



HAL
open science

Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments - Cas de la rue canyon

Emmanuel Bozonnet

► **To cite this version:**

Emmanuel Bozonnet. Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments - Cas de la rue canyon. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de la Rochelle, 2005. Français. NNT: . tel-00011115

HAL Id: tel-00011115

<https://theses.hal.science/tel-00011115>

Submitted on 25 Nov 2005

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

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

UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE

UFR Sciences fondamentales et Sciences pour l'ingénieur

Doctorat

Spécialité : Génie Civil

Emmanuel BOZONNET

**Impact des microclimats urbains
sur la demande énergétique des bâtiments
Cas de la rue canyon**

Thèse dirigée par Francis ALLARD et Rafik BELARBI

Soutenue à La Rochelle le 23 juin 2005

Rapporteurs :	G. GUARRACINO	Professeur, ENTPE, Lyon
	J.F. SINI	Professeur, École Centrale de Nantes
Examineurs :	F. ALLARD	Professeur, Université de La Rochelle
	R. BELARBI	Maître de Conférence, Université de La Rochelle
	G. HÉGRON	Professeur, École d'Architecture de Nantes
	M. SANTAMOURIS	Professeur, Université d'Athènes
Membre invité :	J. MOUSSAFIR	PDG Aria Technologies

Remerciements

Tout d'abord je souhaite remercier vivement toutes les personnes grâce à qui ce travail de thèse a été mené à bien et qui m'ont soutenu tout au long de ces trois années et demie au LEPTAB (Laboratoire d'Étude des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment) à l'Université de La Rochelle.

Merci à mes deux Directeurs de Thèse Rafik Belarbi et Francis Allard : Rafik Belarbi qui m'a soutenu, et m'a permis de structurer mes travaux par ses nombreux conseils tout au long de l'avancement de ma thèse, ainsi que Francis Allard qui m'a accueilli dans son équipe de recherche et m'a apporté de nombreuses pistes de recherche qui ont donné forme à ce projet.

Merci aussi à Gérard Guarracino, ENTPE de Lyon, et Jean-François Sini, École Centrale de Nantes, qui ont accepté d'être rapporteurs de ce mémoire de thèse doctorat qu'ils ont relu de façon approfondie, ainsi que sur leur disponibilité au cours de la relecture du document. En particulier je souhaite remercier Jean-François Sini pour ses nombreuses remarques très enrichissantes sur les phénomènes aérauliques et microclimatiques.

Un grand merci à Gérard Hégron, Directeur du CERMA (Laboratoire d'Architecture de Nantes), d'avoir accepté de participer à mon jury de soutenance de thèse, jury qu'il a présidé.

Merci beaucoup à Matheos Santamouris, Professeur à l'Université d'Athènes (Group Building Environmental Studies), qui a participé au jury de thèse, a lu le document en français et fait le déplacement depuis Athènes. Merci beaucoup aussi à lui et son équipe pour le travail expérimental très complet qu'ils ont mené sur des rues de type canyon à Athènes et dont j'ai bénéficié pour ce travail de doctorat.

Merci à Aria Technologies d'avoir accepté de participer au jury de thèse et plus particulièrement à Armand Albergel, Directeur Général Délégué, qui a participé en remplacement de Jacques Moussafir qui était indisponible.

Enfin merci beaucoup à Etienne Wurtz qui m'a fait découvrir ces thèmes de recherche et grâce à qui j'ai pu participer depuis mon DEA, à l'Université de La Rochelle, à de nombreux projets passionnants. C'est aussi grâce à Etienne que j'ai pu découvrir les modèles zonaux et les modèles intermédiaires sans lesquels ce travail de thèse n'aurait pas pu être possible. Je remercie aussi Laurent Mora qui m'a apporté de précieux conseils sur les modèles utilisés et les problèmes de programmation.

Merci à tous les amis et collègues de bureau et du laboratoire avec qui j'ai partagé de nombreux bon moments à l'université ou en sorties et soirées au cours de ces années de doctorat : Alexis, Mounir, Jérôme, Laurent, Katia, Rodrigo, Dina, Sandro, Bernardo, Frédéric, Alain, Martin, Cyril, Timea, Nicolas. Et, en particulier, merci beaucoup à Alexis Billon pour son soutien et la relecture approfondie de ce rapport et à Frédéric Cherqui pour des conseils et un soutien remarquable.

Un très grand merci à ma famille qui m'a permis de mener ces études, m'a soutenu et m'a tant apporté. Enfin merci à Céline qui m'a soutenu et encouragé.

Résumé

Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments – Cas de la rue canyon

Les systèmes de conditionnement des ambiances intérieures participent pour une part importante à la demande énergétique des bâtiments, notamment en été. L'objectif de cette étude est de définir par des simulations thermoaérauliques l'interaction du microclimat urbain avec le bâti et sa demande énergétique de climatisation dans le cas d'une rue canyon.

Le modèle choisi, de type zonal, nous permet de décrire les paramètres de température et de vitesse d'air dans la rue, avec un degré de précision intermédiaire entre la modélisation CFD fine et les approches nodales simplifiées. L'ensoleillement et les inter-réflexions dans la rue sont ensuite modélisés par une méthode simplifiée, développée et appliquée à l'étude de la convection naturelle dans une rue. Les écoulements dominants dus au vent sont par ailleurs étudiés à partir de données expérimentales, sur la base desquelles un modèle simplifié est proposé, en conditions isothermes. Le couplage des effets du vent et de la convection naturelle a été étudié dans le cas d'une rue canyon sur 28 jours. Nous concluons sur l'importance de la modélisation thermoaéraulique pour la détermination de l'effet d'îlot de chaleur urbain, ainsi que la demande énergétique des bâtiments.

Mots clés : microclimat urbain, rue canyon, rayonnement solaire, canopée urbaine, modélisation zonale, climatisation

Abstract

Urban microclimates impact on the building energy demand – Street canyon case

The building energy demand is greatly affected by air conditioning systems, mainly during summer. The objective of this study is to define the interactions between urban microclimate, buildings and its air conditioning energy demand, by simulation of heat and mass transfer in the typical case of an urban street canyon.

A zonal model is chosen for heat and mass transfer modeling. This approach, midway between accurate fluid dynamics codes and simple nodal models, allows us to describe, accurately enough for building energy study, thermal and wind speed parameters in the street. Then, the solar radiation and wall interchange are modeled for a street. The advantage of the simplified model proposed here is highlighted with a natural convection study of the street. Besides, air flows due to the wind are studied from experimental data, and an empirical approach of the isothermal flow is proposed. A coupled study of wind and natural convection in a street canyon is completed on a 28 days period and compared with experimental data. The consequences of heat and mass transfer in the canyon on the heat island evolution are discussed, as on the building energy demand.

Keywords: urban microclimate, street canyon, solar radiation, urban canopy, zonal model, air conditioning

Table des matières

REMERCIEMENTS	3
RÉSUMÉ	5
ABSTRACT	7
TABLE DES MATIÈRES	9
TABLE DES ILLUSTRATIONS	13
LISTE DES TABLEAUX	17
NOMENCLATURE	19
CARACTÈRES GRECS	20
<i>Minuscules</i>	20
<i>Majuscules</i>	21
CARACTÈRES LATINS	22
<i>Minuscules</i>	22
<i>Majuscules</i>	23
INTRODUCTION	27
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE	29
1.1 EFFET D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN.....	30
1.1.1 <i>Observations sur la température en milieu urbain</i>	30
1.1.2 <i>Demande énergétique de bâtiments et effet d'îlot de chaleur urbain</i>	32
1.2 ÉTUDE DE SOLUTIONS ALTERNATIVES À LA CLIMATISATION ET DES SOLLICITATIONS CLIMATIQUES EN MILIEU URBAIN.....	34
1.2.1 <i>Rafrâichissement passif et effet de confinement en milieu urbain</i>	34
1.2.2 <i>Sollicitations climatiques des bâtiments</i>	34
1.3 PROPOSITION D'UNE MÉTHODOLOGIE DE DÉTERMINATION DE L'IMPACT DU MICROCLIMAT URBAIN SUR LE BÂTI 36	
CHAPITRE 2 ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE DU MICROCLIMAT URBAIN	37
2.1 CIRCULATION D'AIR EN MILIEU URBAIN	38
2.1.1 <i>Échelles climatiques et phénomènes locaux</i>	38
2.1.2 <i>Circulation d'air à l'échelle atmosphérique et vents dominants</i>	39
2.1.3 <i>Vent en site homogène</i>	41
2.1.4 <i>Vent en site urbain</i>	43
2.1.5 <i>À l'échelle des bâtiments</i>	48
2.2 IMPACT DE L'ENSOLEILLEMENT EN MILIEU URBAIN.....	52
2.2.1 <i>Rayonnement solaire en milieu urbain</i>	52
2.2.2 <i>Morphologies et surfaces urbaines du point de vue de l'ensoleillement</i>	53
2.2.3 <i>Calcul du rayonnement solaire incident sur les parois</i>	55
2.2.4 <i>Traitement des surfaces urbaines</i>	56
2.3 OBSERVATIONS EXPÉRIMENTALES DU MICROCLIMAT URBAIN.....	57
2.3.1 <i>Évolution des observations microclimatiques et mesures en milieu urbain</i>	57

2.3.2	<i>Instruments de mesures de vitesse d'air sur site</i>	57
2.3.3	<i>Campagnes de mesure</i>	58
CHAPITRE 3	MODÉLISATION INTERMÉDIAIRE DES TRANSFERTS DE MASSE ET D'ÉNERGIE	61
3.1	DIFFÉRENTS NIVEAUX DE MODÉLISATION THERMOAÉRAULIQUE.....	62
3.2	BILANS LOCAUX POUR UN FLUIDE EN ÉCOULEMENT	64
3.2.1	<i>Bilan de masse</i>	64
3.2.2	<i>Bilan de la quantité de mouvement</i>	64
3.2.3	<i>Bilan d'énergie cinétique</i>	65
3.2.4	<i>Bilan d'énergie thermique</i>	65
3.3	MODÉLISATION FINE À CODE DE DYNAMIQUE DES FLUIDES	69
3.3.1	<i>Différentes approches à code de champ</i>	69
3.3.2	<i>Modélisation de l'écoulement turbulent en milieu urbain</i>	69
3.3.3	<i>Utilisation de modèles moyennés en temps de types k-ε</i>	71
3.4	APPROCHE ZONALE DES TRANSFERTS THERMOAÉRAULIQUES	74
3.4.1	<i>Conservation de la masse</i>	74
3.4.2	<i>Bilan d'énergie thermique</i>	75
3.4.3	<i>Bilan thermique des éléments de paroi et frontière du domaine</i>	76
3.5	MODÉLISATION ZONALE ET INTÉGRATION DE MODÈLES COMPLÉMENTAIRES	77
3.5.1	<i>Le rayonnement solaire et les échanges radiatifs avec la voûte céleste</i>	77
3.5.2	<i>Comportement thermique du sol</i>	78
3.5.3	<i>Écoulements dominants et vent</i>	80
3.5.4	<i>Prise en compte des transferts de composés dans la masse d'air et aux limites</i>	81
3.6	MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODE ZONALE COUPLÉE AUX PHÉNOMÈNES SPÉCIFIQUES DANS UN CODE DE CALCUL 83	
3.6.1	<i>Mise en œuvre de la méthode dans un environnement orienté objet</i>	83
3.6.2	<i>Conclusion et perspectives</i>	84
CHAPITRE 4	ÉTUDE DU RAYONNEMENT SOLAIRE EN MILIEU URBAIN	85
4.1	MÉTHODOLOGIE POUR LA DÉTERMINATION DE L'IMPACT DE L'ENSOLEILLEMENT	86
4.1.1	<i>Détermination du rayonnement de courtes longueur d'onde (CLO) dû aux inter-réflexions par la méthode des radiosités</i>	87
4.1.2	<i>Détermination du rayonnement CLO dû aux inter-réflexions par la méthode des enceintes fictives</i>	88
4.2	ÉTUDE COMPARATIVE DE MÉTHODES D'ÉVALUATION D'APPORTS SOLAIRES DANS L'ÉTUDE DU MICROCLIMAT URBAIN	92
4.2.1	<i>Configuration de l'étude</i>	92
4.2.2	<i>Comparaison de la méthode des radiosités et de la méthode des enceintes fictives pour une rue de type canyon dans le domaine des courtes longueurs d'onde</i>	93
4.2.3	<i>Avantages et limites de la méthode des enceintes fictives</i>	98
4.3	APPLICATION À L'ÉTUDE DE L'IMPACT DE L'ENSOLEILLEMENT SUR LES TRANSFERTS DE MASSE ET DE CHALEUR DANS UNE RUE DE TYPE CANYON	100
4.3.1	<i>Étude de l'impact de l'ensoleillement couplé à des modèles de dynamique des fluides</i>	100
4.3.2	<i>Proposition d'une modélisation thermoaéraulique de l'impact de l'ensoleillement dans une rue de type canyon en l'absence d'écoulement dominant</i>	101
4.3.3	<i>Simulation dynamique du comportement thermoaéraulique d'une rue de type canyon sous l'effet de l'ensoleillement</i>	103
4.4	CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES	106
CHAPITRE 5	MODÉLISATION DES ÉCOULEMENTS DOMINANTS EN MILIEU URBAIN.....	107
5.1	MESURES SUR SITE POUR DES RUES DE TYPE CANYON	108
5.1.1	<i>Scénarii d'écoulement</i>	108
5.1.2	<i>Mesures sur site : étude de rues canyon à Athènes</i>	108
5.1.3	<i>Analyse de la corrélation entre la vitesse instantannée en toiture et dans la rue</i>	110
5.1.4	<i>Analyse de l'évolution de la vitesse moyenne</i>	115
5.2	MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT MOYEN POUR UNE RUE DE TYPE CANYON	123
5.2.1	<i>Élaboration d'un nouvel algorithme de détermination du champ de vitesse moyen pour une rue de type canyon</i>	123
5.2.2	<i>Conception d'un module de calcul d'écoulement canyon</i>	125

5.3	COMPARAISON DU MODÈLE D'ÉCOULEMENT MOYEN AVEC LES VALEURS EXPÉRIMENTALES	128
5.3.1	<i>Modélisation des rues étudiées expérimentalement</i>	<i>128</i>
5.3.2	<i>Calculs et comparaisons avec les valeurs expérimentales.....</i>	<i>129</i>
5.4	BILAN ET PERSPECTIVES POUR LE MODULE DE CALCUL DU CHAMP DE VITESSE DÛ AU VENT	133
CHAPITRE 6 ÉTUDE COUPLÉE DES PHÉNOMÈNES THERMOAÉRAULIQUES POUR UNE RUE DE TYPE CANYON - APPLICATION À L'ÉTUDE ÉNERGÉTIQUE DE BÂTIMENT EN MILIEU URBAIN.....		135
6.1	PRINCIPE D'INTÉGRATIONS DES PHÉNOMÈNES MICROCLIMATIQUES DANS LE CALCUL DES ÉCHANGES THERMOAÉRAULIQUES	136
6.1.1	<i>Définition empirique du couplage des forces de poussée thermique et de l'écoulement dominant.....</i>	<i>136</i>
6.1.2	<i>Intégration au modèle zonal du couplage des écoulements dominants et de la convection naturelle.....</i>	<i>137</i>
6.2	COMPARAISON DU MODÈLE THERMOAÉRAULIQUE COUPLÉ AVEC LES MESURES.....	140
6.2.1	<i>Définition du domaine d'étude.....</i>	<i>140</i>
6.2.2	<i>Conditions de vent en toiture et dans la rue.....</i>	<i>141</i>
6.2.3	<i>Définition des conditions d'ensoleillement</i>	<i>142</i>
6.2.4	<i>Les températures aux limites du domaine</i>	<i>143</i>
6.2.5	<i>Température au niveau des parois</i>	<i>144</i>
6.2.6	<i>Calculs et comparaisons avec les résultats expérimentaux.....</i>	<i>145</i>
6.3	APPLICATION À L'ESTIMATION DE L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN	150
6.3.1	<i>Évolution de la température en site urbain d'après les mesures au dessus des toitures.....</i>	<i>150</i>
6.3.2	<i>évolution de la température dans la rue Dervenion déterminée par la simulation</i>	<i>151</i>
6.4	APPLICATION À L'ESTIMATION DE LA CHARGE THERMIQUE EN FAÇADE	154
6.4.1	<i>Impact de la prise en compte de l'effet d'ilot de chaleur sur la demande énergétique liée aux transferts en façade du bâti.....</i>	<i>154</i>
6.4.2	<i>Calcul de la demande énergétique couplée aux phénomènes de transfert thermoaérauliques de façade.....</i>	<i>156</i>
6.4.3	<i>Couplage de la simulation thermoaéraulique avec le fonctionnement d'un système de climatisation.....</i>	<i>157</i>
6.5	CONCLUSION	159
CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES		161
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		165
ANNEXE A DESCRIPTION DE CLASSES MACROSCOPIQUES DE SPARK POUR LA RÉOLUTION THERMOAÉRAULIQUE COUPLÉE D'UN PROBLÈME		171
ANNEXE B MODÈLES EMPIRIQUE DE VENT DANS UNE RUE DE TYPE CANYON		175

Table des illustrations

Figure 1-1 - Exemple de variation de la température entre milieu urbain et rural pour une fin d'après-midi estivale, d'après « Heat Island Group » (http://eetd.lbl.gov/HeatIsland/)	30
Figure 1-2 - Température de surface pour la ville de Providence d'après une image du satellite Landsat 7 de juillet 2001, d'après le site de « Brown University » (http://envstudies.brown.edu)	30
Figure 1-3 - Phénomène d'amplification de l'îlot de chaleur urbain et système de climatisation.....	33
Figure 2-1 - De la modélisation météorologique à la modélisation microclimatique, jusqu'à l'interface entre le bâti et son environnement proche.....	38
Figure 2-2 - Les différents niveaux d'échelle spatiotemporels des phénomènes climatiques, d'après Lyndon State College	39
Figure 2-3 - Profil de température et définition des différentes couches atmosphériques en fonction de la température (d'après http://www.ens-lyon.fr/Planet-Terre/Infosciences/Climats/Structure-atm/).....	40
Figure 2-4 - Anticyclones (A) et Dépressions (D) et mouvements d'air.....	41
Figure 2-5 - Exemple d'une rose des vents établie à partir de relevés d'une station météorologique (Météo France – période de 1951 à 1980 – Grenoble St-Geoirs)	42
Figure 2-6 - Profil moyen de la vitesse horizontale du vent dominant en site homogène et en site urbain (Plate et Kiefer 2001)	43
Figure 2-7 - Répartition verticale des différentes couches de circulation d'air au-dessus d'un milieu urbain, d'après (Rotach 1999)	44
Figure 2-8 - Surfaces caractéristiques pour une morphologie urbaine régulière en blocs.....	45
Figure 2-9 - Rugosité adimensionnelle en fonction de la densité de bâti s_f / S^* , d'après (Plate et Kiefer 2001)...	46
Figure 2-10 - Profil de la vitesse moyenne de vent $\bar{u}(z)$ en site urbain, d'après (Nicholson 1975).....	47
Figure 2-11 - Allure de la structure de l'écoulement autour de cubes dans un flux turbulent. A : recirculation latérale, B : recirculation de toiture, C : vortex en « fer à cheval », D : bulle de sillage. D'après (Meinders et al. 1998).....	48
Figure 2-12 - Zones d'écoulement perturbé pour un bâtiment isolé : zone de déplacement 1a, zone de recirculation frontale 1b, zone morte 2 et zone de sillage 3	49
Figure 2-13 - Champ de vitesse autour d'un bâtiment isolé, d'après (Kaplan et Dinar 1996)	50
Figure 2-14 - Rue de type canyon avec un rapport d'aspect W / H supérieur à 2,5 (rugosité isolée), compris entre 1,54 et 2,5 (interférence de sillage), et inférieur à 1,54 (rasant), d'après (Oke 1987)	50
Figure 2-15 - Interférence d'un ensemble de bâtiments sur le champ de vitesse moyen – calculé avec QUIC-Urb (Pardijak et al. 2004)	51
Figure 2-16 - Balance énergétique terrestre, d'après (Belarbi 2000)	52
Figure 2-17 - Valeurs type d'albédo de surfaces en milieu urbain, d'après l'agence américaine de protection de l'environnement (http://yosemite.epa.gov/oar/globalwarming.nsf/)	54
Figure 2-18 - Principe de conception du bloc solaire résidentiel optimisé énergétiquement par rapport à l'ensoleillement direct d'hiver et d'été. (Knowles 2003)	54
Figure 2-19 - Application du principe de bloc solaire dans le cadre d'un projet d'urbanisme avec développement de la végétalisation, maquette de l'architecte Glen Small pour Los Angeles (Small 1982).....	55
Figure 2-20 - Définition de la déclinaison solaire d (en degrés) et des angles solaires.....	55
Figure 2-21 - Anémomètre à trois coupelles à 120°	57
Figure 2-22 - Points de mesures dans une rue canyon, rue Dervenion ici, dans le cadre du projet Urbvent (Santamouris et al. 2001a).....	59
Figure 3-1- Différents niveaux de modélisation et différentes finesses de maillage pour le cas d'une ambiance intérieure ventilée et d'un système de chauffage particulier, le convecteur	62
Figure 3-2 - Délimitation de la zone d'étude du groupe de bâtiments, d'après (Jiang et Chen 2002)	70

Figure 3-3- Longueur de la recirculation en fonction du nombre de mailles pour 3 modèles CFD, et représentation des lignes de courant, d'après (Glockner et al. 1999).	73
Figure 3-4 – Maillage du volume étudié en zones parallélépipédiques repérées par les indices i, j et k ; séparées par six interfaces indicées u .	74
Figure 3-5 - Bilan de conservation de masse et d'énergie pour une cellule.	74
Figure 3-6- Spectre de rayonnement atmosphérique incident de grande longueur d'onde pour différentes conditions de température et d'humidité près du sol et pour un corps noir à 20°C, d'après (Perez-Garcia 2004).	78
Figure 3-7- Relation entre variation annuelle de température du sol et profondeur (à gauche) et variation annuelle des températures de sol (à droite) à Ottawa (Canada), d'après (William et Gold 1977).	79
Figure 3-8 - Répartition des débits sortant d'une cellule pour un débit imposé par un jet sur l'une des interfaces : résultat pour un modèle en pression et pour un modèle de jet avec entraînement d'air	80
Figure 3-9 - Transferts par tourbillons et par pulsations vers un local à une ouverture, d'après (Haghighat et al. 1991).	81
Figure 3-10- Définition des objets principaux définis dans l'environnement de simulation SPARK ou VisualC++ et principe de couplage des phénomènes climatiques	83
Figure 4-1 - Domaine d'étude dans une rue de type canyon d'un rapport d'aspect W/H .	86
Figure 4-2 - Définition des différentes grandeurs radiatives associées à la surface S_i .	87
Figure 4-3 - Définition de la surface fictive S_{Fi} associée à la surface S_i et des différents éclairements.	88
Figure 4-4 - Détail des inter-réflexions de l'exitance primaire de S_i , notée M_i^0 , et de l'exitance primaire de S_{Fi} , notée M_{Fi}^0 .	89
Figure 4-5 - Dimension et repérage des facettes du domaine d'étude - Triangulation des facettes de la zone d'étude sous Solene.	92
Figure 4-6- Évolution horaire de l'éclairement solaire total incident en watts sur l'ensemble des parois du domaine d'étude, sur la façade est et sur le sol, au cours de la journée étudiée (21 juin).	93
Figure 4-7 - Fermeture du domaine par des facettes transparentes et semi réfléchissantes	94
Figure 4-8 - Évolution des éclairements solaires en watts absorbés par l'ensemble des parois déterminés heure par heure par la méthode des facteurs de forme (avec Solene) et avec la méthode des enceintes fictives. (Journée d'étude 21 juin).	95
Figure 4-9 - Évolution de l'éclairement solaire total absorbé (W) après réflexions par l'ensemble des parois, le sol et la façade est, calculés par la méthode des radiosités (avec Solene) et la méthode modifiée des enceintes fictives (Journée d'étude 21 juin)	96
Figure 4-10- Évolution de l'éclairement solaire total absorbé (W) après réflexions par l'ensemble des parois, le sol et la façade est, calculés par la méthode des radiosités (avec Solene) et la méthode modifiée et ajustée des enceintes fictives (Journée d'étude 21 juin)	97
Figure 4-11 - Évolution des éclairements solaires absorbés après inter-réflexions (W) par les facettes $F1, F2$ et $F3$ de bas en haut de la façade ouest et par les facettes $F7, F8$ et $F9$ d'est en ouest au sol ; calculs par la méthode des radiosités, Solene, et par la méthode modifiée et ajustée des enceintes fictives (Journée d'étude 21 juin)	98
Figure 4-12 - Écart de températures ΔT imposés représentatifs d'un ensoleillement donné, d'après (Xie et al. 2005)	100
Figure 4-13 - Lignes de courant pour un vent transversal à la rue (vitesse de référence de 2 m/s) et pour les quatre scénarii d'ensoleillement de la Figure 4-12, d'après (Xie et al. 2005).	100
Figure 4-14- Définition des conditions aux limites de la zone étudiée	102
Figure 4-15- Couplage du code de calcul zonal avec les calculs de rayonnement solaire déterminés par Solene.	103
Figure 4-16- Évolution du champ thermoaéraulique dans la rue étudiée pour une journée type	104
Figure 4-17- champ thermoaéraulique dans la rue étudiée à 20 h	105
Figure 5-1 - Les différents scénarii d'écoulement dans une rue de type canyon.	108
Figure 5-2 - Situation des rues étudiées dans le centre de la ville d'Athènes (plan de gauche) et points de mesures pour chaque canyon (schéma de droite)	109
Figure 5-3 - Situation géographique du site universitaire par rapport au centre-ville d'Athènes (plan de gauche) et situation de la station météorologique d'ITIA sur le campus universitaire (plan de droite)	110
Figure 5-4 - Vitesse et orientation par rapport au nord du vent mesurée en toiture (1) sur 3 jours consécutifs pour la rue Dervenion (l'axe de la rue est représenté en trait discontinu)	111
Figure 5-5 - Dimensions et repères transversaux pour une rue de type canyon	112
Figure 5-6- Rue Dervenion : cas du vent extérieur à la rue d'incidence parallèle à l'axe du canyon et de vitesse supérieure à 4 m/s – (a) modèle de Nicholson et valeurs mesurées – (b) modèle de Hotchkiss et valeurs mesurées aux différentes points – source : rapport final d'Urbvent (Allard et Ghiaus 2004; Georgakis et Santamouris 2005).	113

Figure 5-7- Rue Dervenion : cas du vent extérieur à la rue d'incidence transversale à l'axe du canyon et de vitesse supérieure à 4 m/s – modèle de Hotchkiss et valeurs mesurées aux différents points – source : rapport final d'Urbvent (Allard et Ghiaus 2004; Georgakis et Santamouris 2005).....	114
Figure 5-8- Rue Dervenion : cas du vent extérieur à la rue d'incidence oblique à l'axe du canyon et de vitesse supérieure à 4 m/s – modèle de Hotchkiss et valeurs mesurées aux différents points – source : rapport final d'Urbvent (Allard et Ghiaus 2004; Georgakis et Santamouris 2005).....	114
Figure 5-9 - Algorithme d'estimation de la vitesse de vent dans une rue canyon, d'après Urbvent (Georgakis et Santamouris 2005).....	115
Figure 5-10- Évolution des vitesses moyennes pour les cinq rues canyons étudiées, sur trois journées et en différentes hauteurs au centre de la rue : 3,5 m, 7,5 m, 11,5 m et 15,5 m pour les points repérés (6), (7), (8) et (9) respectivement – Les points sont représentés par des cercles de rayon croissant avec la hauteur – la vitesse d'air en toiture est repérée par le point (1).....	116
Figure 5-11- Vitesse horaire moyenne d'air et dispersion en toiture (1) et en partie basse de la rue (6) sur 3 jours consécutifs pour la rue Kaniggos	117
Figure 5-12 - Détermination de l'orientation moyenne barycentre des orientations instantanées et de la dispersion déterminée proportionnellement à la distance du barycentre au bord du cercle.	118
Figure 5-13- Évolution des angles moyens horaires pour les cinq rue canyons étudiées, sur trois journées et en différentes hauteurs au centre de la rue : 3,5 m, 7,5 m, 11,5 m et 15,5 m pour les points repérés (6), (7), (8) et (9) respectivement – les points sont représentés de dimension croissante avec la hauteur – la vitesse d'air en toiture est repérée par le point (1)	119
Figure 5-14 - Orientation moyenne du vent et dispersion en toiture (1) et en partie basse de la rue (6) sur 3 jours consécutifs pour la rue Dervenion.....	120
Figure 5-15 – Évolution de l'orientation moyenne du vent et dispersion de haut en bas dans l'axe de la rue Voukourestiou, aux points (9), (7) et (6) et en toiture (1) – pour 3 jours – l'axe de la rue est situé à 45°/-135°	121
Figure 5-16 - Orientation moyenne du vent et dispersion en toiture (1) et en partie basse de la rue (6) sur 3 jours consécutifs pour la rue Miltiadou, l'axe de la rue est situé à 45°/-135°	122
Figure 5-17 - Modélisation de l'écoulement hélicoïdal dans la rue canyon.....	123
Figure 5-18 - Définition des débits volumiques q_i , q_j et q_k pour la cellule ijk	125
Figure 5-19 - Définition des interfaces entre cellules pour lesquelles les débits dus à l'écoulement dominant sont déterminés pour un écoulement moyenné sur une heure	126
Figure 5-20 - Algorithme du module de calcul du champ des débits moyens d'une rue canyon.....	127
Figure 5-21 - Cas de la rue Miltiadou : vitesse moyenne en toiture déterminée à partir des mesures et par le calcul à partir des données météorologiques en dehors de la ville. La valeur utilisée dans le modèle sera la valeur moyenne de mesure lorsqu'elle est disponible.	129
Figure 5-22- Exemple de champ de vitesse moyen déterminé pour la rue Dervenion et un angle d'incidence oblique par rapport à l'axe de la rue.	130
Figure 5-23 - Cas de la rue Kaniggos, variation de la vitesse moyenne déterminée par le modèle empirique proposé et par les mesures.	131
Figure 5-24 - Cas de la rue Kaniggos, variation de l'orientation moyenne de l'écoulement en partie basse, points (6) et (7), et en partie haute du canyon, points (8) et (9), déterminée par le modèle et par les mesures.....	132
Figure 6-1- Couplage des écoulements dominants et de la convection naturelle par itération pour un volume d'air en contact avec un élément de paroi.....	136
Figure 6-2- Algorithme de couplage des écoulements dans une modélisation thermoaéraulique zonale résolue par une méthode itérative	139
Figure 6-3- Maillage du tronçon d'étude de la rue Dervenion selon les directions i , j et k	140
Figure 6-4- Vitesse de référence du vent en toiture de la rue Dervenion, du 10 août au 6 septembre 2001, établie par interpolation (voir Chapitre 5).....	141
Figure 6-5- Conditions de vent en toiture mesurées (4 au 6 septembre), calculées et valeurs utilisées comme entrée du modèle de calcul aéraulique.....	141
Figure 6-6- Maillage en facettes de la rue Dervenion et triangulation sous Solene avec prise en compte de toute la longueur de la rue de part et d'autre de la section étudiée, soit 200 m au total	142
Figure 6-7- Éclairement solaire absorbée par le sol et les façades au cours des trois jours de mesure du 4 au 6 septembre 2001	143
Figure 6-8- Évolution des températures à Athènes, station météorologique, du 10 août au 6 septembre 2001, et utilisation comme condition limite pour la zone d'étude.	144
Figure 6-9- Modélisation des transferts dans la paroi en régime dynamique par analogie électrique.....	144
Figure 6-10- Champ de température et lignes de courant de vitesse moyenne totale, vitesse due au vent dominant et vitesse due à la convection le 4 septembre.	146

Figure 6-11- Champ de température et lignes de courant de vitesse moyenne totale, vitesse due au vent dominant et vitesse due à la convection le 5 septembre.	147
Figure 6-12- Champ de température et lignes de courant de vitesse moyenne totale, vitesse due au vent dominant et vitesse due à la convection le 6 septembre.	148
Figure 6-13-a : Évolution de l'écart de température, calculé et mesuré, entre le site de la rue Dervenion et la station météorologique. -b : Évolution de la température mesurée, calculée et d'entrée du modèle pour le site de la rue Dervenion.	150
Figure 6-14- Évolution de la température extérieure relevée par la station météorologique et calculée pour le site de la rue Dervenion, du 10 août au 6 septembre 2001.	151
Figure 6-15- Évolution de la température d'air calculée dans l'axe du canyon à 3,5m, 7,5m, 11,5m et 15,5m de hauteur correspondant respectivement aux points 6, 7, 8 et 9.	151
Figure 6-16- Évolution de la température d'air calculée, courbes, et points mesurés, losanges, dans l'axe du canyon à 3,5m, 7,5m, 11,5m et 15,5m de hauteur, pour les 3 jours d'expérimentation, et température relevée par la station météorologique T_{ext}	152
Figure 6-17- Évolution sur 28 jours des écarts ΔT_{ur} entre la température mesurée par la station météorologique et la température sur le site de la rue Dervenion, estimée en toiture et moyenne des résultats de simulation dans le canyon.	152
Figure 6-18- Calcul simplifié des charges climatiques en différents niveaux de la façade avec une température extérieure d'air dans le canyon définie par des données météorologiques.	154
Figure 6-19- Évolution de la demande énergétique quotidienne de climatisation en façade par niveau dans la rue en Wh/m ² par jour sur la période de simulation, sur la base des données météorologiques de référence.	155
Figure 6-20- Évolution de la demande énergétique quotidienne de climatisation en façade par niveau dans la rue en Wh/m ² par jour sur la période de simulation, sur la base de la température estimée en toiture.	155
Figure 6-21- Évolution de la demande énergétique quotidienne de climatisation en façade par niveau dans la rue en Wh/m ² par jour sur la période de simulation, calculée à partir de la simulation aéraulique.	156
Figure 6-22- Intégration simplifiée dans la simulation d'un système de climatisation de type « windows ».	157
Figure 6-23- Évolution de la température d'air calculée dans l'axe du canyon à 3,5m, 7,5m, 11,5m et 15,5m de hauteur, avec l'influence d'un système de climatisation.	157
Figure 6-24- Évolution de la demande énergétique quotidienne de climatisation en façade par niveau dans la rue en Wh / m ² par jour sur la période de simulation, calculée à partir de la simulation aéraulique couplée avec le fonctionnement théorique d'un système de climatisation.	158
Figure 6-25- Comparaison, en pourcentage, de la demande énergétique calculée sur les 28 jours d'étude pour les différents niveaux de détermination des conditions extérieures par rapport au cas de référence.	159

Liste des tableaux

Tableau 2-1- Propriétés aérodynamiques typiques pour des zones urbaines homogènes d'après (Grimmond et Oke 1999).....	45
Tableau 3-1- Profondeur d'atténuation des cycles de température quotidiens et annuels.....	79
Tableau 4-1- Définition de la zone étudiée et des conditions d'ensoleillement.....	93
Tableau 5-1- Géométrie des rues étudiées par l'Université d'Athènes dans le cadre du projet Urbvent.....	109
Tableau 5-2- Rugosité z_{0N} moyenne calculées à partir des valeurs moyennes de vitesses pour les rues étudiées à Athènes.....	129

Nomenclature

Caractères Grecs

MINUSCULES

Désignation	Unité	Description
α	rad	Angle d'incidence
$\alpha_{i,clo}$	–	Absorptivité de courtes longueurs d'ondes pour la facette i
α_{moy}	rad	Angle d'incidence moyen
β	–	Variable du modèle de Hotchkiss et Harlow
β_B	–	Coefficient de Boussinesq (cf. équation de bilan de quantité de mouvement)
β_{par}	rad	Inclinaison de la paroi étudiée par rapport au sol
β_{sol}	rad	Hauteur solaire
γ_{par}	rad	Azimut de la paroi étudiée
γ_{sol}	rad	Azimut solaire
δ_{ij}	–	Symbole de Kronecker égal à 1 si $i = j$ et 0 sinon
ε	m^2 / s^3	Taux de dissipation d'énergie cinétique turbulente
ε_{ciel}	–	Émissivité équivalente de grande longueur d'onde d'un ciel clair
$\varepsilon_{ciel,n}$	–	Émissivité équivalente de grande longueur d'onde d'un ciel de nébulosité n
ε_u	–	Émissivité de grande longueur d'onde de la surface S_u
$\varphi_{net,u}$	W / m^2	Flux net de grande longueur d'onde émis par l'élément de paroi u
κ	–	0,4 constante de Von Karman
κ_m	$kg / (m.s)$	Viscosité de masse d'un fluide newtonien (cf. approximation pour un fluide newtonien)
λ	$W / (m.K)$	Conductivité thermique du milieu considéré
μ	$kg / (m.s)$	Viscosité dynamique de l'air
ν	m^2 / s	Viscosité cinématique de l'air
ν_t	m^2 / s	Viscosité turbulente
ξ_k	–	Fraction massique de l'élément k dans le mélange considéré
π_{jT}	$m.K / s$	Flux de sous-maille
ρ	kg / m^3	Masse volumique de l'air humide
ρ_{as}	kg / m^3	Masse volumique de l'air sec
ρ_{Fi}	–	Réflexivité de courtes longueurs d'onde de la surface Fi
ρ_i	–	Réflexivité de courtes longueurs d'onde de la facette i
ρ_{ijk}	kg / m^3	Masse volumique de l'air dans la cellule ijk
ρ_{vap}	kg / m^3	Masse volumique de la vapeur d'eau
τ	Pa	Tenseur des contraintes de cisaillement
τ_{Fi}	–	Transmittivité courtes longueurs d'onde de la surface Fi
τ_i	–	Transmittivité courtes longueurs d'onde de la facette i

τ_{SM}	m^2 / s^2	Tenseur des contraintes de sous-maille
Ψ_{se}	–	Facteur de forme du ciel au centre de la rue

MAJUSCULES

Désignation	Unité	Description
Δ_i	–	Largeur de filtre de sous-maille
$\Delta E_{dif,ur}$	W / m^2	Écart entre le milieu urbain et rural de l'éclairement diffus de la voûte céleste sur le sol
Δp_u	Pa	Écart de pression entre la cellule ijk et la cellule adjacente à l'interface u
ΔT_{su}	K	Amplitude de variation de température au niveau du sol
ΔT_{ur}	K	Écart de température entre la ville et la campagne environnante
ϕ_g	J / kg	Énergie potentielle massique
ϕ_{source}	W	Puissance calorifique produite dans la cellule ijk
ϕ_u	W	Flux de chaleur entrant dans la cellule ijk par l'interface u
χ_{dir} χ_{dif}	–	Coefficients de rayonnement solaire direct et diffus

