. 14
1.4 Représentation schématique du refroidissement nocturne en zones rurale et urbaine. 17
1.5 Bilans énergétiques diurne et nocturne d'une surface rurale. 24
1.6 Bilans énergétiques diurne et nocturne d'une surface urbaine. 25
1.7 Piégeage radiatif entre trois surfaces urbaines. 26
1.8 Effets dynamiques et thermiques des arbres dans la canopée. 28
1.9 Effets des arbres sur l'écoulement du vent dans la canopée. 29
1.10 Représentation schématique des écoulements d'air autour d'un bâtiment haut. 32
1.11 Écoulement du vent autour d'un bâtiment cubique en coupe verticale et avec incidence perpendiculaire. 32
1.12 Écoulement du vent autour de bâtiments de formes rectangulaires, en U ou en L et avec différentes incidences de vent. 33
1.13 Les trois régimes d'écoulement : rugosité isolée, interférence des sillages et recouvrement des flux. 34
1.14 Quelques effets aérodynamiques types. 34
1.15 Schématisation des différents échanges énergétiques entre un bâtiment et son environnement. 35
1.16 Effet de la conduction dans la paroi du bâtiment sur le milieu intérieur. 38
1.17 Infiltrations d'air extérieur dans un bâtiment au niveau d'une menuiserie. 39

2.1 Représentation d'une canopée urbaine et d'un modèle énergétique de bâtiment modélisés par réseau de résistances et capacitances. 46
2.2 Représentation d'une paroi homogène. 52
2.3 Modélisation des composants d'un bâtiment monozone dans BuildSysPro. 61
2.4 Modélisation de la régulation thermique du bâtiment dans BuildSysPro. 62
2.5 Modèle de paroi utilisé dans SOLENE. 66

3.1 Représentation schématique d'une cellule de bord dans *Code_Saturne* (EDF R&D (2012)). 75
3.2 Représentation schématique des modèles de paroi simple et de Force Restore. 77
3.3 Évolution de la température extérieure sur 24h simulée par les différents modèles. 79
3.4 Données échangées par *Code_Saturne* et BuildSysPro lors du couplage. 81
3.5 Modèles BuildSysPro de bâtiments soumis aux rayonnements, à la température de l'air extérieur et à la température du sol. 82
3.6 Simulation par les matrices issues de BuildSysPro de l'évolution des températures de surfaces extérieures pour un bâtiment monozone. . . 84
3.7 Schéma du couplage entre *Code_Saturne* et BuildSysPro. 87

4.1 Vue aérienne du site de EM2PAU. 92
4.2 Dimensions des bâtiments de EM2PAU. 92
4.3 Localisation des thermocouples dans le canyon 93
4.4 Distribution des anémomètres dans le canyon. 94
4.5 Distribution des pyrgéomètres et pyranomètre dans EM2PAU. 95
4.6 Les bâtiments dans EM2PAU 95
4.7 Températures mesurées dans le canyon de EM2PAU. 96
4.8 Évolution de la température de l'air extérieur et des flux solaires et infrarouges pendant EM2PAU. 96
4.9 Localisation des anémomètres soniques dans le canyon et code couleur utilisé. 97
4.10 Évolution du vent parallèle à l'axe du canyon de EM2PAU. 98

4.11 Évolution du vent perpendiculaire à l'axe du canyon de EM2PAU. . . 99

4.12 Suivi de la vitesse verticale du vent au mât et dans le canyon lors de EM2PAU. 99

4.13 Évolution temporelle de la direction du vent de référence lors de EM2PAU. 101

4.14 Évolution temporelle de la composante verticale de la vitesse du vent dans le canyon de EM2PAU. 101

4.15 Représentation de la convection engendrée dynamiquement dans le canyon par un vent provenant du côté Nord-Ouest du canyon. 102

4.16 Direction du vent mesurée par les soniques du canyon de EM2PAU. . 102

4.17 Méthode de calcul de l'angle δ. 103

4.18 Composante verticale de la vitesse du vent mesuré par les soniques S1 et S3 en fonction de δ. 103

4.19 Carte verticale des températures mesurées dans le canyon. 104

4.20 Évolution des températures de parois, du sol et de l'air dans le canyon de EM2PAU. 104

4.21 Composante verticale du vent mesuré par les anémomètres placés à 4 m d'altitude dans le canyon filtrée selon δ en fonction de l'heure de la journée. 106

4.22 Différences entre le jour et la nuit de la vitesse verticale dans le canyon et du module de la vitesse du vent du référence. 106

4.23 Vitesse verticale du vent mesurée aux soniques S1 et S3 en fonction du vent de référence. 107

4.24 Vitesse relative du vent en fonction de l'heure pour les soniques S1 et S3. 108

4.25 Évolution temporelle de la vitesse relative du vent pour les soniques S1 et S3. 109

4.26 Écart des températures de parois à la moyenne de toutes les températures de paroi. 110

4.27 Écarts de températures au niveau des parois et dans le canyon par rapport à la moyenne des températures de parois. 110

4.28 Vitesse verticale relative du vent en fonction des écarts de température pour les différents soniques du canyon. 111

5.1 Rugosité du sol autour des conteneurs de EM2PAU. 116

5.2 Géométrie du domaine modélisé autour des conteneurs de EM2PAU avant maillage. 116

5.3 Maillage du sol respectivement pour les maillages rectangulaire et construit sur les diagonales. 117

5.4 Maillage du sol pour le maillage tétrahédrique. 117

5.5 Résultats obtenus pour la simulation du 16h le 06/04/2011 pour les différents maillages. 118

5.6 Comparaison des résultats obtenus avec différentes valeurs de rugosités. 119

5.7 Convergence des composantes du vent sur 800 itérations pour la simulation du 16h le 06/04/2011. 120

5.8 Direction du vent aux instants étudiés. 123

5.9 Température de l'air dans le sillage du canyon à 2m de hauteur avec couplage. 126

5.10 Répartition inhomogène de la température dans le canyon et composante de la vitesse du vent perpendiculaire au canyon obtenues avec le couplage. 126

5.11 Températures hétérogènes et vitesses des écoulements dans le canyon obtenues avec le couplage. 127

5.12 Champs d'énergie cinétique turbulente obtenus sans échange thermique et avec le couplage. 128

5.13 Influence des températures de paroi du canyon sur la vitesse horizontale dans le sillage du canyon - simulations sans échange thermique et avec le couplage. 129

5.14 Vitesse verticale dans et en aval du canyon lors des simulations obtenus sans échange thermique et avec le couplage. 130

5.15 Vitesse perpendiculaire au canyon lors des simulations obtenus sans échange thermique et avec le couplage. 130

5.16 Vent horizontal perpendiculaire au canyon et vent vertical à 10h le 5 avril 2011 sans effet thermique - TAIR-0510. 131

5.17 Vent horizontal perpendiculaire au canyon et vent vertical obtenus avec le couplage à 10h le 5 avril 2011 - TBSP-0510. 131

5.18 Représentation schématique des écoulements observés dans le canyon sans et avec effets thermiques à 10h le 5 avril 2011. 132

5.19 Vent horizontal perpendiculaire au canyon et vent vertical obtenus avec le couplage à 17h le 6 avril 2011 - TBSP-0617. 132

5.20 Écoulements horizontaux de l'air dans le canyon sans échange thermique et avec le couplage. 133

5.21 Écoulements parallèles au canyon entre les bâtiments sans échange thermique et avec le couplage. 133

5.22 Énergie cinétique turbulente dans le canyon sans échange thermique et avec le couplage. 134

5.23 Vitesse verticale du vent et températures des parois des bâtiments simulées par le modèle couplé. 134

5.24 Vitesse horizontale du vent dans le canyon sans échange thermique et avec le couplage. 135

5.25 Vitesse horizontale du vent dans le canyon sans échange thermique et avec le couplage à 16h le 06/04/2011. 135

5.26 Températures proches des parois du canyon avec les températures mesurées et avec le couplage à 10h le 5 avril 2011. 137

5.27 Températures proches des surfaces du canyon aux quatre instants étudiés calculées par le couplage et avec les températures de surfaces imposées aux valeurs mesurées. 138

5.28 Vitesse horizontale du vent dans le sillage du canyon avec les températures mesurées et avec le couplage. 140

5.29 Vitesse horizontale du vent dans le canyon avec les températures mesurées et avec le couplage. 140

5.30 Vitesses verticales du vent avec les températures mesurées et avec le couplage. 141

5.31 Températures dans le canyon avec les températures mesurées et avec le couplage. 141

5.32 Températures sur des coupes horizontales dans le canyon obtenues avec le couplage à 16h le 6 avril 2011 - TBSP-0616. 142

5.33 Vitesse horizontale dans le canyon obtenue avec le couplage à 16h le 6 avril - TBSP-0616. 142

5.34 Vent horizontal parallèle au canyon avec les températures mesurées et avec le couplage à 11h le 6 avril 2011. 143

5.35 Vitesses verticales dans le canyon pour les différentes simulations aux quatre instants étudiés. 144

5.36 Vitesses horizontales dans le canyon pour les différentes simulations aux quatre instants étudiés. 145

5.37 Vent vertical dans le canyon pour un vent incident perpendiculaire au canyon d'une force de $2\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. 146