Caractères latins

MINUSCULES

Désignation	Unité	Description
a	m^2 / s	Diffusivité thermique de l'air
a_{sol}	m^2 / s	Diffusivité thermique du sol
a_{MG}	$^{\circ}\text{C}$	Coefficient du modèle de Montávez et González-Rouco
b_{MG}	$^{\circ}\text{C}$	Coefficient du modèle de Montávez et González-Rouco
c_{MG}	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 / \text{W}$	Coefficient du modèle de Montávez et González-Rouco
c_p	$\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$	Chaleur massique à pression constante de l'air humide
c_m	$\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$	Chaleur massique du matériau solide m
c_v	$\text{J} / (\text{kg} \cdot \text{K})$	Chaleur massique à volume constant de l'air humide
d	rad	Déclinaison solaire
d_{MG}	$^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 / \text{W}$	Coefficient du modèle de Montávez et González-Rouco
f	–	Coefficient de Coriolis
f_d et f_0	–	Coefficients empiriques de rugosité en site urbain
g	m / s^2	Accélération de la pesanteur
h	J / kg	Enthalpie massique de l'air humide
$h_{conv,u}$	$\text{W} / (\text{K} \cdot \text{m}^2)$	Coefficient d'échange convectif de la paroi à l'interface u de la cellule ijk
h_i	$\text{W} / (\text{K} \cdot \text{m}^2)$	Coefficient d'échange surfacique intérieur linéarisé
h_{ijk}	J / kg	Enthalpie massique de l'air humide dans la cellule ijk
h_k	m	Hauteur de la cellule ijk , suivant l'axe z
h_u	J / kg	Enthalpie massique de l'air humide de la cellule adjacente à la cellule ijk et à l'interface u
i_{par}	rad	incidence du soleil par rapport à la normale à la paroi étudiée
k	m^2 / s^2	Énergie cinétique turbulente
k_H	m^{-1}	Variable du modèle de Hotchkiss et Harlow
l_j	m	Largeur de la cellule ijk , suivant l'axe y
n	octas	Degré de nébulosité de l'atmosphère
q	W / m^2	Densité surfacique de flux conductif
q_i	m^3 / s	Débit volumique d'air dans la direction i
r	$\text{m}^2 / (\text{s}^2 \cdot \text{K})$	Constante du gaz parfait considéré
r_{vap}	$\text{m}^2 / (\text{s}^2 \cdot \text{K})$	Constante de la vapeur d'eau
r_{as}	$\text{m}^2 / (\text{s}^2 \cdot \text{K})$	Constante de l'air sec
s^*	m^2	Surface au sol des bâtiments de la zone considérée
s_f	m^2	Surface projetée perpendiculairement au vent des façades de bâtiment
u	m / s	Vitesse du fluide en écoulement

u^*	m / s	Vitesse de friction du profil logarithmique de vitesse moyenne
\hat{u}	J / kg	Énergie interne massique du système considéré
u_0	m / s	Vitesse horizontale de référence au niveau des toitures
u_{10}	m / s	Vitesse horizontale de référence à 10 mètres
\bar{u}_G	m / s	Vitesse géostrophique
\bar{u}_i	m / s	Composante suivant l'axe i de la vitesse d'air moyennée en temps
u'_i	m / s	Partie fluctuante de la vitesse d'air $U_i - \bar{u}_i$
w	kg _{eau} / kg _{airsec}	Humidité spécifique de l'air humide
x_N	–	Nombre adimensionnel
x_w, y_w	m	Coordonnées au sol dans la direction parallèle et transversale au vent dominant
z_0	m	Rugosité
z_d	m	Hauteur du plan de déplacement nul
z_H	m	Hauteur moyenne des bâtiments
z_R	m	Hauteur de couche limite rugueuse

MAJUSCULES

Désignation	Unité	Description
A	m / s	Variable du modèle de Hotchkiss et Harlow
A_{fict}	–	Facteur d'atténuation de la méthode modifiée des enceintes fictives
C_d	–	Coefficient de traînée en condition atmosphérique neutre
C_R, C_T et C_S	–	Coefficients empiriques de modification de la vitesse moyenne
D^*	m	Espacement moyen des obstacles sous la canopée urbaine
E^i	W / m ²	Éclairement total de la facette i
E'_i	W / m ²	Éclairement de la facette i dû aux inter-réflexions à l'intérieur de la zone d'étude
$E_{ciel,u}$	W / m ²	Éclairement de grande longueur d'onde de la surface S_u par le ciel
E_{dir}	W / m ²	Éclairement solaire direct sur une surface donnée
E_{dif}	W / m ²	Éclairement solaire diffus dû à la voûte céleste sur une surface donnée
$E_{dif,h}$	W / m ²	Éclairement solaire d'une surface horizontale par la voûte céleste
$E_{e,clo}$	W	Flux de courte longueur d'onde entrant dans la zone d'étude
E_e^{ei}	W / m ²	Éclairement de la facette i du côté extérieur à la zone étudiée autre que solaire
E_e^i	W / m ²	Éclairement solaire global incident sur la facette i
E_R	–	Facteur d'extinction du rayonnement solaire pour de l'air pur
$E_{r,clo}$	W	Reliquat du bilan de flux radiatif de courte longueur d'onde
$E_{s,clo}$	W	Flux de courte longueur d'onde sortant de la zone d'étude
F_{Fi-Fi}	–	Facteur de forme de la surface fictive Fi vers elle-même
F_{Fi-i}	–	Facteur de forme de la surface fictive Fi vers la facette i

F_u	$1 / s^2$	Fonction de dissipation
G	–	Fonction de filtre de sous-maille
G_a	K / m	$1 K / 100 m$ gradient de température adiabatique
H	m	Hauteur du bâtiment étudié ou de la rue
HR	%	Humidité relative de l'air humide
I_0	W / m^2	Constante solaire
K	m / s	Coefficient de décharge
L_b	m	Largeur du bâtiment dans la direction du vent dominant
L_{fx}	m	Longueur de la zone frontale perturbée pour un bâtiment isolé
L_{fx}	m	Longueur de la zone de recirculation frontale pour un bâtiment isolé
L_i	m	Longueur de la cellule ijk , suivant l'axe x
L_r	m	Longueur de la zone morte pour un bâtiment isolé
L_w	m	Longueur de la zone de sillage pour un bâtiment isolé
M_{as}	kg	Masse d'air sec
M_{Fi}^0	W / m^2	Exitance primaire de la surface fictive Fi
M_i^0	W / m^2	Exitance primaire de la facette i
M_i	W / m^2	Exitance totale de la facette i
M_{vap}	kg	Masse de vapeur d'eau dans la cellule ijk
M_{liq}	kg	Masse d'eau sous forme liquide dans la cellule ijk
P	Pa	Pression totale de l'air humide
P_{as}	Pa	Pression partielle d'air sec
P_{at}	Pa	Pression atmosphérique
P_{vap}	Pa	Pression partielle de vapeur
Q_u	kg / s	Débit massique d'air humide entrant dans la cellule ijk par l'interface u
$Q_{u,vent}$	kg / s	Débit massique d'air entrant dans la cellule ijk par l'interface u et dû au vent
Q_u^{as}	$kgas / s$	Débit massique d'air sec entrant dans la cellule ijk par l'interface u
$Q_u^{vap,as}$	kge / s	Débit massique de vapeur entrant dans la cellule ijk par l'interface u transporté par l'air sec
$Q_u^{vap,cond}$	kge / s	Débit massique de vapeur se condensant sur l'interface u de la cellule ijk
$Q_u^{vap,diff}$	kge / s	Débit massique de vapeur entrant dans la cellule ijk par l'interface u par diffusion
S^*	m^2	Surface au sol de la zone considérée
S_{Fi}	m^2	Aire de la surface fictive Fi
S_i	m^2	Aire de la facette i
S_{ij}	$1 / s$	Taux de déformation des échelles résolues
S_u	m^2	Surface de l'interface u

S_{vap}	kg / s	Production de vapeur dans la cellule ijk
T	K	Température de l'air humide
T_a	K	Température d'air moyenne de la zone étudiée
T_{ciel}	K	Température équivalente du ciel
T_{dp}	K	Température du point de rosée de la zone considérée
T_e	K	Température extérieure
T_I	–	Facteur de trouble atmosphérique
T_{ijk}	K	Température de la cellule ijk
T_{int}	K	Température résultante sèche intérieure
T_u	K	Température de la cellule adjacente à la cellule ijk et à l'interface u
T_{se}	K	Température de surface extérieure
T_{si}	K	Température de surface intérieure
T_{Su}	K	Température de surface de la paroi adjacente à la cellule ijk et à l'interface u
U	m / s	Vecteur vitesse de l'air
U_0	m / s	Vitesse moyenne de référence pour le profil de vent sous la canopée urbaine
U_i	m / s	Composante suivant l'axe i de la vitesse d'air
\bar{U}_i	m / s	Composante de la maille d'échelle suivant l'axe i de la vitesse d'air
U'_i	m / s	Composante de sous-maille suivant l'axe i de la vitesse d'air
U_{jr}	m / s	Vitesse transversale de référence
V	m ³	Volume d'air humide
V_{ijk}	m ³	Volume de la cellule ijk
W	m	Largeur de la rue étudiée
W_b	m	Largeur du bâtiment transversalement à la direction du vent dominant
Z	m	Hauteur comptée à partir du niveau des toitures
Z^*	m	Hauteur au-dessus des toits pour laquelle la vitesse horizontale moyenne serait égale à la vitesse de friction
Z_0	m	Rugosité de sous canopée urbaine
Z_d	m	Distance au niveau des toitures du plan de déplacement nul
Z_r	m	Hauteur de référence

Introduction

Par le passé, la conception des bâtiments était souvent liée au maintien d'une ambiance intérieure de confort thermique, définie principalement par des paramètres hygrothermiques. Ainsi, le bâti traditionnel, voire la ville elle-même à l'image de la ville de type méditerranéenne, ont-ils été adaptés pour répondre aux sollicitations du climat. Avec le développement des systèmes de traitement des ambiances intérieures, les contraintes thermiques ont progressivement cédé la place aux critères architecturaux, économiques ou fonctionnels. Par la suite, du fait notamment des perfectionnements des systèmes de chauffage, les études de thermique du bâtiment ont connu un essor qui s'est encore amplifié avec la crise énergétique. L'isolation thermique des bâtiments est alors devenue l'objet de réglementations spécifiques aux situations hivernales, tandis que parallèlement, la climatisation d'été se répandait sans cadre réglementaire. Enfin plus récemment, l'émergence de préoccupations environnementales a suscité des études plus approfondies sur la demande énergétique des bâtiments, liée principalement aux systèmes de conditionnement des ambiances. Grâce à l'informatisation, ces études ont été affinées par l'élaboration de nombreux codes informatiques pour la simulation des ambiances intérieures permettant des calculs détaillés dès la phase d'avant-projet. Toutefois, la prise en compte des conditions climatiques aux abords des bâtiments est souvent limitée aux seules données de stations météorologiques de référence pour le site de la construction, ou réglementaires, sans prise en compte du couplage entre le climat et le bâti.

L'objectif de cette étude est de définir par des simulations thermoaérauliques, l'interaction du microclimat urbain avec le bâti et sa demande énergétique de climatisation dans le cas typique d'une rue canyon.

Au Chapitre 1, nous examinons les spécificités microclimatiques produites par la densification des zones urbaines. Les variations de température entre la ville et la campagne environnante sont un fait bien établi par de nombreux auteurs, et ce phénomène de microclimat propre aux villes est identifié sous la dénomination de « phénomène d'îlot de chaleur urbain ». Ce dernier peut être bénéfique en période hivernale eu égard aux besoins de chauffage, mais, en période estivale, il devient critique pour le confort thermique à l'intérieur des bâtiments ainsi que pour la demande énergétique exigée par la climatisation. Différentes causes à l'origine de ce phénomène sont identifiées, dont la production anthropique de chaleur, la morphologie urbaine, la pollution atmosphérique, mais aussi le couplage de ces paramètres avec deux phénomènes climatiques principaux : l'ensoleillement et les écoulements dominants dus au vent.

Dans l'étude bibliographique qui suit, au Chapitre 2, nous nous intéressons à la présentation des différentes échelles empiriques d'écoulement atmosphérique, de façon à préciser les phénomènes microclimatiques à l'échelle de la ville, de la rue et du bâtiment. Par ailleurs, en nous appuyant sur la littérature, nous explicitons les effets de l'ensoleillement sur le milieu urbain et sur les bâtiments. Cette connaissance empirique des phénomènes est utilisée par la suite, et confrontée à des résultats de mesure en site urbain, de développement récent.

Au Chapitre 3, nous nous proposons d'intégrer dans un modèle de type zonal, la modélisation simplifiée de deux phénomènes climatiques essentiels : l'ensoleillement et les écoulements dominants dus au vent. L'intérêt du choix d'une telle approche est comparé à d'autres méthodes de calcul, comme les méthodes fines de dynamique des fluides, par rapport aux objectifs d'étude de demande énergétique des bâtiments en milieu urbain.

Au Chapitre 4, nous entreprenons une première étude de l'impact sur les transferts thermoaérauliques de l'ensoleillement dans une rue de type canyon. Cette forme typique des centres urbains, est retenue par la suite pour l'ensemble de notre travail. La modélisation du rayonnement, et plus particulièrement des inter-réflexions, est développée au travers d'une approche originale et simplifiée.

Au Chapitre 5, une deuxième étude est menée sur l'écoulement d'air en milieu urbain : nous y analysons les données expérimentales de cinq rues de type canyon à Athènes. Les résultats sont confrontés à des modèles empiriques de vent en zone urbaine afin de pouvoir définir un mode de calcul de l'écoulement dans la rue canyon en conditions isothermes.

Enfin au Chapitre 6, nous abordons la prise en compte de l'effet couplé du vent dominant et de l'ensoleillement, et donc des mouvements de convection naturelle ; nous y proposons une intégration de ces phénomènes dans le modèle zonal. Cette modélisation simplifiée du microclimat urbain, à l'échelle de la rue, est mise en œuvre pour le cas d'une rue canyon à Athènes, la rue Dervenion. Les résultats de l'étude sont confrontés aux mesures disponibles pour la rue et deux applications possibles de cette approches sont alors étudiées : l'une afin de caractériser l'évolution de l'effet d'îlot de chaleur en lien avec l'architecture du site et le choix des points de mesure, et l'autre afin de quantifier la demande énergétique des bâtiments. Pour terminer, nous nous interrogeons sur l'intérêt de définir avec suffisamment de précision les conditions thermoaérauliques aux abords des bâtiments en vue de la conception d'un système de conditionnement des ambiances intérieures et à l'étude de l'interaction entre celui-ci, le bâtiment et l'environnement extérieur.

Chapitre 1

Problématique

La densification des villes et le développement des exigences de confort dans les bâtiments ont conduit à des solutions consommatrices d'énergies contradictoires avec des notions nouvelles telles que la nécessité d'un développement durable.

Des situations problématiques liées au climat sont constatées dans les grands centres urbains actuels, phénomènes d'autant plus perceptibles que des mesures de suivi et de contrôle sont mises en place avec de plus en plus de rigueur. Ces situations critiques sont constatées en été avec parfois des conséquences dramatiques, comme par exemple en France lors de la canicule de l'été 2003 avec un surplus de mortalité important chez les personnes âgées en particulier.

Par ailleurs, les bâtiments et leurs usages représentent une part importante de la demande énergétique globale. L'optimisation des systèmes liés au bâti est étroitement liée à la conception même des constructions et leurs interactions avec l'environnement proche. L'objet de cette étude est d'analyser l'interaction des phénomènes microclimatiques en milieu urbain avec les bâtiments ainsi que l'impact sur les sollicitations thermiques des ambiances intérieures.

1.1 Effet d'îlot de chaleur urbain

On appelle phénomène « d'îlot de chaleur urbain » l'observation de fortes différences entre les températures mesurées en site urbain et les températures des campagnes environnantes. En effet, la représentation de l'évolution spatiale de la température révèle dans ces conditions un pic de température, semblable à un « îlot », qui peut être observé au niveau des agglomérations, Figure 1-1. La forme de l'évolution de température observée est ici très fortement corrélée à la variation de densité urbaine.

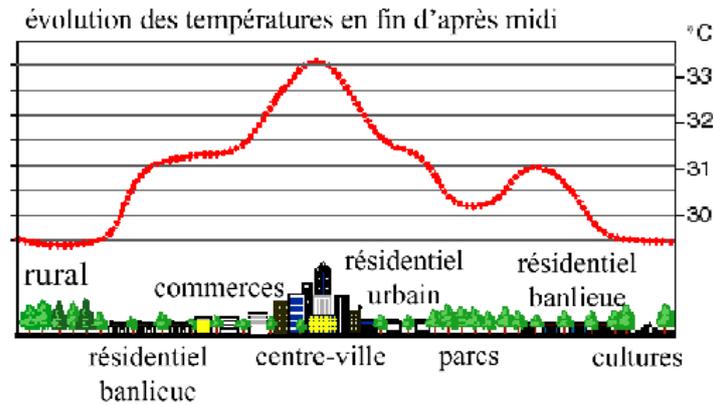


Figure 1-1 - Exemple de variation de la température entre milieu urbain et rural pour une fin d'après-midi estivale, d'après « Heat Island Group » (<http://ceetd.lbl.gov/HeatIsland/>)

1.1.1 OBSERVATIONS SUR LA TEMPÉRATURE EN MILIEU URBAIN

L'observation de l'évolution des températures en milieu urbain montre une augmentation d'année en année qui coïncide avec l'intensification de l'urbanisation. Ainsi, des mesures effectuées au centre-ville de Los Angeles (Akbari et al. 2001) montrent une augmentation des températures maximum d'environ 2,5 °C entre 1920 et 1997. Cette évolution a conduit à l'observation d'îlots de chaleur urbains. En Californie, des relevés sur une trentaine de villes et des zones rurales environnantes (Akbari et al. 2001) ont montré que ces villes constituaient des zones plus froides avant 1940, contrairement au phénomène actuel où la différence de température entre l'extérieur et l'intérieur de la ville est de 2,5 °C en moyenne. Ce phénomène est aussi révélé par les vues satellites de températures de surfaces, comme dans l'exemple la ville de Providence, États-unis, à la Figure 1-2.

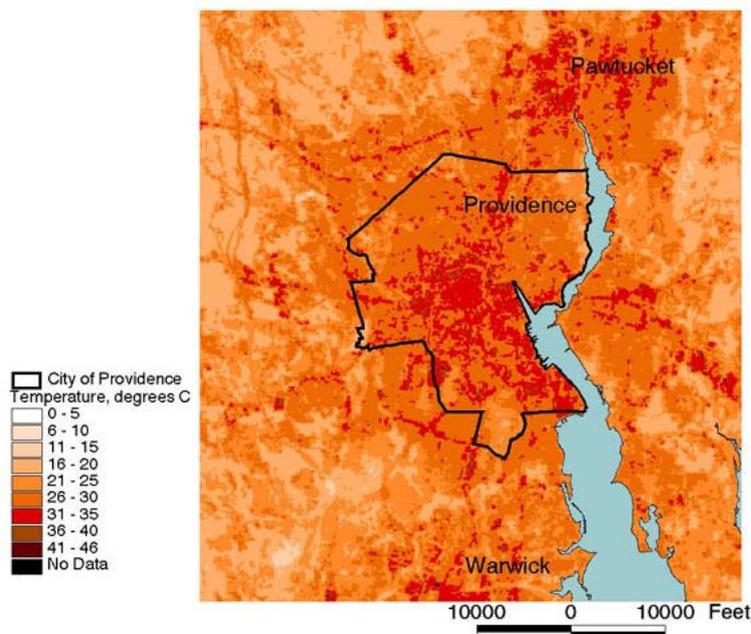


Figure 1-2 - Température de surface pour la ville de Providence d'après une image du satellite Landsat 7 de juillet 2001, d'après le site de « Brown University » (<http://envstudies.brown.edu>).

Comme pour la température d'air, l'effet d'îlot de chaleur observé au niveau des températures de surface, Figure 1-2, est bien corrélé avec la morphologie urbaine. Cependant, cet écart de température dû à l'urbanisation est difficilement quantifiable. Ainsi, certains sites urbains étaient plus froids dans le passé, et des phénomènes microclimatiques naturels rendent la comparaison difficile avec les différences de température actuelles. Ceci est dû aussi au fait que les centres urbains se sont souvent développés en fonction de configurations naturelles particulières, présence de cours d'eau pour le transport par exemple, et donc dans des conditions climatiques singulières. Comment quantifier alors l'écart de température dû à l'effet de l'urbanisation sans connaître précisément ces particularités climatiques initiales ? Une autre difficulté est due à la nature des relevés météorologiques disponibles, provenant principalement de stations de mesures situées en dehors des centres urbains, comme les zones aéroportuaires. Ces zones sont elles aussi choisies en fonction de caractéristiques naturelles particulières et donc de conditions météorologiques particulières souvent fort différentes des conditions recherchées aux abords des bâtiments.

De plus, les observations, telles que représentées Figure 1-1 et Figure 1-2, montrent que l'effet d'îlot de chaleur urbain suit bien la morphologie urbaine et les écarts de température notables sont observés aux frontières marquées entre milieu rural et urbain (Oke 1987). De nombreuses études se sont alors intéressées à l'étude des variations de températures en milieu urbain et de l'évaluation de l'impact de l'urbanisation sur ce phénomène (Landsberg 1981; Karl et Jones 1989; Goodridge 1992; Heino 1999).

Cet effet d'îlot de chaleur urbain peut être caractérisé par la différence de température maximum entre la ville et la campagne environnante ΔT_{urMAX} . Les variations de cette différence au cours de la journée montrent que le rafraîchissement nocturne en milieu urbain est affaibli (Oke 1987), l'écart de température devenant alors important la nuit. De plus, l'augmentation de température en début de journée est plus rapide en milieu rural et, temporairement, une température plus faible en ville peut même être observée. L'inertie plus importante du milieu urbain est notamment due aux matériaux et revêtements des surfaces urbaines.

L'effet d'îlot de chaleur urbain est d'autant plus marqué que la ville est importante. Ainsi, des mesures ont révélé une corrélation entre les écarts observés ΔT_{urMAX} et la population des villes. Oke propose une expression de ΔT_{urMAX} en fonction de la population et de la vitesse de vent de référence (Oke 1987). Cependant, cette relation est aussi fortement dépendante de la morphologie de la ville, ce qui conduit Oke à distinguer les villes européennes et américaines. Il propose donc une autre corrélation entre ΔT_{urMAX} et le rapport d'aspect W/H des rues de type canyon des centres urbains, où H représente la hauteur moyenne des bâtiments et W la largeur moyenne de ces rues dont la longueur L est grande par rapport à ces deux dimensions :

$$\Delta T_{urMAX} = 7,54 - 3,97 \ln\left(\frac{W}{H}\right) \quad (1.1)$$

Cette relation est très bien vérifiée (Oke 1987) par les relevés des différents types de villes, américaine ou européennes, étudiées par Oke. Il met ainsi en évidence la très forte importance de la géométrie urbaine sur le phénomène d'îlot de chaleur. Le ratio W/H correspond en réalité au facteur de forme ψ_{se} du ciel au centre de la rue, au niveau du sol, qui peut s'exprimer dans le cas de la rue canyon par (Oke 1987) :

$$\psi_{se} = \cos\left(\arctan\frac{2}{W/H}\right) \quad (1.2)$$

Oke exprime de façon plus générale ΔT_{urMAX} en fonction de ψ_{se} , quelle que soit la géométrie de la rue. Cette différence de température due à la géométrie peut s'expliquer notamment par la morphologie urbaine qui accentue l'effet des inter-réflexions et l'absorption d'énergie solaire.

Cependant, cette formulation semble être mal adaptée dans le cas de villes sous des climats différents, comme l'a montré en particulier l'étude de villes coréennes et japonaises (Montávez et al. 2003). En effet, pour être plus précis le potentiel de rafraîchissement du milieu rural doit être pris en compte au même titre que l'effet sur le microclimat du milieu urbain. Montávez et González-Rouco (Montávez et

al. 2003) proposent une formulation où le potentiel de rafraîchissement du milieu rural est pris en compte en introduisant un facteur a_{MG} . L'impact des caractéristiques du milieu urbain est calculé à partir des coefficients empiriques b_{MG} , c_{MG} et d_{MG} et de la prise en compte du rayonnement diffus de la voûte céleste accentué par la pollution avec le terme $\Delta E_{dif,ur}$, soit l'expression proposée suivante :

$$\Delta T_{urMAX} = a_{MG} + b_{MG}\psi_{se} + (c_{MG} + d_{MG}\psi_{se})\Delta E_{dif,ur} \quad (1.3)$$

Cette approche semble bien adaptée (Montávez et al. 2003) pour déterminer l'intensité de l'îlot de chaleur urbain pour les températures de surface en conditions météorologiques idéales, i.e. vent très faible et ciel clair. Mais en réalité l'îlot de chaleur urbain est dû à une concordance de nombreux facteurs (Oke 1987) recensés par Oke :

- ❖ absorption accrue du rayonnement de courtes longueurs d'onde due à la géométrie et à l'effet combiné de la surface accrue et des inter-réflexions,
- ❖ absorption accrue du rayonnement de grande longueur d'onde de la voûte céleste due à la pollution atmosphérique,
- ❖ pertes réduites par rayonnement grande longueur d'onde dues au faible degré d'ouverture vers la voûte céleste,
- ❖ sources de chaleur anthropogéniques,
- ❖ augmentation du stockage de chaleur latente,
- ❖ diminution de l'évapotranspiration du fait de la faible végétalisation des surfaces urbaines,
- ❖ diminution des transferts thermiques par transport due à la diminution des vitesses d'air.

Parmi ces facteurs, l'effet des sources anthropogéniques est mal connu, car difficile à évaluer. En effet, les sources de chaleur anthropogéniques correspondent à la production de chaleur des véhicules, des bâtiments et des industries, ainsi qu'au métabolisme humain. En moyenne, sur une ville, cette production de chaleur est généralement inférieure à 100 W/m^2 (Fan et Sailor 2005), mais elle peut varier fortement en fonction de la densité urbaine (Sailor et Lu 2004) et atteindre localement des valeurs beaucoup plus élevées. L'estimation de la production anthropogénique peut se faire à partir de la densité de population. Le développement de modèles simplifiés (Fan et Sailor 2005) démontre ainsi l'importance de ce paramètre, qui peut entraîner une variation de l'écart de température dû à l'îlot de chaleur urbain de l'ordre de 1°C . Cette influence est plus importante en période nocturne ou hivernale (Offerle et al. 2003), car la durée et l'intensité d'ensoleillement sont alors réduites. En été, la charge anthropique peut donc devenir négligeable par rapport à l'ensoleillement en journée qui est l'un des paramètres principaux de l'effet d'îlot de chaleur.

Finalement, les conditions microclimatiques auxquelles sont soumis les bâtiments peuvent être très différentes des conditions météorologiques données par une station de référence, et une étude tenant compte de l'ensemble de ces phénomènes s'avère nécessaire.

1.1.2 DEMANDE ÉNERGÉTIQUE DE BÂTIMENTS ET EFFET D'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

Le phénomène d'îlot de chaleur a des conséquences directes sur les charges climatiques des bâtiments, donc sur le confort thermique à l'intérieur de ceux-ci mais aussi sur leur demande énergétique. Si en hiver l'effet peut être positif sur la réduction des consommations dues aux systèmes de chauffage, en été les bâtiments climatisés ont par contre une consommation énergétique accrue. Des calculs ont ainsi estimé pour le centre d'Athènes une diminution de charge de chauffage de 30 à 50 % par rapport à celle relevées en banlieue (Santamouris et al. 2001b). Par ailleurs, les exigences de confort d'été dans les bâtiments, et donc la climatisation, se développent fortement. Ce développement est problématique en zone urbaine, et des relevés pour un bâtiment de référence dans le centre d'Athènes (Santamouris et al. 2001b) ont montré que les charges thermiques pouvaient être doublées par l'effet d'îlot de chaleur tandis que le coefficient de performance (COP) des systèmes d'air conditionné était réduit de 25 %.

Parallèlement aux températures moyennes, les maxima de température augmentent eux aussi, entraînant une augmentation des niveaux de puissance de crête. La puissance crête des systèmes de climatisation peut être directement corrélée aux charges climatiques et donc à cette augmentation. Ainsi, une étude sur six villes américaines (Akbari et al. 2001) a montré que le pic de puissance appelée aug-

mente de 2 à 4 % pour une augmentation de la température maximum de 1 °C, au-delà d'un seuil de 15-20 °C. Ces pics d'appel de puissance ont différentes conséquences négatives dont des baisses éventuelles de tension sur les réseaux électriques et surtout la nécessité de surdimensionner les systèmes de production par rapport aux consommations courantes.

Les dissipations thermiques des bâtiments participent alors de façon importante à l'amplification du réchauffement urbain. La densification des villes et l'accroissement général des consommations énergétiques font augmenter l'énergie dissipée, Figure 1-3, et les systèmes de climatisation peuvent représenter une part significative d'autant plus que leur charge augmente avec le réchauffement.

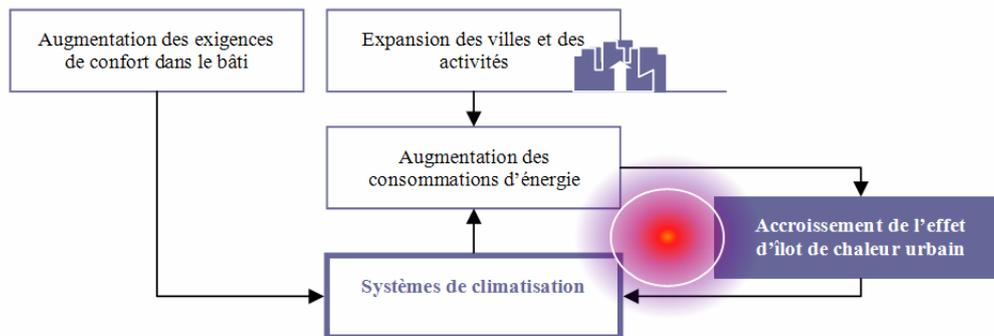


Figure 1-3 - Phénomène d'amplification de l'îlot de chaleur urbain et système de climatisation

D'autre part, l'urbanisation a souvent entraîné une diminution globale de l'albédo de surface, due en particulier à la disparition de la végétation. Cette caractéristique du milieu urbain peut avoir un impact sur les bâtiments du même ordre que l'effet d'îlot de chaleur. En effet, plusieurs expériences et simulations ont en montré les conséquences (Akbari et al. 2001), avec comme effet direct la corrélation entre les consommations énergétiques et les pics de puissance engendrés par la climatisation, et comme effet indirect la réduction des îlots de chaleur. Ainsi, Akbari a montré que l'application d'un revêtement d'albédo élevé sur des locaux scolaires, en Californie, permettait une économie d'énergie de 35% sur l'énergie consommée par la climatisation et une diminution de la puissance crête d'environ 20% sur la puissance crête appelée par la climatisation. Des simulations (Akbari et al. 2001) ont aussi montré que l'augmentation globale de l'albédo d'une ville, aux États-Unis, pouvait entraîner une diminution forte des îlots de chaleur urbains. Néanmoins, la validation de ces résultats par la mesure est difficile à mettre en œuvre réellement, surtout qu'elle n'est effective que si elle est respectée à grande échelle, l'effet étant indirect.

La végétation a aussi un impact important, notamment les arbres, de façon directe et indirecte. Les ombres portées sur les bâtiments et autres surfaces participent à la diminution des charges de climatisation. Le microclimat urbain peut aussi être amélioré par la présence d'arbres : l'évapotranspiration de la végétation rafraîchit l'air et la disposition des arbres modifie la circulation d'air en protégeant par exemple les bâtiments en hiver par rapport aux courants froids, ou inversement en favorisant un dispositif de ventilation naturelle en été.

1.2 *Étude de solutions alternatives à la climatisation et des sollicitations climatiques en milieu urbain*

Pour répondre aux exigences de confort thermique croissantes et aux exigences de développement durable, des architectures spécifiques et le développement de solutions de climatisation passive peuvent devenir de bonnes alternatives aux systèmes de climatisation classiques. Face au problème microclimatique en zone urbaine décrit précédemment, ces approches permettent aussi de réduire les consommations énergétiques, dont le bâtiment représente une part importante. Ainsi, la prise en compte du confort thermique d'été se développe dans les approches réglementaires et par des labellisations, comme par exemple le label Ecodom pour les départements d'outre-mer ou plus généralement la labellisation Haute Qualité Environnementale (HQE). Ces approches font notamment la promotion de solutions de ventilation naturelle qui semblent avoir un potentiel important d'économie d'énergie et de développement du confort thermique dans les bâtiments en milieu urbain (Germano et al. 2002; Kolokotroni et al. 2002).

1.2.1 *RAFRAÎCHISSEMENT PASSIF ET EFFET DE CONFINEMENT EN MILIEU URBAIN*

La ventilation des zones d'occupation des bâtiments est la méthode la plus répandue de rafraîchissement passif, puisqu'une vitesse d'air plus importante donne une sensation de rafraîchissement due à l'évapotranspiration. De plus, une ventilation correcte de la rue et/ou du bâtiment permet d'éliminer la chaleur accumulée, par les parois principalement. La ventilation naturelle des bâtiments peut être traversante ou simple exposition ; le vent dominant en milieu urbain étant généralement l'un des moteurs principaux de ces systèmes. D'autres systèmes utilisent aussi l'effet de tirage thermique. Le problème à la conception de ces systèmes est de connaître leur fonctionnement en régime dynamique, l'interaction avec les différents phénomènes microclimatiques étant très forte.

Le bon fonctionnement de la ventilation naturelle peut être compromis en milieu urbain par le confinement dû principalement à la densité des constructions et à la faible porosité de la morphologie urbaine. Cette faible porosité peut être renforcée par la présence de végétation qui, a priori bénéfique d'un point de vue thermique, fait écran à la circulation d'air. L'étude du système passif doit donc être suffisamment précise pour prendre en compte les comportements dynamiques du bâti en interaction avec son environnement, notamment dans les scénarii les plus défavorables en période estivale avec des vitesses de vent dominant très faibles.

Par ailleurs, l'ensoleillement joue un rôle prépondérant dans ces phénomènes de circulation d'air lorsque le vent est suffisamment faible ou que la zone étudiée est confinée. Cependant, un effet de confinement par rapport à l'ensoleillement est aussi constaté. En effet, bien que l'albédo des surfaces soit généralement faible en milieu urbain, les inter-réflexions entre bâtiments « piègent » le rayonnement, et le phénomène d'îlot de chaleur est renforcé par l'absorption de ces flux, dus aux inter-réflexions, par les parois.

Les solutions de rafraîchissement passif doivent donc pour se développer s'accompagner d'études suffisantes des conditions microclimatiques à l'interface du bâtiment et de l'environnement proche.

1.2.2 *SOLLICITATIONS CLIMATIQUES DES BÂTIMENTS*

L'un des objectifs de l'étude étant de déterminer les sollicitations climatiques sur le bâti, les ambiances intérieures étant climatisées ou non, les paramètres climatiques intéressants concernent les abords immédiats du bâtiment. La modélisation envisagée par la suite doit nous permettre de définir les flux de chaleur conductifs, au niveau des façades de bâtiment. Ces flux sont étroitement liés aux conditions de température d'air et donc aux échanges convectifs en façade, ainsi qu'aux échanges radiatifs liés à l'ensoleillement. Une approche simplifiée consiste à découpler l'étude thermoaéroulrique extérieure et intérieure, la définition des conditions extérieures étant parfois limitée aux seules données météorologiques. Ce niveau de modélisation peut être très insuffisant en milieu urbain du fait des particularités microclimatiques, ainsi que dans le cas de la ventilation naturelle où le taux d'ouverture en façade est relativement élevé.

Dans un projet où le bâtiment d'étude n'est pas complètement défini, il peut être intéressant d'obtenir des conditions aux limites qui donnent une estimation du potentiel de rafraîchissement de celui-ci.

Ainsi, une étude thermoaéraulique de l'extérieur du bâtiment peut aboutir à l'établissement de coefficients de pression, de températures de surfaces, de coefficients de convection et de température d'air extérieur. Par ailleurs, pour un bâtiment dont l'ambiance est régulée en température cette approche peut permettre d'estimer les charges climatiques à l'interface du bâtiment et de l'environnement extérieure, charges participant au dimensionnement d'un système de traitement des ambiances intérieures.

Le développement de méthodes de calcul simplifiées présentées dans ce rapport permet toutefois d'envisager de plus larges zones d'études, incluant la description approfondie de l'intérieur des bâtiments et des systèmes. Ainsi, une étude complète du comportement du bâti dans son environnement pourrait être menée.

1.3 Proposition d'une méthodologie de détermination de l'impact du microclimat urbain sur le bâti

Le microclimat urbain présenté précédemment peut modifier les charges climatiques des bâtiments et donc les ambiances intérieures. Le phénomène d'îlot de chaleur urbain est critique en période estivale où les phénomènes les plus influents sont l'ensoleillement et le vent, détaillés dans le chapitre suivant. Cette connaissance empirique des phénomènes climatiques principaux sera utilisée par la suite dans la modélisation générale pour l'étude d'une rue de type canyon.

Nous nous proposons en effet de modéliser le bâtiment dans son environnement proche, limité au domaine de la rue, sur une durée de l'ordre d'une saison pour estimer les sollicitations climatiques sur le bâti tout en tenant compte des effets couplés des différents phénomènes en régime variable. La comparaison de différentes modélisations thermoaérauliques nous a ensuite conduit au choix d'une approche simplifiée, de type zonale, d'un niveau de précision intermédiaire entre des modèles fins de dynamique des fluides et des modèles simples de type nodaux. Cette approche développée au LEPTAB pour l'étude des ambiances intérieures (Wurtz 1995; Musy 1999) nous permet d'envisager des simulations sur de longues périodes et des volumes importants tout en intégrant les spécificités du microclimat urbain décrit précédemment.

Une première étude du rayonnement et de l'effet de l'ensoleillement seul sur une rue de type canyon, nous amène à adapter cette modélisation. Le couplage du modèle thermoaéraulique avec un logiciel de calcul solaire, Solene (Antoine et Groleau 1998), a été développé pour définir précisément les conditions d'ensoleillement. Une méthode simplifiée du calcul des inter-réflexions est alors étudiée du point de vue du rayonnement de courte longueur d'onde, et confrontée à une méthode plus précise de référence, la méthode des radiosités. L'intérêt de cette démarche est ensuite mis en évidence par rapport à l'étude de l'impact de l'ensoleillement sur les phénomènes thermoaérauliques dans une rue.

La modélisation empirique de l'écoulement dû au vent dominant dans une rue en milieu urbain est ensuite développée. Dans cette seconde étude les effets thermiques locaux ne sont pas pris en compte, et des corrélations, entre l'écoulement moyen à grande échelle et celui dans la rue, sont établies. Une modélisation simplifiée de l'écoulement moyen est proposée et confrontée à des mesures sur cinq rues de type canyon situées au centre d'Athènes. Le modèle est développé en vue d'un couplage avec la modélisation thermoaéraulique retenue.

Une proposition de couplage entre cet écoulement de grande échelle et les phénomènes locaux dus aux forces de poussée thermique est développée. Cette méthode est intégrée dans un code de calcul et appliquée à l'étude d'une rue où des mesures ont été réalisées. Ces premiers résultats sont appliqués à l'étude plus précise du phénomène d'îlot de chaleur en milieu urbain, phénomène qui peut varier en fonction de la morphologie urbaine. Cette définition plus fine des paramètres thermiques près des façades est alors étudiée du point de vue de l'impact sur les charges climatiques du bâti et l'importance relative de la prise en compte des transferts thermoaérauliques couplés dans la rue. Enfin, l'impact d'un système de climatisation simplifié est étudié par rapport au microclimat ainsi qu'au couplage avec la charge thermique du bâtiment.