5.38 Températures dans le canyon pour des vents incidents perpendiculaires aux bâtiments de forces comprises entre 1 et $5\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. 147

5.39 Vitesses verticales dans le canyon pour des vents incidents perpendiculaires aux bâtiments de forces comprises entre 1 et $5\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. 148

5.40 Vent horizontal parallèle au canyon sur une coupe verticale pour un vent incident perpendiculaire au canyon d'une vitesse de $5\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. . . 148

5.41 Vent vertical sur une coupe parallèle aux bâtiments dans le canyon pour un vent incident perpendiculaire au canyon de $5\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. 149

5.42 Canyon de EM2PAU soumis à un vent incident à 155°. 149

5.43 Vent vertical sur une coupe parallèle aux bâtiment dans le canyon pour un vent incident à 155° de $2\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. 150

5.44 Vitesse verticale du vent dans le canyon pour un vent incident présentant une force de $2\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. 150

5.45 Températures dans le canyon pour des vents incidents à 155° avec des forces de 2 et $3\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. 151

5.46 Vitesses verticales dans le canyon pour des vents incidents à 155° avec des forces de 2 et $3\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. 151

Liste des tableaux

3.1 Les différentes techniques d'échanges de données entre deux logiciels couplés. 85

4.1 Propriétés physiques des matériaux constituant les bâtiments et le sol. 93

5.1 Valeurs expérimentales de longueurs de rugosité obtenues sur des sites homogènes de grande extension horizontale (Wieringa, 1993). 119

5.2 Noms des simulations réalisées à quatre instants différents avec trois méthodes de détermination des températures de paroi des conteneurs. 122

5.3 Nombre de Richardson et nombre de Froude pour les quatre instants étudiés. 124

5.4 Températures de l'air et du sol mesurées aux quatre instants étudiés et utilisés pour les simulations. 138

Bibliographie

Acero, J. A., Arrizabalaga, J., Kupski, S., Katzschner, L., 2012. Urban heat island in a coastal urban area in northern spain. Theoretical and Applied Climatology, Volume 113, Issue 1-2, 137–154.

Adams, W. H. M., 1964. Transmission de la chaleur. Dunod.

ADEME, 2014. Chiffres clés climat, air et énergie.

Ali-Toudert, F., 2009. Energy efficiency of urban buildings : significance of urban geometry, building construction and climate conditions. Seventh International Conference on Urban Climate.

Ali-Toudert, F., 2015. Implementation of the teb model as a new trnsys-type for the assessment of urban microclimate prior to dynamic building thermal situation. 9th International Conference on Urban Climate.

Allegrini, J., Dorer, V., Carmeliet, J., 2013. Wind tunnel measurements of buoyant flows in street canyons. Building and Environment, 59, 315–326.

ALTERÉCO, 2015a. Bureau d'Études thermiques du bâtiment - test d'étanchéité à l'air. `http://www.thermiquedubatiment.fr/nos-prestations/test-detancheite-a-lair/`.

ALTERÉCO, 2015b. Bureau d'Études thermiques du bâtiment - thermographie infrarouge. `http://www.thermiquedubatiment.fr/nos-prestations/thermographie-infrarouge/`.

Antoine, M. J., Groleau, D., 1998. Assessing solar energy and environmental variables in urban outdoor spaces : Towards a simulation and monitoring tool. Rebuild the European cities of tomorrow : Shaping our European cities for the 21st Century Proccedings of the 2nd European Conference, Florence, Italy.

Archambeau, F., Méchitoua, N., Sakiz, M., 2003. Code_saturne : a finite volume code for the computation of turbulent incompressible flows - industrial applications. International Journal on Finite Volume, 1–62.

Arnfield, A. J., Grimmond, C., 1998. An urban canyon energy budget model and its application to urban storage heat flux modeling. Energy and Buildings, Volume 27, Issue 1, 61–68.

Arya, S. P., 1999. Air Pollution Meteorology and Dispersion. Oxford University Press.

Ashie, Y., Ca, V. T., Asaeda, T., 1999. Building canopy model for the analysis of urban climate. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 81, Issues 1–3, 237–248.

Assimakopoulos, M., Mihalakakou, G., Flocas, H., 2006. Simulating the thermal behaviour of a building during summer period in the urban environment. Renewable Energy, 32, 1805–1816.

Athamena, K., 2012. Modélisation et simulation des microclimats urbains : Étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. cas des éco-quartiers. Ph.D. thesis, École Centrale de Nantes.

Athamena, K., Sini, J.-F., Guilhot, J., Vinet, J., Sabre, M., Rosant, J.-M., 2011. Numerical model to characterize the thermal comfort in new eco-districts : methodology and validation through the canyon street case. Recent Advances in Fluid Mechanics, Heat and Mass Transfer and Biology.

Banque Mondiale, 2014a. Développement urbain. `http://donnees.banquemondiale.org/theme/developpement-urbain`.

Banque Mondiale, 2014b. Population urbaine. `http://donnees.banquemondiale.org/indicateur/SP.URB.TOTL.IN.ZS`.

Bartak, M., Beausoleil-Morrison, I., Clarke, J. A., Denev, J., Drkal, F., Lain, M., MacDonald, I. A., Melikov, A., Popiolek, Z., Stankov, P., 2002. Integrating cfd and building simulation. Building and Environment, Volume 37, Issues 8–9, 865–871.

Bascom, R., 1996. Health effects of outdoor air pollution. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, Vol 153, 3–50.

Basu, R., Samet, J. M., 2002. Relation between elevated ambient temperature and mortality : A review of the epidemiological evidence. Reviews(24), 190–202.

Bell, M. L., Davis, D. L., Fletcher, T., 2004. A retrospective assessment of mortality from the london smog episode of 1952 : The role of influenza and pollution. Environmental Health Perspectives, volume 112, 6–8.

Beranek, W. J., Koten, H. V., 1979. Beperken van windhinder om gebouwen, deel 1, stichting bouwresearch no. 65. Kluwer Technische Boeken BV, Deventer.

Biltoft, C. A., 2001. Customer report for mock urban setting test. West Desert Test Center, U.S. Army Dugway Proving Ground, DPG Doc. WDTC-FR-01-121, 58.

Blackman, K., Perret, L., Savory, E., 2015. Dynamics of a street canyon flow from idealized field and wind tunnel experiments. 9th International Conference on Urban Climate.

Blocken, B., 2012. Urban physics inaugural lecture. `http://alexandria.tue.nl/extra2/redes/blocken2012.pdf`.

Blocken, B., Moonen, P., Stathopoulos, T., Carmeliet, J., 2008. A numerical study on the existence of the venturi-effect in passages between perpendicular buildings. Journal of Engineering Mechanics, 1021–1028.

Blocken, B., Persoon, J., 2009. Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment : Cfd simulation, validation and application of the new dutch wind nuisance standard. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 97(5-6), 255–270.

Bottema, M., 1993. Wind Climate and Urban Geometry.

Bouquerel, M., Schumann, M., Musy, M., Dufrasnes, E., 2015. Merubbi : Implantation d'un nouveau bâtiment dans un îlot existant. SIMUREX 2015.

Bouyer, J., 2009. Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Ph.D. thesis, École Polytechnique de l'Université de Nantes.

Boyer, H., Chabiat, J.-P., Grondin-Perez, B., Tourrand, C., Brau, J., 1996. Thermal building simulation and computer generation of nodal models. Building and Environment, Volume 31, Issue 3, 207–214.

Boyer, H., Fakra, A. H., Miranville, F., Malet-Damour, B., Guichard, S., Lauret, P., 2014. Evolution of codyrun from thermal simulation to coupled thermal and daylight simulation software. Energy Procedia.

Britter, R., Hanna, S. R., 2003. Flux and dispersion in urban areas. Annual Review od Fluid Mechanics, 35, 469–496.

Brown, G., M.DeKay, 2000. Sun wind and light : architectural design strategies, 2nd Edition. John Wiley & Sons Inc.

Brun, A., Spitz, C., Wurtz, E., Mora, L., 2010. Behavioural comparison of some predictive tools used in a low-energy building. Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland.

Buccoleri, R., Salim, S. M., Leo, L. S., Sabatino, S. D., Chan, A., Ielpo, P., Gennaro, G. D., Gromke, C., 2010. Analysis of local scale tree-atmosphere interaction on pollutant concentration in idealized street canyons and application to a real urban junction. Atmospheric Environment, 45, 1702–1713.

Bueno, B., Norford, L., Pigeon, G., Britter, R., 2011. Combining a detailed building energy model with a physically-based urban canopy model. Boundary Layer Meteorology, 140, 471–489.

Bueno, B., Norford, L., Pigeon, G., Britter, R., 2012a. A resistance-capacitance network model for the analysis of the interactions between the energy performance of buildings and the urban climate. Building and Environment, 54, 116–125.