Chapitre 2

Étude bibliographique du microclimat urbain

Les études et la connaissance du microclimat urbain se sont développées récemment dans différents contextes et problématiques, comme l'étude des constructions, ou de la pollution atmosphérique. Ce chapitre précise les différents phénomènes microclimatiques afin de mieux définir notre problème. Dans une première partie, la circulation d'air en milieu extérieur est étudiée ; elle peut être abordée à différentes échelles et elle devient complexe à l'échelle urbaine. L'identification de différentes zones d'écoulement a permis d'établir des lois empiriques décrivant ces mouvements d'air. L'ensoleillement, source importante d'apport thermique, participe aussi à la complexité de détermination des conditions microclimatiques en site urbain. Enfin, les études récentes du microclimat urbain nous permettent d'envisager la confrontation de nos résultats de simulation avec des mesures sur site.

2.1 Circulation d'air en milieu urbain

En milieu urbain, les mouvements d'air sont fortement perturbés par de nombreux obstacles de formes diverses. Cette perturbation atmosphérique peut être abordée à différentes échelles, selon la représentation simplifiée de la Figure 2-1.

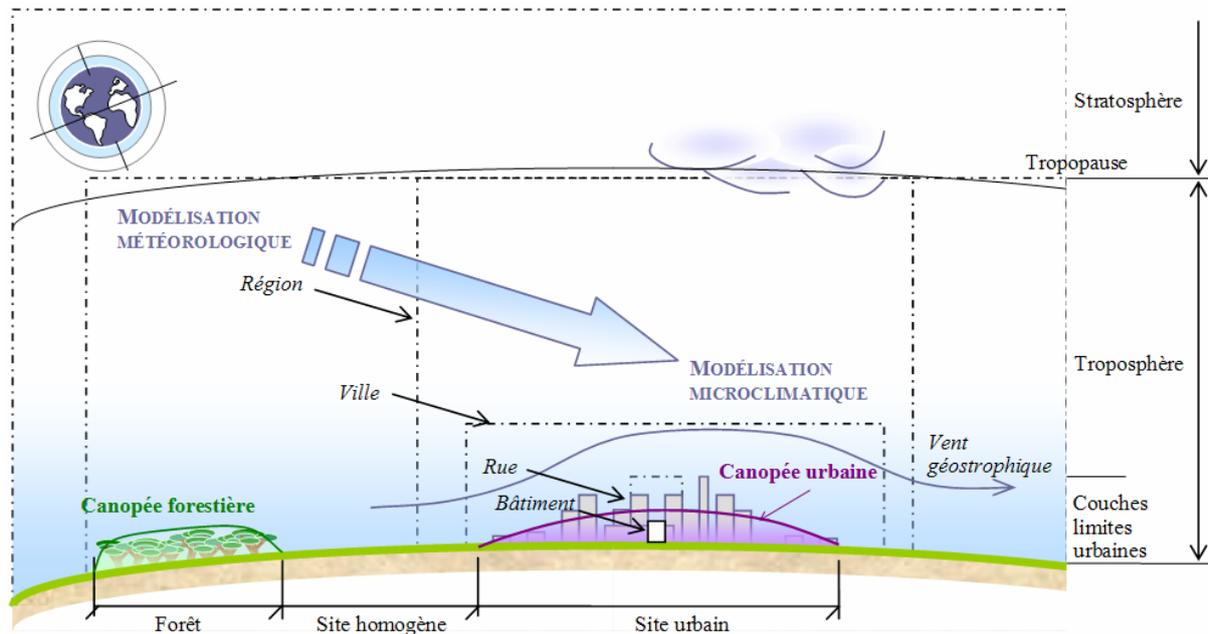


Figure 2-1 - De la modélisation météorologique à la modélisation microclimatique, jusqu'à l'interface entre le bâti et son environnement proche

L'écoulement d'air entre les bâtiments est très affaibli et la modélisation empirique de ces écoulements s'est inspirée de l'écoulement d'air sous la canopée forestière (Nicholson 1975). La limite d'obstruction de l'écoulement en milieu urbain est parfois appelée par analogie « canopée urbaine », Figure 2-1. De nombreuses études se sont intéressées à la caractérisation aérodynamique, par les paramètres de rugosité, des différentes zones urbaines rencontrées. Ces propriétés permettent d'envisager des modèles empiriques utilisables par la suite dans nos modèles thermo-aérodynamiques à l'échelle microclimatique.

Aussi, pour définir précisément les limites de notre étude, les différentes échelles climatiques sont tout d'abord décrites par rapport à la circulation d'air à la surface du globe. Les mouvements atmosphériques à l'échelle régionale sont modifiés à l'échelle des villes, Figure 2-1, et la connaissance de ces écoulements locaux est nécessaire pour une description correcte de l'écoulement autour des bâtiments.

2.1.1 ÉCHELLES CLIMATIQUES ET PHÉNOMÈNES LOCAUX

Les anticyclones et les dépressions sont à l'origine de mouvements d'air à l'échelle planétaire, notamment entre l'équateur plutôt chaud et les pôles plutôt froids. Les vents dominants sont des phénomènes observables sur plusieurs centaines de kilomètres et ils fluctuent sur des périodes de l'ordre de la journée ; ils sont considérés comme des phénomènes climatiques de grande échelle selon le classement représenté à la Figure 2-2. Mais, localement, des phénomènes spécifiques peuvent apparaître comme des brises de terre/mer ou de montagne/vallée. Ces brises sont dues à des écarts de température relativement importants sur de faibles distances, elles dépendent de la géographie locale.

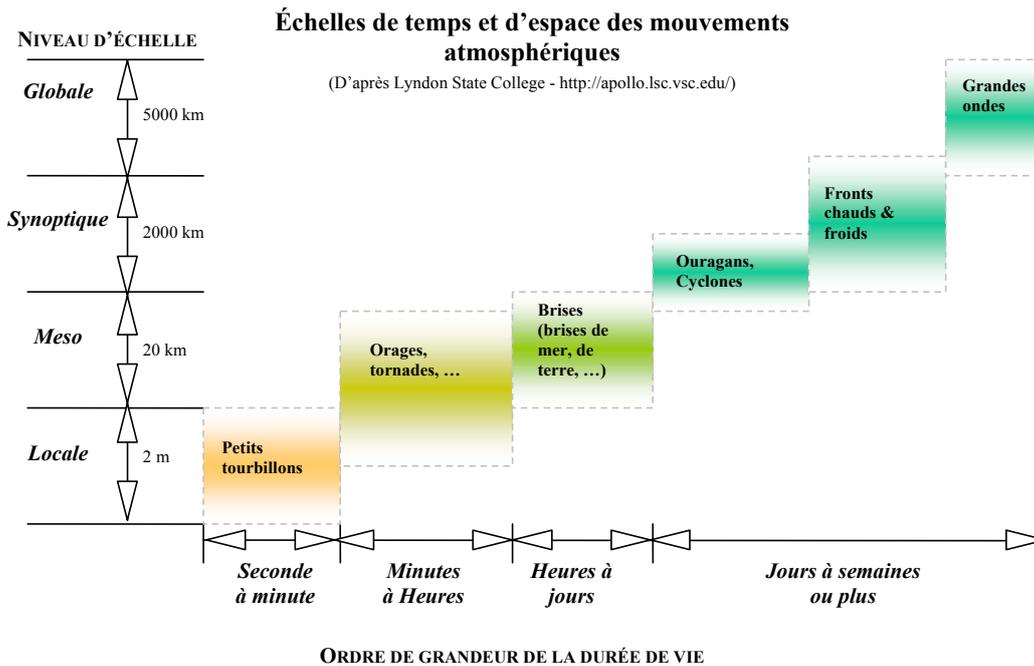


Figure 2-2 - Les différents niveaux d'échelle spatiotemporels des phénomènes climatiques, d'après Lyndon State College

Ces mouvements d'air peuvent être caractérisés localement par les équations de conservation de la quantité de mouvement, de la masse et de l'énergie. Néanmoins, étant donnée la complexité du milieu étudié, une description plus macroscopique est nécessaire. Trois échelles principales d'étude peuvent être définies (Allard 1998) : l'échelle régionale qui couvre des étendues de l'ordre de la centaine de kilomètres, l'échelle meso qui couvre des étendues de l'ordre de la dizaine de kilomètres, et l'échelle microclimatique, objet de la présente étude, qui correspond à quelques centaines de mètres. Pour cette dernière échelle, l'écoulement d'air peut être modifié non seulement par la présence de petits obstacles, de la végétation, mais aussi par des phénomènes thermiques liés notamment à l'ensoleillement.

2.1.2 CIRCULATION D'AIR À L'ÉCHELLE ATMOSPHÉRIQUE ET VENTS DOMINANTS

Les grands mouvements d'air à l'échelle du globe sont provoqués par des différences de pression et de température dans la couche atmosphérique. L'atmosphère n'est pas homogène thermiquement, et en fonction de l'altitude différentes couches ont été définies en fonction des mesures de température et de pressions. Les premières mesures effectuées par Pascal ont montré la variation de la pression atmosphérique en fonction de l'altitude, mais c'est beaucoup plus tard que sa structure verticale a été déterminée à partir de moyens de mesures plus élaborés tels que les ballons sondes notamment. Plusieurs couches atmosphériques ont été définies, représentée à la Figure 2-3, chaque couche correspondant à une inversion de l'évolution de température : la troposphère au niveau de la surface, puis la stratosphère, la mésosphère et la thermosphère.

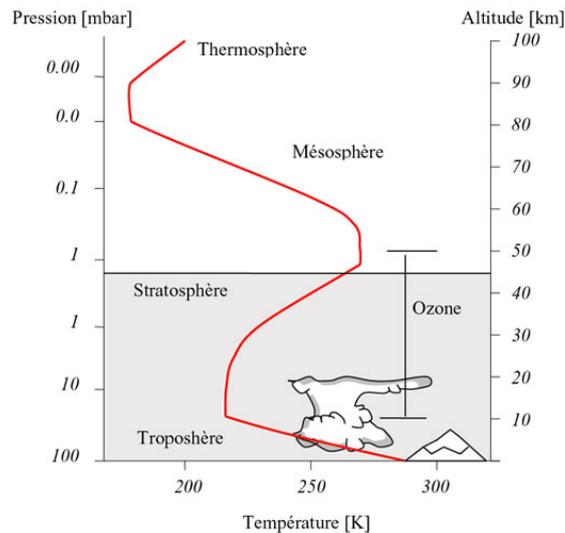


Figure 2-3 - Profil de température et définition des différentes couches atmosphériques en fonction de la température (d'après <http://www.ens-lyon.fr/Planet-Terre/Infosciences/Climats/Structure-atm/>)

Au-dessus de la stratopause, limite supérieure de la stratosphère située à environ 40 Km (Aubé 2002), la densité de l'air devient très faible et la limite supérieure de l'atmosphère n'est pas précisément définie. Au-delà d'une certaine altitude, une part des gaz échappe à l'attraction terrestre, et un renouvellement permanent s'effectue à partir des différentes sources terrestres. La tropopause se situe à une altitude variable en fonction notamment de la latitude, de 8 à 17 Km des pôles à l'équateur (Aubé 2002) ; la hauteur de celle-ci augmente avec la température moyenne d'air, l'air étant alors moins dense. Au niveau de la tropopause, la température atteint un minimum d'environ -57 °C , la décroissance moyenne de température étant d'environ 6.5 °C/Km dans la troposphère. La hauteur de la tropopause peut donc varier aussi quotidiennement de part l'influence de la température (Strawbridge et Snyder 2004). Dans la stratosphère cette température remonte jusqu'à environ 0 °C au niveau de la stratopause. Cette augmentation de température est provoquée par la transformation de l'oxygène en ozone sous l'effet du rayonnement solaire ultraviolet.

Les phénomènes climatiques observés au niveau de la surface terrestre ont principalement lieu dans la troposphère, notamment au niveau de la couche limite planétaire (CPL) qui s'étend jusqu'à une limite de 2 Km d'altitude.

Mouvements d'air verticaux dans la troposphère

En conditions stables la pression diminue avec l'altitude et ainsi que sa température. Cette variation est indépendante des échanges de chaleur et on définit alors le gradient adiabatique sec de température G_a (1 °C pour 100 m) qui correspond au gradient de température en conditions définies alors comme « neutres ». Cependant de nombreux échanges de chaleur ont lieu près du sol et trois états de conditions atmosphériques peuvent alors être définis :

- ❖ Atmosphère neutre ou adiabatique : le taux de refroidissement de l'air est égal au gradient adiabatique,
- ❖ Atmosphère instable ou sur-adiabatique : le taux de refroidissement de l'air est supérieur au gradient adiabatique,
- ❖ Atmosphère stable ou sous-adiabatique : le taux de refroidissement de l'air est inférieur au gradient adiabatique.

En condition sous-adiabatique extrême, la température s'accroît avec l'altitude. Ce phénomène, appelé inversion de température, est caractérisé par une altitude maximum d'inversion et une différence de température entre la partie basse et haute. Celui-ci peut être observé lorsque le sol rafraîchit l'air au cours de la nuit alors que l'air en altitude se maintient en température ; le plan d'inversion de température peut se trouver entre 100 et 400 mètres. Du fait de la forte stabilité de cette situation, si le réchauffement diurne est faible, le plan d'inversion de température demeure et les échanges entre les deux couches restent très faibles.

À l'échelle du globe et à une même altitude on observe des zones de basse pression, dites dépressions, et des zones de haute pression, appelées anticyclones, Figure 2-4.

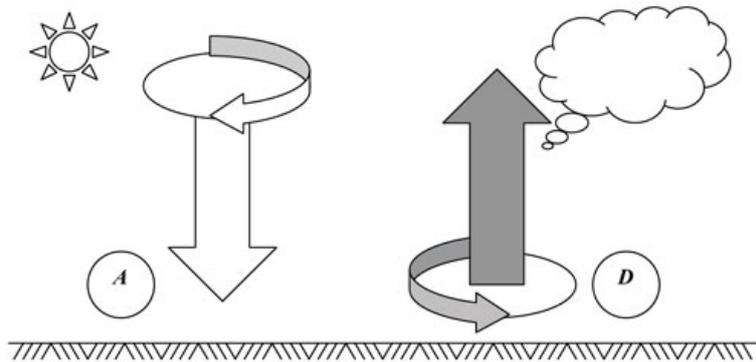


Figure 2-4 - Anticyclones (A) et Dépressions (D) et mouvements d'air

L'air descend dans les zones de haute pression, où la « colonne d'air » est plus importante, et remonte dans les zones de basse pression. Le mouvement d'air descendant est lent et celui-ci se réchauffe progressivement, ce qui souvent limite la formation de nuages, tandis que dans les zones d'air ascendantes l'air humide se refroidit, favorisant ainsi la condensation et la formation de nuages.

Mouvements d'air horizontaux : le vent

Les vents correspondent aux mouvements d'air entre ces zones, vents d'autant plus forts que les zones sont rapprochées et les écarts de pression importants. Cependant, à l'échelle atmosphérique, ces mouvements d'air ne se font pas directement des zones anticycloniques vers les zones dépressionnaires, car l'effet de la force de Coriolis crée une déviation du mouvement d'air, force vers la droite dans l'hémisphère nord et vers la gauche dans l'hémisphère sud. Cette force, explicitée par Gustave Gaspard Coriolis en 1835, est très faible et négligeable aux petites échelles. Mais à grande échelle, cette force est déterminante ; elle provoque une déviation qui entraîne l'air de l'hémisphère nord d'un mouvement horaire autour des anticyclones vers un mouvement antihoraire autour des dépressions, Figure 2-4, et dans le sens inverse dans l'hémisphère sud. Ainsi, lorsque ces deux seules forces agissent et s'équilibrent, le vent est appelé vent géostrophique et il est alors parallèle aux isobares.

Le vent est aussi soumis aux frottements dus à la surface terrestre et, proche du sol, la force de Coriolis devient négligeable ; le vent n'est donc plus géostrophique et l'air s'écoule plutôt suivant le gradient de pression dominant. Cette zone correspond à la couche limite planétaire définie précédemment.

2.1.3 VENT EN SITE HOMOGENÈME

Loin du sol, à plus de 1000 m, les perturbations sont faibles et le vent est sensiblement parallèle aux isobares, ce qui correspond à l'équilibre géostrophique, décrit précédemment, entre la force de Coriolis et la force du gradient de pression. Plus près du sol, les forces de frottement sur le sol rugueux réduisent la vitesse du vent, en valeur moyenne, et sont sources de turbulence ; l'effet de cette rugosité est sensible sur plusieurs centaines de mètres. Localement, l'écoulement peut être décrit par les équations de conservation de la masse (ou équation de continuité), de conservation de la quantité de mouvement (équation de Navier Stokes) et de conservation de l'énergie. Ces équations permettent de déterminer le champ de vitesse U de l'air, de composantes U_i , U_j , U_k . Cependant, pour simplifier l'étude de l'écoulement, il est courant dans les modèles météorologiques de décomposer au point M les composantes du champ de vitesse d'air $U_i(M,t)$ en une composante moyennée en temps $\bar{u}_i(M)$ et une composante fluctuante $u_i'(M,t)$:

$$U_i(M,t) = \bar{u}_i(M) + u_i'(M,t) \quad (2.1)$$

$$\bar{u}_i(M) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} U_i(M,t) \cdot dt \quad (2.2)$$

La vitesse horizontale instantanée, ou vitesse de vent, est usuellement décomposée en une vitesse moyenne sur une période de dix minutes et une vitesse correspondant aux fluctuations. La composante moyenne est mesurée en site homogène à dix mètres du sol par les stations météorologiques qui donnent aussi l'orientation et la fréquence du vent dominant pour un site donné. La composante verticale de la vitesse dépend plutôt de phénomènes locaux et puisque la hauteur de la stratopause est faible à l'échelle du globe terrestre, ce sont plutôt les mouvements horizontaux qui sont étudiés. Cependant, les effets thermiques et la géométrie de surface peuvent entraîner localement des vitesses ascendantes ou descendantes non négligeables.

Les relevés de mesures météorologiques présentent les résultats sous forme d'une rose des vents, comme par exemple le relevé de MétéoFrance de la Figure 2-5, qui donnent l'orientation, la vitesse et la fréquence du vent pour un site donné et à dix mètres du sol. La fréquence est représentée par des traits de longueur proportionnelle à celle-ci, pour chaque direction et par des épaisseurs différentes en fonction de l'intensité de la vitesse mesurée : de 2 à 4 m/s, de 5 à 8 m/s et supérieure à 8 m/s.

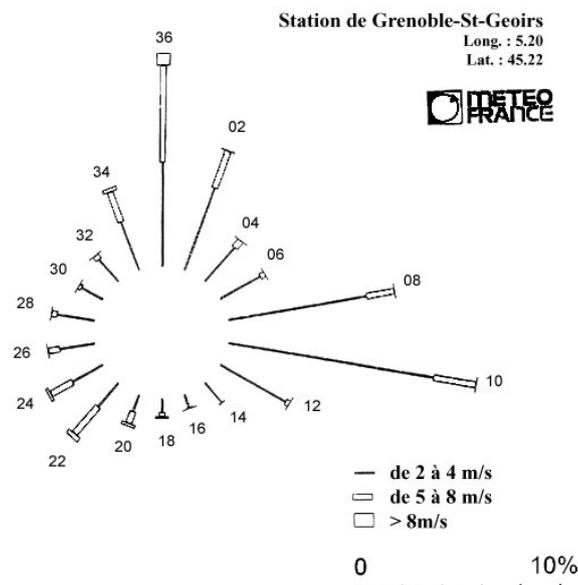


Figure 2-5 - Exemple d'une rose des vents établie à partir de relevés d'une station météorologique (Météo France – période de 1951 à 1980 – Grenoble St-Geoirs)

Sur un site homogène, Figure 2-1, la rugosité est identique en tout point : la vitesse ne dépend a priori que de l'altitude au point considéré. Ce cas peut correspondre, par exemple, à un vent en milieu rural de rugosité régulière. La vitesse horizontale moyenne $\bar{u}(z)$ dépend de l'altitude et de la rugosité du sol et peut être modélisée par une loi logarithmique (Gandemer 1981) :

$$\begin{aligned} \bar{u}(z) &= K u_{10} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \\ &= C_z u_{10} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Avec z l'altitude du point considéré, u_{10} la vitesse moyenne de référence prise par convention à dix mètres du sol en site plat et à faible rugosité. Les coefficients z_0 et K sont établis expérimentalement par type de site, où la longueur de rugosité z_0 correspond à la distance à la paroi où la vitesse serait nulle si le profil était logarithmique partout.

Par contre les fluctuations de la vitesse d'air $u'(M,t)$ varient aléatoirement et il est plus facile de les étudier de statistiquement. Ces fluctuations sont caractérisées par l'écart type σ en m/s sur la période T choisie :

$$\begin{aligned}\sigma &= \sqrt{u'(M,t)^2} \\ &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u'(M,t)^2 dt}\end{aligned}\quad (2.4)$$

σ dépend du site et peut s'écrire (Gandemer 1981) :

$$\sigma = K \cdot u_{10} \quad (2.5)$$

Ces fluctuations correspondent à la turbulence produite par une surface rugueuse, et l'intensité de cette turbulence peut être quantifiée par un nombre adimensionnel I_z :

$$I_z = \frac{\sigma}{\bar{u}(z)} \quad (2.6)$$

À partir des relations (2.3) et (2.5) on obtient :

$$I_z = \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (2.7)$$

La turbulence décroît donc avec l'altitude : les phénomènes tourbillonnaires sont d'autant plus importants que l'on se trouve proche du sol (dans l'hypothèse d'un profil logarithmique du vent moyen). Cette formulation du champ de vitesse du vent ne reste valable que pour un site de rugosité régulière et en atmosphère neutre. Elle ne peut donc plus être appliquée en zone urbaine à cause de la rugosité trop irrégulière et une description plus détaillée est alors nécessaire.

2.1.4 VENT EN SITE URBAIN

La couche limite atmosphérique en site homogène se modifie aux abords des constructions ainsi que le profil de vitesse moyenne, Figure 2-6.

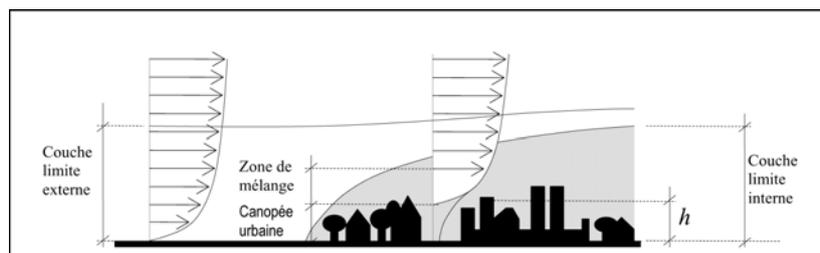


Figure 2-6 - Profil moyen de la vitesse horizontale du vent dominant en site homogène et en site urbain (Plate et Kiefer 2001)

La rugosité variable des sites urbains entraîne donc la formation d'une nouvelle couche limite atmosphérique appelée couche limite urbaine (Oke 1987) ou Urban Boundary Layer (UBL).

Sous-couches atmosphériques en milieu urbain

En milieu urbain, le profil moyen de vitesse d'air dû au vent dominant est différent du profil logarithmique défini en site homogène. L'écoulement est ainsi fortement perturbé aux abords des bâtiments. En revanche, au-delà d'une zone appelée zone de mélange, le profil de l'écoulement redevient similaire à celui d'un site homogène. Des relations empiriques établissent le profil de vitesse en fonction

de la rugosité du site, souvent sous forme logarithmique (Nicholson 1975). D'après (Rotach 1999), ce profil dépend beaucoup des axes dominants des rues canyon, même loin du sol.

À partir de cette zone de mélange, plusieurs sous-couches d'écoulement peuvent être définies, Figure 2-7, de la même façon que pour un écoulement de paroi.

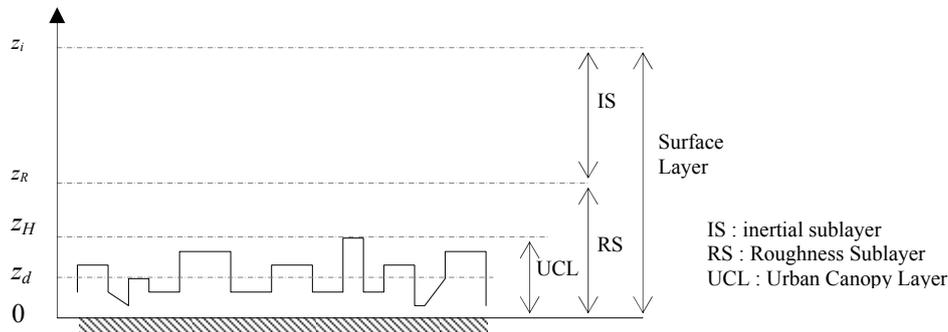


Figure 2-7 - Répartition verticale des différentes couches de circulation d'air au-dessus d'un milieu urbain, d'après (Rotach 1999).

La zone d'écoulement perturbée est aussi appelée couche limite de surface, ou « surface layer », Figure 2-7, et s'étend sur plusieurs dizaines de mètres au-dessus des bâtiments. En partie haute, la couche limite inertielle s'apparente à l'ensemble de la couche limite de surface pour les zones rurales (Rotach 1999). Dans la partie basse de la couche limite, $z < z_R$, l'écoulement est perturbé et des écoulements secondaires verticaux ou transversaux sont observés, cette zone est appelée sous couche limite rugueuse ou « Roughness Sublayer ». En pratique, l'écoulement tridimensionnel et fortement variable provoqué par la forte irrégularité de la rugosité rend difficile la définition en échelle réelle de cette limite z_R en zone urbaine ou périurbaine.

Dans la couche limite sous la « canopée urbaine » ou Urban Canopy Layer (UCL), de hauteur moyenne z_H , la vitesse moyenne de l'écoulement dominant diminue fortement. En conditions neutres, le profil de vitesse moyenne observé en site homogène est décalé d'une hauteur z_d , appelée aussi hauteur de déplacement. En milieu urbain, la vitesse de référence u_{10} est alors définie pour une hauteur de 10 mètres au-dessus de z_d .

Près de ce plan de déplacement, de manière analogue à un écoulement en site homogène, une longueur de rugosité z_0 est définie. Le « nombre de Jensen » associé, z_H / z_0 , est l'un des paramètres d'échelle principaux dans les études aérauliques.

Pour la zone correspondante à notre étude, au niveau des bâtiments, de nombreux phénomènes interviennent et une étude thermoaéraulique locale est nécessaire.

Rugosité en site urbain

La forte rugosité des surfaces urbaines se traduit par des hauteurs de couche limites importantes, et la limite de sous couche rugueuse z_R relevée par différentes études (Grimmond et Oke 1999) montrent qu'elle varie entre 2 à 5 fois la hauteur moyenne z_H .

Utiles pour définir l'écoulement près du sol, la hauteur z_d et la rugosité z_0 peuvent être estimées à partir de valeurs caractéristiques pour différents types de zones urbaines répertoriées par la littérature, Tableau 2-1, en l'absence de données plus précises. Les différentes zones sont caractérisées par le niveau moyen des bâtiments ainsi que par le type de construction, industriel ou résidentiel par exemple, à laquelle une morphologie typique peut être associée.

Tableau 2-1- Propriétés aérodynamiques typiques pour des zones urbaines homogènes d'après (Grimmond et Oke 1999)

	z_H [m]	z_d [m]	z_0 [m]
Densité et hauteur faibles Résidentiel à 1 ou 2 niveaux avec jardins et petits arbres, entrepôts, zones industrielles.	5-8	2-4	0,3-0,8
Densité et hauteur moyennes Résidentiel à 2 ou 3 niveaux proches ou bâtiments de moins de 5 niveaux espacés.	7-14	3,5-8,0	0,7-1,5
Forte densité et grande hauteur Bâtiments proches d'au moins 6 niveaux, centres-villes.	11-20	7-15	0,8-1,5
Immeubles de grande hauteur Situés en zone urbaine dense.	>20	>12	>2,0

Deux types d'approches sont donc utilisées pour définir ces hauteurs (Grimmond et Oke 1999) : l'une en fonction de la morphologie de la surface, telle qu'au Tableau 2-1 de façon simplifiée, et l'autre par l'observation microclimatique et l'identification des paramètres avec les profils logarithmiques. La détermination de ces paramètres à partir de la morphologie de surface peut se formuler plus précisément à partir de la définition d'une texture moyenne d'une ville ou d'un quartier tel que schématisé à la Figure 2-8.

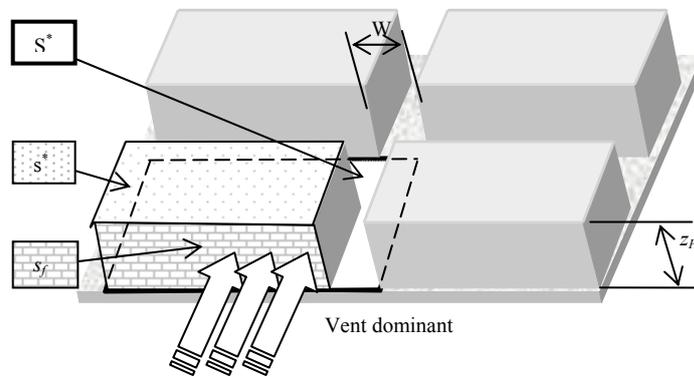


Figure 2-8 - Surfaces caractéristiques pour une morphologie urbaine régulière en blocs.

La formulation morphologique la plus simple consiste à évaluer z_d et z_0 en fonction de la hauteur moyenne des obstacles z_H par des coefficients empiriques f_d et f_0 , voir équation (2.8), respectivement de l'ordre de 0,5 à 0,7 et 0,1 d'après (Grimmond et Oke 1999).

$$\begin{cases} z_d = f_d z_H \\ z_0 = f_0 z_H \end{cases} \quad (2.8)$$

Lettau (Lettau 1969), cité par (Nicholson 1975), propose une autre formule simple d'estimation du paramètre de rugosité z_0 en fonction de z_H et du rapport s^*/S^* de la surface de bâtiment à la surface de terrain considéré, exprimée sous la forme :

$$z_{0N} = z_0 + z_d \approx z_H \frac{s^*}{S^*} \quad (2.9)$$

z_d est alors estimé par (Nicholson 1975) :

$$z_d = (z_H + z_{0N}) - z_{0N} x_N \text{ avec } x_N \text{ tel que } x_N \ln(x_N) = 0,1 \frac{z_H^2}{z_{0N}^2} \quad (2.10)$$

La relation entre densité de bâti s_f/S^* et rugosité z_0 se retrouve à travers différentes études expérimentales sur site ou en soufflerie, résultats représentés Figure 2-9, avec s_f la surface de bâti en projection perpendiculaire au vent.

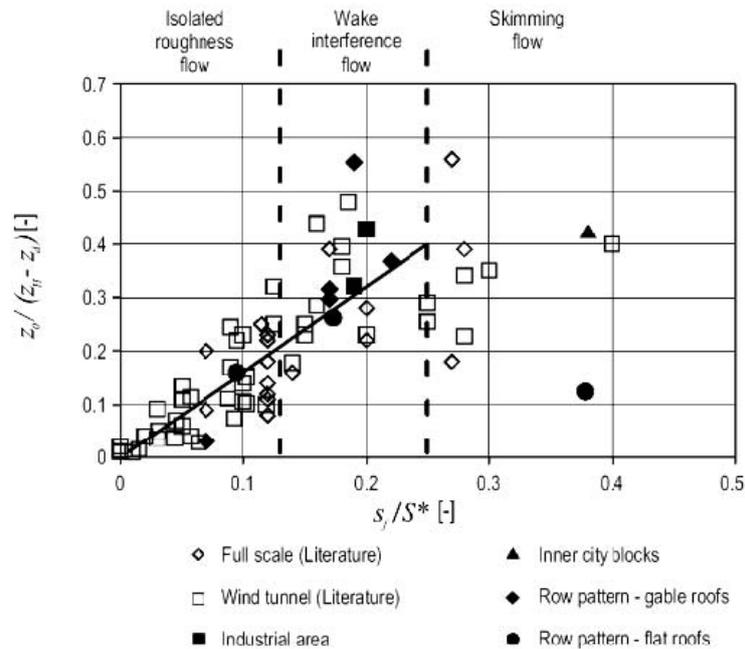


Figure 2-9 - Rugosité adimensionnelle en fonction de la densité de bâti s_f / S^* , d'après (Plate et Kiefer 2001)

En fonction de ce paramètre de densité, trois types d'écoulements ont été relevés (Figure 2-9) : l'écoulement à rugosité isolé, à interférence de sillage et rasant. Pour un écoulement rasant, la relation entre rugosité adimensionnelle et densité n'est pas établie, et une étude en fonction de la morphologie urbaine considérée doit être menée. Une classification des diverses formes d'urbanisme a été proposée par Theurer et appliqué sur trois villes en Allemagne, l'auteur a relevé les caractéristiques moyennes de chaque forme urbaine (Theurer 1999).

La seconde approche, à partir de l'expression logarithmique du profil de vitesse, la relation entre z_0 et z_d peut aussi s'écrire analytiquement en fonction du rapport s_f / S^* (Bottema 1996) :

$$z_0 = (z_H - z_d) e^{\sqrt{0,5 \frac{s_f}{S^*} C_d}^{-\kappa}} \quad (2.11)$$

où C_d est un coefficient de traînée dépendant de la forme des obstacles. Des formulations prenant en compte plus précisément la géométrie des bâtiments ont été proposées par différents auteurs (Bottema 1996; Bottema 1997; Bottema et Mestayer 1998).

Cependant, les formulations de rugosité les plus complètes sont plus difficiles à mettre en œuvre à cause du nombre de paramètres difficiles à estimer et à confronter aux cas réels (Grimmond et Oke 1999). Des tableaux de valeurs ou des expressions simplifiées peuvent néanmoins donner des estimations suffisamment représentatives.

Pour la sous-couche obstruée en dessous du plan de déplacement nul, ou sous-canopée urbaine, l'écoulement moyen est beaucoup plus difficile à définir du fait des fortes irrégularités du milieu. Nicholson propose la définition d'un autre paramètre de rugosité Z_0 , dérivée d'études sur l'écoulement sous la canopée forestière (Nicholson 1975), en fonction de l'espacement moyen entre les obstacle D^* :

$$Z_0 = z_H \frac{D^*}{z_{0N}} \quad (2.12)$$

Pour une rue, ce paramètre de rugosité de sous-canopée Z_0 est pratiquement nul lorsque la longueur de rugosité z_{0N} est grande par rapport à la profondeur z_H ou la largeur de la rue D^* , tandis qu'il peut être élevé dans le cas contraire.

Les modèles de couche limite atmosphérique présentés ici permettent de définir qualitativement des écoulements moyens à l'échelle d'une ville. Mais pour décrire précisément les mouvements d'air autour des bâtiments, fortement perturbés, cette approche est insuffisante.

Profils de vitesse moyenne

Bien que la vitesse moyenne horizontale $\bar{u}(z)$ dans le sens de l'écoulement dominant soit fortement perturbée en milieu urbain, cette grandeur est couramment utilisée, en particulier pour la détermination des charges mécaniques sur les constructions. Dans le cas d'un vent suffisamment fort, les profils empiriques de vitesse moyenne sont par ailleurs suffisants pour déterminer les charges extrêmes dues au vent ; les perturbations dues aux effets thermiques devenant alors négligeables. Dans l'hypothèse d'une atmosphère neutre, une expression logarithmique de la vitesse moyenne est souvent utilisée pour la sous couche atmosphérique urbaine au dessus du plan de déplacement nul (Nicholson 1975) :

$$\bar{u}(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z - z_d + z_{0N}}{z_{0N}} \right) \quad (2.13)$$

où u^* , vitesse de friction, s'exprime en fonction d'une vitesse de référence u_{10} mesurée à $z_d + 10$ m. En pratique, cette vitesse en atmosphère neutre est difficilement mesurable. Elle peut être estimée à partir de la vitesse géostrophique \bar{u}_G du vent et du coefficient C_g qui dépend de \bar{u}_G , z_{0N} et du coefficient de Coriolis f (Nicholson 1975) :

$$u^* = C_g(\bar{u}_G, z_{0N}, f) \approx \frac{1}{10 \ln \left(\frac{\bar{u}_G}{z_{0N} f} \right)} \cdot \bar{u}_G \quad (2.14)$$

Cependant, au niveau des rues, des effets locaux d'accélération par effet venturi sont observés et le profil de vitesse moyenne sous la « canopée urbaine » peut alors s'exprimer par une formulation empirique fonction de la rugosité de sous-couche limite Z_0 (Nicholson 1975) :

$$\bar{u}(z) = U_0 \cdot e^{\frac{z}{Z_0}} \quad (2.15)$$

où U_0 est déterminé par continuité des profils à la cote z_H , selon la représentation à la Figure 2-10 et les relations (2.13) et (2.15).

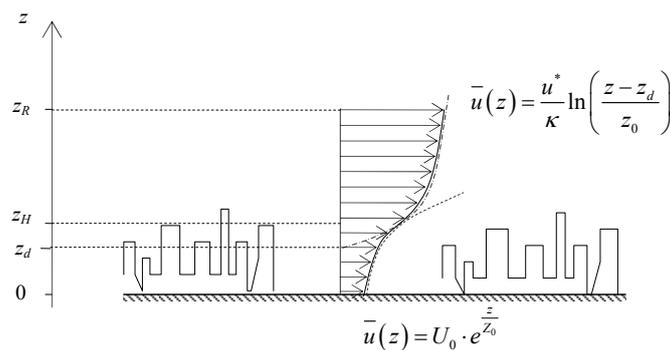


Figure 2-10 - Profil de la vitesse moyenne de vent $\bar{u}(z)$ en site urbain, d'après (Nicholson 1975)

Lorsque le paramètre Z_0 est grand, la vitesse sous la canopée urbaine est à peu près constante égale à U_0 , tandis que lorsque Z_0 est faible, l'atténuation de vitesse selon l'évolution exponentielle devient importante.

2.1.5 À L'ÉCHELLE DES BÂTIMENTS

La valeur moyenne de la vitesse du vent aux abords des bâtiments peut être définie de façon approchée en fonction de la rugosité du sol, des modifications locales de relief et de la présence d'obstacle singulier. Ces trois paramètres peuvent être pris en considération dans le calcul de la vitesse moyenne \bar{u} par trois coefficients empiriques respectifs C_R , C_T et C_S (Allard 1998) :

$$\bar{u}(x, z) = u_{10} \cdot C_R(x, z, z_0) \cdot C_T(x, z) \cdot C_S(x, z) \quad (2.16)$$

Plus précisément, à partir de l'analyse de l'écoulement autour d'un bâtiment isolé, il est possible de reconstruire l'écoulement autour d'un ensemble d'obstacle. Cependant, la complexité des perturbations et des interactions entre bâtiments en milieu urbain a conduit au développement de modèles empiriques spécifiques à l'échelle d'une rue.

Description de l'écoulement autour de bâtiments

Lorsque le vent dominant s'écoule autour des bâtiments, perpendiculairement à une des façades, différentes zones perturbées peuvent être distinguées (Figure 2-11) : sur la façade au vent une zone de surpression, sur les côtés et la partie supérieure un décollement et une couche limite turbulente, sur la façade sous le vent une zone de dépression turbulente.

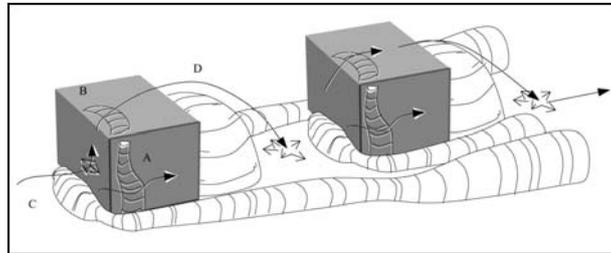


Figure 2-11 - Allure de la structure de l'écoulement autour de cubes dans un flux turbulent. A : recirculation latérale, B : recirculation de toiture, C : vortex en « fer à cheval », D : bulle de sillage. D'après (Meinders et al. 1998)

À partir d'une description empirique de ces zones d'écoulement (Hosker 1984), des méthodes de prédiction du champ de vitesse moyen ont été développées par Rockle (Rockle 1990) et repris par d'autres équipes (Kaplan et Dinar 1996; Brown et Streit 1998). La démarche consiste à définir les zones perturbées pour un obstacle, puis à les combiner pour un ensemble d'obstacle.

Pour un obstacle isolé en site homogène, Figure 2-12, trois zones principales d'écoulement perturbé sont définies : la zone de recirculation frontale, la zone morte ou bulle de sillage et la zone de sillage perturbée.

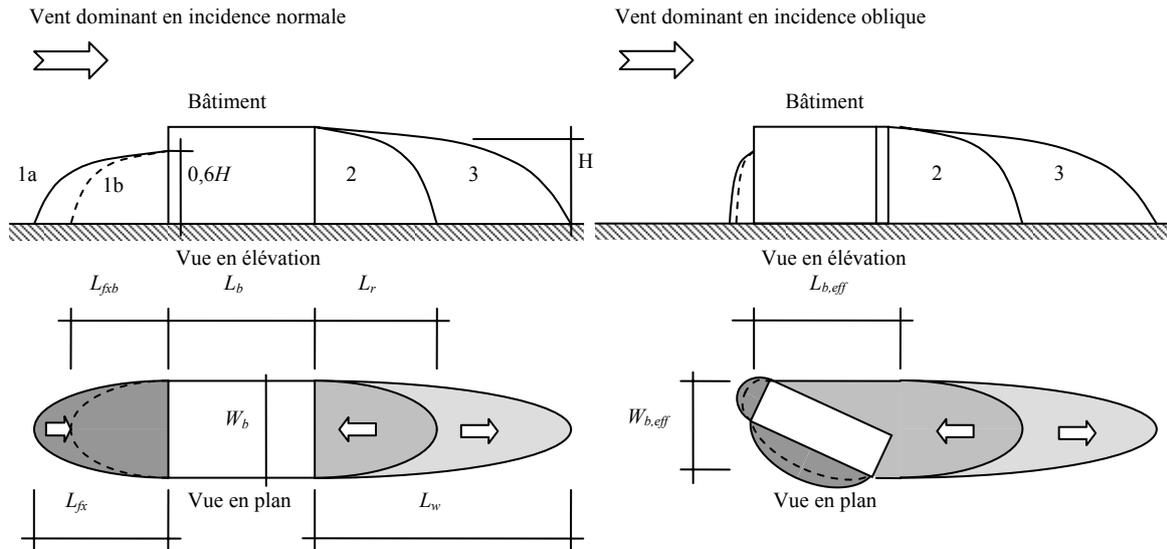


Figure 2-12 - Zones d'écoulement perturbé pour un bâtiment isolé : zone de déplacement 1a, zone de recirculation frontale 1b, zone morte 2 et zone de sillage 3.

La zone de perturbation frontale s'étend au niveau du sol jusqu'à une distance L_{fx} exprimée d'après Hosker par l'expression (Hosker 1984) :

$$\frac{L_{fx}}{H} = \frac{2 (W_b/H)}{1 + 0,8 \times W_b/H} \quad (2.17)$$

Cette zone a été définie de façon plus précise à partir d'expérimentations en soufflerie qui ont conduit à la définition de deux sous zones 1a et 1b (Pardijak et al. 2004). Au niveau du bâtiment elle atteint une hauteur évaluée à $0,6H$ (Hosker 1984), et la limite de cette zone est définie par l'équation de surface suivante :

$$\frac{x_w^2}{L_{fx}^2 (1 - (z/0,6H)^2)} + \frac{y_w^2}{W_b^2} = 1 \quad (2.18)$$

Où x_w et y_w sont les coordonnées dans la direction parallèle et transversale au vent dominant.

La zone morte s'étend sur une longueur L_r définie par (Hosker 1984) :

$$\frac{L_r}{H} = \frac{1,8 (W_b/H)}{(L_b/H)^{0,3} (1 + 0,24 \times W_b/H)} \quad (2.19)$$

Et la surface délimitant la zone morte est de type elliptique (Rockle 1990) d'équation :

$$\frac{x_w^2}{L_r^2 (1 - (z/H)^2)} + \frac{y_w^2}{W_b^2} = 1 \quad (2.20)$$

La zone de sillage s'étend dans le prolongement de la zone morte sur une longueur L_w (Rockle 1990) calculée par :

$$L_w = 3L_r \quad (2.21)$$

Dans le cas où le vent incident est oblique par rapport au bâtiment, les mêmes zones peuvent être définies en fonction des dimensions efficaces du bâtiment par rapport au vent $W_{b,eff}$ et $L_{b,eff}$ (Kaplan et Dinan 1996).

La détermination du champ de vitesse moyen est réalisée à partir du champ de vitesse empirique défini pour chaque zone perturbée. Dans la démarche présentée par Kaplan et Dinar (Kaplan et Dinar 1996), le profil de vitesse moyenne pour chaque zone est tout d'abord défini en fonction du profil moyen non perturbé $\bar{u}(z)$, lui-même défini par des lois empiriques présentées précédemment. Le champ de vitesse ainsi défini correspond donc à une modification de l'intensité du profil moyen non perturbé et/ou de sens, mais pas de direction, il ne respecte donc pas la loi de conservation de la masse. L'étape suivante consiste à « déformer » de façon itérative ce profil de vitesse pour respecter la loi de conservation de la masse pour obtenir le champ de vitesse estimé, Figure 2-13.

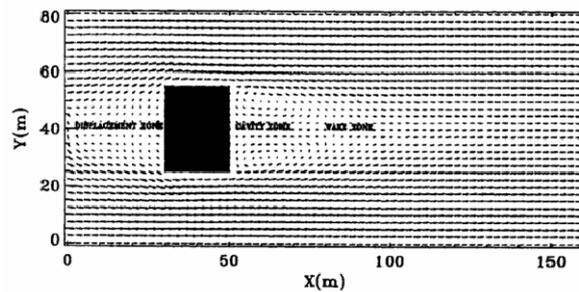


Figure 2-13 - Champ de vitesse autour d'un bâtiment isolé, d'après (Kaplan et Dinar 1996).

Description de l'écoulement dans une rue

De par la complexité de l'interaction des bâtiments en milieu urbain, on distingue de façon simplifiée deux types d'écoulements principaux : longitudinal lorsque la rue est dans la direction principale du vent, et transversal lorsque l'axe de la rue est transverse à la direction de la vitesse moyenne.

À l'échelle de la rue, les trois types d'écoulements définis pour une ville, rasant, à interférence de sillage et à rugosité isolée, peuvent être aussi identifiés, Figure 2-14.

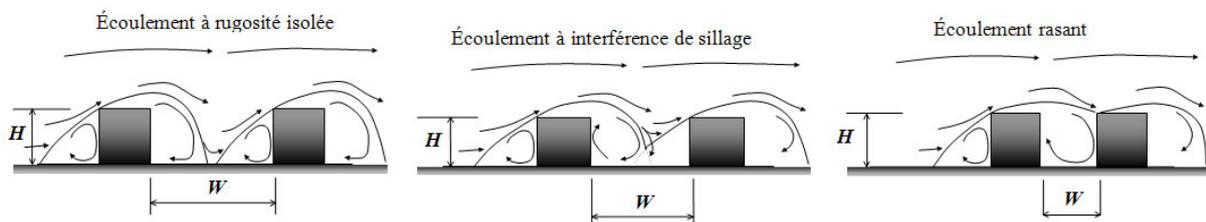


Figure 2-14 - Rue de type canyon avec un rapport d'aspect W/H supérieur à 2,5 (rugosité isolée), compris entre 1,54 et 2,5 (interférence de sillage), et inférieur à 1,54 (rasant), d'après (Oke 1987).

Pour des rues de type canyon de hauteur H et de largeur W Le rapport d'aspect W/H traduit la rugosité du site et permet de prévoir ces différents écoulements dans le cas d'un vent transversal à la rue (Oke 1987). Des rapports d'aspect W/H moyens de l'ordre de 0,6 ont été relevés pour des centres urbains en Allemagne (Theurer 1999), et de l'ordre de 2 pour les autres zones urbaines.

Cette approche, valable pour des géométries de type canyon, ne permet pas de définir les écoulements pour les autres formes urbaines. Aussi, une approche empirique a été développée à partir de l'écoulement défini pour un bâtiment isolé (Hosker 1984) et reprise par la suite (Rockle 1990; Kaplan et Dinar 1996; Brown et Streit 1998; Pardijak et al. 2004) pour permettre d'estimer les écoulements autour d'un ensemble quelconque de bâtiments, comme dans l'exemple de la Figure 2-15.

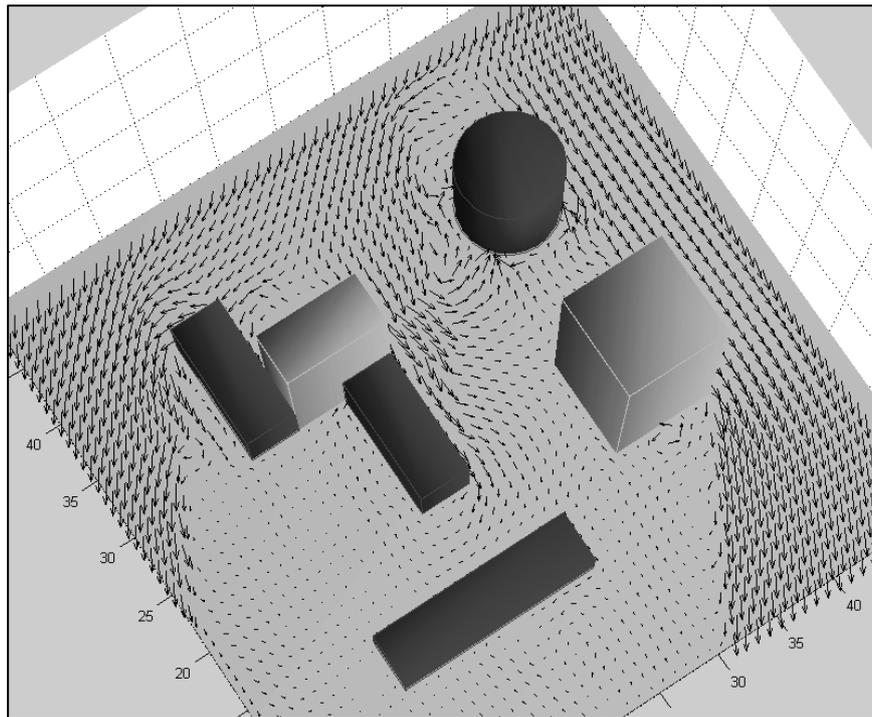


Figure 2-15 - Interférence d'un ensemble de bâtiments sur le champ de vitesse moyen
– calculé avec QUIC-Urb (Pardijak et al. 2004)

De même que dans la démarche du bâtiment isolé, les différentes zones d'influences des bâtiments sont définies géométriquement, et les profils de vitesse de ces zones sont modifiés de façon itérative pour respecter la loi de conservation de la masse. Cette méthode conduit à un algorithme de calcul très rapide, repris dans différents logiciels dont QUIC-Urb (Pardijak et al. 2004) ou AriaLocal (<http://www.aria.fr/>).

L'ensemble des modèles empiriques décrits dans cette partie ne tiennent cependant pas compte des perturbations thermiques, et correspondent généralement à une hypothèse d'atmosphère neutre. Cette approximation est acceptable dans le cas d'études de résistance mécanique au vent par exemple, mais insuffisante pour notre étude thermoaéraulique du microclimat, surtout dans le cadre de scénarii de vents dominants faibles et de charges thermiques fortes.

2.2 Impact de l'ensoleillement en milieu urbain

L'ensoleillement est l'un des facteurs le plus influent sur le phénomène d'îlot de chaleur urbain, surtout en période estivale et de vent dominant faible. Cette partie détaille le calcul de l'ensoleillement sur une paroi exposée, ainsi que les caractéristiques des surfaces urbaines. Dans l'objectif d'établir des solutions à la problématique exposée au Chapitre 1, l'impact sur l'effet du rayonnement solaire du traitement des surfaces urbaines, et notamment la végétalisation, est détaillé ici.

2.2.1 RAYONNEMENT SOLAIRE EN MILIEU URBAIN

L'énergie solaire absorbée par le globe terrestre doit être globalement réémise vers l'espace, sinon un déséquilibre de ce bilan énergétique, schématisé à la Figure 2-16, correspondrait à une augmentation ou diminution de la température terrestre.

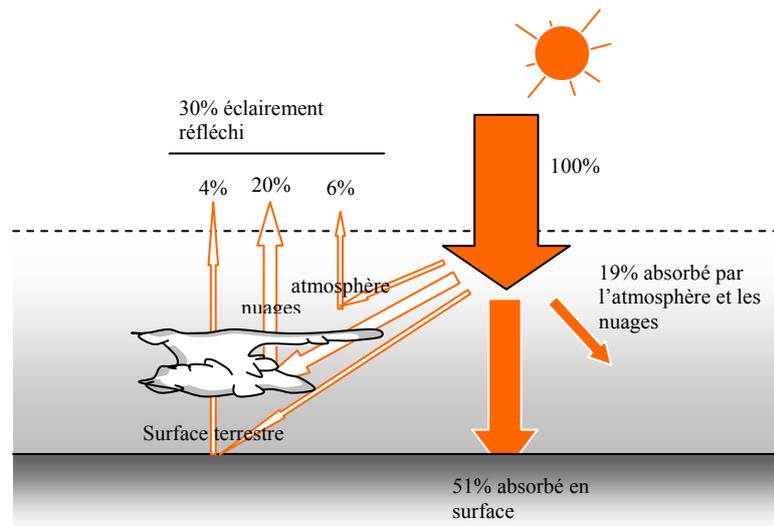


Figure 2-16 - Balance énergétique terrestre, d'après (Belarbi 2000).

Près de la moitié de l'énergie solaire incidente est absorbée par la surface terrestre et environ un tiers de cette énergie est réfléchi vers l'espace, le reste étant absorbé par l'atmosphère. Ce bilan est cependant variable en fonction des conditions climatiques, et notamment de la couverture nuageuse. En milieu urbain, la concentration en polluants, gazeux et particulaires, dans la sous-couche atmosphérique urbaine peut entraîner une diminution de l'énergie solaire incidente. Ce phénomène est observé sur la durée d'ensoleillement qui peut être ainsi diminuée de 10 à 20 % en zone industrielle (Landsberg 1981). Cette perte énergétique est d'autant plus importante que le soleil est bas sur l'horizon, car l'épaisseur relative de la couche atmosphérique polluée traversée est alors plus grande. Ce phénomène est donc plus marqué en hiver ou en début et fin de journée. Néanmoins, cette perte énergétique est compensée par une augmentation du flux diffus réémis par la voûte céleste, du fait de la présence de polluants notamment. De plus, le spectre de longueurs d'ondes du rayonnement incident en zone urbaine est modifié par la couche atmosphérique polluée, et un filtrage important des ultraviolets est généralement observé. En revanche, la part de rayonnement infrarouge mesurée est souvent supérieure à celle des zones rurales environnantes.

L'éclairement perpendiculairement au rayonnement solaire aux limites de l'atmosphère terrestre, ou constante solaire, est noté I_0 (W/m^2). La valeur de I_0 , de l'ordre de $1370 \text{ W}/\text{m}^2$, varie au cours de l'année à cause de la variation de la distance terre/soleil. Le rayonnement traverse ensuite la couche atmosphérique dont l'épaisseur est caractérisée par un coefficient noté m_{at} et appelé masse atmosphérique. Ce coefficient dépend de la pression atmosphérique P_{at} du site considéré selon la relation suivante :

$$m_{at} = \frac{P_{at}}{101325} \cdot \frac{1}{\sin(\beta_{sol})} \quad (2.22)$$

où β_{sol} correspond à la hauteur solaire.

Au niveau du sol, le rayonnement solaire incident se décompose en une partie directe I_{dir} (W/m^2) normale aux rayons solaires, et une partie diffusée par le ciel définie par l'éclairement d'une surface horizontale $E_{dif,h}$ (W/m^2). La partie diffuse de l'ensoleillement peut constituer de 15 % à 100 % du flux total selon que le ciel est clair ou complètement couvert (Samaali 2002). D'après (Cadiergues 1998) I_{dir} et $E_{dif,h}$ peuvent s'exprimer en fonction des coefficients χ_{dir} et χ_{dif} caractérisant l'effet de la voûte céleste :

$$I_{dir} = I_0 e^{-\chi_{dir} m_{at}} \quad (2.23)$$

$$E_{dif,h} = \chi_{dif} I_{dir} \quad (2.24)$$

D'autres modèles permettent de déterminer ces flux incidents et de modéliser plus précisément l'absorption atmosphérique. Le modèle de ciel clair isotrope est mal adapté pour une détermination heure par heure de l'ensoleillement, et, d'après (Glockner et al. 1999), la méthode de Perez (Perez et al. 1987) est alors mieux adaptée. Il existe aussi des modèles simplifiés qui prennent en compte la notion de trouble atmosphérique tels que le modèle ASHRAE. Le facteur de trouble atmosphérique T_I peut être estimé à partir du rayonnement incident direct I_{dir} (Landsberg 1981) :

$$T_I = \frac{\ln I_0 - \ln I_{dir}}{m_{at} E_R \ln HR} \quad (2.25)$$

avec E_R le facteur d'extinction pour de l'air pur et HR l'humidité relative de l'air. Le coefficient χ_{dir} peut donc s'exprimer par la relation suivante, d'après (2.23) :

$$\chi_{dir} = -T_I E_R \ln HR \quad (2.26)$$

L'affaiblissement du rayonnement solaire direct est donc accentué par l'humidité de l'air, celle-ci absorbant principalement les infrarouges. Dans les zones urbaines polluées l'absorption de longueurs d'ondes plus faibles est accentuée et participe à l'augmentation du facteur T_I . Ainsi pour la ville de Mexico, l'atténuation du rayonnement solaire direct peut atteindre des valeurs de l'ordre de 18 % du fait de la forte concentration en aérosols très absorbants (Raga et al. 2001).

Cette modélisation du rayonnement solaire direct et diffus, plus ou moins fine, est intégrée dans de nombreux logiciels de calcul solaire, tel que Solene développé par le CERMA (Antoine et Groleau 1998; Miguet et Groleau 2002). Ce logiciel utilise un modèle de voûte céleste décomposé en facettes, dont les facteurs de forme d'échange avec la surface considérée sont déterminés pour obtenir la radiance solaire diffuse selon différents modèles de ciel intégrés. Les calculs réalisés sur l'ensoleillement incident en zone urbaine avec ce type de logiciel se sont révélés précis dans le cas de l'étude expérimentale d'une rue de type canyon à Nantes (Vachon 2001).

2.2.2 MORPHOLOGIES ET SURFACES URBAINES DU POINT DE VUE DE L'ENSOLEILLEMENT

L'ensoleillement direct est réduit en zone urbaine du fait de l'absorption des couches atmosphériques urbaines, absorption liée à la pollution, mais aussi de la morphologie urbaine. En effet, au niveau du sol, en zone piétonne et pour un site urbain dense, l'ensoleillement est souvent réduit par les bâtiments. Du point de vue des usagers à l'extérieur des bâtiments, mais aussi pour les occupants à l'intérieur, cette diminution de lumière naturelle peut devenir un facteur de stress et d'inconfort. Aussi la définition de solutions architecturales respectant un « droit au soleil » (Capeluto et al. 2003) sont abordées par les urbanistes.

Pourtant, du fait des inter-réflexions et de la surface développée importante, l'énergie absorbée est plus élevée en milieu urbain qu'en milieu rural. Ce phénomène accentué par les particularités d'inertie thermique des matériaux de construction participe à l'effet d'îlot de chaleur urbain.

L'albédo¹ solaire de surface est un autre paramètre important par rapport aux spécificités microclimatiques urbaines. L'urbanisation s'accompagne généralement d'une diminution de l'albédo de surface, dont certaines valeurs classiques sont données à la Figure 2-17, liée notamment à la diminution de surfaces végétalisées, en particulier pour le cas de l'asphalte.

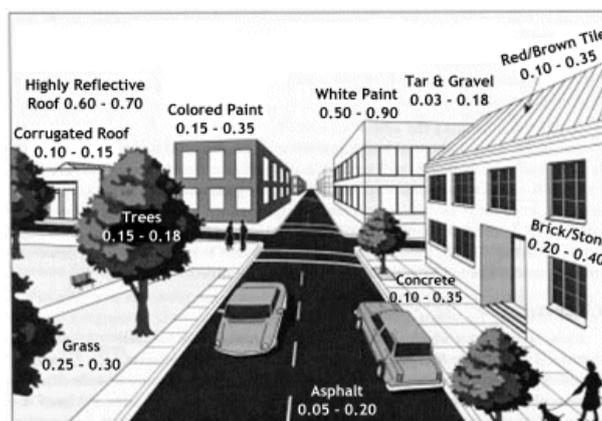


Figure 2-17 - Valeurs type d'albédo de surfaces en milieu urbain, d'après l'agence américaine de protection de l'environnement (<http://yosemite.epa.gov/oar/globalwarming.nsf/>)

Le traitement des surfaces de construction est un facteur très important sur les charges de climatisation des bâtiments ainsi que d'amplification de l'effet d'îlot de chaleur (Akbari et al. 2001) décrit au chapitre précédent.

Ces phénomènes d'absorption et d'inter-réflexions dépendent aussi de la géométrie considérée, et des études paramétriques sur les formes urbaines sont nécessaires pour en déterminer l'impact. L'analyse à partir de formes urbaines génériques menée par Ratti (Ratti et al. 2003), montre que les bâtiments fermés sur une cour intérieure, ou blocs urbains, pouvaient être optimum du point de vue de l'éclairage naturel et des conditions de température en conditions estivales chaudes.

Les études architecturales sur les formes urbaines et l'ensoleillement ont conduit à la définition de nouvelles formes. Ainsi Okeil a étudié l'exposition des façades urbaines pour différentes formes classiques, canyons et blocs urbains, avec une nouvelle conception architecturale optimisée pour l'ensoleillement, ou « bloc solaire résidentiel » (Okeil 2004), selon le principe schématisé Figure 2-18.

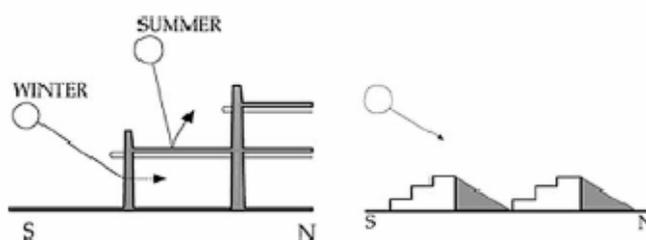


Figure 2-18 - Principe de conception du bloc solaire résidentiel optimisé énergétiquement par rapport à l'ensoleillement direct d'hiver et d'été. (Knowles 2003).

Ce type d'architecture se révèle être très performant, tant en période hivernale qu'en période estivale, du point de vue de l'ensoleillement, L'espace entre bâtiments étant juste suffisant pour permettre l'ensoleillement hivernal du rez-de-chaussée. Dans le cadre de l'étude paramétrique présentée (Okeil 2004), cette forme est le meilleur compromis énergétique bien que d'autres formes telles que le canyon soient plus avantageuses pour certaines des situations présentées.

¹ Le terme d'albédo (du latin « blancheur ») a été introduit au 19^{ème} siècle par l'astronome américain George Philipps Bond (1825/1865) dans l'étude des planètes, et correspond au rapport du rayonnement solaire réfléchi et du rayonnement solaire reçu sans tenir compte de la surface réelle de l'objet. On l'utilise dans les études solaires pour caractériser la réflexion d'une surface.

Des variations sur cette approche ont été proposées par différents auteurs tels que Knowles (Knowles 2003) ou Small dont un projet architectural est représenté à la Figure 2-19 (Small 1982).



Figure 2-19 - Application du principe de bloc solaire dans le cadre d'un projet d'urbanisme avec développement de la végétalisation, maquette de l'architecte Glen Small pour Los Angeles (Small 1982).

Cette maquette présentant ici des bâtiments d'habitation met en évidence l'avantage de ce type de morphologie pour le développement de la végétalisation des surfaces en terrasse. Les toitures exposées au rayonnement solaire participent pour une part très importante dans les apports thermiques des bâtiments en été, et la végétalisation de celles-ci par des plantes à feuillage caduque peut permettre d'atténuer fortement ces apports sans les limiter en hiver.

2.2.3 CALCUL DU RAYONNEMENT SOLAIRE INCIDENT SUR LES PAROIS

L'ensoleillement varie en fonction de la situation géographique, de l'instant et de la surface considérée, Figure 2-20.

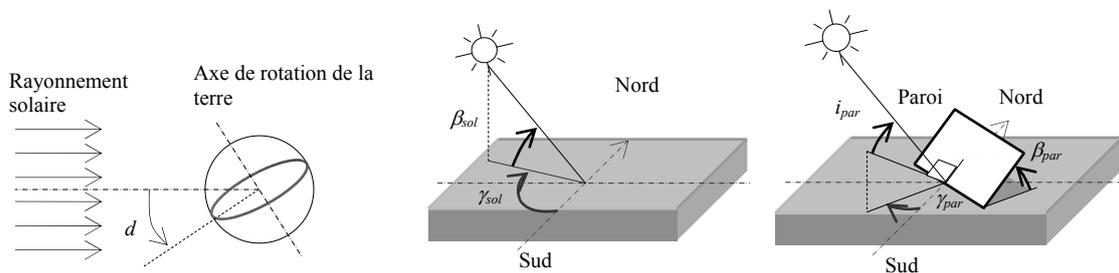


Figure 2-20 - Définition de la déclinaison solaire d (en degrés) et des angles solaires

La position de la terre par rapport au soleil est variable au cours de l'année et est mesurée par la déclinaison solaire d , de $-23,45^\circ$ au solstice d'hiver, le 21 décembre, à $+23,45^\circ$ au solstice d'été, le 21 juin. Cependant, les valeurs de d peuvent légèrement varier d'une année à l'autre (Cadiergues 1998). La position du soleil est alors repérée par sa hauteur angulaire apparente au-dessus de l'horizon, ou hauteur solaire notée β_{sol} , et par l'azimut solaire noté γ_{sol} défini comme l'angle par rapport au sud de la projection horizontale du rayon solaire donc compris entre -180° et $+180^\circ$. L'énergie solaire incidente sur une paroi dépend de l'orientation de celle-ci par rapport au rayonnement solaire. La position de la paroi est repérée par son inclinaison β_{par} en degrés, son azimut par rapport au sud γ_{par} en degrés, et l'incidence du soleil par rapport à la normale à la surface est repérée par l'angle i_{par} en degrés. L'éclairement de la paroi par le rayonnement solaire direct peut s'exprimer en fonction de la position du soleil par l'expression :

$$E_{dir} = I_{dir} \cos i_{par} \quad (2.27)$$

et l'éclairement dû au rayonnement diffus par la relation :

$$E_{dif} = (1 - 0,5 \sin \beta_{par}) E_{dif,h} \quad (2.28)$$

L'objectif final est de déterminer l'éclairement solaire total, composé de l'éclairement solaire direct E_{dir} , de l'éclairement diffus E_{dif} , et de l'éclairement diffus dû aux inter-réflexions avec l'environnement urbain. Ce calcul peut alors se décomposer en trois étapes :

- ❖ détermination des masques pour la paroi étudiée,
- ❖ calcul des éclairagements solaires incidents E_{dir} et E_{dif} au niveau de la paroi étudiée,
- ❖ calcul des inter-réflexions permettant de déterminer l'éclairement diffus dû à l'environnement.

Ces étapes sont traitées de façons plus ou moins simplifiées selon les différentes méthodes. Ainsi, dans les études de bâtiment, il est courant de considérer un éclairement solaire issu de données météorologiques et réduit du facteur de masque pour des masques proches (balcons, végétation). De plus, le calcul des inter-réflexions de courtes longueurs d'ondes n'est pas toujours réalisé du fait de la complexité et des temps de calcul qui peuvent être élevés pour des géométries complexes. Pourtant, en milieu urbain, cette contribution peut ne pas être négligeable.

L'effet des inter-réflexions et des masques peut être abordé à l'échelle de la ville par la définition d'un albédo de surface équivalent qui intègre ces inter-réflexions en fonction de la géométrie des bâtiments. Une proposition de modèle simplifié de ce type a été faite par Chimklai pour des géométries de bâtiments parallélépipédiques de dimensions variables (Chimklai et al. 2004). Cette approche permet de réaliser des calculs rapides à grande échelle, mais ne donne pas le détail de la distribution tridimensionnelle de l'ensoleillement dans une rue. Plusieurs méthodes de résolution de ces inter-réflexions ont été établies, dont la méthode des radiosités et une méthode approchée : la méthode des enceintes fictives (Walton 1980).

Le logiciel de calcul solaire Solene (Antoine et Groleau 1998) permet d'effectuer ces différentes étapes sur des géométries plus ou moins complexes avec des modèles précis. Cependant, la puissance de calcul requise pour déterminer le flux solaire dû aux inter-réflexions peut devenir pénalisante en temps de calcul par rapport à une méthode approchée.

2.2.4 TRAITEMENT DES SURFACES URBAINES

Influence de la végétation sur le rayonnement solaire

Les arbres et leur feuillage produisent un effet de masque bénéfique en période estivale, et laissent passer les rayons solaires en hiver dans le cas d'arbres à feuilles caduques. Les feuilles se comportent différemment en fonction de la bande de longueur d'onde considérée, et trois cas sont généralement retenus (Samaali 2002) : le visible (0,4 à 0,7 μm), le proche infrarouge (0,7 à 1,3 μm) et l'infrarouge (1,3 à 100 μm). Dans le domaine du visible, les feuilles ont un coefficient de réflexion et de transmission faible, l'absorption étant principalement due à la chlorophylle dans le bleu et le rouge et la réflexion dans le jaune vert. Dans le domaine du proche infrarouge par contre l'absorption est faible, de l'ordre de 10 %, et le flux solaire est transmis et réfléchi, chaque part représentant de l'ordre de 40 % du flux incident. Dans le domaine du moyen infrarouge, l'absorption des feuilles est similaire au cas du rayonnement visible, avec des variations dues à la teneur en eau.

Cependant, L'influence du feuillage sur le rayonnement solaire incident ne dépend pas que des caractéristiques individuelles des feuilles, mais aussi de l'implantation et de l'orientation du feuillage. Ainsi on définit l'indice foliaire qui correspond à la moitié de la surface totale des feuilles contenues dans un cylindre de un mètre carré de base et dont la hauteur est égale à celle du couvert considéré (Samaali 2002). La distribution des feuilles est aussi un facteur important, car elle détermine leur orientation moyenne par rapport au rayonnement solaire, et donc le flux solaire total incident sur le feuillage.

La modélisation thermoaérolaïque d'une zone couverte par des feuillages peut se faire alors suivant différents niveaux de finesse. De façon simplifiée l'ensemble du feuillage et du sol peut être assimilé à une surface particulière dont l'albédo dépend du type de végétation. Ce modèle peut convenir dans le cadre d'études à grande échelle. Néanmoins, les échanges entre le feuillage et le sol sont complexes, et des modèles multicouches permettent d'établir un bilan énergétique plus complet pour le sol et le

feuillage. De plus, à l'échelle microclimatique, les arbres ont une influence sur l'écoulement d'air et les mouvements convectifs, et un modèle suffisamment fin est nécessaire.

2.3 Observations expérimentales du microclimat urbain

2.3.1 ÉVOLUTION DES OBSERVATIONS MICROCLIMATIQUES ET MESURES EN MILIEU URBAIN

Les mesures en site urbain sont assez récentes et leur mise en œuvre reste malaisée. La différence entre l'air des villes et de la campagne a été ressentie depuis l'Antiquité déjà, par l'odorat particulièrement sensible à la pollution atmosphérique¹. Des accidents de pollution urbaine furent décelés dès le moyen-âge² comme à Londres où, en 1273, la combustion du charbon fût interdite. En 1952, un excès de 4000 morts dû à la pollution amena Londres et d'autres villes anglaises à légiférer pour définir des zones « sans fumées ».

L'évolution des techniques de mesures mena progressivement à l'identification du microclimat urbain avec notamment les travaux suivants :

- ❖ Luke Howard (1772-1864), un chimiste, publia en 1803 un livre toujours d'actualité sur la classification des nuages, et identifia le « smog » urbain. Des mesures de températures moyennes mensuelles le menèrent à conclure à la présence de centres urbains plus chauds, i.e. il identifia le phénomène d'îlot de chaleur urbain.
- ❖ Émilien Renou (1815-1902) observa à Paris en 1855 une température supérieure, par rapport aux environs, de 1 à 2 °C en milieu urbain. Dans une publication de 1868, suite à une comparaison critique des différences de température entre zones urbaines et rurales, il nota que par temps calme et clair les différences en soirée sont plus élevées et dues au rafraîchissement radiatif. Il nota aussi que les vitesses de vent en ville sont plus faibles.

Par la suite, de nombreuses études furent menées, mais un pas décisif fût franchi lorsque Wilhelm Schmidt (1883-1936) mena en 1917 des campagnes de mesures à l'échelle du microclimat, notamment lorsqu'il introduisit l'utilisation de véhicules motorisés pour mener des campagnes de mesure à travers les espaces urbains (1927, 1930) et établir des cartographies.

Après la seconde guerre mondiale, la reconstruction de nombreuses villes fût accompagnée d'une réflexion sur le climat plus ou moins intégrée dans la planification. Ce n'est que très récemment que des campagnes de mesures précises ont été menées sur site pour des cas précis de configuration microclimatique, notamment dans le cadre d'études sur les polluants atmosphériques (Hotchkiss et Harlow 1973; Nicholson 1975; Landsberg 1979).

2.3.2 INSTRUMENTS DE MESURES DE VITESSE D'AIR SUR SITE

Historiquement c'est en 1450 Léon Batista Alberti mesure pour la première fois la vitesse du vent grâce à un anémomètre à pression. En 1500, Léonard de Vinci crée la première girouette pour déterminer l'orientation du vent. L'anémomètre à coupelles, Figure 2-21, encore utilisé aujourd'hui, fut mis au point en 1846 par l'astronome irlandais Thomas R. Robinson.



Figure 2-21 - Anémomètre à trois coupelles à 120°

¹ Le philosophe romain Sénèque écrivait : « Dès que j'aurai laissé derrière moi l'oppressant air de la ville et la puanteur des fumantes cheminées qui, une fois leurs feux allumés, vomissent toutes les pestilentes fumées et suies qu'elles contiennent, je me sentirai tout à fait un autre homme. » cité par le rapport (CITEPA 2001).

² Historique détaillé des événements liés au microclimat urbain par Landsberg dans *The Urban Climate* (Landsberg 1981).

En fonction de la précision des mesures souhaitées et des possibilités existantes, différentes technologies de mesure sont utilisées de nos jours. Pour les mesures de vitesse de vent les anémomètres à coupelle sont couramment utilisés mais il existe aussi des anémomètres à hélices, à fil chaud ou à thermistance, à plaque ou à pression, et soniques ou laser. Ces anémomètres possèdent les caractéristiques suivantes :

- ❖ Les anémomètres à coupelle ou à hélice mesurent une tension produite par une dynamo tachymétrique entraînée par le rotor ; ils permettent d'établir la vitesse d'air moyenne sur une période donnée.
- ❖ Les anémomètres à fil chaud ou à thermistance mesurent les variations d'intensité électrique produites par les échanges thermiques sur le fil chaud ou la thermistance. Le flux convectif varie en fonction de la vitesse d'air.
- ❖ Pour les anémomètres à plaques, la pression dynamique du vent agit plus ou moins sur l'inclinaison d'un axe horizontal muni d'une plaque.
- ❖ Les anémomètres à tube de Pitot mesurent aussi la pression dynamique due au vent, et permettent de mesurer les vitesses de rafale.
- ❖ Les anémomètres soniques ou laser mesurent le temps de parcours d'ondes ultrasonores ou lumineuses par un dispositif émetteur/récepteur appelé transducteur. Ce temps est mesuré suivant un axe donné dans un sens puis dans l'autre, ce qui permet d'en déduire la vitesse d'air suivant cet axe. La célérité du son et donc la température d'air peuvent être calculées en connaissant les conditions de pression et d'humidité. Ce type d'anémomètre a l'avantage d'avoir un temps de réponse rapide associé à une finesse de 0,1 m/s le rendant parfaitement adapté à la mesure de la turbulence.

2.3.3 CAMPAGNES DE MESURE

Après les différents accidents de pollution liés aux spécificités microclimatiques urbaines, la sensibilisation aux problèmes environnementaux s'est fortement développée à la fin du XX^{ème} siècle et quelques études expérimentales ont été menées ces dernières années.

Ainsi, l'expérience Nantes '99 (Vachon 2001) a porté sur une rue de type canyon au centre-ville de Nantes, la rue de Strasbourg, au cours de l'été 1999. L'effet de la pollution urbaine était étudié ici pour de faibles vitesses de vent et des périodes de forte chaleur, scénario défavorable sur la qualité de l'air. L'étude des écoulements d'air en milieu urbain a fait l'objet de nombreux projets européens d'un point de vue pollution atmosphérique, et récemment ces études se sont fortement développées aux États-Unis en abordant le risque d'attaque terroriste et de diffusion de nuage toxique.

On peut citer l'étude Urban 2000 (Allwine et al. 2002) qui a été menée à Salt Lake City en Octobre 2000 et qui a comportée des mesures avec des gaz traceurs (SF₆) à l'échelle d'un bâtiment, d'un quartier et de la ville. Par la suite, d'autres études de ce type ont été menées (Hanna et Chang 2004) : Birmingham 1999-2000, Los Angeles 2001, Barrio Logan 2002, Basel 2002 et Joint Urban 2003.

L'étude du microclimat urbain du point de vue des constructions et de leur optimisation énergétique est beaucoup moins abordée dans la littérature. Aussi, les potentiels de ventilation naturelle en milieu urbain ont fait l'objet d'un projet européen, Urbvent (Santamouris et al. 2001a; Germano et al. 2002; Allard et Ghiaus 2004), piloté par le LEPTAB (Université de La Rochelle). Sur la base de résultats expérimentaux obtenus par l'Université d'Athènes sur cinq rues de type canyon à Athènes, des scénarii de vitesse de vent ont été établis. Ces mesures ont été réalisées lors de l'été 2001 sur 3 jours consécutifs et 12 heures par jour pour chacune des rues. Elles sont exploitées par la suite pour estimer la validité des modélisations empiriques proposées. Les points de mesure, représentés à la Figure 2-22, ont été définis de façon à définir une corrélation entre le vent dominant au dessus de la canopée urbaine, en toiture point (1), et sous la canopée dans l'axe de la rue, point (6), (7), (8) et (9), et en façade.