Bueno, B., Pigeon, G., Norford, L., Zibouche, K., Marchadier, C., 2012b. Development and evaluation of a building energy model integrated in the teb scheme. Geoscientific Model Development, 5, 433–448.

Carlucci, S., Pagliano, L., 2012. A review of indices for the long-term evaluation of the general thermal comfort conditions in buildings. Energy and Buildings, Volume 53, 194–205.

Coutts, A., 2015. Green infrastructures for cities. 9th International Conference on Urban Climate.

Crawley, D. B., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., Buhl, W., Huang, Y., Pederson, C. O., Strand, R. K., Liesen, R. J., Fisher, D. E., Witte, M. J., Glazer, J., 2001. Energyplus : creating a new-generation building energy simulation program. Energy and Building, 33, 319–331.

Davis, D. L., Bell, M. L., Fletcher, T., 2002. A look back at the london smog of 1952 and the half century since. Environmental health perspectives, 734–735.

Deardorf, J. W., 1978. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation. Journal of Geophysical Reasearch, 83, 1889–1903.

Djedjig, R., Bozonnet, E., Belarbi, R., 2015. Experimental study of the urban microclimate mitigation potential of green roofs and green walls in street canyons. International Journal of Low-Carbon Technologies, Volume 10, Issue 1, 34–44.

Doll, R., 1978. Atmospheric pollution and lung cancer. Environmental Health Perspectives, Vol22, 23–31.

Duta, A. G., Roux, J.-J., Noël, J. X., 1994. Codyba – v.6 : New version of software for building dynamical behaviour simulation.

EDF R&D, 2012. Code_saturne 2.3.0 theory guide, 84–95.

El Mankibi, M., 2003. Développement et Évaluation numérique et expérimentale des stratégies de régulation de la ventilation hybride. Ph.D. thesis, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H., Carissimo, B., 2007. Best practice guideline for the cfd simulation of flows in the urban environment. COST Action 732 : Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models. Tech. Rep. ISBN 3-00-018312-4, COST Office Brussels.

Gandemer, J., Guyot, A., 1976. Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti. Ministère de l'Equipement, Direction de l'Aménagement foncier et de l'Urbanisme, Paris.

Groenewegen, P. P., van den Berg, A. E., de Vries, S., Verheij, R. A., 2006. Vitamin g : effects of green space on health, well-being, and social safety. BMC Public Health.

Haak, H., 2012. Climate change and heat stress in residential buildings - evaluation of adaptation measures. Ph.D. thesis, Eindhoven University of Technology.

Holtslag, A., Westrhenen, R., 1991. Air pollution modeling and its application viii. Challenges of Modern Society, vol. 15 of NATO, 123–128.

Hénon, A., 2008. Températures mesurées, modélisées, et observées par télédétection infrarouge, dans la canopée urbaine : modélisation aero-thermo-radiative des flux de chaleur urbains. Ph.D. thesis, Université Louis Pasteur Strasbourg I.

Idczak, M., Groleau, D., Mestayer, P., Rosant, J.-M., Sini, J.-F., 2010. An application of the thermo-radiative model solene for the evaluation of street canyon energy balance. Building and Environment, vol 45, Issue 5, 1262,1275.

IFSTTAR, École Centrale Nantes, U. d. M., 2012. Influence des effets micro-météorologiques sur la propagation acoustique en milieu urbain - synthèse finale.

International Agency for Research on Cancer, 2013. Outdoor air pollution a leading environmental cause of cancer deaths. Organisation Mondiale de la Santé.

Janssen, H., Blocken, B., Carmeliet, J., 2007. Conservative modelling of the moisture and heat transfer in building components under atmospheric excitation. International Journal of Heat and Mass Transfer, 50, 1128–1140.

Janssen, H., Blocken, B., van Hooff, T., 2013. Pedestrian wind comfort around buildings : Comparison of wind comfort criteria based on whole-flow field data for a complex case study. Building and Environment, Volume 59, 547–562.

Johansson, E., Emmanuel, R., Thorsson, S., Krüger, E., 2012. Initial development of protocols for the study of outdoor thermal comfort. 8th International Conference on Urban Climates.

Johnson, G., Oke, T., Lyons, T., Steyn, D., Watson, I., Voogt, J., 1991. Simulation of surface urban heat islands under 'ideal' conditions at night
part 1 : Theory and tests against field data. Boundary-Layer Meteorology, Vol 56, 275–294.

Kerschgens, J., Nolle, C., Martens, R., 2000. Comments on turbulence parameters for the calculation of dispersion in the atmospheric boundary layer. Meteorologische Zeitschrift, 9, 155–163.