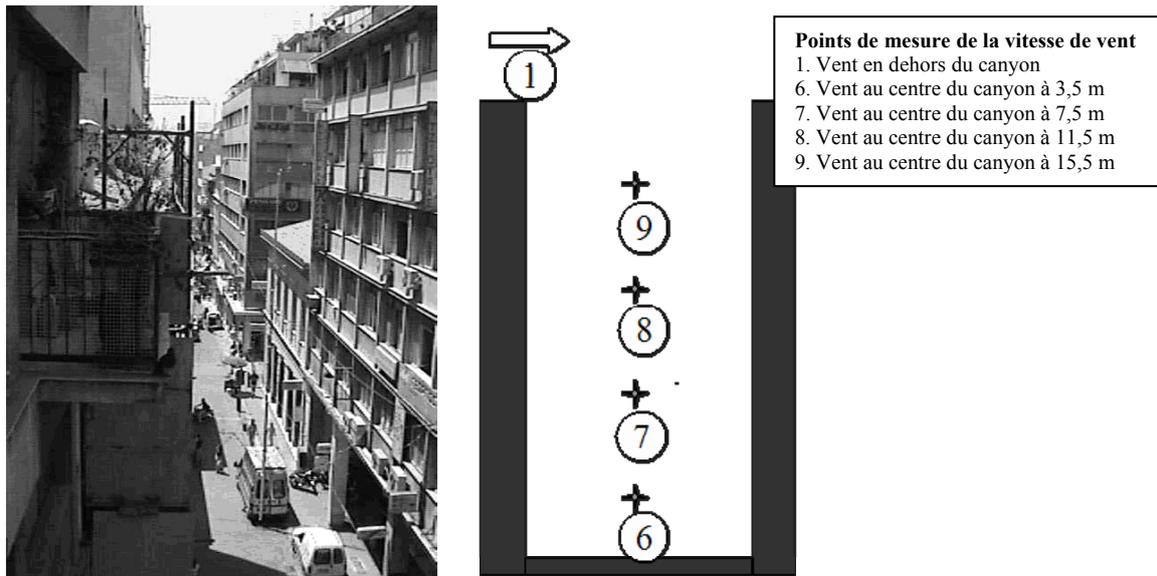


Figure 2-22 - Points de mesures dans une rue canyon, rue Dervenion ici, dans le cadre du projet Urbvent (Santamouris et al. 2001a)

La confrontation des relevés expérimentaux avec la modélisation empirique est abordée dans les chapitres suivants, ainsi que l'adaptation et les limites de la modélisation. L'une des difficultés principale est de définir correctement l'ensemble des caractéristiques de la zone urbaine considérée (rugosité, densité, morphologie) et leur influence sur la mesure.

Dans les chapitres suivants nous nous proposons donc d'intégrer les corrélations établies à partir des mesures dans des modèles thermoaérauliques simplifiés. Ces corrélations, sur les transferts de masse et d'énergie à l'échelle de la rue, nous permettent ainsi d'envisager la réalisation d'un outil d'évaluation de l'impact du microclimat urbain à l'échelle d'une rue de type canyon.

Chapitre 3

Modélisation intermédiaire des transferts de masse et d'énergie

Pour l'étude des transferts de masse et d'énergie dans le volume d'air étudié, une rue de type canyon, différents niveaux de finesse de modélisation peuvent être retenus. Pour cette étude, une approche de modélisation dite « intermédiaire » a été choisie, celle-ci se situe entre des modèles de calcul fins issus de la dynamique des fluides et des modèles nodaux. Ces modèles se basent comme les modèles fins, sur les équations locales de conservation pour l'air du volume étudié. Différentes applications des approches fines au cas du microclimat urbain ont été réalisées, et ce chapitre montre comment un modèle intermédiaire zonal peut aussi s'appliquer à cette étude et les avantages d'une telle approche.

3.1 Différents niveaux de modélisation thermoaéraulique

Pour l'étude des transferts thermoaérauliques différents niveaux de modélisation sont utilisés, en fonction des caractéristiques des phénomènes étudiés et des paramètres recherchés ainsi que des différents niveaux d'utilisation des résultats :

- ❖ La méthode nodale considère que les conditions d'une zone d'étude sont parfaitement homogènes. Dans les études énergétiques de bâtiment c'est une méthode couramment utilisée, les différents locaux correspondent à différents nœuds du modèle et le climat extérieur correspond alors à un nœud dont les paramètres sont déterminés par les conditions climatiques données par la station météorologique du site. De façon plus détaillée un nœud de calcul par façade peut être défini pour tenir compte des différentes expositions au rayonnement solaire.
- ❖ La modélisation par codes de dynamique des fluides ou « Computational Fluid Dynamics », est étroitement liée au développement des puissances de calcul. Cette modélisation fine est très exigeante en moyens de calcul du fait du maillage très fin nécessaire à la modélisation des transferts turbulents. Son utilisation pour la prédiction des écoulements d'air à l'intérieur des bâtiments s'est développée depuis quelques années (Gadgil 1980), ainsi que pour des études de microclimat urbain. Cependant ces méthodes sont très sensibles aux variations de conditions limites et peuvent se révéler inefficaces avec des données peu précises.
- ❖ Dans le domaine du bâtiment, des approches intermédiaires ont été développées, notamment avec la méthode zonale pour l'étude des ambiances et des systèmes de conditionnement d'air. Le volume d'étude est partitionné alors en différentes zones, avec certaines spécificités comme dans le cas d'un panache à la sortie d'un convecteur (Inard 1988). La méthode zonale en pression par exemple a été codifiée par la suite dans des environnements orientés objet (Wurtz 1995).

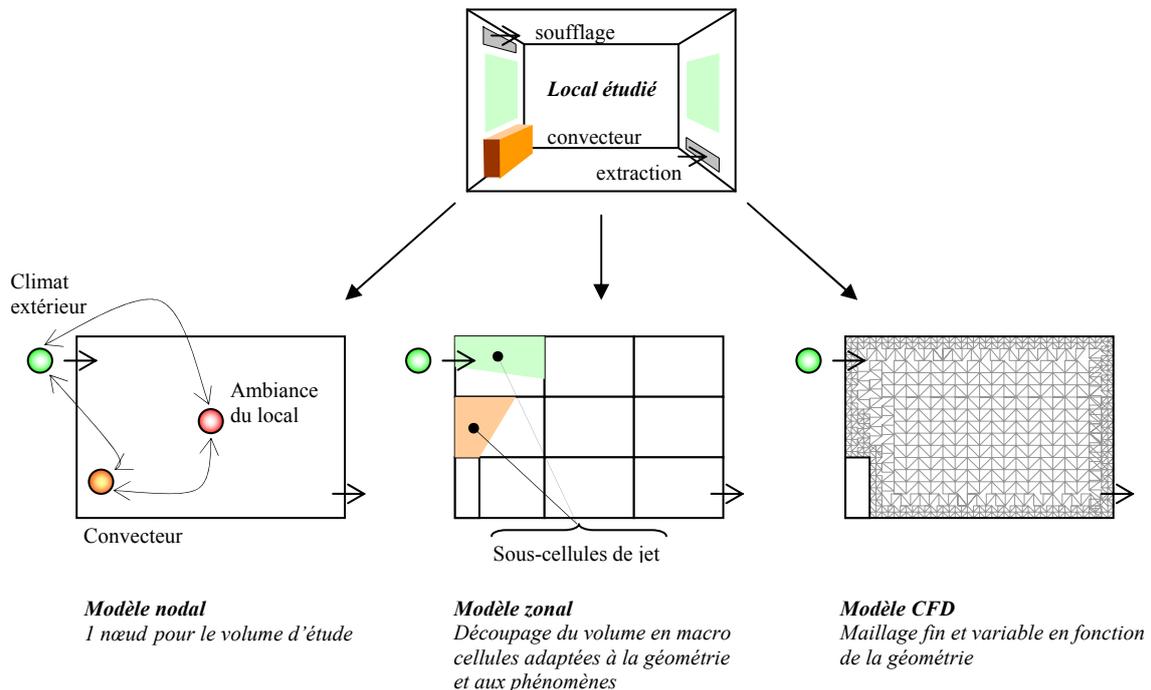


Figure 3-1- Différents niveaux de modélisation et différentes finesses de maillage pour le cas d'une ambiance intérieure ventilée et d'un système de chauffage particulier, le convecteur.

Pour l'étude des ambiances intérieures des bâtiments ces trois approches sont utilisées. Dans le cas d'un local ventilé équipé d'un convecteur par exemple, Figure 3-1, la modélisation nodale permet des calculs rapides pour le dimensionnement du système. Un modèle zonal permet dans ce cas de définir plus précisément les conditions d'ambiances en différentes zones du local, ce qui permet notamment de définir les zones de confort thermique. Enfin une modélisation de type CFD permet d'estimer la forme d'un écoulement en régime établi dans le local sans connaissance a priori des phénomènes et

des écoulements dominants, contrairement à l'approche zonale où des modèles complémentaires sont nécessaires pour des zones d'écoulement particulier et localisés par exemple.

Dans le cadre de notre étude du microclimat urbain décrite précédemment, les caractéristiques thermo-aérauliques dépendent de nombreux facteurs et varient fortement d'un site à l'autre. Aussi la modélisation nodale, où un ou plusieurs nœuds permettent la description du milieu extérieur par des conditions moyennes globales, reste très insuffisante pour la description de l'hétérogénéité des sollicitations du bâtiment. La modélisation des phénomènes par CFD se développe donc, mais se trouve confrontée à des limites de temps de calcul liés aux dimensions des zones étudiées.

Dans la suite de ce chapitre, nous définissons tout d'abord les équations de conservation utilisées par les différents modèles thermo-aérauliques. Nous montrons alors quelles sont les utilisations des modèles CFD pour les ambiances extérieures, leurs limites et la conception d'une approche intermédiaire zonale appliquée au cas de la détermination des conditions microclimatiques.

3.2 Bilans locaux pour un fluide en écoulement

Pour définir les flux de masse, de quantité de mouvement et d'énergie dans le volume d'air étudié, les modèles de mécanique des fluides se basent sur les bilans de ces différentes grandeurs.

3.2.1 BILAN DE MASSE

La conservation de la masse peut s'écrire à partir de la densité ρ et de la vitesse du fluide u :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho u) \quad (3.1)$$

équation qui peut aussi s'écrire avec la notation de dérivée particulaire :

$$\frac{D\rho}{Dt} = -\rho \nabla \cdot u \quad (3.2)$$

D'autre part, dans le cas d'un écoulement à faible nombre de Mach, d'après (Gadgil 1980), on peut considérer que la variation de densité du fluide en fonction du temps est négligeable, soit :

$$\nabla \cdot u = \text{div}(u) = 0 \quad (3.3)$$

3.2.2 BILAN DE LA QUANTITÉ DE MOUVEMENT

L'équation vectorielle de bilan de la quantité de mouvement volumique ρu peut s'écrire :

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho u = -\nabla \cdot (\rho u \otimes u) - \nabla P - \nabla \cdot \tau + \rho g \quad (3.4)$$

avec $\nabla \cdot (\rho u \otimes u)$ le « flux de quantité de mouvement », ou divergence. Les forces de viscosité sont exprimées à partir du tenseur des contraintes visqueuses τ par $\nabla \cdot \tau$.

Soit, l'expression détaillée de ces deux vecteurs :

$$\nabla \cdot (\rho u \otimes u) = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_n} \rho U_n U_i \\ \frac{\partial}{\partial x_n} \rho U_n U_j \\ \frac{\partial}{\partial x_n} \rho U_n U_k \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

$$\nabla \cdot \tau = \begin{pmatrix} \frac{\partial}{\partial x_n} \tau_{ni} \\ \frac{\partial}{\partial x_n} \tau_{nj} \\ \frac{\partial}{\partial x_n} \tau_{nk} \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

L'équation de quantité de mouvement peut être aussi écrite avec la notation de dérivée particulaire D / Dt :

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + \rho g \quad (3.7)$$

Pour un fluide Newtonien, les forces de viscosité peuvent s'exprimer en fonction de la viscosité dynamique μ :

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \delta_{ij} \left(\frac{2}{3} \mu - \kappa_m \right) \nabla \cdot u \quad (3.8)$$

Et, pour l'air qui est de faible densité, le terme de viscosité de masse κ_m est négligeable (Bird et al. 1960).

Dans le cas particulier où ρ et μ sont constants, et d'après l'équation de continuité (3.3), l'expression des forces de viscosité peut se simplifier :

$$\nabla \cdot \tau = \mu \nabla^2 u \quad (3.9)$$

3.2.3 BILAN D'ÉNERGIE CINÉTIQUE

C'est une équation scalaire qui découle du produit scalaire de l'équation de bilan de quantité de mouvement (3.4) par la vitesse u :

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{2} u^2 \right) = -u \cdot \nabla P + u \cdot (\nabla \cdot \tau) + \rho u \cdot g \quad (3.10)$$

équation qui peut aussi s'écrire :

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho u^2 \right) = -\nabla \cdot \left(\frac{1}{2} \rho u^2 u \right) - \nabla \cdot (Pu) - P(-\nabla \cdot u) + \nabla \cdot (\tau \cdot u) - \tau : \nabla u + \rho u \cdot g \quad (3.11)$$

Ou aussi :

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{1}{2} u^2 \right) = -\nabla \cdot (Pu) + P(\nabla \cdot u) + \nabla \cdot (\tau \cdot u) - \tau : \nabla u + \rho u \cdot g \quad (3.12)$$

Avec, d'après (Bird et al. 1960) :

- ❖ $\nabla \cdot (Pu)$ la puissance des forces de pression extérieures
- ❖ $P(\nabla \cdot u)$ le taux de conversion réversible en énergie interne par compression ou détente
- ❖ $\nabla \cdot (\tau \cdot u)$ la puissance des forces de viscosité
- ❖ $\tau : \nabla u$ le taux de conversion irréversible en énergie interne par dissipation visqueuse

Dans le cas d'un fluide Newtonien, ce taux de conversion d'énergie irréversible peut s'écrire selon l'équation suivante :

$$\tau : \nabla u = \mu F_u = \frac{1}{2} \mu \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u) \delta_{ij} \right]^2 \quad (3.13)$$

avec F_u la fonction de dissipation.

3.2.4 BILAN D'ÉNERGIE THERMIQUE

Équation de bilan pour l'énergie interne massique \hat{u}

En considérant en plus de l'énergie mécanique, l'énergie thermique et l'énergie interne massique du système considéré, notée \hat{u} en J/kg , on peut décrire localement la conservation de l'énergie par l'équation suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho \left(\hat{u} + \frac{1}{2} u^2 \right) = -\nabla \cdot \rho u \left(\hat{u} + \frac{1}{2} u^2 \right) - \nabla \cdot q + \rho u \cdot g - \nabla \cdot Pu + \nabla \cdot (\tau \cdot u) \quad (3.14)$$

où q représente le flux de chaleur surfacique par conduction en W/m^2 . Cette équation provient du premier principe de la thermodynamique appliqué à un système ouvert en régime non établi. Certaines formes d'énergie ne sont pas prises en compte ici, telles que l'énergie de rayonnement ou électromagnétique.

Les différents termes de l'équation (3.14) représentent des taux de variation volumique de puissance :

- ❖ $\nabla \cdot \rho u (\hat{u} + \frac{1}{2} u^2)$ l'énergie cinétique et interne échangées par convection par unité de volume et par unité de temps
- ❖ $\nabla \cdot q$ la puissance thermique échangée par conduction par unité de volume
- ❖ $\rho u \cdot g$ la puissance des forces gravitationnelles par unité de volume
- ❖ $\nabla \cdot Pu$ la puissance des forces de pression par unité de volume
- ❖ $\nabla \cdot (\tau \cdot u)$ la puissance des forces visqueuses par unité de volume.

L'équation (3.14) peut aussi s'écrire de façon développée :

$$\rho \left[\frac{\partial}{\partial t} \left(\hat{u} + \frac{1}{2} u^2 \right) + u \cdot \nabla \left(\hat{u} + \frac{1}{2} u^2 \right) \right] + \left(\hat{u} + \frac{1}{2} u^2 \right) \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho u \right) = -\nabla \cdot q + \rho u \cdot g - \nabla \cdot Pu - \nabla \cdot (\tau \cdot u) \quad (3.15)$$

et, en considérant l'équation de conservation de la masse (3.1), le second terme de l'équation s'annule. Soit, avec la notation de dérivée particulaire :

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\hat{u} + \frac{1}{2} u^2 \right) = -\nabla \cdot q + \rho u \cdot g - \nabla \cdot Pu - \nabla \cdot (\tau \cdot u) \quad (3.16)$$

Et, avec l'équation de bilan de l'énergie cinétique (3.12), une simplification supplémentaire permet d'obtenir l'équation de bilan de l'énergie interne :

$$\rho \frac{D\hat{u}}{Dt} = -\nabla \cdot q - P(\nabla \cdot u) + \tau : \nabla u \quad (3.17)$$

On peut aussi écrire l'équation (3.16) avec l'énergie potentielle massique ϕ_g en considérant que g dérive de ce potentiel indépendant du temps (i.e. $g = -\nabla \phi_g$) :

$$\begin{aligned} \rho u \cdot g &= -\rho u \cdot \nabla \phi_g \\ &= -\rho \frac{D\phi_g}{Dt} + \rho \frac{\partial \phi_g}{\partial t} \\ &= -\rho \frac{D\phi_g}{Dt} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Soit :

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\hat{u} + \phi_g + \frac{1}{2} u^2 \right) = -\nabla \cdot q - \nabla \cdot Pu - \nabla \cdot (\tau \cdot u) \quad (3.19)$$

Équation de bilan pour l'enthalpie massique h

Cette équation de l'énergie peut aussi s'écrire en utilisant la notion d'enthalpie massique h :

$$h = \hat{u} + \frac{P}{\rho} \quad (3.20)$$

Soit :

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \rho \frac{Dh}{Dt} - \frac{DP}{Dt} + \frac{P}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} \quad (3.21)$$

Et, en utilisant l'équation de conservation de la masse (3.2) :

$$\rho \frac{D\hat{u}}{Dt} = \rho \frac{Dh}{Dt} - \frac{DP}{Dt} - P(\nabla \cdot u) \quad (3.22)$$

Soit, en reportant dans l'équation (3.17) :

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = -\nabla \cdot q + \frac{DP}{Dt} + \tau : \nabla u \quad (3.23)$$

Équation de bilan d'énergie en fonction de la température T

Souvent, l'équation de l'énergie thermique est exprimée avec la température T du fluide considéré. L'énergie interne massique peut s'écrire :

$$\begin{aligned} d\hat{u} &= \left(\frac{\partial \hat{u}}{\partial (1/\rho)} \right)_T d(1/\rho) + \left(\frac{\partial \hat{u}}{\partial T} \right)_\rho dT \\ &= \left[-P + T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho \right] d(1/\rho) + c_v dT \end{aligned} \quad (3.24)$$

Soit :

$$\rho \frac{D\hat{u}}{Dt} = \left[-P + T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho \right] \rho \frac{D(1/\rho)}{Dt} + \rho c_v \frac{DT}{Dt} \quad (3.25)$$

D'où la nouvelle expression de l'équation (3.17), en utilisant la relation (3.22) :

$$\rho c_v \frac{DT}{Dt} = -\nabla \cdot q - T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho \nabla \cdot u + \tau : \nabla u \quad (3.26)$$

Dans le cas d'un fluide Newtonien avec une conductivité thermique λ constante, cette équation peut s'écrire :

$$\rho c_v \frac{DT}{Dt} = \lambda \nabla^2 T - T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho \nabla \cdot u + \mu F_u \quad (3.27)$$

avec F_u la fonction de dissipation définie par l'équation (3.13).

Pour un gaz parfait, d'après l'équation d'état $P/\rho = rT$:

$$T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho = P \quad (3.28)$$

On peut de même écrire cette équation de conservation en fonction de la capacité calorifique à pression constante c_p du fluide, à partir de l'expression de l'enthalpie massique h pour un fluide :

$$dh = c_p dT - \left[T \left(\frac{\partial (1/\rho)}{\partial T} \right)_P - \frac{1}{\rho} \right] dP \quad (3.29)$$

Soit :

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \rho c_p \frac{DT}{Dt} - \left[\rho T \left(\frac{\partial (1/\rho)}{\partial T} \right)_P - 1 \right] \frac{DP}{Dt} \quad (3.30)$$

Et, en reportant dans l'équation de conservation (3.23), avec l'hypothèse de fluide Newtonien, on obtient :

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \lambda \nabla^2 T + \rho T \left(\frac{\partial(1/\rho)}{\partial T} \right)_p \frac{DP}{Dt} + \mu F_u \quad (3.31)$$

Pour un gaz parfait, d'après l'équation d'état $P/\rho = rT$:

$$\rho T \left(\frac{\partial(1/\rho)}{\partial T} \right)_p = 1 \quad (3.32)$$

Nota : la dissipation visqueuse μF_u est généralement négligée dans l'équation de conservation de l'énergie thermique pour les études thermoaérouliques du bâtiment.

Cas d'un mélange de plusieurs composants

Dans le cas d'un mélange non équilibré, il faut considérer la diffusion des espèces et ajouter alors à l'équation de bilan de l'énergie le terme d'énergie transportée par la diffusion des différentes espèces.

À l'échelle de notre étude, nous considérons que les phénomènes de transport sont prédominants sur les phénomènes de diffusion. Cette hypothèse est valable dans le cas d'études en milieu extérieur où les vitesses d'air sont relativement importantes et admises généralement aussi pour les études des ambiances intérieures des bâtiments, où les vitesses d'air sont fortement réduites mais néanmoins prédominantes par rapport aux vitesses de diffusion. Cependant, à l'échelle d'une paroi de bâtiment par exemple ce phénomène doit être pris en considération notamment dans l'étude de diffusion de l'humidité.

3.3 Modélisation fine à code de dynamique des fluides

Le développement de plateformes de simulation CFD, multi-échelles et intégrant l'étude de phénomènes couplés (Murakami 2004), permet d'envisager le dimensionnement de systèmes et la conception de bâtiments pour obtenir des conditions d'ambiance prédéfinies. Mais la modélisation fine par CFD des ambiances et du climat est confrontée à deux difficultés majeures : l'interaction de nombreux phénomènes physiques et les différences d'échelles spatiales et temporelles. Ces difficultés se répercutent sur la modélisation mais aussi sur les temps de calcul nécessaires.

3.3.1 DIFFÉRENTES APPROCHES À CODE DE CHAMP

Étant donnée la forte turbulence et l'influence des effets dynamiques dans l'écoulement urbain, les codes de champ ont souvent été utilisés malgré les nombreuses difficultés propres aux simulations pour de « grands espaces » (Jiang et Chen 2002). Ils se basent sur les équations locales de bilan des écoulements, équations (3.1), (3.10) et (3.31). En négligeant les forces de pesanteur et en considérant le fluide isovolume (hypothèses courantes pour les écoulements d'air étudiés ici), ce système d'équations devient :

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.34)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial U_i T}{\partial x_i} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \quad (3.35)$$

Cependant, la résolution directe de ce système d'équation pour un écoulement fortement perturbé peut devenir problématique et des modèles spécifiques de turbulence ont été établis pour simplifier cette résolution dans certains cas. On distingue alors différentes approches pour les codes de champ :

- ❖ La simulation numérique directe, DNS ou Direct Numerical Simulation : maillage très fin pour représenter toutes les échelles spatiales de la turbulence.
- ❖ Moyenne temporelle des équations de mouvement, RANS ou Reynolds Averaged Navier-Stokes Simulation : très utilisée mais limitée par les hypothèses de fermeture concernant la turbulence.
- ❖ Séparation des grandes et petites échelles de turbulence par la simulation des grandes échelles, LES ou Large Eddy Simulation : filtrage spatial et temporel des équations de mouvement pour conserver un maillage raisonnable, en ajoutant un modèle de sous maille pour la turbulence de petite échelle.

3.3.2 MODÉLISATION DE L'ÉCOULEMENT TURBULENT EN MILIEU URBAIN

Dans une étude réalisée par Jiang et Chen (Jiang et Chen 2002) la modélisation fine a portée sur un ensemble de bâtiments, Figure 3-2, dans l'objectif de prédire la ventilation d'un logement. Des mesures expérimentales ont été effectuées in situ sur les bâtiments A à D ainsi que pour un appartement dans le bâtiment A. Le modèle devait représenter correctement la circulation d'air autour de ces bâtiments, et plus particulièrement du bâtiment A. Le vent mesuré provient d'un site dégagé, homogène, et d'une direction nord à ouest. La zone étudiée a donc été limitée à l'ensemble des dix bâtiments représentés sur la Figure 3-2. Pour réduire le temps de calcul, l'étude a été faite sur uniquement les bâtiments A, B, E et F. La comparaison des résultats de cette simplification avec les résultats du calcul complet sur l'ensemble des 10 bâtiments a montré une différence de moins de 5 % sur la pression autour du bâtiment A.

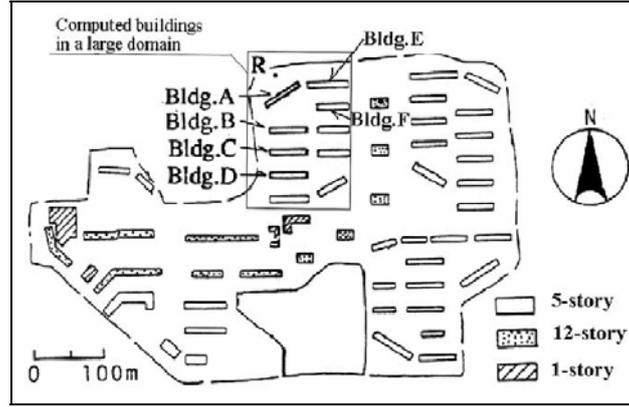


Figure 3-2 - Délimitation de la zone d'étude du groupe de bâtiments, d'après (Jiang et Chen 2002)

Par ailleurs, cette étude a montré l'importance de la variation de la direction du vent : pour un vent de nord ouest constant l'écart de pression pour la ventilation d'un appartement est surestimé d'un facteur 4 par rapport au cas réel où le vent a une direction variable entre le nord et l'ouest. Aussi, les essais en soufflerie se révèlent insuffisants de part la difficulté de mise en œuvre de cette variation de direction.

La modélisation LES retenue par Jiang et Chen (Jiang et Chen 2002) a montré, par une étude comparative, l'insuffisance de méthodes basées sur un écoulement moyen et donc l'importance des transferts turbulents. Cependant, les temps de calcul pour une telle approche se sont révélés très importants, de l'ordre de trois mois, sans tenir compte des effets thermiques.

Une des caractéristiques du mouvement turbulent est liée à la grande gamme d'échelles de tourbillons présents dans le mouvement. Les différentes échelles de turbulence correspondent à des phénomènes physiques différents : le gradient de vitesse produit la turbulence à grande échelle qui elle-même entraîne la formation d'une « cascade » de tourbillons qui, à petite échelle, dissipent l'énergie cinétique sous forme de chaleur, ce qui correspond au travail des contraintes visqueuses.

Le terme $\partial(U_i U_j) / \partial x_j$ de l'équation de Navier Stokes représente la diffusion et le principe de la simulation des grandes échelles consiste alors à filtrer les équations caractéristiques de l'écoulement de façon à découpler les échelles de turbulence. Ce filtre donne un champ résolu dit « composante de la maille d'échelle » $\bar{U}_i(x, t)$ et un champ résiduel dit « composante de sous-maille » $U'_i(x, t)$.

Ainsi la vitesse d'air peut s'écrire :

$$U_i(x, t) = \bar{U}_i(x, t) + U'_i(x, t) \quad (3.36)$$

et, en intégrant l'approximation de Boussinesq, les équations locales filtrées deviennent alors dans le cas d'un fluide newtonien incompressible :

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.37)$$

$$\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{U}_i \bar{U}_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_j} (-2\nu \bar{S}_{ij} + \tau_{ij}) + \delta_{i3} g \beta_B (\bar{T} - T_\infty) \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{U}_j \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial^2}{\partial x_j^2} \left(a \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \pi_{jT} \right) \quad (3.39)$$

avec τ_{SM} le tenseur des contraintes de sous-maille :

$$\tau_{SM,ij} = \overline{U_i U_j} - \bar{U}_i \cdot \bar{U}_j \quad (3.40)$$

π_{jT} le vecteur de flux thermique de sous-maille :

$$\pi_{jT} = \overline{U_i T} - \overline{U_i} \cdot \overline{T} \quad (3.41)$$

et S_{ij} le taux de déformation des échelles résolues :

$$\overline{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \overline{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.42)$$

Pour leurs calculs, Jiang et Chen (Jiang et Chen 2002) ont utilisé le filtre suivant qui correspond à une moyenne spatiale :

$$\overline{U}_i = \int G(x, x') U_i(x) dx' \quad (3.43)$$

$$\text{et } G(x, x') = \begin{cases} \frac{1}{\Delta_i} & \text{si } |x, x'| \leq \frac{\Delta_i}{2} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{avec } \Delta_i \text{ largeur du filtre, soit avec le modèle de sous-maille de}$$

Smagorinsky (Smagorinsky 1963) :

$$\tau_{ij} = -2\nu_{SGS} \overline{S}_{ij} \quad \text{avec } \nu_{SGS} = (C_{SGS} \Delta_i)^2 \sqrt{2\overline{S}_{ij} \cdot \overline{S}_{ij}} \quad \text{et } C_{SGS} \text{ de l'ordre de } 0,1 \text{ à } 0,2 \quad (3.44)$$

Cependant le problème d'une telle étude réside dans la finesse de la discrétisation spatiale et temporelle et le temps de calcul qu'elle entraîne. Ici, la finesse de maillage était de 0,2 m pour l'intérieur et 1 m pour l'extérieur. Le pas de temps devait être d'au moins 0,05 s pour l'intérieur et 0,1 s pour l'extérieur. Pour limiter les temps de calcul, trois mois sur une station de calcul dans ce cas, les calculs intérieurs et extérieurs ont été découplés.

3.3.3 UTILISATION DE MODÈLES MOYENNÉS EN TEMPS DE TYPES $k-\varepsilon$

Ce type de modèle permet d'envisager la simulation des écoulements aux échelles considérées avec des temps de calcul réduits de par la simplification de la modélisation de la turbulence. De plus, des comparaisons de modèles de canyons avec des résultats expérimentaux pour des grands nombres de Reynolds ont montré la validité de ce type de modélisation, d'après (Jeong et Andrews 2002).

La modélisation $k-\varepsilon$ est souvent utilisée pour déterminer les champs de vitesse et la forme d'un écoulement. Ainsi Carrilho da Graca a utilisé ce modèle pour estimer l'écoulement extérieur au bâtiment (Carrilho da Graca et al. 2002) en configuration isotherme pour des raisons de capacité de calcul. À partir du champ des vitesses ainsi calculé, les coefficients d'échange et les taux de ventilation sont déterminés sur la base de relations empiriques. Un modèle énergétique simplifié permet alors de déterminer les paramètres du confort thermique à l'intérieur du bâtiment.

Principe de la modélisation de type $k-\varepsilon$

Les équations locales caractéristiques du fluide sont moyennées en temps et un modèle de turbulence est ajouté. Aussi, la vitesse est décomposée en une valeur moyenne et un terme fluctuant :

$$U_i(M, t) = \overline{u}_i(M) + u'_i(M, t) \quad (3.45)$$

Avec :

- ❖ $\overline{u}_i(M) = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} u_i(M, t) dt$ la vitesse moyennée sur la période Δt ,
- ❖ $u'_i(M, t)$ les fluctuations de la vitesse en fonction du temps.

Les équations locales de conservation s'écrivent alors :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.46)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \overline{u'_i u'_j} \right) + \delta_{i3} g \beta_B (\bar{T} - T_\infty) \quad (3.47)$$

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = a \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial x_j \partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-\overline{u'_j T'} \right) \quad (3.48)$$

Les termes correspondant à la turbulence sont alors décrits par une viscosité turbulente ν_t et un coefficient empirique σ_t . L'hypothèse de Boussinesq exprime alors la dissipation d'énergie turbulente, ou contrainte de Reynolds, par l'équation suivante :

$$-\overline{u'_i u'_j} = \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (3.49)$$

et l'analogie de Reynolds exprime le terme de flux de chaleur turbulente :

$$-\overline{u'_j T'} = \frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \quad (3.50)$$

La turbulence est prise en compte par son énergie cinétique k et par son taux de dissipation ε :

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (3.51)$$

$$\varepsilon = \nu \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \frac{\partial u'_i}{\partial x_j} \quad (3.52)$$

En reprenant les équations de conservation, deux nouvelles équations pour k et ε sont alors obtenues :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{u'_j T'} \delta_{j3} g \beta_B - \varepsilon \quad (3.53)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{1\varepsilon} C_{3\varepsilon} \frac{\nu_t}{\sigma_T} \delta_{j3} g \beta_T \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i} - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (3.54)$$

Applications et limites

Ces modèles sont souvent utilisés dans la modélisation des écoulements en milieu urbain, pour des rues de types canyon, et couplés avec la détermination de la dispersion de polluants (Tsai et Chen 2004), de l'étude de la ventilation naturelle (Chen 2004), ou des phénomènes de transfert thermoaérodynamiques (Tsai et Chen 2004).

Cependant les simplifications du modèle de type k - ε peuvent entraîner de fortes imprécisions dans la prédiction des écoulements autour des bâtiments. Les modèles plus précis, comme les modèles LES, validés par des mesures précises en laboratoire peuvent alors être plus satisfaisants. Différentes ap-

proches CFD comparées par Stéphane Glockner pour un cas simple d'une marche descendante, comparatif représenté à la Figure 3-3 (Glockner et al. 1999), démontrent la difficulté de prédiction de l'écoulement.

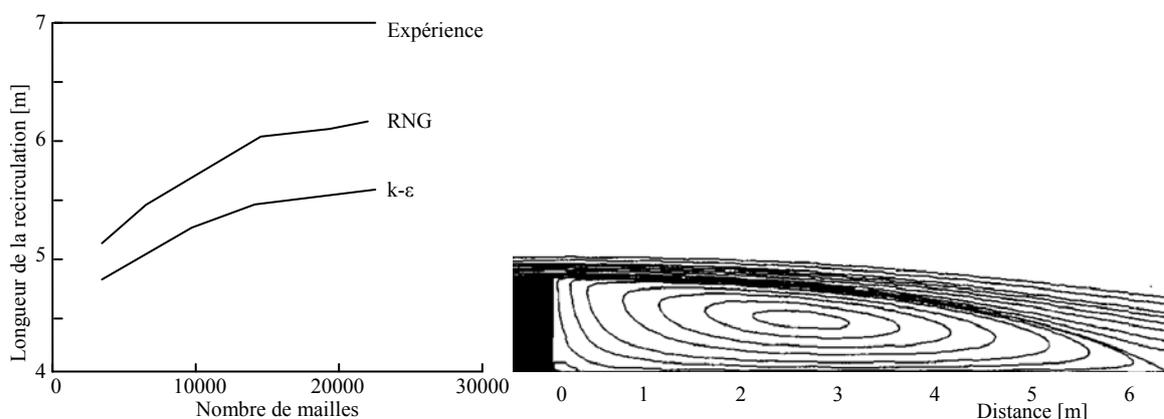


Figure 3-3- Longueur de la recirculation en fonction du nombre de mailles pour 3 modèles CFD, et représentation des lignes de courant, d'après (Glockner et al. 1999).

En effet pour ce cas qui peut s'apparenter au cas d'un bâtiment exposé à un vent dominant, la forme de la recirculation est largement sous-évaluée, notamment avec le modèle $k-\varepsilon$. Le nombre de mailles apparaît aussi ici déterminant, et la précision n'augmente pas linéairement avec celui-ci, Figure 3-3.

Finalement, pour ces méthodes des compromis sont à faire entre le temps de calcul, la précision recherchée et le domaine de validité des modèles adoptés. Utilisés avec des maillages adaptés et des conditions aux limites correctement définies, cette famille d'outils CFD peut permettre de donner une bonne estimation d'un écoulement inconnu « a priori », comme dans le cas d'un projet de construction ou d'urbanisme. Cependant, la nécessité d'un maillage suffisamment fin pour une prédiction réaliste entraîne des temps de calcul des mouvements aérauliques qui peuvent devenir prohibitifs, en particulier en raison des couplages thermoaérauliques parfois complexes. Ces temps de calcul nécessaires augmentent très fortement sur de longues périodes de simulation et pour des grands volumes. De plus, ces modèles sont très sensibles aux conditions aux limites qui doivent donc être définies précisément, ce qui n'est pas toujours possible dans le cadre de l'étude des microclimats urbains où le milieu complexe des villes est souvent défini grossièrement. La partie suivante présente une approche intégrée sur un maillage plus grossier qui permet d'envisager des couplages plus complets et des temps de calcul relativement plus courts, et compatible avec notre objectif d'estimation de l'impact du microclimat sur les bâtiments.

3.4 Approche zonale des transferts thermoaérauliques

La modélisation zonale constitue une approche intermédiaire entre la modélisation nodale et la modélisation fine à code de champs. Le volume étudié est partitionné en sous-volumes ou zones, sur lesquels les grandeurs d'état sont supposées être constantes, et entre lesquels les transferts de masse et d'énergie sont déterminés à partir des lois de bilan intégrées ou de lois empiriques. Dans l'étude de locaux par modèles zonaux (Wurtz 1995; Musy 1999; Mora 2003), le maillage du local considéré comme parallélépipédique se fait en sous-volumes eux-mêmes parallélépipédiques et adaptés aux éléments spécifiques du local tels que vitrages, convecteurs, bouches de ventilation (Figure 3-1). Ces sous-volumes ainsi définis sont aussi appelés cellules et séparés donc par six interfaces.

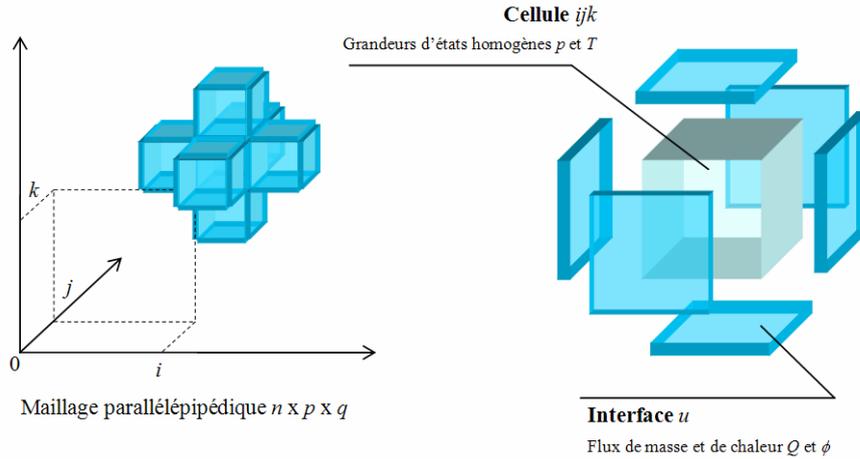


Figure 3-4 – Maillage du volume étudié en zones parallélépipédiques repérées par les indices i, j et k ; séparées par six interfaces indicées u .

Pour chaque cellule, on effectue alors un bilan de masse et d'énergie en considérant les flux aux interfaces, Figure 3-5. Les interfaces, Figure 3-4, sont indicées suivant leur orientation indicée u (ouest, est, sud, nord, bas ou haut).

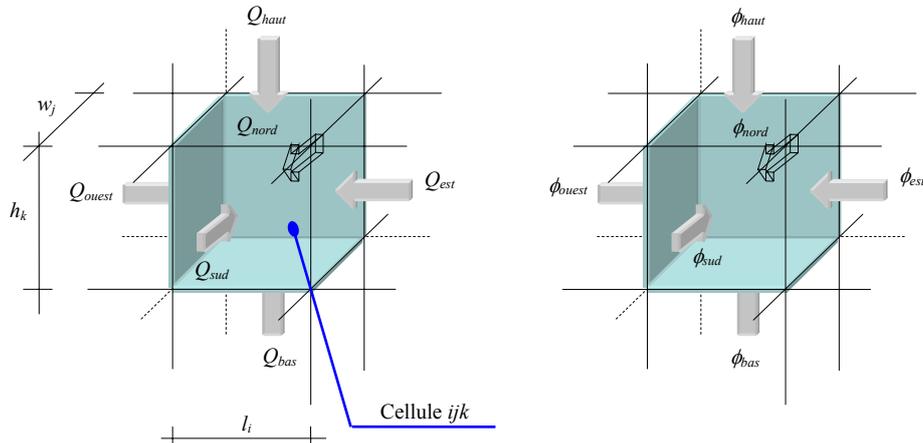


Figure 3-5 - Bilan de conservation de masse et d'énergie pour une cellule.

3.4.1 CONSERVATION DE LA MASSE

Avec l'hypothèse de fluide isovolume, l'équation de conservation de la masse pour une cellule peut s'écrire d'après (3.1) :

$$\sum Q_u = 0 \quad (3.55)$$

avec Q_u le débit massique en kg/s compté positif entrant dans la cellule ijk par l'interface indicée u .

Le moteur de l'écoulement correspond aux écarts de pression Δp_u entre cellules adjacentes. Pour des faibles vitesses d'air, hypothèse souvent retenue pour l'étude des ambiances intérieures de bâtiments, Q_u peut s'exprimer selon une relation linéaire en considérant une résistance à l'écoulement entre cellules modélisée par un coefficient empirique K et en supposant la pression homogène dans le volume de chaque cellule, d'après (Musy 1999) :

$$Q_u = \frac{1}{K} S_u \Delta p_u \quad (3.56)$$

Le domaine de validité de cette simplification est cependant limité, et pour des écoulements de vitesse importante des modèles complémentaires, explicités par la suite, seront utilisés. Pour tenir compte de la poussée thermique, dans le cas des débits verticaux on ajoute à ce terme un terme tenant compte de la variation hydrostatique de la pression. Soit, au niveau de l'interface haute de la cellule ijk par exemple :

$$Q_{haut} = \frac{1}{K} S_{haut} \Delta p_{haut} + \frac{1}{K} S_{haut} \left(\rho_{ijk} g \frac{h_k}{2} + \rho_{ijk+1} g \frac{h_{k+1}}{2} \right) \quad (3.57)$$

Avec :

- ❖ g l'accélération de pesanteur
- ❖ $\rho_{ijk} g h_k / 2$ la pression due à la masse d'air d'un côté de l'interface considérée (du côté de la cellule ijk).

La densité de l'air ρ_{ijk} est déterminée en fonction de la température de la cellule ijk à partir de la loi des gaz parfaits, soit :

$$\frac{P_{ijk}}{\rho_{ijk}} = r T_{ijk} \quad (3.58)$$

3.4.2 BILAN D'ÉNERGIE THERMIQUE

L'équation de bilan des flux de chaleur est intégrée sur le volume de la cellule. L'hypothèse est faite ici que la température T_{ijk} est homogène dans le volume de la cellule ijk . D'après (3.27) en négligeant les termes de diffusion thermique et de dissipation visqueuse et en considérant l'hypothèse de fluide isovolume, i.e. $\nabla \cdot u = 0$:

$$\rho_{ijk} c_v V_{ijk} \frac{\partial T_{ijk}}{\partial t} = \sum_u \phi_u + \phi_{source} \quad (3.59)$$

Avec :

- ❖ $\rho_{ijk} c_v V_{ijk} (\partial T_{ijk} / \partial t)$ la variation d'énergie interne en J / K pour la cellule ijk
- ❖ ϕ_u le flux de chaleur en watts, compté positif entrant dans la cellule ijk par l'interface u :

$$\phi_u = c_v Q_u (T_u - T_{ijk}) \quad (3.60)$$

- ❖ ϕ_{source} l'apport d'une source de chaleur éventuelle dans la cellule ijk en watts.

Au niveau de l'interface u avec une paroi on ajoute à ϕ_u un terme d'échange par convection, l'éventuel débit d'air Q_u correspond alors à un débit d'infiltration à travers la paroi ou à un dispositif de ventilation par exemple. Soit l'expression de ϕ_u :

$$\phi_u = c_v Q_u (T_u - T_{ijk}) + h_{conv,u} S_u (T_{su} - T_{ijk}) \quad (3.61)$$

Les échanges convectifs sont ici linéarisés et exprimés à partir d'un coefficient de convection surfacique $h_{conv,u}$ donné pour l'élément de paroi de surface S_u et de température T_{su} . Ces paramètres peuvent

être fixés comme conditions aux limites ou calculés comme détaillé par la suite à partir du bilan énergétique de l'élément de paroi.

3.4.3 BILAN THERMIQUE DES ÉLÉMENTS DE PAROI ET FRONTIÈRE DU DOMAINE

Les éléments de parois, situés aux frontières du domaine dans notre cas, sont des éléments soumis au phénomène de convection, conduction et rayonnement.

Un élément de paroi en contact avec une interface du domaine échange par convection avec la cellule adjacente le flux convectif de chaleur défini précédemment, équation (3.61). Le coefficient de convection $h_{conv,u}$ dépend principalement de l'écart de température entre la surface et l'air proche de celle-ci, et des relations empiriques ont été établies dans le cadre d'études des locaux (Lebrun 1970; Allard 1987; Inard 1988). À l'extérieur des bâtiments, la vitesse d'air est souvent nettement plus importante qu'à l'intérieur, et celle-ci est souvent considérée comme déterminante dans l'expression du coefficient de convection. Pour le cas d'une rue $h_{conv,u}$ peut être corrélé à la vitesse u^* au dessus des bâtiment d'après (Ca et al. 1995) :

$$h_{conv,u} = 0,99 + 0,689 \cdot u^* \quad (3.62)$$

Ces parois sont exposées au rayonnement solaire qui est en partie absorbé et en partie réfléchi vers les autres facettes du domaine. Le bilan des inter-réflexions de ce rayonnement dit de courte longueur d'onde se fait sur un espace fermé de facettes transparentes au rayonnement, dans le cas d'absence de paroi, et des parois caractérisées par leur absorptivité, réflectivité et de transmittivité. Ce même bilan doit être effectué pour le rayonnement de grande longueur d'onde, ou rayonnement infrarouge, lié directement à la température des parois et à leur émissivité. Le domaine étant limité par des facettes transparentes, l'hypothèse est donc faite que le rayonnement sortant du domaine n'est pas réémis vers les parois étudiées. Le choix des limites des parois étudiées dans le calcul du rayonnement doit donc permettre de limiter l'erreur due à cette approximation.

Ces flux thermiques sont transmis par conduction dans le matériau de la paroi ou du sol et varient dans l'épaisseur de la couche considérée en fonction des paramètres de conduction et d'inertie liée à la chaleur massique du matériau. Ce flux peut alors être exprimé en surface en fonction des températures aux limites du domaine, ici à l'intérieur des bâtiments ou à une certaine profondeur dans le sol.

Cette condition aux limites de température d'air est aussi utilisée pour déterminer le transfert de chaleur par transport, équation (3.60), à l'interface de frontière, due au débit d'air et lié à la perméabilité de l'interface et aux écarts de pression. Dans le cas d'une paroi par exemple une perméabilité liée aux infiltrations peut donc être ainsi définie.

Le bilan thermique des parois ainsi que les échanges aérauliques aux frontières définissent alors les conditions aux limites du domaine étudié.

3.5 Modélisation zonale et intégration de modèles complémentaires

Le modèle zonal défini précédemment donne une prédiction des transferts thermoaérouliques entre différentes zones, appelées cellules, les différences de pression entre ces volumes définissant l'écoulement. Cependant ce volume étudié est soumis à plus grande échelle à des sollicitations climatiques ainsi que localement à l'interaction avec des systèmes liés aux bâtiments, climatisation ou ventilation naturelle. Ces phénomènes sont très souvent couplés et la description des couplages doit être intégrée au modèle général. Cette partie décrit l'intégration de ces modèles complémentaires qui peuvent permettre aussi de pallier certaines limitations du modèle zonal par rapport aux écoulements dominant notamment. Pour permettre la résolution de l'ensemble du système simultanément, et limiter les temps de calcul pour un pas de temps ou une itération, les modèles retenus sont simplifiés et définis si possible par des relations linéaires. La formulation empirique précise des phénomènes spécifiques connus est nécessaire pour affiner la prédiction des phénomènes couplés, mais elle nécessite d'identifier au préalable l'ensemble de ces phénomènes.

3.5.1 LE RAYONNEMENT SOLAIRE ET LES ÉCHANGES RADIATIFS AVEC LA VOÛTE CÉLESTE

Le rayonnement solaire est en partie absorbé par les différentes sous-couches atmosphériques, l'éclairement incident à la surface des parois exposées est alors constitué de l'éclairement solaire direct E_{dir} , diffus E_{dif} et de l'éclairement provenant des surfaces environnantes du fait des inter-réflexions (voir Chapitre 2).

En considérant le volume d'air étudié comme transparent au rayonnement, le flux solaire net absorbé par les parois est indépendant des autres phénomènes de transferts thermoaérouliques. Il est donc calculé sur la période d'étude considérée en parallèle ou en amont de la simulation globale. Ce couplage est de type asynchrone, i.e. le résultat du modèle d'ensoleillement est utilisé comme condition limite dans le modèle zonal. Cette modélisation est approfondie au Chapitre 4.

La voûte céleste intervient aussi dans le domaine des grandes longueurs d'ondes, ce rayonnement émis par la surface terrestre est absorbé par les gaz à effet de serre. Ce phénomène appelé aussi contre-rayonnement (Bonnet 2004) concerne les longueurs d'ondes comprises entre 8 et 100 μm et peut se modéliser par une température de ciel équivalente relativement faible. L'échange thermique par rayonnement dépend alors de l'écart de température entre la surface considérée T_{su} et la température de ciel T_{ciel} . Pour une paroi dont la surface S_u est négligeable par rapport à la voûte céleste, et l'éclairement reçu de grande longueur d'onde E_{ciel} (W/m^2) s'exprime par la relation suivante :

$$E_{ciel,u} = \varepsilon_u \sigma (T_{ciel}^4 - T_{su}^4) \quad (3.63)$$

ε_u étant l'émissivité de la surface considérée en grandes longueurs d'onde. T_{ciel} est donc défini comme étant la température équivalente du corps noir émettant globalement le même rayonnement de grande longueur d'onde que l'atmosphère considérée. Cette température équivalente dépend de la clarté du ciel, de l'humidité et de l'épaisseur de la couche atmosphérique. En effet la température équivalente est généralement plus grande à l'horizon qu'au zénith, mais de façon simplifiée elle sera considérée homogène sans prise en compte de l'orientation de la surface réceptrice. Pour un ciel clair, l'analyse du spectre de rayonnement atmosphérique, représenté Figure 3-6, montre que l'émission suit bien celle d'un corps noir de même température que celle de l'air près du sol, avec néanmoins une zone d'exclusion comprise ici entre 8 et 13 μm (Perez-Garcia 2004) et appelée « fenêtre atmosphérique ». Cette fenêtre atmosphérique est liée à l'absorption sélective de la vapeur d'eau, et elle « se ferme » avec la présence de nuages, composés eux d'eau liquide ou solide et qui se comportent comme des corps gris. Cette température équivalente peut donc atteindre au maximum, théoriquement, la température d'air, bien qu'elle soit généralement inférieure, ce que traduit la bande de longueurs d'ondes filtrées de la Figure 3-6. Elle peut ainsi atteindre des valeurs inférieures à 50K pour un ciel clair (Bonnet 2004).

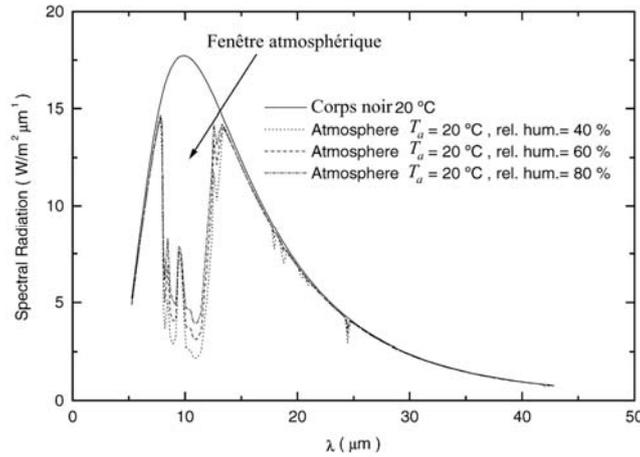


Figure 3-6- Spectre de rayonnement atmosphérique incident de grande longueur d'onde pour différentes conditions de température et d'humidité près du sol et pour un corps noir à 20°C, d'après (Perez-Garcia 2004).

T_{ciel} est alors formulée empiriquement à partir de la température d'air moyenne de la zone étudiée T_a et de la température du point de rosée T_{dp} pour un ciel clair par (Martin et Berdahl 1984) :

$$T_{ciel} = \varepsilon_{ciel}^{\frac{1}{4}} \cdot T_a \text{ avec } \varepsilon_{ciel} = 0,711 + 0,0056 \cdot T_{dp} + 0,000073 \cdot T_{dp}^2 \quad (3.64)$$

Dans le cas d'un ciel couvert, il faut corriger cette formulation en fonction du coefficient de nébulosité n exprimé en octas, c'est-à-dire en huitièmes de ciel occupés par les nuages. La température de ciel s'exprime donc de façon générale par :

$$T_{ciel} = \varepsilon_{ciel,n}^{\frac{1}{4}} \cdot T_a \text{ avec } \varepsilon_{ciel,n} = \varepsilon_{ciel} (1 + 0,0224 \cdot n - 0,0035 \cdot n^2 + 0,00028 \cdot n^3) \quad (3.65)$$

Le couplage est donc réalisé par la formulation de $E_{ciel,u}$ en fonction de la température T_{ciel} déterminée empiriquement à partir des données météorologiques, et la température des surfaces T_{su} qui sont aussi dépendantes des bilans thermiques de surface et donc indirectement des transferts thermoaérouliques dans la zone étudiée.

3.5.2 COMPORTEMENT THERMIQUE DU SOL

La température du sol dépend principalement de trois paramètres : les sollicitations climatiques, la nature du sol et les paramètres du sous-sol. Cette température varie donc de façon cyclique en fonction des saisons et quotidiennement du fait des variations d'ensoleillement, avec des variations particulières dues à des éléments comme la pluie qui modifient les transferts de chaleur en surface. Dans sa profondeur, le sol est constitué de différentes couches de matériaux de caractéristiques thermiques variables, et les principaux transferts de chaleur sont dus à la conduction du matériau ainsi qu'à la teneur en humidité de ceux-ci. D'autre part, le noyau terrestre diffuse un flux de chaleur vers la surface, et l'équilibre de ces sollicitations entraîne une température du sous-sol qui varie très faiblement à partir d'une certaine profondeur, de l'ordre d'un degré supplémentaire tous les 50 m du fait de la chaleur géothermique. Les températures observées tendent vers une température moyenne annuelle constante à partir de 5 à 6 mètres, Figure 3-7. Les variations en surface ont alors une amplitude proche de la température de l'air et évoluent suivant le cycle des saisons suivant une forme moyenne sinusoïdale. On constate alors que les extrema sont atteints avec un retard croissant avec la profondeur, ce qui aux environs de 5 mètres de profondeur amène un décalage de l'ordre de 6 mois, Figure 3-7. Cette atténuation peut être calculée très simplement en considérant le sol comme un milieu semi-infini soumis en surface à une condition en température variable et à une profondeur supposée infinie à une température fixée correspondant à la moyenne annuelle.

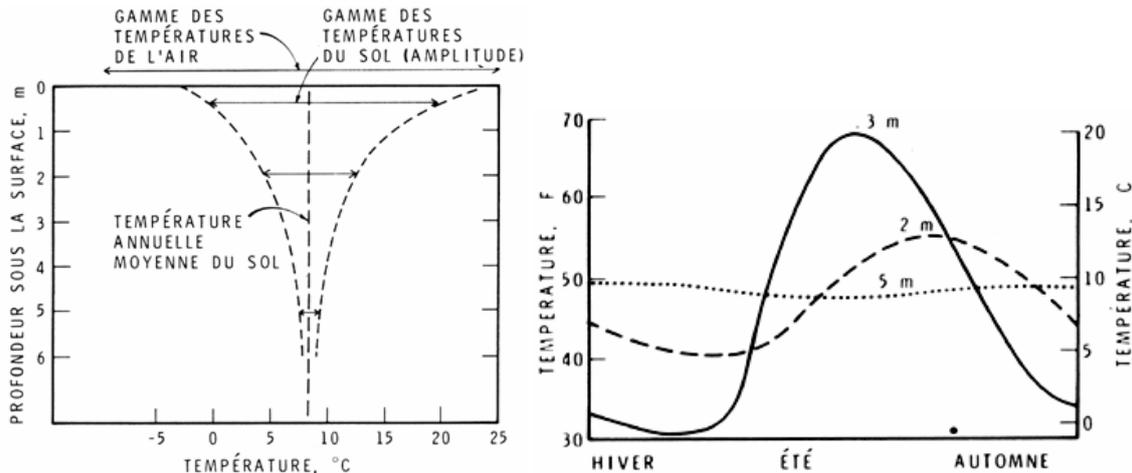


Figure 3-7- Relation entre variation annuelle de température du sol et profondeur (à gauche) et variation annuelle des températures de sol (à droite) à Ottawa (Canada), d'après (William et Gold 1977).

L'évolution cyclique de la température T_{sz} du sous-sol, à la profondeur z , s'exprime donc en fonction de la température moyenne de surface $T_{su,moy}$ pour la période étudiée, une année dans le cas de la Figure 3-7, par la relation suivante :

$$T_{sz}(t) = T_{su,moy} + \Delta T_{su} \cdot e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{a_{sol} \cdot \Delta t}}} \cos\left(\frac{2\pi t}{\Delta t} - z \sqrt{\frac{\pi}{a_{sol} \Delta t}}\right) \quad (3.66)$$

avec ΔT_{su} l'amplitude de variation de la température à la surface sur la période considérée, Δt la période considérée, et a_{sol} la diffusivité thermique du sol.

De même que les variations annuelles de la température dans le sol s'atténuent avec la profondeur en fonction de la composition du sol, les variations diurnes sont sensibles en surface et sont plus rapidement négligeables. Le tableau suivant, Tableau 3-1, établit la profondeur d'atténuation des variations diurnes et annuelles pour différentes natures de sol, cette profondeur d'atténuation étant définie par la profondeur à laquelle l'amplitude de variation de la température est réduite à 1% de l'amplitude en surface.

Tableau 3-1- Profondeur d'atténuation des cycles de température quotidiens et annuels

	a_{sol} [cm ² / s]	Profondeur de pénétration	
		Variation diurne [m]	Variation annuelle [m]
Roc	0,020	1,10	20,5
Argile humide	0,015	0,95	18,0
Sable humide	0,010	0,80	14,5
Argile sèche	0,002	0,40	6,5
Sable sec	0,001	0,30	4,5

À l'échelle de notre étude, les périodes d'étude envisagées sont de l'ordre d'une saison et nous nous intéresseront aux cycles quotidiens pour suivre la température heure par heure dans le sol de la rue. La période Δt à retenir pour les variations de la température du sous-sol est donc de l'ordre de la journée.

La température du sol est choisie comme condition limite de notre modèle, et imposée selon une variation horaire donnée par l'équation (3.66) à une profondeur au moins supérieure à la profondeur de pénétration horaire. Pour limiter l'inertie du modèle et permettre de diminuer la sensibilité aux conditions initiales, la profondeur choisie sera inférieure à la profondeur de pénétration diurne. D'autre part l'amplitude de variation quotidienne de température en surface ΔT_{su} ainsi que $T_{su,moy}$ ne sont pas connues a priori avant la simulation. L'hypothèse est donc faite que ces paramètres varient peu d'un jour à l'autre, et les valeurs de la journée précédente sont utilisées pour permettre de définir la condi-

tion limite de température. Une période transitoire d'initialisation des conditions thermiques du sol sera donc nécessaire au début de chaque simulation.

3.5.3 ÉCOULEMENTS DOMINANTS ET VENT

La modélisation zonale en pression développée pour l'étude des locaux permet la description des écoulements à faible quantité de mouvement ainsi que les mouvements convectifs. Cependant cette approche doit être complétée de modèles spécifiques pour le cas d'écoulements à forte quantité de mouvement, comme un vent dominant en extérieur par exemple.

Faiblesse de la modélisation zonale par rapport aux écoulements dominants

Dans le cas d'un écoulement dominant, avec une direction privilégiée, Figure 3-8, le modèle en pression est insuffisant. En effet les équations résolues sur chaque macro volume, ou cellule, ne prennent pas en compte le terme d'inertie de l'équation de conservation de la quantité de mouvement. La pression imposée par un débit d'entrée se répartira alors de la même façon dans toutes les directions. Pourtant, le bilan d'énergie cinétique dans la direction du jet devrait provoquer une circulation entre zones totalement différente.

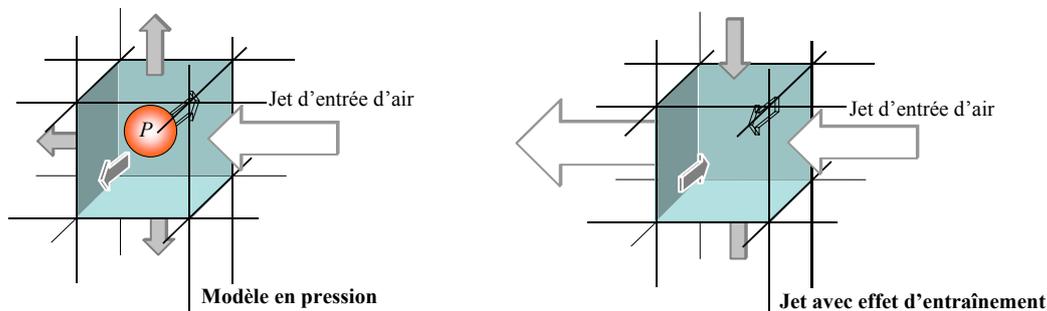


Figure 3-8 - Répartition des débits sortant d'une cellule pour un débit imposé par un jet sur l'une des interfaces : résultat pour un modèle en pression et pour un modèle de jet avec entraînement d'air

Dans le cas de notre étude, la vitesse d'air peut être relativement forte au dessus des bâtiments, et beaucoup plus faible à l'intérieur de la rue où les mouvements de convection naturelle peuvent devenir prédominants. Aussi, il est nécessaire d'ajouter au modèle zonal global des modèles spécifiques correspondant par exemple ici au vent transversal à la rue canyon. Au-dessus des bâtiments, la vitesse moyenne horizontale $\bar{u}(z)$ peut être modélisée suivant une loi d'évolution logarithmique, comme celle décrite par (Nicholson 1975).

L'intégration au modèle zonal de ce type de modèle d'écoulement dominant peut alors être envisagée par la création de cellules d'écoulement spécifiques si la zone est précisément définie. Le débit sera alors calculé empiriquement au niveau des interfaces concernées est imposé dans le modèle. Cependant si une interaction avec d'autres phénomènes thermoaérauliques est envisageable, le couplage doit être plus complet et les débits aux interfaces sont alors déterminés de façon itérative.

Approche empirique du transfert turbulent

Les modèles semi empiriques d'écoulements donnent généralement des valeurs moyennes, mais les fluctuations sont plus complexes à définir précisément. Pourtant c'est un facteur qui peut devenir prédominant dans les mécanismes de ventilation naturelle des bâtiments comme dans le cas d'une ouverture unique, Figure 3-9, de deux ouvertures parallèles, ou quand l'effet de tirage thermique et l'effet du vent dominant sont opposés.

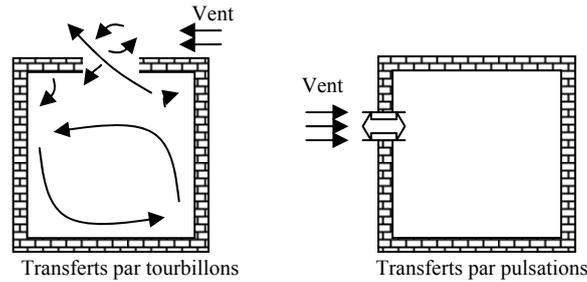


Figure 3-9 - Transferts par tourbillons et par pulsations vers un local à une ouverture, d'après (Haghighat et al. 1991).

Différentes approches sont possibles pour estimer ces transferts dus à la turbulence, dans la méthode présentée par Haghighat et al. les débits entraînés ainsi que les fluctuations de débits sont calculés en fonction des écarts et des fluctuations de pression (Haghighat et al. 1991). Les lois d'évolution des fluctuations sont ici linéarisées et étudiées suivant les fréquences correspondant aux modes prédominants des turbulences.

Dans la perspective de l'étude de systèmes de ventilation naturelle, ce modèle de transfert pourrait être intégré dans la modélisation zonale par la définition du comportement particulier de l'interface de transfert entre l'extérieur et l'intérieur.

3.5.4 PRISE EN COMPTE DES TRANSFERTS DE COMPOSÉS DANS LA MASSE D'AIR ET AUX LIMITES

Il peut être intéressant d'intégrer à notre modèle la prise en compte du transfert de composés tels que des polluants ou de la vapeur d'eau. L'eau en particulier peut intervenir de façon non négligeable dans les bilans thermiques et les transferts de masse, elle intervient dans l'étude de l'impact de la végétation ou de plan d'eau par exemple (Robitu et al. 2004). Dans une première approche, les simulations réalisées par la suite ne tiennent cependant pas compte de ce facteur et se limitent au cas d'un climat sec. Néanmoins c'est un facteur important par rapport au traitement de notre problème lié à l'îlot de chaleur urbain.

La prise en compte d'un composé implique l'ajout d'une équation de transport, mais il faut aussi tenir compte des conséquences énergétiques, liées aux changements d'états et au transport de chaleur sensible, et des conséquences possibles sur les mouvements d'air. La concentration du composé dans l'air dépend de plusieurs phénomènes : transport dû au vent et aux mouvements locaux, échange par diffusion avec l'intérieur des bâtiments, absorption/désorption avec les parois et productions locales, liées à la végétation, aux fontaines et à la présence humaine. Ces phénomènes varient avec la température et les mouvements d'air.

Dans la suite, l'intégration des transferts d'humidité est décrite, et la même démarche peut être appliquée pour un autre composé.

Comme pour le modèle thermoaéraulique, le moteur des mouvements d'air humide reste la pression totale du mélange, ce qui permet de calculer le débit d'air humide. Le volume d'air étudié peut alors être décrit par les variables d'état suivantes : P la pression totale de l'air humide en Pascal, T la température d'air humide en Kelvin et w l'humidité spécifique en kilogramme d'eau [kge] par kilogramme d'air sec [kgas].

L'humidité spécifique est donc ajoutée comme paramètre supplémentaire à déterminer par le modèle zonal. Il faut pour cela ajouter les équations du mélange et prendre en compte dans les bilans ce nouveau paramètre. L'air humide peut être considéré comme un mélange parfait de deux gaz parfaits qui vérifient alors l'équation d'état des gaz parfaits, en notant i l'indice correspondant à l'air sec ou la vapeur :

$$P_i V = M_i r_i T \quad (3.67)$$

La loi de Dalton :

$$P = P_{vap} + P_{as} \quad (3.68)$$

Les masses volumiques de l'air sec et de la vapeur d'eau peuvent alors être déterminées à partir des trois variables d'état :

$$\rho_{as}(T, P, w) = \frac{P}{(wr_{vap} + r_{as})T} \quad (3.69)$$

$$\rho_{vap}(T, P, w) = \frac{P \cdot w}{(wr_{vap} + r_{as})T} \quad (3.70)$$

Ainsi que la pression partielle de vapeur d'eau :

$$P_{vap}(P, w) = \frac{P \cdot r_{vap} \cdot w}{(wr_{vap} + r_{as})} \quad (3.71)$$

Bilan de masse

Chaque espèce considérée dans le mélange est conservée, soit, pour l'air sec, d'après (3.55) :

$$\sum Q_u^{as} = 0 \quad (3.72)$$

Mais, en considérant l'eau sous forme vapeur, la masse contenue dans la cellule peut varier en fonction des paramètres suivants :

- ❖ Les débits massiques de vapeur entrant dans la cellule par les interfaces u et transportée par l'air sec $Q_u^{vap,as}$
- ❖ Les débits massiques de vapeur entrant dans la cellule par diffusion $Q_u^{vap,diff}$
- ❖ La condensation de vapeur sur les surfaces $Q_u^{vap,cond}$
- ❖ L'apport de vapeur par production interne S_{vap}
- ❖ Condensation ou évaporation d'eau sous forme liquide dans le volume d'air $\partial M_{liq} / \partial t$

Soit l'équation de bilan de masse suivante :

$$\sum \left(Q_u^{vap,as} + Q_u^{vap,diff} - Q_u^{vap,cond} \right) + S_{vap} - \frac{\partial M_{liq}}{\partial t} = \frac{\partial M_{vap}}{\partial t} \quad (3.73)$$

Bilan d'énergie thermique

Pour l'air humide, la notion d'enthalpie est couramment utilisée. Si on fait l'hypothèse que le terme de variation de pression au cours du temps DP / DT est négligeable par rapport aux apports d'enthalpie, et en négligeant le terme de friction et de diffusion thermique dans l'air humide :

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \rho \frac{\partial h}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla h = 0 \quad \text{ou} \quad \rho \frac{\partial h}{\partial t} = \rho u \cdot (-\nabla h) \quad (3.74)$$

Pour une cellule, le bilan d'énergie thermique peut alors s'écrire :

$$\rho_{ijk} V \frac{\partial h_{ijk}}{\partial t} = \sum Q_u (h_u - h_{ijk}) + \phi_{source} \quad (3.75)$$

3.6 Mise en œuvre de la méthode zonale couplée aux phénomènes spécifiques dans un code de calcul

3.6.1 MISE EN ŒUVRE DE LA MÉTHODE DANS UN ENVIRONNEMENT ORIENTÉ OBJET

La méthode zonale en pression exposée précédemment a été développée au sein LEPTAB dans un environnement orienté objet, SPARK (Bulh et al. 1993), pour l'étude des locaux et du confort thermique (Wurtz 1995; Musy 1999; Mora 2003). Ces développements ont conduit à définir une terminologie adaptée aux phénomènes étudiés et cohérente avec la définition d'objets dans l'environnement SPARK. On distingue ainsi trois éléments principaux représentés Figure 3-10 : les cellules, les interfaces et les facettes, ou éléments de surface. Les équations de bilan thermiques et aérauliques sont établies sur les cellules et les facettes, les débits d'air et les flux de chaleur sont définis aux interfaces. L'approche a été développée de façon modulaire pour permettre l'intégration et le couplage d'autres modèles, ou de résultats d'autres codes. Avec SPARK, les équations sont regroupées et résolues simultanément, ce qui conduit parfois à des difficultés de convergence. Aussi nous avons développé un code en VisualC++ qui reprend la méthode zonale de façon simplifiée, dans lequel les différents phénomènes sont résolus successivement et les solutions définitives établies de façon itérative selon un critère de convergence sur les paramètres d'état des cellules et des parois (P_{ijk} , T_{ijk} , ρ_{ijk} et T_{su}).

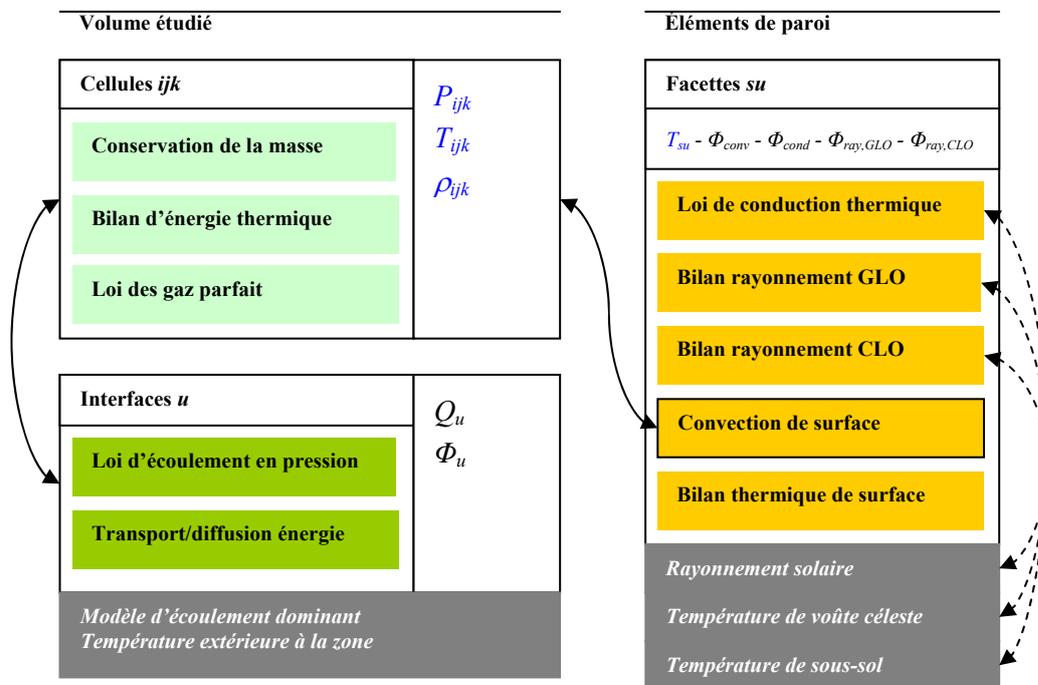


Figure 3-10- Définition des objets principaux définis dans l'environnement de simulation SPARK ou VisualC++ et principe de couplage des phénomènes climatiques

Les différents phénomènes météorologiques et conditions aux limites sont intégrés comme des objets supplémentaires dans cet environnement de simulation et couplés aux éléments de base du modèle (Figure 3-10). L'utilisation de logiciels complémentaires tels que Solene pour les calculs d'ensoleillement est facilitée lorsqu'aucun bouclage n'est nécessaire, un programme complémentaire permet alors de formater les résultats qui seront utilisés comme données par le code principal.

Pour les phénomènes météorologiques d'échelle supérieure à l'échelle d'étude et indépendants des variations internes à la zone d'étude, le couplage ne nécessite pas de bouclage. Ce sera le cas pour le rayonnement solaire et la température de voûte céleste. Pour des paramètres tels que la température extérieure à la zone étudiée ou le modèle d'écoulement dominant, leur intégration doit permettre de tenir compte de l'impact des autres phénomènes sur la circulation d'air et l'évolution de la température dans une zone urbanisée par exemple. Il est alors nécessaire de modéliser la zone environnante du domaine étudié pour évaluer correctement les paramètres des modèles d'écoulement dominant et de tempéra-

ture extérieure à la zone. Un couplage entre modèles de différentes échelles sera alors réalisé. La modélisation de la température de sous-sol sera elle complètement intégrée au code de calcul puisqu'elle peut être modélisée assez simplement par une équation liée directement aux paramètres de la simulation.

3.6.2 CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La modélisation zonale retenue est basée sur les équations de bilan d'énergie thermique et de la masse mais elle ne permet pas de prédire correctement les écoulements dominants contrairement aux modèles CFD présentés. Ces modèles CFD sont toutefois limités par les difficultés de résolution numérique des équations d'écoulement, et le couplage de phénomènes thermoaérauliques sur de larges domaines et de longues périodes peut entraîner des temps de calcul excessifs. Le couplage de modèles empiriques avec l'approche zonale en pression a donc été développée dans un environnement orienté objet modulaire. Les faiblesses du modèle thermoaérauliques peuvent alors être corrigées par la connaissance empirique de phénomènes météorologiques identifiés préalablement, comme la connaissance d'écoulements dominants validés expérimentalement. Les temps de calcul très réduits obtenus avec ces modèles simplifiés permettront de réaliser des simulations sur des saisons et pour de nombreuses configurations, donnant ainsi la possibilité d'études paramétriques d'aide à la conception de bâtiments

Le choix de modèles empiriques précis ne permet pas comme dans le cas de CFD de prédire un écoulement particulier en conditions anisothermes par exemple, mais par contre le couplage des différents phénomènes et leur évolution en régime transitoire est alors possible. Aussi dans la suite nous étudions l'impact du rayonnement solaire seul, puis l'écoulement dominant seul, et enfin le couplage de l'ensemble des phénomènes thermoaérauliques pour le cas d'une rue de type canyon en zone urbaine.

Chapitre 4

Étude du rayonnement solaire en milieu urbain

Le flux solaire incident représente une part importante de l'effet d'îlot de chaleur urbain du fait de la nature des surfaces urbaines et de la morphologie des constructions. Les méthodes de calculs des effets de masque et des inter-réflexions sont étudiées ici avec pour objectif la détermination de l'impact du rayonnement solaire sur les mouvements d'air et les transferts d'énergie à l'échelle d'une rue. Une méthode de calcul simplifiée est comparée à la méthode précise des radiosités pour la détermination des inter-réflexions.

4.1 Méthodologie pour la détermination de l'impact de l'ensoleillement

L'impact de l'ensoleillement sur la température intérieure des bâtiments peut être très important. D'après une étude de sensibilité réalisée par Lauret (Lauret et al. 2001) sur un cas d'étude particulier, situé en milieu tropical, le rayonnement solaire direct représente 60 % de la variance résiduelle de la température intérieure (mesure de la sensibilité). Pour certains bâtiments les apports solaires peuvent représenter jusqu'à 80 % de la charge thermique (Lauret et al. 2001).

Les données météorologiques donnent l'ensoleillement direct et diffus, mais pour définir complètement l'impact du rayonnement solaire sur un bâtiment donné il faut définir les effets de masque puis des inter-réflexions.

Les effets de masque sont déterminés au préalable à partir d'une géométrie masque simplifiée. Par exemple dans le cas d'une section d'étude d'une rue de type canyon, Figure 4-1, la géométrie masque sera définie par seulement deux surfaces correspondant aux façades des bâtiments. L'effet de masque est calculé pour chaque élément de surface de la zone étudiée et défini par les angles limites d'ombrage de l'obstacle. Ce calcul est d'autant plus rapide que la géométrie masque est simple.