Kesselmeier, J., Staudt, M., 1999. Biogenic volatile organic compounds (voc) : An overview on emission, physiology and ecology. Journal of Atmospheric Chemistry Volume 33, Issue 1, 23–88.

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

Lam, C. K. C., 2015. Visitor perception of thermal comfort in 2 contrasting public landscape gardens during extreme heat waves. 9th International Conference on Urban Climate.

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

Louka, P., Vachon, G., Sini, J.-F., Mestayer, P. G., Rosant, J.-M., 2002. Thermal effects on the airflow in a street canyon – nantes'99 experimental results and model simulations. Water, Air and Soil Pollution : Focus, Vol 2, 5, 351–364.

Lucas, F., Mara, T., Garde, F., Boyer, H., 2012. A comparison between codyrun and trnsys, simulation models for thermal building behaviour.

Malys, L., 2012. Évaluation des impacts directs et indirects des façades et des toitures végétales sur le comportement thermique des bâtiments. Ph.D. thesis, CERMA, École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes.

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

Masson, V., al., 2008. The canopy and aerosol particles interactions in toulouse urban layer (capitoul) experiment. Atmos. Phys., 102, 135–157.

Masson, V., Grimmond, C. S. B., Oke, T. R., 2002. Evaluation of the town energy balance (teb) scheme with drect measurements from dry districts in two cities. Journal of Applied Meteorology, 41, 1011–1026.

Merlier, L., 2015. 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. Ph.D. thesis, L'Institut National des Sciences Appliquées (INSA) de Lyon.

Miguet, F., Groleau, D., 2002. A daylight simulation tool for urban and architectural spaces - application to transmitted direct and diffuse light through glazing. Building and Environment, 37, 833–843.

Milliez, M., 2006. Modélisation thermique au sein du modèle Mercure_Saturne. application à la modélisation de l'environnement urbain. Ph.D. thesis, École des Ponts et Chaussées.

Mochida, A., Lun, I., 2008. Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 96, 1498–1527.

Moonen, P., Defraeye, T., Dorer, V., Blocken, B., Carmeliet, J., 2012. Urban physics : Effect of the micro-climate on comfort, health and energy demand. Frontiers of Architectural Research, 1, 197–228.

M.Robitu, 2005. Étude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs. Ph.D. thesis, École polytechnique de l'université de Nantes.

Negrao, C. O., 1998. Integration of computational fluid dynamics with building thermal and mass flow simulation. Energy and Buildings, Volume 27, 155–165.

Neill, J. R. M., 2001. Something New Under the Sun - An Environmental History of the Twentieth-Century World. W. W. Norton & Company.

Oke, T., 1987. Boundary layer climates. Methuen London and New York, 435.

ONU, 2014. Plus de la moitié de la population mondiale vit désormais dans des villes – onu. https://www.un.org/development/desa/fr/news/population/world-urbanization-prospects.html.

Orlanski, I., 1975. A rational subdivision of scales for atmospheric processes. Bulletin of the American Meteorology Society, 56, 527–530.

Picaut, J., 2012. Projet em2pau - influence des effets micro-météorologiques sur la propagation acoustique en milieu urbain. Rapport de l'IFSTTAR.

Pigeon, G., Legain, D., Durand, P., Masson, V., 2007. Anthropogenic heat release in an old european agglomeration (toulouse, france). International Journal of Climatology, Volume 27, Issue 14, 1969–1981.

Plessis, G., Bouia, H., Milliez, M., Schumann, M., Musy, M., Leduc, T., Alamy, P., 2006. Building energy simulation and urban climate : a strong coupling approach. 6th International Conference on Urban Climate.

Plessis, G., Kaemerlen, A., Lindsay, A., 2014. Buildsyspro : a modelica library for modelling buildings and energy systems. 10th International Modelica Conference.

Pope, C. A., Dockery, D. W., 2006. Health effects of fine particulate air pollution : Lines that connect. Journal of the Air and Waste Management.

Qu, Y., 2011. Three-dimensional modeling of radiative and convective exchanges in the urban atmosphere. Ph.D. thesis, École des Ponts et Chaussées.

Qu, Y., Milliez, M., Musson-Genon, L., B.Carissimo, 2010. Micrometeorological modeling of radiative and convective effects with a building-resolving code. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1703–1724.

Ramponi, R., 2013. Thermal comfort in the urban environment. Urban Physics Autumn School 2013.

Ringenbach, N., 2004. Bilan radiatif et flux de chaleuren climatologie urbaine : mesures, modélisation et validation sur strasbourg. Ph.D. thesis, Université Louis Pasteur Strasbourg I.