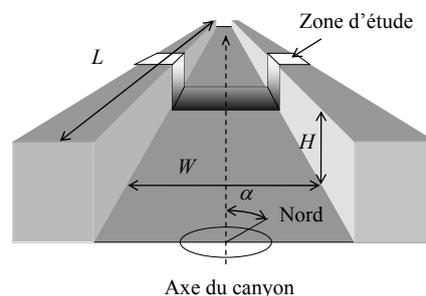


Figure 4-1 - Domaine d'étude dans une rue de type canyon d'un rapport d'aspect W/H

La simulation sur la période d'étude prend en compte alors cet effet de masque pour déterminer à chaque pas de temps le flux incident primaire sur chaque facette, i.e. sans tenir compte des inter-réflexions. Cet effet de masque s'applique pour les flux solaires directs et diffus déterminés à partir de données météorologiques ou de modèles. La position du soleil et le flux solaire direct peuvent être déterminés en fonction du jour et de l'heure considérés (voir 2.2) ainsi que le flux solaire diffus par des modèles de voûte céleste plus ou moins précis. Cette modélisation de la voûte céleste est intégrée dans le logiciel Solene utilisé dans notre étude, sous la forme d'une demi-sphère de rayon infini et partitionnée en facettes.

L'étape suivante consiste alors à déterminer le flux solaire net incident et absorbé par chaque facette après inter-réflexions. Les réflexions sont multiples et leur intensité décroît de part l'absorption des différents matériaux. Le calcul complet doit donc se faire sur un domaine fermé, où chaque surface échange avec l'ensemble des autres facettes en fonction de leur relation géométrique. On fait ici l'hypothèse simplificatrice de surfaces dites « grises diffusantes », i.e. non spéculaires (émission diffuse) répondant à la loi de Lambert pour la plage de longueur d'onde considérée. Le calcul conduit cependant à la résolution d'un système complexe d'équations liées, système qui peut être résolu par la méthode des radiosités.

Dans les études énergétiques de bâtiment, ce calcul des inter-réflexions radiatives est souvent simplifié quand il n'est pas négligé. La méthode dite des enceintes fictives (Walton 1980) a été développée pour permettre des calculs rapides sans résolution de systèmes d'équations fastidieux. Cette méthode simplifiée mais inexacte donne des résultats suffisamment précis dans le cas d'un local « classique » de bâtiment. Elle semble cependant avoir quelques faiblesses dans le cas d'éléments de paroi recevant un éclairage direct (Allard et al. 1985).

Dans ce chapitre cette méthode simplifiée est comparée à la méthode précise des radiosités et, pour la configuration étudiée de la rue de type canyon, une adaptation de la méthode simplifiée des enceintes fictives est proposée.

4.1.1 DÉTERMINATION DU RAYONNEMENT DE COURTES LONGUEUR D'ONDE (CLO) DÙ AUX INTER-RÉFLEXIONS PAR LA MÉTHODE DES RADIOSITÉS

Cette méthode permet de déterminer de façon précise les flux échangés par les surfaces d'une enceinte fermée. Les limites du domaine d'étude sont donc définies par des surfaces, schématisées à la Figure 4-2, caractérisées par leur réflectivité, transmittivité et absorptivité dans le domaine des courtes longueurs d'ondes, de 0,4 à 2,5 μm .

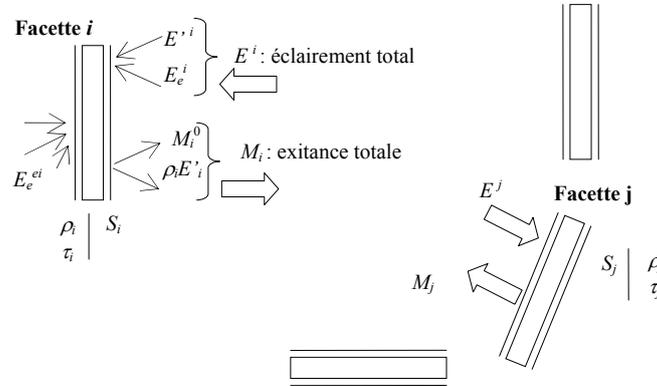


Figure 4-2 - Définition des différentes grandeurs radiatives associées à la surface S_i .

Le milieu est supposé transparent vis-à-vis du rayonnement courte longueur d'onde, et l'ensemble des « parois » constituant les limites du domaine est pris en compte. Ainsi, une ouverture vers l'extérieur constitue une paroi complètement transparente au rayonnement. Pour chaque élément de paroi i , appelé aussi facette, de surface S_i , la somme de l'éclairement solaire incident direct et diffus est notée E_e^i . D'autre part, la paroi est éclairée par les inter-réflexions E'_i . Soit l'éclairement total E^i de la facette :

$$E^i = E_e^i + E'_i \quad (4.1)$$

La surface diffuse alors une exitance totale M_i en W/m^2 qui correspond à la somme de la partie réfléchie des inter-réflexions et de l'exitance initiale M_i^0 en W/m^2 :

$$M_i = M_i^0 + \rho_i E'_i \quad (4.2)$$

où l'exitance initiale M_i^0 correspond à la transmission ou la réflexion de façon diffuse par la surface de l'éclairement direct de celle-ci :

$$M_i^0 = \rho_i E_e^i + \tau_i E_e^{ei} \quad (4.3)$$

ρ_i et τ_i sont respectivement la réflectivité et la transmittivité de la facette i , et E_e^{ei} l'éclairement de la facette S_i extérieur à la zone étudiée autre que solaire (soit l'intérieur du bâtiment si l'on étudie la rue canyon par exemple).

D'après (4.1) et (4.2) on obtient l'expression de l'exitance suivante :

$$M_i = M_i^0 + \rho_i (E^i - E_e^i) \quad (4.4)$$

D'autre part, en introduisant les facteurs de forme F_{j-i} de la facette j vers i , l'éclairement total de la facette i peut s'écrire :

$$\begin{aligned} S_i E^i &= S_i E_e^i + \sum_j F_{j-i} S_j M_j \\ &= S_i E_e^i + \sum_j F_{i-j} S_i M_j \end{aligned} \quad (4.5)$$

i.e.

$$E^i - E_e^i = \sum_j F_{i-j} M_j \quad (4.6)$$

Soit, en reportant dans l'équation (4.4) l'expression de E^i définie par (4.6) :

$$M_i = M_i^0 + \rho_i \sum_j F_{i-j} M_j \quad (4.7)$$

Nous obtenons ainsi, en considérant les n facettes du problème, un système linéaire de n équations à n inconnues : les exitances. Il faut au préalable avoir déterminé les facteurs de forme entre facettes. Cette méthode est utilisée par Solene pour la détermination des flux reçus et absorbés par les parois.

4.1.2 DÉTERMINATION DU RAYONNEMENT CLO DÛ AUX INTER-RÉFLEXIONS PAR LA MÉTHODE DES ENCEINTES FICTIVES

L'éclairement solaire incident sur chaque paroi est plus ou moins réfléchi en fonction de la couleur et de la nature de celle-ci. Le calcul des inter-réflexions entre les parois peut s'effectuer de façon directe en calculant les facteurs de forme de chaque surface. La méthode des enceintes fictives établie par (Walton 1980) est appliquée ici au cas du rayonnement de courte longueur d'onde (Allard et al. 1985), sa rapidité d'exécution étant avantageuse pour l'intégration dans une modélisation thermoaérodynamique zonale (Musy 1999).

Définition des grandeurs fictives

Pour chaque surface S_i , une surface fictive S_{Fi} est associée, schématisée à la Figure 4-3, et celle-ci est caractérisée par rapport au rayonnement de l'ensemble des autres facettes sur la facette i .

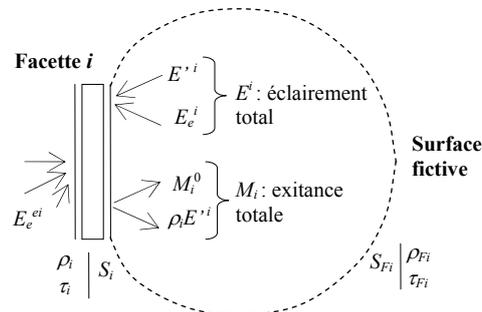


Figure 4-3 - Définition de la surface fictive S_{Fi} associée à la surface S_i et des différents éclaircements.

S_{Fi} correspond à la somme des surfaces constituant les parois d'orientation différente de la paroi contenant la surface S_i , soit pour des parois planes :

$$S_{Fi} = \sum_{j(\text{paroi} \neq i)} S_j \quad (4.8)$$

Les échanges par rayonnement de courte longueur d'onde pour la surface S_i se résument alors au rayonnement entre cette surface et la surface fictive S_{Fi} à laquelle sont associées des caractéristiques fictives de rayonnement : réflectivité fictive, exitance primaire fictive en W/m^2 . ρ_{Fi} et M_{Fi}^0 sont donc définis par :

$$\rho_{Fi} = \frac{\sum_{j(\text{paroi} \neq i)} \rho_j S_j}{S_{Fi}} \quad (4.9)$$

$$M_{F_i}^0 = \frac{\sum_{j(\text{paroi} \neq i)} M_j^0 S_j}{S_{F_i}} \quad (4.10)$$

Calcul de l'éclairement total E^i de la facette i

L'exitance totale de la surface i peut alors être calculée en tenant compte de la somme des inter-réflexions des exitances primaires M_i^0 et $M_{F_i}^0$, représentée à la Figure 4-4 :

$$S_i M_i = S_i M_i^0 + \rho_i F_{F_i-i} \cdot \frac{1}{1 - \rho_{F_i} (\rho_i F_{F_i-i} + F_{F_i-F_i})} \cdot (\rho_{F_i} S_i M_i^0 + S_{F_i} M_{F_i}^0) \quad (4.11)$$

i.e.

$$M_i = M_i^0 + \rho_i F_{F_i-i} \cdot \frac{1}{1 - \rho_{F_i} (\rho_i F_{F_i-i} + F_{F_i-F_i})} \cdot \left(\rho_{F_i} M_i^0 + \frac{M_{F_i}^0}{F_{F_i-i}} \right) \quad (4.12)$$

avec F_{F_i-i} et $F_{F_i-F_i}$ les facteurs de forme de la surface fictive F_i vers la facette i et vers elle-même, leur valeur se détermine simplement par :

$$F_{F_i-i} = \frac{S_i}{S_{F_i}} \quad (4.13)$$

$$F_{F_i-F_i} = 1 - \frac{S_i}{S_{F_i}} \quad (4.14)$$

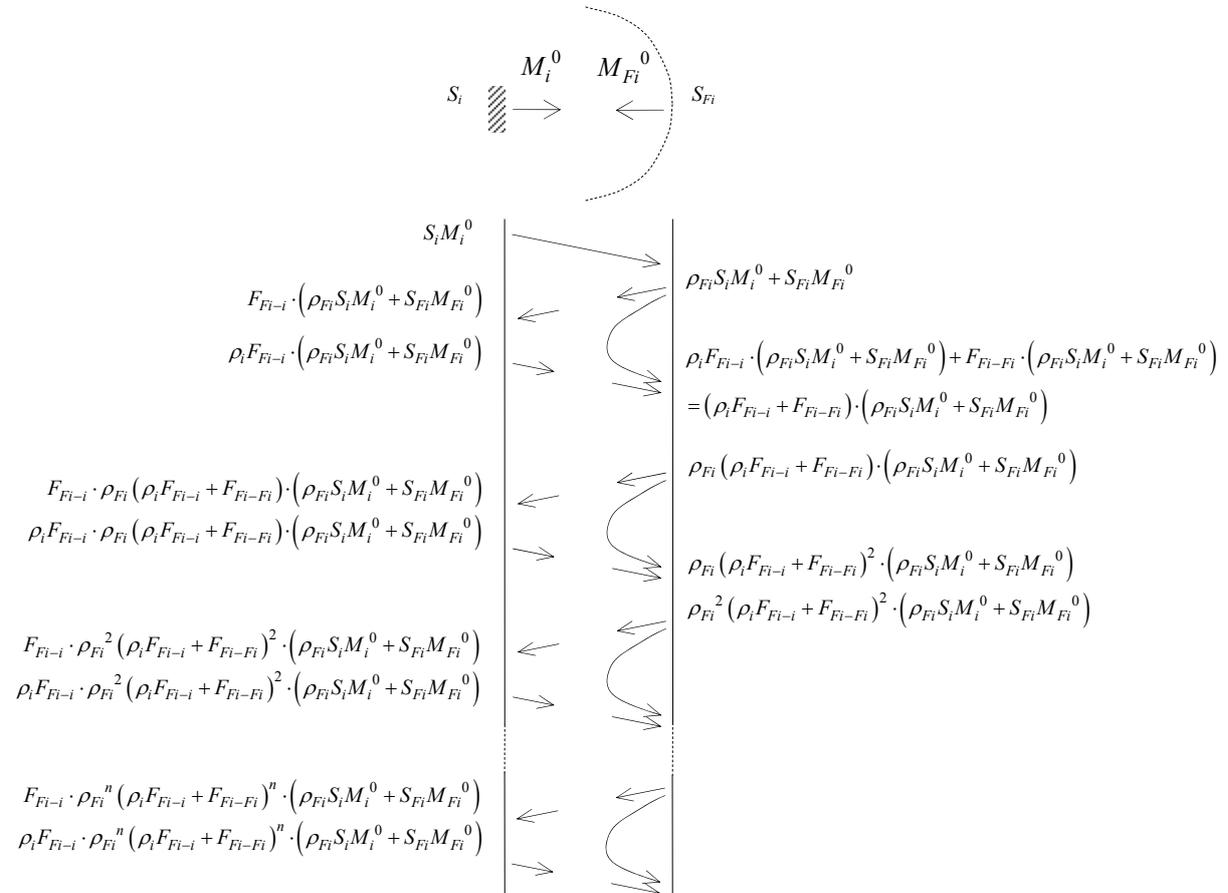


Figure 4-4 - Détail des inter-réflexions de l'exitance primaire de S_i , notée M_i^0 , et de l'exitance primaire de S_{F_i} , notée $M_{F_i}^0$.

D'après (4.2) et (4.12), l'éclairement de la facette i dû aux inter-réflexions peut s'exprimer par :

$$E^i = F_{Fi-i} \cdot \frac{1}{1 - \rho_{Fi}(\rho_i F_{Fi-i} + F_{Fi-Fi})} \cdot \left(\rho_{Fi} M_i^0 + \frac{M_{Fi}^0}{F_{Fi-i}} \right) \quad (4.15)$$

D'où l'éclairement total de la surface i :

$$E^i = E_e^i + F_{Fi-i} \cdot \frac{1}{1 - \rho_{Fi}(\rho_i F_{Fi-i} + F_{Fi-Fi})} \cdot \left(\rho_{Fi} M_i^0 + \frac{M_{Fi}^0}{F_{Fi-i}} \right) \quad (4.16)$$

Bilan du rayonnement de courtes longueurs d'onde pour l'ensemble du domaine d'étude

Le bilan du rayonnement solaire absorbé par les parois du domaine étudié peut être effectué en considérant que la partie absorbée de l'éclairement global incident correspond à la différence de l'éclairement total entrant dans la zone étudiée $E_{entrant,clo}$, et de l'éclairement total transmis vers l'extérieur du domaine étudié $E_{sortant,clo}$. Ce bilan se traduit par la relation suivante :

$$\sum_i \alpha_{i,clo} E^i S_i - (E_{entrant,clo} - E_{sortant,clo}) = 0 \quad (4.17)$$

avec $\alpha_{i,clo}$ le coefficient d'absorption des courtes longueurs d'ondes pour la facette i . Les éclairements $E_{entrant,clo}$ et $E_{sortant,clo}$ peuvent s'exprimer à partir des relations suivantes :

$$E_{entrant,clo} = \sum_i (E_e^i + \tau_i E_e^{ei}) S_i \quad (4.18)$$

$$E_{sortant,clo} = \sum_i \tau_i E^i S_i \quad (4.19)$$

où E_e^i , E_e^{ei} et E^i représentent respectivement, pour la surface indicée i , l'éclairement solaire diffus et direct incident, l'éclairement éventuel provenant de l'extérieur de la zone étudiée et transmis de façon diffuse par la facette i , et l'éclairement total incident sur la facette i après inter-réflexions.

Cependant, le bilan global de rayonnement n'est pas équilibré, puisque l'échange avec la surface fictive est une approximation de l'échange réel, et que les angles solides ne sont pas calculés. Il faut donc équilibrer le bilan radiatif global pour les échanges de courte longueur d'onde. Le reliquat de flux, qui correspond au déséquilibre du bilan radiatif courte longueur d'onde se calcule alors par l'équation :

$$E_{rl,clo} = E_{entrant,clo} - E_{sortant,clo} - \sum_i \alpha_{i,clo} E^i S_i \quad (4.20)$$

Le reliquat du bilan radiatif est supposé entièrement absorbé par les parois, (Musy 1999), il suffit alors de le redistribuer sur chaque facette, au prorata de leur coefficient d'absorption, soit la nouvelle expression du flux absorbé pour chaque facette :

$$\alpha_{i,clo} E^i = \alpha_{i,clo} E^i + \frac{\alpha_{i,clo} E_{rl,clo}}{\sum_j \alpha_{j,clo} S_j} \quad (4.21)$$

i.e. la valeur de l'éclairement par chaque facette vaut :

$$E^i = E^i + \frac{E_{rl,clo}}{\sum_j \alpha_{j,clo} S_j} \quad (4.22)$$

Un nouveau bilan global de flux radiatif fera apparaître un nouveau reliquat, plus faible, que l'on peut alors redistribuer de la même façon, et par itérations successives obtenir la précision souhaitée. Cette

méthode itérative permet, par un code de calcul informatique par exemple, d'obtenir rapidement l'éclairage total de chaque facette avec une erreur relativement faible pour un local fermé (Allard et al. 1985).

4.2 Étude comparative de méthodes d'évaluation d'apports solaires dans l'étude du microclimat urbain

4.2.1 CONFIGURATION DE L'ÉTUDE

Nous nous proposons de déterminer le rayonnement incident sur les façades et le sol d'une rue canyon. Cette rue est supposée « suffisamment » longue, i.e. $W/L \ll 1$ avec W et L la largeur et la longueur de cette rue, voir Figure 4-1. L'orientation du canyon est définie par l'angle α entre l'axe de la rue et le nord. Nous nous limitons alors à l'étude d'une zone courante du canyon, le rayonnement étant identique sur toute la longueur du canyon, sauf pour les zones soumises aux effets de bord aux extrémités de la rue. Les surfaces sont supposées identiques de réflectivité 0,8 et d'absorptivité 0,2 dans le domaine des courtes longueurs d'onde. Les résultats retenus concernent une bande de 1m de large maillée en facettes de 3m de long repérées sur la Figure 4-5.

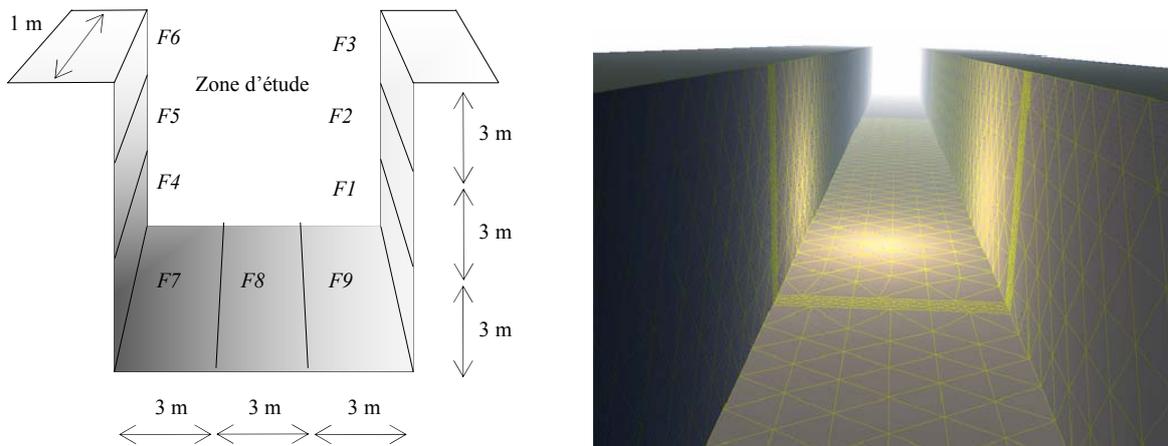


Figure 4-5 - Dimension et repérage des facettes du domaine d'étude -
Triangulation des facettes de la zone d'étude sous Solene.

Ces facettes correspondent à la projection du maillage utilisé dans la résolution thermoaéroulrique zonale envisagée par la suite. Elles sont triangulées sous Solene pour permettre une définition plus précise de l'ensoleillement incident direct et diffus tout en tenant compte du masque défini de façon simplifiée, suffisamment long pour permettre de négliger les effets de bord, soit 100m de part et d'autre ici. Pour estimer l'effet des inter-réflexions avec Solene la géométrie est triangulée de part et d'autre de la zone étudiée, Figure 4-5, sur une longueur totale de 120m, longueur à partir de laquelle l'éclairement total du tronçon étudié n'évolue plus. Pour effectuer le bilan de radiatif au niveau des parois, on distingue les courtes et grandes longueurs d'onde, et pour chaque bande de longueur d'onde les coefficients de rayonnement moyens sont définis pour les matériaux et revêtements de surfaces considérés. Pour ces deux gammes de longueur d'onde, on suppose que les surfaces se comportent comme des corps gris diffusant.

La méthode des enceintes fictives a été développée dans le cadre de locaux parallélépipédiques réguliers et fermés. Cependant, pour une rue de type canyon la zone d'étude est ouverte et les proportions sont très différentes de celles d'un local « classique ». Nous nous proposons ici d'étudier dans quelles mesures les simplifications de la méthode des enceintes fictives restent valables, et comment faire évoluer cette méthode pour l'adapter à notre cas d'étude.

Aussi nous nous proposons de comparer les flux incidents absorbés calculés par la méthode des enceintes fictives avec ceux obtenus par la méthode des radiosités, i.e. en tenant compte des facteurs de forme dans le domaine des courtes longueurs d'onde. La simulation est réalisée sur une journée type (solstice d'été) suivant les conditions récapitulées au Tableau 4-1.

Tableau 4-1- Définition de la zone étudiée et des conditions d'ensoleillement

Paramètres de la simulation	Valeurs des paramètres
Situation géographique	latitude 47°, longitude 10°
Date d'étude	21 juin
Durée d'ensoleillement	4h08 à 19h52
Simulation	4h30 à 19h30 avec un pas de temps de 1h
Dimensions de la rue canyon	$L=200$ m, $W=9$ m, $H=9$ m
Largeur de la zone étudiée	1 m
azimut de l'axe de la rue	0°
Maillage de la zone étudiée	facettes de 3m x 1m
Triangulation des facettes	éléments de l'ordre de 0,03 m ²
Modèle de ciel (luminance et radiançe solaire)	ciel clair de type CIE

4.2.2 COMPARAISON DE LA MÉTHODE DES RADIOSITÉS ET DE LA MÉTHODE DES ENCEINTES FICTIVES POUR UNE RUE DE TYPE CANYON DANS LE DOMAINE DES COURTES LONGUEURS D'ONDE

Détermination de l'ensoleillement direct et diffus à partir de Solene

Pour chaque élément triangulé, les masques sont calculés par Solene par rapport à la géométrie masque définie simplement par les parois de la rue sur toute sa longueur. L'évolution des éclairagements totaux du tronçon étudié, représenté à la Figure 4-6, montre que l'énergie due à la voûte céleste, éclairage diffus incident, représente 15 % de l'énergie totale incidente, avec 13,4 % de l'éclairage total à 12h30, heure solaire. Cet éclairage incident global, variable pour chaque élément de paroi, est en partie absorbé et en partie réfléchi.

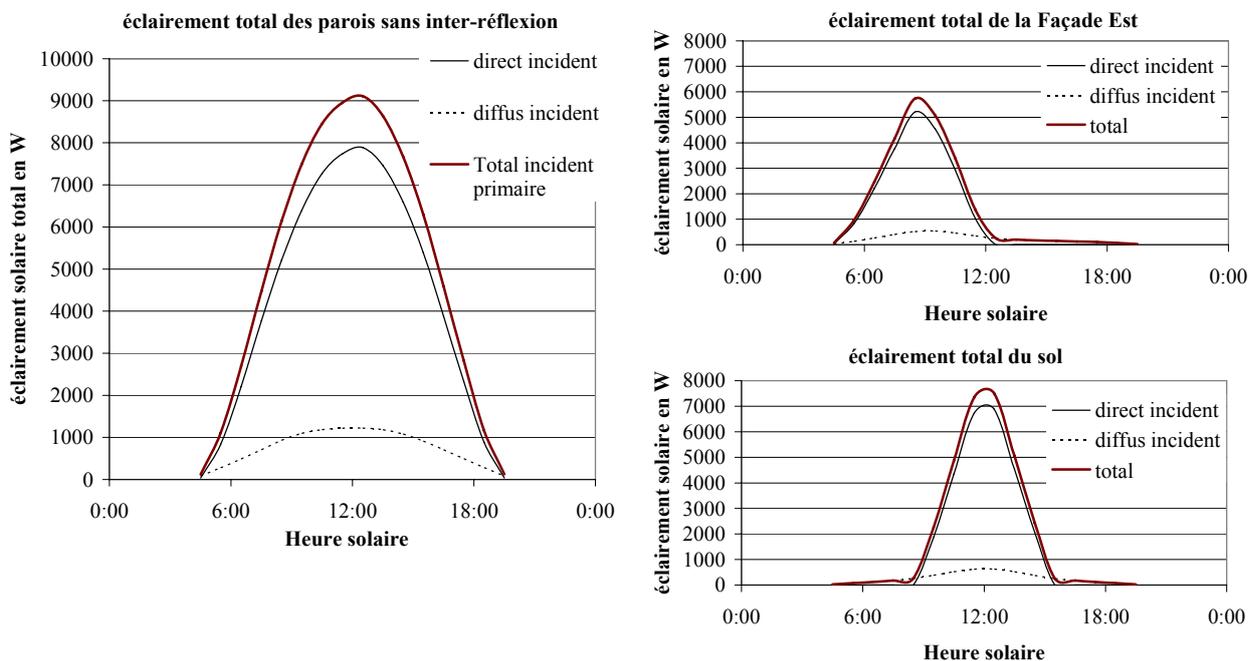


Figure 4-6- Évolution horaire de l'éclairage solaire total incident en watts sur l'ensemble des parois du domaine d'étude, sur la façade est et sur le sol, au cours de la journée étudiée (21 juin).

Nous remarquons, Figure 4-6, que l'éclairage diffus représente une part plus importante pour les parois verticales moins exposées au rayonnement direct, soit sur l'énergie incidente pour la journée un rapport de 15,6 % pour la façade Est et de 14,1 % pour le sol.

Comparaison des flux absorbés après inter-réflexions calculés par la méthode des radiosités et par la méthode des enceintes fictives

L'éclairement incident déterminé précédemment est absorbé et subit des inter-réflexions au sein de la zone d'étude. La résolution par la méthode des radiosités avec le logiciel Solene se fait sur l'ensemble des facettes triangulées ; et le domaine est fermé par la modélisation du ciel comme un hémisphère de rayon infini.

Avec la méthode des enceintes fictives, il faut aussi considérer une enceinte fermée, Figure 4-7, pour respecter le bilan de rayonnement.

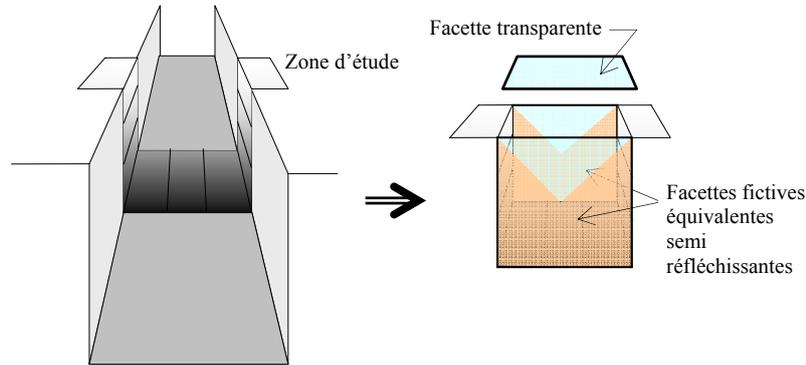


Figure 4-7 - Fermeture du domaine par des facettes transparentes et semi réfléchissantes

Aussi le domaine est fermé par des facettes fictives conformes au maillage et équivalentes à l'environnement. La part de rayonnement de courte longueur d'onde provenant de la voûte céleste étant déjà prise en compte par le rayonnement diffus incident défini précédemment, la partie supérieure de la rue est supposée transparente, i.e. la transmittivité de courtes longueurs d'onde τ_i vaut 1. L'éclairement provenant des parois, de part et d'autre du tronçon étudié, est identique à l'éclairement global émis par les parois de ce tronçon car le canyon est supposé infini. L'ensemble des parois adjacentes au tronçon est alors remplacé par des facettes fictives équivalentes semi-réfléchissantes. Si toutes les parois étaient transparentes, alors ces facettes fictives équivalentes seraient transparentes. Si toutes les parois, y compris la facette en partie supérieure, étaient opaques, alors ces facettes fictives équivalentes seraient parfaitement réfléchissantes, car l'éclairement provenant des parois adjacentes est à l'image des parois du tronçon étudié. Pour notre cas, seules les façades et le sol participent aux inter-réflexions, les facettes fictives latérales sont donc semi-réfléchissantes. La part de réflectivité et de transmittivité de ces surfaces fictives est alors déterminée à partir des dimensions latérales du canyon, W et H . Soit l'expression de la réflectivité $\rho_{Fi,latéral}$ et de transmittivité $\tau_{Fi,latéral}$ de la surface fictive latérale équivalente :

$$\rho_{Fi,latéral} = \frac{2H + W}{2(H + W)} \text{ et } \tau_{Fi,latéral} = \frac{W}{2(H + W)} \quad (4.23)$$

Dans notre cas d'étude le rapport d'aspect W/H étant de 1, ces deux coefficients prennent les valeurs suivantes : $\rho_{Fi,latéral} = 0,75$ et $\tau_{Fi,latéral} = 0,25$.

Les résultats obtenus Figure 4-8 sont très différents des résultats obtenus avec la méthode des radiosités, avec Solene.

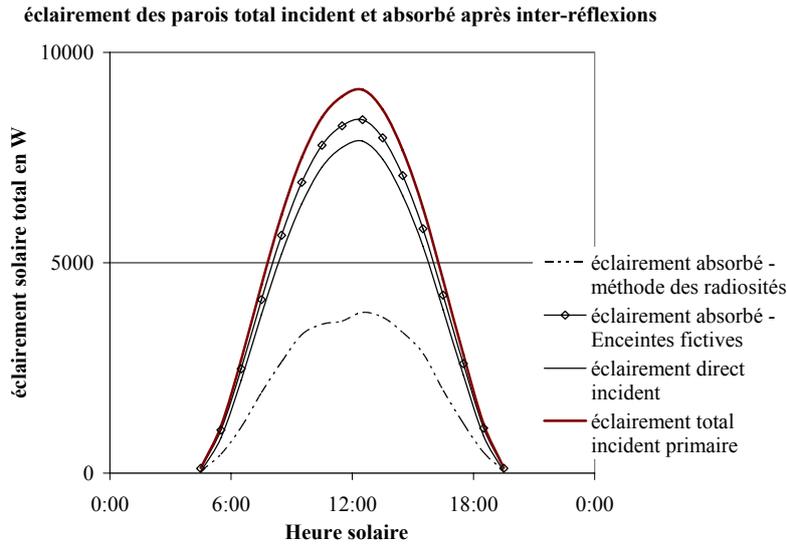


Figure 4-8 - Évolution des éclairagements solaires en watts absorbés par l'ensemble des parois déterminés heure par heure par la méthode des facteurs de forme (avec Solene) et avec la méthode des enceintes fictives. (Journée d'étude 21 juin).

Le résultat obtenu par Solene montre qu'une part importante de l'éclairage incident est réfléchi vers l'extérieur du domaine, phénomène lié à la faible absorptivité de courte longueur d'onde des parois, de 0,2 ici. Avec la méthode des enceintes fictives, l'éclairage solaire absorbé est fortement surestimé. La quasi-totalité de l'éclairage solaire incident dans la rue est absorbé par les parois suite aux inter-réflexions. Cet écart peut s'expliquer la non-prise en compte de la transparence dans la répartition du reliquat. En effet, pour l'étude des inter-réflexions à l'intérieur des locaux, les surfaces sont généralement opaques au rayonnement, surtout dans le domaine des grandes longueurs d'onde. Le reliquat du bilan radiatif courtes longueurs d'ondes $E_{rl,clo}$ est donc réparti au prorata de l'absorptivité $\alpha_{i,clo}$, selon la relation (4.21), car l'éclairage non absorbé ou transmis au premier bilan est supposé absorbé par les parois après inter-réflexions. Pour équilibrer correctement le bilan radiatif il faut cependant tenir compte des transparences dans la répartition du reliquat.

Première adaptation de la méthode des enceintes fictives

Le reliquat du bilan de rayonnement de courtes longueurs d'ondes, inhérent à l'approximation des enceintes fictives, correspond à l'éclairage dû aux inter-réflexions réfléchi et non absorbé ou non transmis. En tenant compte de la transmittivité et de l'absorptivité, $\tau_i + \alpha_{i,clo} = 1 - \rho_i$, dans le calcul et la redistribution du reliquat, la relation (4.20) peut s'écrire :

$$E_{rl,clo} = E_{entrant,clo} - \sum_i (1 - \rho_i) E^i S_i \quad (4.24)$$

D'où la nouvelle répartition du reliquat à l'itération n :

$$\left[(1 - \rho_i) E^i \right]_n = \left[(1 - \rho_i) E^i \right]_{n-1} + \frac{(1 - \rho_i) E_{rl,clo}}{\sum_j (1 - \rho_j) S_j} \quad (4.25)$$

On en déduit enfin la nouvelle expression de l'éclairage absorbé $\left[\alpha_{i,clo} E^i \right]_n$ par la facette i en fonction de l'éclairage absorbé et transmis $\left[(1 - \rho_i) E^i \right]_n$ ainsi calculé :

$$\left[\alpha_{i,clo} E^i \right]_n = \frac{\alpha_{i,clo}}{(1 - \rho_i)} \times \left[(1 - \rho_i) E^i \right]_n \quad (4.26)$$

Les résultats obtenus avec cette nouvelle approche, Figure 4-9, sont alors globalement plus proches de ceux obtenus par Solene.

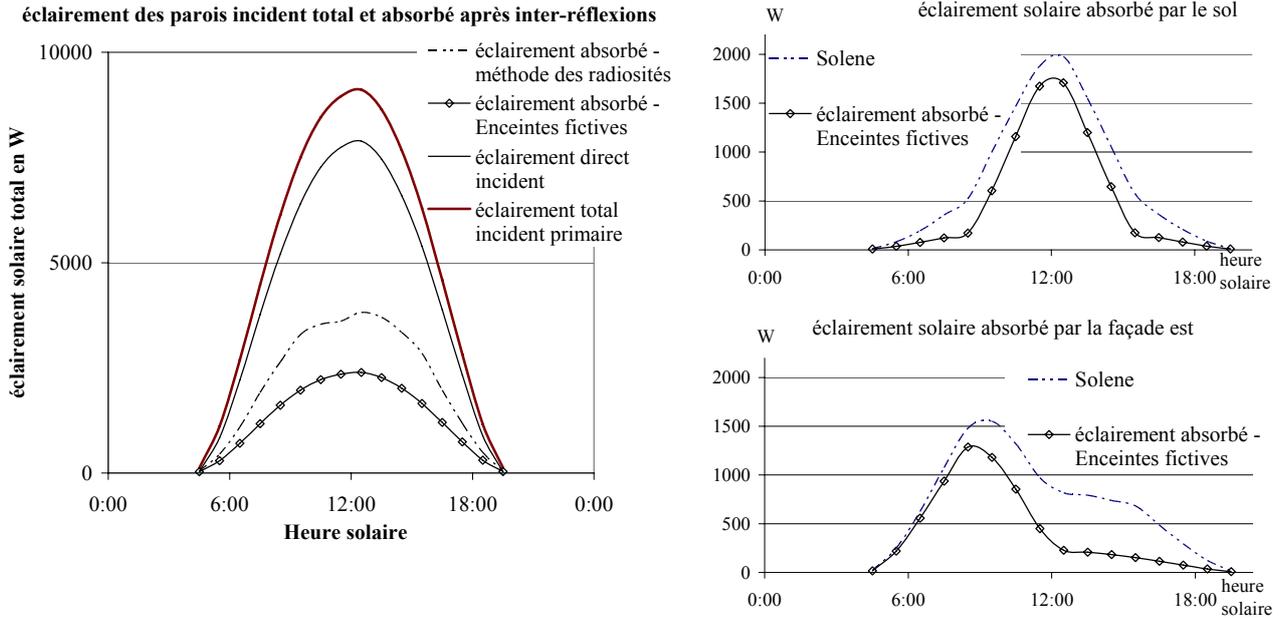


Figure 4-9 - Évolution de l'éclairement solaire total absorbé (W) après réflexions par l'ensemble des parois, le sol et la façade est, calculés par la méthode des radiosités (avec Solene) et la méthode modifiée des enceintes fictives (Journée d'étude 21 juin)

La différence absolue, avec les résultats de Solene, faible en début et fin de journée, s'amplifie vers le milieu de journée. L'écart absolu maximum est ainsi observé à 13h30 pour un total de 1434W sur le tronçon, soit un écart relatif de 40% environ. L'écart relatif maximum observé est lui constaté avant et après le milieu de journée, soit environ 42% d'éclairement absorbé en moins par le calcul avec la méthode des enceintes fictives pour 15h30. En moyenne l'écart relatif des éclairagements absorbés totaux calculés par les deux méthodes est de 38% sur la journée. Les éclairagements absorbés au niveau de chaque paroi suivent aussi l'évolution générale déterminée par Solene, mais toujours avec des différences importantes, de 31% pour le sol et 42% pour les façades. Ainsi, pour la façade est, l'écart relatif absolu maximum est de 591W à 12h30, l'écart relatif maximum étant relevé à 15h30 avec une différence de 78%. De même pour le sol, l'écart absolu maximum est relevé avant et après midi, soit 408W à 14h30, tandis que l'écart relatif est maximum un peu avant et après, soit 70% à 15h30. Les écarts maxima sont donc relevés lorsque les parois ne sont pas exposées au rayonnement solaire direct. Ceci peut s'expliquer par la sous-estimation de l'éclairement solaire réfléchi et absorbé par les parois du canyon. La répartition du reliquat vers les facettes transparentes et absorbantes est effectivement trop importante, bien qu'elle se fasse proportionnellement à la somme de l'absorptivité solaire et de la transmittivité ($\tau_i + \alpha_i$), et l'effet de la réflexion est fortement sous-évalué. Nous nous proposons donc dans la suite de modifier cette méthode de répartition.