Rotach, M. W., Vogt, R., Bernhofer, C., Batchvarova, E., Christen, A., Clappier, A., Feddersen, B., Gryning, S.-E., Martucci, G., Mayer, H., Mitev, V., Oke, T. R., Parlow, E., Richner, H., Roth, M., Roulet, Y.-A., Ruffieux, D., Salmond, J. A., Schatzmann, M., Voogt, J. A., 2005. Bubble – an urban boundary layer meteorology project. Theoretical and Applied Climatology, Volume 81, Issue 3, 231–261.

Roux, J.-J., 2012. Cours sur la réduction des modèles d'états.

Salamanca, F., Krpo, A., Martilli, A., A.Clappier, 2010. A new building energy model coupled with an urban canopy parametrization for urban climate simulation, part i. formulation, verification and sensitive analysis of the model. Theoretical and applied climatology, 99, 331–344.

Salomon, T., Mikolasek, R., Peuportier, B., 2005. Outil de simulation thermique du bâtiment, Comfie. Journée thématique SFT-IBPSA.

Saneinejad, S., Moonen, P., Carmeliet, J., 2011. Studying the effect of evaporative cooling on the local condition in the street canyon.

Santamouris, M., 2005. Advances of solar energy. James and James Science Publishers.

Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A., Assimakopoulos, D., 2001. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings. Solar Energy, Vol. 70, No. 3, 201–216.

Sini, J.-F., Anquetin, S., Mestayer, P. G., 1995. Pollutant dispersion and thermal effects on urban street canyons. Atmospheric Environment, 15, 2659–2677.

Staffordshire-University, 2002. The Great Fog. `http://www.staffs.ac.uk/schools/sciences/environment/GreatFog/fog1.html`.

Stewart, I., Oke, T., 2012. Local climate zones for urban temperature studies. Bulletin of the American Meteorological Society, 1879–1900.

Stull, R., 1988. An Introduction to boundary layer meteorology. Kluwer, Dordrecht.

Theeuwes, N., 2015. A breath of fresh air in uhi studies. 9th International Conference on Urban Climate, 2015, Toulouse.

Thibault, J., 2003. L'air au quotidien. Odile Jacob.

Unzeta, B. B., Norford, L. K., Britter, R., 2009. An urban weather generator coupling building simulations with a physically based urban model. Seventh International Conference on Urban Climate.

Urbinato, D., 1994. London's historic "pea-soupers". United States Environmental Protection Agency Journal.

Zaïdi, H., Dupont, E., Milliez, M., Carissimo, B., Musson-Genon, L., 2013. Effect of atmospheric stability on the atmospheric dispersion conditions over a industrial site surrounded by forests. NATO Science for Peace and Security Series C : Environmental Security, 733–737.

Zeger, S. L., Dominici, F., McDermott, A., Samet, J. M., 2008. Mortality in the medicare population and chronic exposure to fine particulate air pollution in urban centers (2000–2005). Environmental Health Perpectives, 116(12), 1614–1619.

Zhai, Z. J., Chen, Q. Y., 2003. Solution characters of iterative coupling between energy simulation and cfd programs. Energy and Building 35, 493–505.

Zhai, Z. J., Chen, Q. Y., 2005. Performance of coupled building energy and cfd simulations. Energy and Buildings, Volume 37, Issue 4, 333–344.

Modélisation fine des échanges thermiques entre les bâtiments et l'atmosphère urbaine

Résumé : Le travail réalisé dans le cadre de cette thèse porte sur l'effet que les bâtiments exercent sur l'atmosphère urbaine et notamment sur les échanges énergétiques qui s'opèrent entre les deux systèmes. Afin de modéliser plus finement les effets thermiques du bâtiment sur les écoulements atmosphériques lors de simulations réalisées par le logiciel de CFD *Code_Saturne*, nous procédons au couplage de cet outil avec le modèle de bâtiment BuildSysPro. Cette bibliothèque fonctionne sous Dymola et peut calculer des matrices descriptives du bâtiment utilisables ensuite en dehors du logiciel. Ce sont donc ces matrices qui sont utilisées pour le couplage par l'intermédiaire d'un code assurant l'échange de données entre les calculs de thermique du bâtiment et ceux de CFD.

Après une revue des phénomènes physiques en lien avec l'atmosphère urbaine et des modèles existants, nous nous intéressons aux interactions entre l'atmosphère et le milieu urbain, notamment les bâtiments. Ceux-ci peuvent avoir un impact sur les écoulements aussi bien dynamique, en tant qu'obstacles, que thermique, via leurs températures de parois.

Parallèlement à la mise en place du couplage entre les deux logiciels, nous étudions les données de la campagne de mesures EM2PAU que nous utilisons pour notre validation. EM2PAU, réalisée en 2011 à Nantes, représente une rue canyon idéalisée par deux rangées de conteneurs. La campagne a pour spécificité de prendre simultanément les mesures de températures d'air et de parois ainsi que les vitesses du vent de référence et des écoulements dans le canyon par un anémomètre sonique placé à 10 m d'altitude et six autres positionnés en six emplacements dans le canyon. Nous cherchons donc à mettre en évidence les effets dynamiques et thermiques des bâtiments sur les écoulements à partir des résultats de cette campagne, pour ensuite les simuler.

Puis la modélisation numérique des écoulements sur le domaine de EM2PAU est réalisée. L'objectif de ce travail est de mettre en évidence l'influence des effets thermiques des parois sur les flux atmosphériques. Nous comparons des simulations avec différentes méthodes pour donner les valeurs des températures de surface des conteneurs. La première méthode consiste à imposer ces températures d'après les mesures ; ainsi la température de chaque paroi sera fixée à la température de surface mesurée lors de l'instrumentation de EM2PAU. Quant à la deuxième méthode, on impose la température de l'air extérieur mesurée à l'instant simulé à toutes les parois des conteneurs, afin de créer un cas où l'on n'observe que peu ou pas d'échanges de chaleur. Enfin la troisième méthode est la simulation couplée de *Code_Saturne* et BuildSysPro. Les résultats des différentes simulations sont alors comparés afin de

distinguer les effets thermiques des parois des bâtiments sur les écoulements d'air. Nous observons que les effets dynamiques sont primordiaux et peuvent engendrer des vitesses verticales de l'écoulement dans le canyon de l'ordre plusieurs $\mathrm{m.s^{-1}}$, tandis que des écarts de températures de surface de l'ordre de 15°C peuvent modifier les vitesses verticales du vent de moins de $0,5\,\mathrm{m.s^{-1}}$. Si ces effets thermiques sont difficiles à isoler sur des mesures en raison des autres phénomènes susceptibles d'influencer les écoulements atmosphériques, les études numériques peuvent toutefois mieux quantifier ces différences.

Mots-clefs : Physique urbaine, atmosphère, CFD, échanges énergétiques, bâtiments, température de surface

Fine modelling of thermal exchanges between the buildings and the atmosphere

Abstract : This thesis work is about the effect of buildings on the urban atmosphere and more precisely the energetic exchanges that take place between these two systems.

In order to model more finely the thermal effects of buildings on the atmospheric flows in simulations run under the CFD software *Code_Saturne*, we proceed to couple this tool with the building model BuildSysPro. This library is run under Dymola and can generate matrices describing the building thermal properties that can be used outside this software. In order to carry out the coupling, we use these matrices in a code that allows the building thermal calculations and the CFD to exchange their results.

After a review about the physical phenomena and the existing models, we explain the interactions between the atmosphere and the urban elements, especially buildings. The latter can impact the air flows dynamically, as they act as obstacles, and thermally, through their surface temperatures.

At first, we analyse the data obtained from the measurement campaign EM2PAU that we use in order to validate the coupled model. EM2PAU was carried out in Nantes in 2011 and represents a canyon street with two rows of four containers. Its distinctive feature lies in the simultaneous measurements of the air and wall temperatures as well as the wind speeds with anemometers located on a 10 m-high mast for the reference wind and on six locations in the canyon. This aims for studying the thermal influence of buildings on the air flows.

Then the numerical simulations of the air flows in EM2PAU is carried out with different methods that allow us to calculate or impose the surface temperature we use for each of the container walls. The first method consists in imposing their temperatures from the measurements. For each wall, we set the temperature to the surface temperature that was measured during the EM2PAU campaign. The second method involves imposing the outdoor air temperature that was measured at a given time to all the surfaces, reducing every heat exchange to almost zero. The third method at last is the coupled simulation of *Code_Saturne* and BuildSysPro where BuildSysPro calculates the wall temperature from the *Code_Saturne* data. . The results of these different ways of modelling the wall temperatures are then compared in order to show the thermal effects of building wall heating on the air flows.

We notice that the dynamic effects are dominant and can generate vertical wind speed that can pass several $m.s^{-1}$. On the other hand, differences of surface temperatures higher than 15°C can influence the vertical wind speed for less than $0.5\,m.s^{-1}$. These thermal effects are not easily highlighted with measured data because of the

other phenomena that can impact the air flows. However they can be quantified with numerical studies.

Keywords : Urban physics, atmosphere, CFD, energetic exchanges, buildings, surface temperature