Deuxième adaptation de la méthode des enceintes fictives

Dans cette partie, pour corriger l'écart observé précédemment, la redistribution aux facettes du reliquat est effectuée au prorata de $(1 - \rho_i)$ atténué d'autant plus fortement que ce paramètre est élevé. Un facteur d'atténuation A_{fict} est alors défini, permettant d'amplifier l'influence de la réflexion en remplaçant la relation (4.25) par :

$$\left[(1 - \rho_i) E^i \right]_n = \left[(1 - \rho_i) E^i \right]_{n-1} + \frac{e^{-A_{fict}(1-\rho_i)} E_{r1, clo}}{\sum_j e^{-A_{fict}(1-\rho_j)} S_j} \quad (4.27)$$

Le coefficient A_{fict} est déterminé de façon à minimiser l'écart moyen entre les résultats obtenus par la méthode des radiosités et cette méthode modifiée des enceintes fictives. Ainsi, pour un coefficient $A_{fict} = 19,11$, l'écart moyen obtenu sur la journée type du cas étudié est quasiment nul, d'après la Figure 4-10.

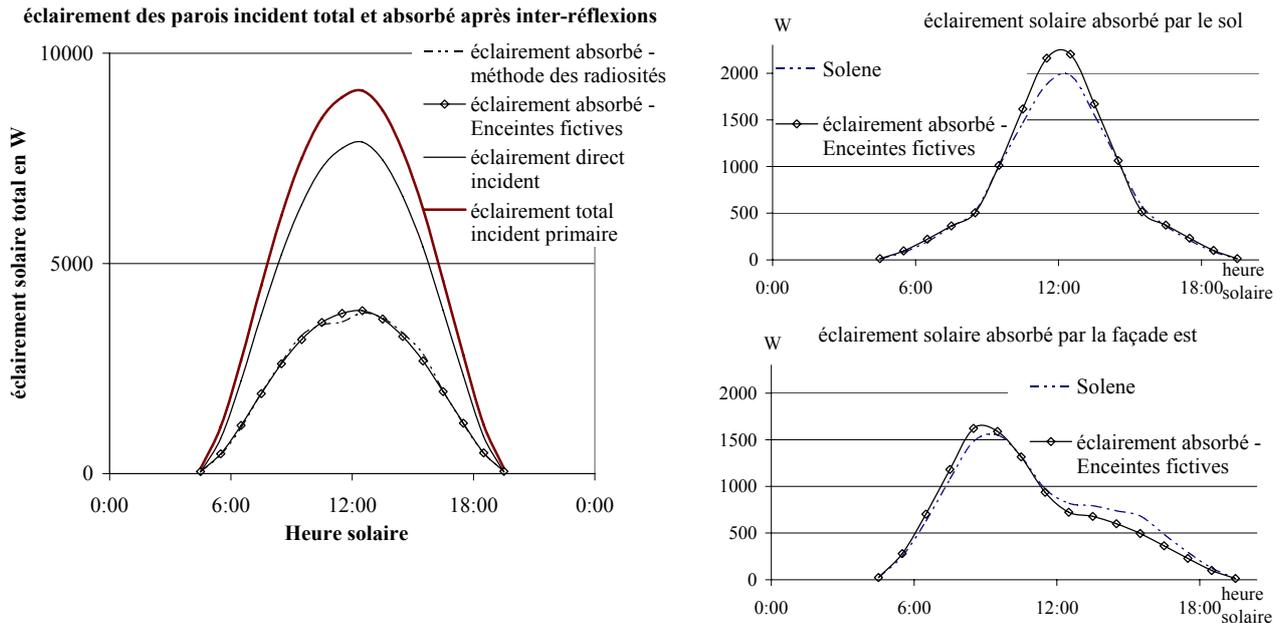


Figure 4-10- Évolution de l'éclairement solaire total absorbé (W) après réflexions par l'ensemble des parois, le sol et la façade est, calculés par la méthode des radiosités (avec Solene) et la méthode modifiée et ajustée des enceintes fictives (Journée d'étude 21 juin)

L'évolution des éclairements absorbés par les parois, représentée à la Figure 4-10, est aussi très similaire entre les deux méthodes avec un écart moyen de 3,5% pour les façades et de 7,3% pour le sol. L'écart absolu maximum pour le sol est observé en milieu de journée, 281W à 11h30, et dans l'après-midi pour la façade Est, 188W à 15h30. Globalement, l'éclairement absorbé par le sol est surestimée tandis que pour les façades il est sous-estimé, ce qui s'explique par le principe de la méthode des enceintes fictives qui ne tient pas compte de la différence du facteur de forme de ces parois avec le ciel. De plus, l'éclairement absorbé par les parois exposées au rayonnement direct du soleil est surestimé, ce qui est compensé par la sous-estimation de l'éclairement absorbé lorsque ces parois sont exposées aux seules inter-réflexions et au flux diffus de la voûte céleste.

Cette différence entre les différentes expositions est plus remarquable dans les différences d'évolution de l'éclairement absorbé par facette représenté à la Figure 4-11. Ainsi l'éclairement absorbé calculé par la méthode modifiée des enceintes fictives est surévalué de 5,5% en moyenne en haut de la façade ouest, facette *F3*, et sous-évalué de 12,7% en moyenne pour le bas, facette *F1*. Comme pour l'ensemble de la façade, lorsque les facettes ne sont pas exposées au rayonnement solaire direct, l'effet des inter-réflexions est sous-estimé. Les écarts les plus importants sont observés pour la facette *F1* la plus exposée aux inter-réflexions et pour laquelle la transmission vers l'extérieur du domaine est surestimée. Inversement, cet effet des inter-réflexions est surestimé pour la facette *F3*.

Au niveau du sol, facettes *F7*, *F8* et *F9*, l'évolution au cours de la journée est bien reproduite, écart moyen de 7,1 à 7,7%, avec une surestimation de l'éclairement absorbé en milieu de journée, de 14% au centre, facette *F8*, et de 10% près des façades, facettes *F7* et *F9*. Pour cette surface, l'éclairement absorbé est globalement surestimé pour chaque facette inversement au cas des façades comme l'a montré l'évolution représentée Figure 4-10.

Du fait de la méthode adoptée ici, les écarts dus aux différences de facteur de forme entre les parois et l'extérieur du domaine, facettes transparentes, se compensent globalement. Néanmoins, les évolutions, calculées par la méthode modifiée et ajustée des enceintes fictives, sont cohérentes avec les évolutions calculées par la méthode précise des radiosités. Ainsi, l'effet des inter-réflexions très important pour la détermination de l'énergie totale absorbée est dans l'ensemble correctement évalué, notamment dans le cas où les parois ne sont pas exposées au rayonnement solaire direct.

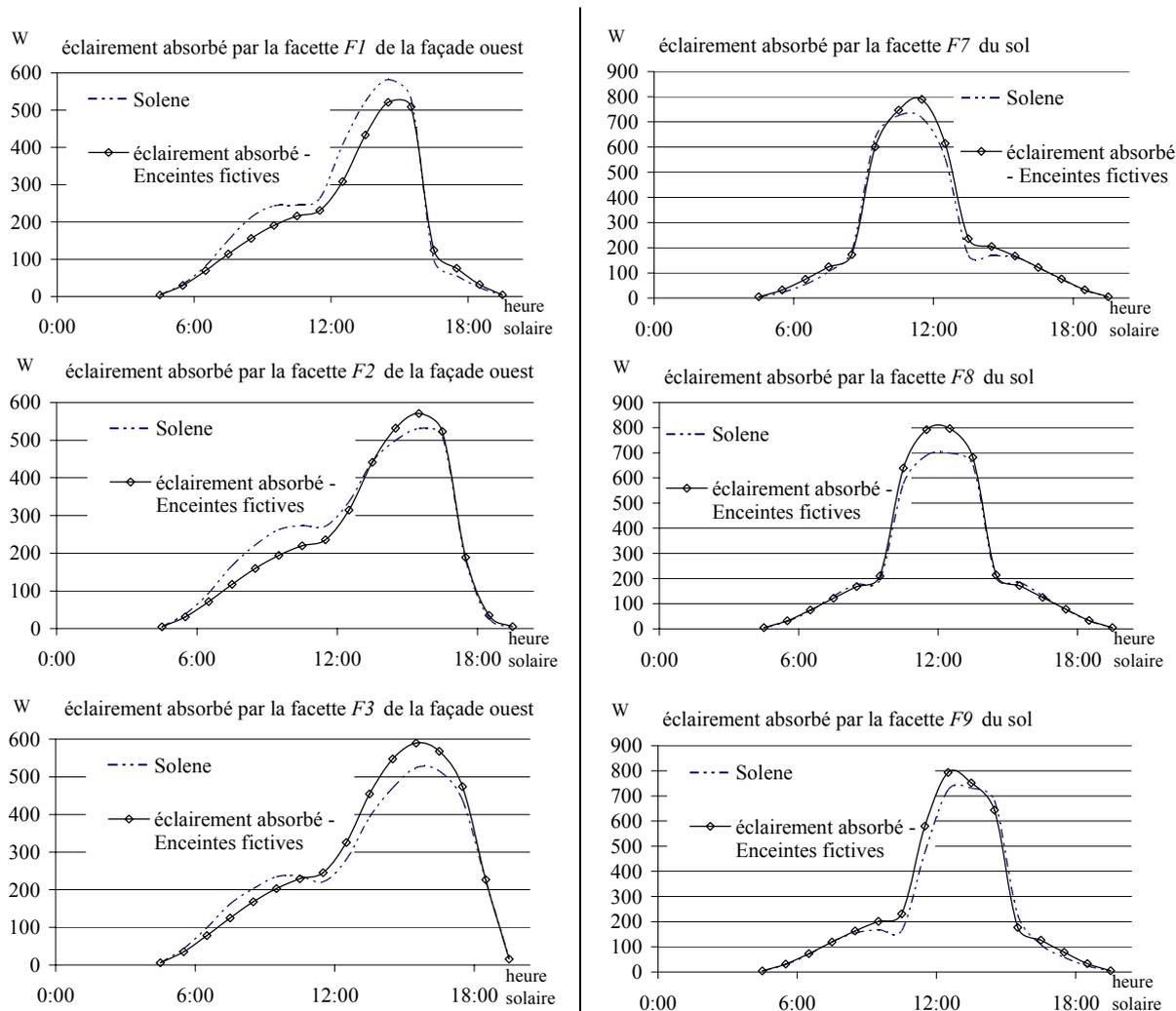


Figure 4-11 - Évolution des éclairagements solaires absorbés après inter-réflexions (W) par les facettes $F1$, $F2$ et $F3$ de bas en haut de la façade ouest et par les facettes $F7$, $F8$ et $F9$ d'est en ouest au sol ; calculs par la méthode des radiosités, Solene, et par la méthode modifiée et ajustée des enceintes fictives (Journée d'étude 21 juin)

4.2.3 AVANTAGES ET LIMITES DE LA MÉTHODE DES ENCEINTES FICTIVES

Le principal avantage de la méthode des enceintes fictives est sa facilité de mise en œuvre et sa rapidité d'exécution. Ce faible temps de calcul peut s'expliquer par l'absence de système d'équations à résoudre pour déterminer l'éclairage net de chaque facette, contrairement à la méthode des radiosités où un système de n équations à n inconnues doit être résolu, dans le cas de n facettes. De plus, la méthode des radiosités nécessite la manipulation d'une matrice de facteurs de forme de dimension $n \times n$ qui peut rapidement devenir prohibitive en quantité de mémoire de stockage et de temps de calcul. Aussi l'écart en temps de calcul entre les deux méthodes croît de façon « exponentielle » avec le nombre de facette considérée, et par exemple pour une rue décomposée en 150 facettes le temps de calcul varie approximativement d'un facteur 100 (environ 1s pour la méthode des radiosités contre environ 0,01s pour la méthode des enceintes fictives avec un PC de bureau).

Les résultats obtenus avec la méthode des enceintes fictives pour une forme régulière sont globalement proches de ceux obtenus avec la méthode des radiosités. Cependant des écarts sont relevés au niveau des éléments de parois confinés où l'impact des différences de facteurs de forme devient important. Cet écart pourrait être atténué par une approche intermédiaire dans laquelle l'enceinte fictive associée à une facette serait déterminée à partir de 5 surfaces fictives équivalentes aux différentes orientations des surfaces visibles par la facette, pour un domaine parallélépipédique, pondérée par les 5 facteurs de formes associés. Cette modification pourrait être intéressante dans le cas par exemple d'une rue d'un rapport d'aspect W/H très différent de 1.

Dans le cadre d'études d'avant projet sommaire et de comparaison de différentes solutions urbanistiques ou architecturales, cette approche peut néanmoins permettre de discriminer rapidement diverses solutions et de définir des tendances. Pour un calcul plus complet dans certaines configurations il est cependant possible d'utiliser de façon couplée le logiciel Solene pour définir a priori le rayonnement de courte longueur d'onde absorbé sur une séquence donnée, car celui-ci dépend uniquement de la géométrie sans interdépendance avec les phénomènes thermoaérauliques. Cette approche est adoptée au Chapitre 6 pour le calcul des transferts thermoaérauliques dans une rue canyon sur une période d'un mois avec un pas de temps d'une heure.

Finalement, cette méthode est surtout très intéressante dans le domaine des grandes longueurs d'ondes. En effet, le rayonnement de grandes longueurs d'ondes des parois dépend des températures de surface à la puissance 4 qui sont elles-mêmes liées aux différents phénomènes de transfert thermique en surface. La résolution du système complet sur un large domaine entraîne la résolution de systèmes complexes dont le temps de résolution lié au couplage avec les inter-réflexions peut devenir prohibitif pour des simulations sur des longues périodes. De plus, les effets des approximations de la méthode des enceintes fictives sur le calcul des températures de surface sont minimisés dans le domaine des grandes longueurs d'onde du fait de la forte absorptivité en général des matériaux de construction dans ce domaine de longueur d'onde, couramment de l'ordre de 0,9, et donc de la faible part de l'éclairement réfléchi.

Le niveau de finesse de cette méthode modifiée des enceintes fictives, et les temps de calculs associés, sont compatibles avec le modèle thermoaéraulique simplifié envisagé, décrit au Chapitre 3, pour le calcul des transferts thermoaérauliques dans une rue. Dans la partie suivante, la méthode est intégrée au modèle thermoaéraulique pour déterminer l'impact de l'ensoleillement dans une rue sur une journée type en l'absence de vent dominant.

4.3 Application à l'étude de l'impact de l'ensoleillement sur les transferts de masse et de chaleur dans une rue de type canyon

L'étude de l'ensoleillement en milieu urbain et son couplage avec l'ensemble des transferts thermo-aérodynamiques est difficile du fait de la complexité de la détermination du champ thermo-aérodynamique dans le cas anisotherme. Des approches par code de dynamique des fluides, exposées ci-après, ont cependant montré des résultats intéressants bien que simplifiés. Aussi, la méthode approchée pour le calcul du rayonnement dans une rue de type canyon développée dans la partie précédente nous permet d'envisager un couplage plus complet des phénomènes thermo-aérodynamiques ainsi que des simulations sur des périodes d'étude saisonnières, avec un pas de temps de horaire compatible avec les calculs énergétiques utilisés pour les bâtiments.

4.3.1 ÉTUDE DE L'IMPACT DE L'ENSOLEILLEMENT COUPLÉ À DES MODÈLES DE DYNAMIQUE DES FLUIDES

L'ensoleillement a un impact sur les températures des surfaces urbaines et donc sur les échanges convectifs aux parois. Dans un code de type CFD la modélisation de l'écoulement demande des calculs itératifs sur des maillages suffisamment fins pour permettre la prise en compte des transferts turbulents. La modélisation des transferts thermiques est alors souvent simplifiée pour permettre de diminuer les temps de calcul et le phénomène de rayonnement est lui aussi souvent simplifié.

Sini a mis en évidence l'impact sur l'écoulement dans une rue de type canyon des différences de température de surface dues à l'ensoleillement (Sini et al. 1996). Cette étude est basée sur un modèle numérique d'écoulement de type $k-\varepsilon$ à deux équations, code CHENSI¹, et l'écoulement dominant en milieu urbain défini par son profil logarithmique et ses paramètres de rugosité (voir Chapitre 2). Pour le cas présenté, une rue de rapport d'aspect $W/H = 0,89$ soumise à un vent transversal, la simulation prédit une recirculation dans le cas isotherme, ce qui correspond au cas de l'écoulement dit rasant (Oke 1987), ou de la cavité entraînée. Ce vortex est amplifié lorsque la façade sous le vent, ou le sol, est exposée au rayonnement solaire, i.e. un écart de température de 5°C est ici imposé. Ce type de simulation a été mené par différents auteurs (Kim et Baik 2001) ou Xie (Xie et al. 2005) qui, avec des écarts de température plus important, voir Figure 4-12 et Figure 4-13, a complété son étude avec des rues canyon non symétriques.

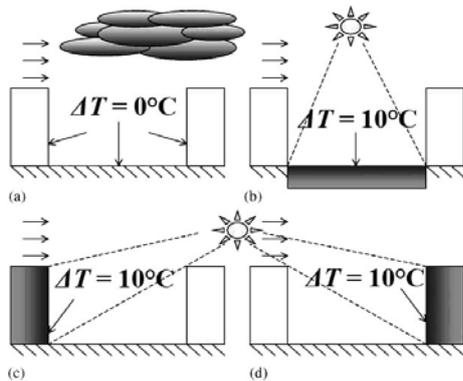


Figure 4-12 - Écarts de températures ΔT imposés représentatifs d'un ensoleillement donné, d'après (Xie et al. 2005)

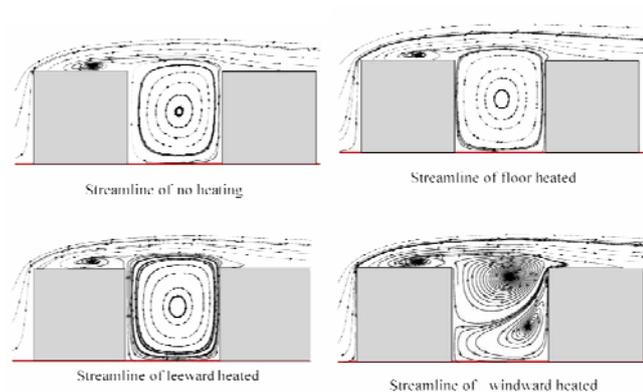


Figure 4-13 - Lignes de courant pour un vent transversal à la rue (vitesse de référence de 2 m/s) et pour les quatre scénarii d'ensoleillement de la Figure 4-12, d'après (Xie et al. 2005).

Ces simulations montrent que l'effet de poussée thermique renforce la recirculation dans le cas où la surface du sol est chauffée, Figure 4-13, bien qu'une partie de l'air échauffé au contact du sol se trouve du côté du mouvement descendant. En réalité, l'air s'écoulant principalement suivant

¹ Le code de calcul CHENSI est un code CFD tridimensionnel basé sur un modèle $k-\varepsilon$ standard développé à l'École Centrale de Nantes pour la détermination des écoulements turbulents en milieu urbain (Mestayer et al. 1993).

l'écoulement dominant, il s'échauffe progressivement au contact du sol, et la force de poussée thermique, faible au départ, devient forte près de la façade sous le vent. Ce phénomène d'amplification est donc d'autant plus manifeste lorsque la façade sous le vent est chauffée, Figure 4-13. Par contre, dans le cas où la façade face au vent subit une élévation de température, voir Figure 4-13, la recirculation principale déterminée par le code se scinde en deux vortex contraires, la recirculation en partie basse se développant le long de la façade exposée au soleil.

Dans cette approche les phénomènes sont couplés de façon asynchrone et il n'y a aucun bouclage entre le rayonnement solaire, le comportement thermique des surfaces et l'étude aéraulique. Le rayonnement solaire est modélisé par des écarts de température qui sont utilisés comme condition limite de la modélisation aéraulique. Un couplage plus complet, de type synchrone par blocs (Mora 2003), a été développé par Ca (Ca et al. 1995) pour le cas d'une rue de type canyon soumise au rayonnement solaire. Un premier modèle permet de résoudre le bilan thermique des surfaces soumises aux échanges par rayonnement, par conduction et par convection. Le flux de convection est, dans ce cas, estimé a priori. Ces résultats servent de base pour le calcul CFD de type LES utilisé par Ca, qui est ici limité au cas bidimensionnel pour des raisons de temps de calcul. Ces deux codes sont alors exécutés successivement une seconde fois, et le modèle thermique une troisième fois sur la base du champ thermoaéraulique du code CFD. La procédure itérative utilisée ici permet de mieux approcher le couplage des phénomènes, mais du fait de la difficulté liée à la convergence et au temps d'exécution du code CFD, celui-ci n'est utilisé que deux fois par pas de temps, sans critère de convergence ; Le couplage n'est donc pas total.

Cependant les échanges convectifs réciproques entre les parois et les surfaces urbaines sont déterminants dans l'étude des phénomènes microclimatiques (voir Chapitre 1), liés notamment à la forte inertie des surfaces concernées. Dans la suite nous nous intéressons donc au développement d'une modélisation couplée permettant l'étude en régime dynamique.

4.3.2 PROPOSITION D'UNE MODÉLISATION THERMOAÉRAULIQUE DE L'IMPACT DE L'ENSOLEILLEMENT DANS UNE RUE DE TYPE CANYON EN L'ABSENCE D'ÉCOULEMENT DOMINANT

La modélisation zonale présentée au Chapitre 3 permet d'envisager le couplage avec des modèles simplifiés comme la méthode modifiée des enceintes fictives développée dans la partie précédente. Les écoulements sont déterminés par une modélisation zonale en pression dans laquelle les écoulements sont déterminés par les écarts de pression, la force de poussée thermique est prise en compte du fait des variations de la densité de l'air en fonction de la température. Cette approche ne permet pas de décrire correctement les écoulements dominants, mais convient bien pour l'étude de l'impact de l'ensoleillement en l'absence de vent dominant. Les échanges convectifs au niveau des surfaces sont intégrés dans le bilan thermique des parois qui tient compte des transferts conductifs et de l'inertie des matériaux, par un modèle modal, ainsi que des apports radiatifs en surface. Les conditions aux limites sont donc données par les températures extérieures aux parois, comme par exemple la température intérieure d'un bâtiment sur la Figure 4-14 ci-après.

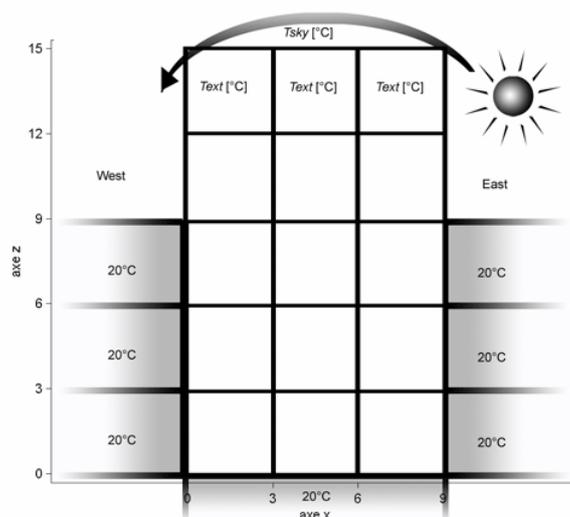


Figure 4-14- Définition des conditions aux limites de la zone étudiée

L'ensoleillement incident sur les parois est à l'origine de mouvements convectifs dans la rue qui s'organisent au cours d'une journée en fonction du comportement thermique des parois et des échanges thermiques avec l'air. Le rayonnement solaire primaire incident peut être déterminé géométriquement à partir de la connaissance des effets de masque comme décrit précédemment. Les inter-réflexions dans le domaine des courtes longueurs d'onde, donc principalement du rayonnement solaire, sont calculées par la méthode modifiée des enceintes fictives appliquée au domaine fermé représenté Figure 4-7. Pour la simulation thermoaéraulique, l'éclairement solaire absorbé est calculé heure par heure sur toute la période d'étude sur le volume maillé, représenté ici Figure 4-14. Ce flux intervient dans le bilan thermique des surfaces qui elles-mêmes émettent un flux radiatif infrarouge, de grande longueur d'onde. Le bilan des inter-réflexions des flux de grande longueur d'onde est résolu par la méthode des enceintes fictives aussi.

Le code de calcul zonal utilisé est couplé ici avec le logiciel Solene suivant le schéma présenté Figure 4-15. Les calculs sont réalisés avec Solene sur une géométrie, construite avec l'interface de Solene, identique à la géométrie du calcul zonal. L'utilisation d'une géométrie plus complexe est cependant envisageable dans Solene, pour permettre la prise en compte de solutions architecturales particulières entraînant des effets de masque par exemple. Un programme de pilotage de Solene, Figure 4-15, développé en VisualC++ permet d'interfacer les résultats obtenus avec le code de calcul zonal. Les facettes du modèle zonal sont repérées par leur orientation et l'indice de la cellule correspondante. Elles sont identifiées avec les facettes correspondantes de la géométrie définie sous Solene où elles sont indicées par ordre de création. Étant données les dimensions du maillage, chaque facette est triangulée avec Solene pour plus de précision sur les calculs d'ensoleillement et de détail sur les ombres portées. Le programme de pilotage agglomère les résultats par facettes et par heure dans le format de données utilisé par la plateforme de simulation zonale SimSPARK (Mora et al. 2003) et le programme zonal en VisualC++. La modélisation des inter-réflexions par la méthode modifiée des enceintes fictives est ici intégrée au modèle zonal pour le cas du rayonnement de grande et de courte longueur d'onde. Les inter-réflexions du rayonnement de courte longueur d'onde ne sont pas dépendantes des conditions thermiques des surfaces, et ce calcul peut aussi être réalisé avec la méthode des radiosités sous Solene.

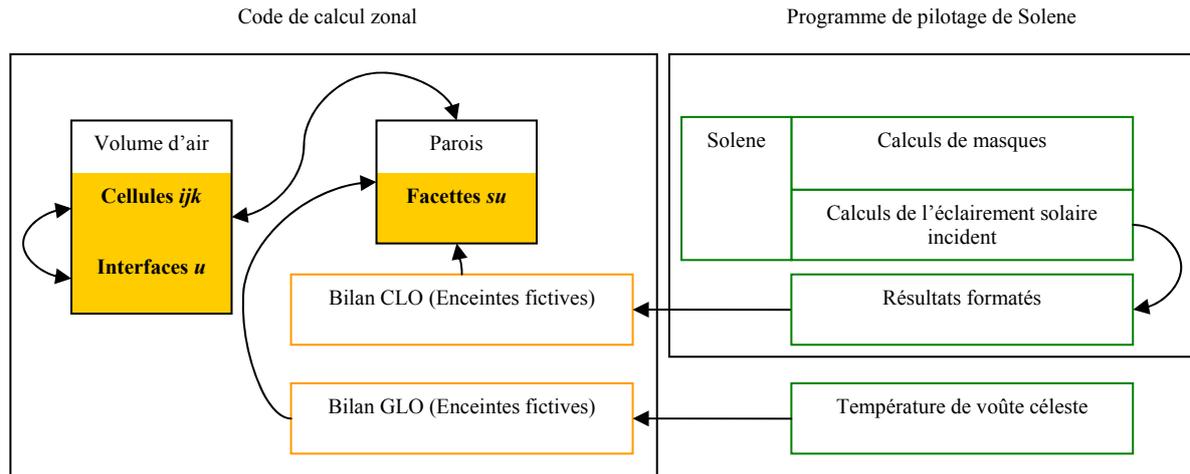


Figure 4-15- Couplage du code de calcul zonal avec les calculs de rayonnement solaire déterminés par Solene.

4.3.3 SIMULATION DYNAMIQUE DU COMPORTEMENT THERMOAÉRAULIQUE D'UNE RUE DE TYPE CANYON SOUS L'EFFET DE L'ENSOLEILLEMENT

Le couplage précédent est appliqué ici au cas simple d'une rue de type canyon dans les conditions définies au Tableau 4-1. Pour la journée type étudiée ici, la circulation d'air dans la rue est due aux seuls mouvements convectifs. Les conditions de température aux limites sont simplifiées : les locaux et le sous-sol sont supposés maintenus en température à 20°C par un système de conditionnement d'air, la température d'air au-delà de 12 mètres de hauteur, au dessus de la canopée urbaine, est supposée constante à 25°C. La température de la voûte céleste est supposée constante et égale à 10°C sur l'ensemble de la journée, ce qui correspond à un temps chaud et relativement brumeux. Étant donnée l'inertie des parois, la simulation sur la journée type est répétée jusqu'à l'obtention d'un régime transitoire établi, soit ici 7 journées de simulation.

Les résultats obtenus de simulation donnent une estimation de l'évolution du champ thermoaéraulique représenté pour certains pas de temps Figure 4-16 et Figure 4-17. Durant la nuit, une recirculation d'air se maintient, l'air s'échauffant le long de la façade orientée à l'Ouest¹ qui est la paroi la plus chaude en fin de journée. L'air chaud du canyon s'élève au-dessus de la canopée urbaine et se mélange avec l'air plus frais au-dessus des bâtiments. Cet air, rafraîchi, recircule alors dans la rue et participe au rafraîchissement des parois, principalement dans ce cas pour la façade Est d'après la Figure 4-16. Le mouvement d'air d'Ouest en Est au niveau du sol se maintient donc au cours de la nuit, tout en s'affaiblissant, cas à 8 h de la Figure 4-16, du fait de la diminution des températures de surfaces des façades et du sol. L'ensoleillement de la façade Est entraîne un échauffement progressif des éléments de paroi exposés graduellement avec le levé du soleil. L'échauffement d'air sur ces facettes exposées inverse alors le mouvement de recirculation dans la rue, à partir de 9 h ici d'après la Figure 4-16. Ce vortex est renforcé en début de journée, de 10 h à 16 h, avec l'ensoleillement de la façade Est puis du sol. La température augmente du côté de la façade est puis dans l'ensemble de la rue alors que la recirculation s'amplifie. En effet l'air chaud s'élevant au dessus des bâtiments réchauffe l'air de la canopée urbaine et est réentraîné en partie dans la zone du canyon. Ce phénomène de stagnation contribue à l'effet de réchauffement de la zone de la rue au cours de la journée et donc de l'ensemble d'une zone urbanisée. Durant l'après-midi, la zone ensoleillée de la rue change de l'Est vers l'Ouest, la façade Ouest et le sol de la rue du même côté sont alors échauffés ce qui conduit au déclenchement d'une recirculation secondaire observée ici à 17 h sur la Figure 4-16. Cependant la recirculation principale d'Est en Ouest se maintient en partie haute de la rue du fait de la longue exposition au flux solaire de la partie haute de la façade Est par rapport à la partie basse moins exposée, car à l'ombre en début de

¹ Les façades des bâtiments sont ici systématiquement repérées par l'orientation du nu extérieur de la façade, et une façade orientée Ouest sera alors appelée aussi « façade Ouest », même dans le cas où elle se situerait à l'Est du domaine d'étude où de la rue.

journée. De plus le rafraîchissement de la façade Est a été moins important que la façade Ouest durant la première partie de journée, l'air frais s'échauffant préalablement sur la façade Ouest et le sol.

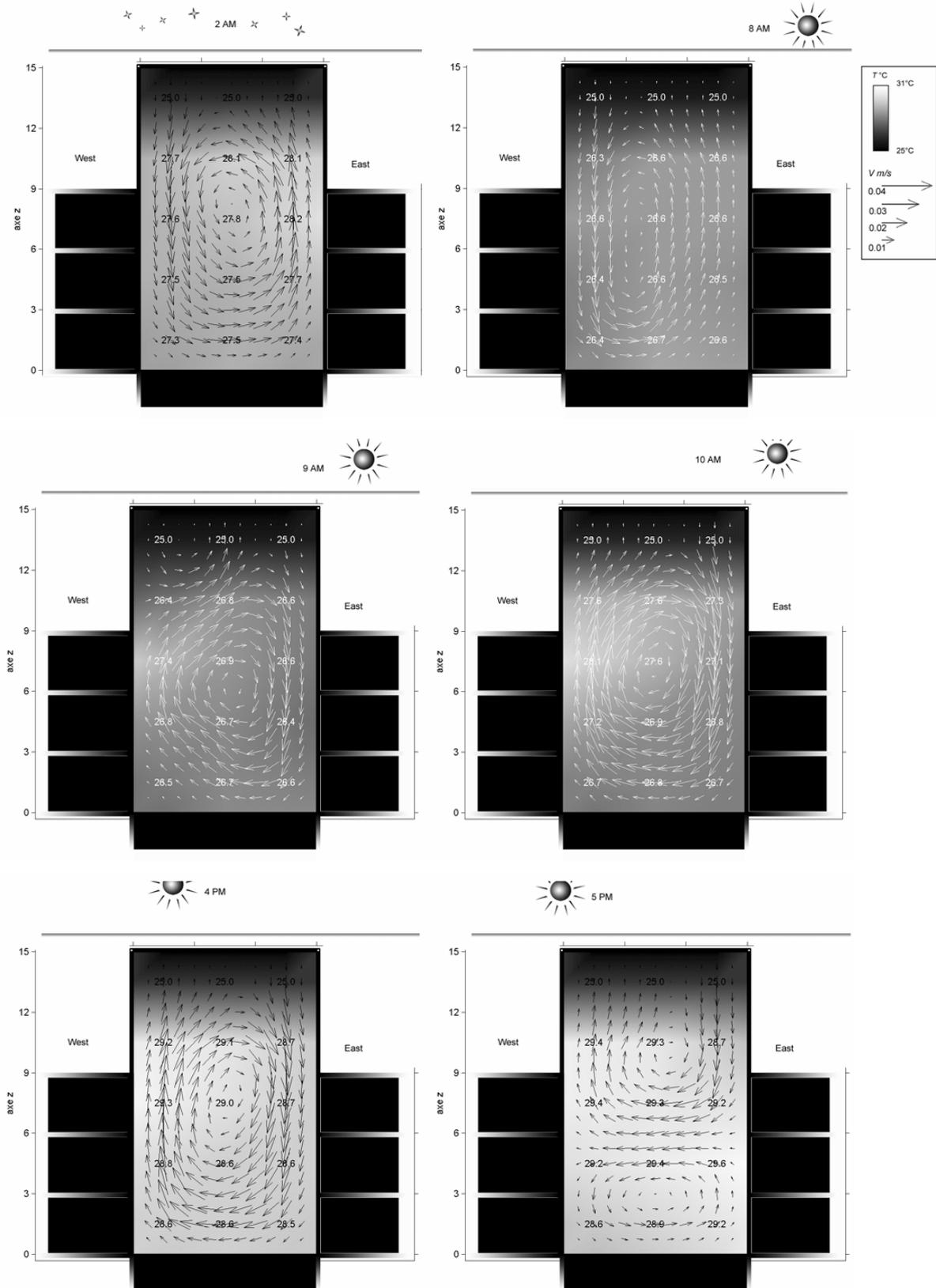


Figure 4-16- Évolution du champ thermoaérial dans la rue étudiée pour une journée type

Au cours de l'après-midi l'effet de confinement en partie basse de la rue contribue au réchauffement des surfaces. En partie haute, l'apport d'air frais contribue au rafraîchissement des surfaces et surtout de la façade Est non ensoleillée. La recirculation en partie basse s'amplifie donc alors que le premier vortex s'estompe, comme le montre la Figure 4-17 à 20 h ici. Ce mouvement convectif d'Ouest en Est en partie basse de la rue se développe en fin de journée et continue durant la nuit alors que la façade Ouest continue de se rafraîchir au contact de la recirculation, Figure 4-16, qui s'atténue jusqu'au lever de soleil suivant.

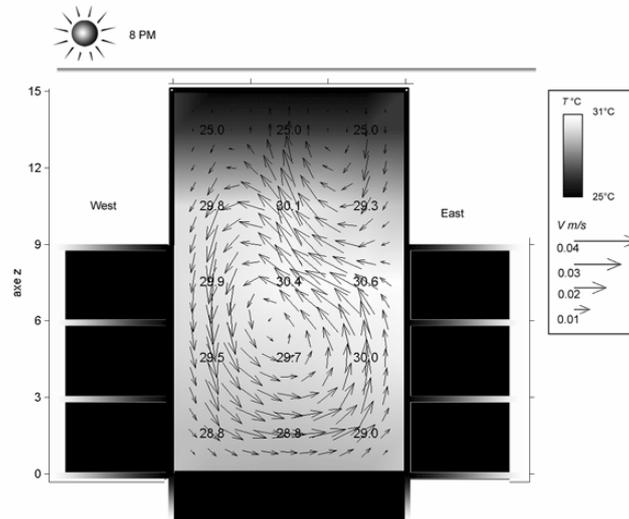


Figure 4-17- champ thermoaérodynamique dans la rue étudiée à 20 h

Les résultats obtenus ici sont qualitativement cohérents et donnent une prédiction des transferts de masse et de chaleur entre la cavité du canyon et la couche atmosphérique au dessus de la canopée urbaine. Le phénomène de confinement développé par de nombreux auteurs du point de vue de la dispersion des polluants, se retrouve ici du point de vue des transferts de chaleur. Dans le cas présenté, ce phénomène est renforcé du fait de l'absence de vent dominant. Par ailleurs ce confinement se répercute sur l'évolution de la température dans la cavité du canyon au cours de la journée type : cette température reste élevée en fin de journée et diminue faiblement au cours de la nuit. Ce résultat est cohérent avec le phénomène d'îlot de chaleur urbain accentué la nuit et décrit au Chapitre 1.

Les vitesses d'air obtenues sont très faibles et correspondent aux vitesses de débit moyen horaire aux interfaces ; elles n'ont donc pas de sens physique au sens d'une mesure ponctuelle. En effet, les mouvements d'air sont en réalité turbulents et les résultats de ces simulations ont pour objectif de donner une estimation du bilan énergétique moyen de la rue et des bâtiments sur une longue période avec un pas de temps horaire, sans tenir compte des phénomènes locaux. Néanmoins, il peut être important de tenir compte de l'écoulement près des parois et d'intégrer au modèle la description de la couche limite. Il faut alors évidemment tenir compte de la « rugosité » des façades et l'interaction de l'écoulement avec des éléments architecturaux tels que balcons, ouvrants ou autres. Ces éléments peuvent modifier significativement les phénomènes thermoaérodynamiques bien qu'ils ne soient pas toujours définis précisément, comme dans le cas d'un avant projet par exemple.

4.4 Conclusions et perspectives

Le rayonnement solaire est un élément essentiel pour la prédiction des conditions thermoaérauliques à l'interface des bâtiments et de la rue en milieu urbain. Le cas de la rue canyon a été étudié ici du point de vue de l'ensoleillement des surfaces et une méthode simplifiée de détermination des inter-réflexions a été développée. Cette méthode, dérivée de la méthode des enceintes fictives, a été adaptée à partir de résultats obtenus avec la méthode plus précise des radiosités. Couplée avec la modélisation zonale développée au Chapitre 3, cette approche nous a permis de simuler le comportement thermoaéraulique d'une rue canyon sur une journée type avec des temps de calculs faibles, de l'ordre de quelques minutes sur un ordinateur de bureau classique. Il est donc possible d'envisager des calculs sur de longues périodes et de nombreuses configurations dans le cadre d'études préliminaires à un projet par exemple.

Cependant, les mouvements d'air, très faibles ici en l'absence de toute perturbation aéraulique de plus grande échelle, doivent être complétés pour l'étude de cas réels par les mouvements d'air dus aux vents dominants. La modélisation de ces écoulements est développée au chapitre suivant, Chapitre 5, puis couplée au modèle thermoaéraulique de la rue, Chapitre 6. Une validation de l'approche par une comparaison avec des mesures sur site sera alors envisageable, en considérant phénomènes de transfert sur une période suffisamment longue. Les calculs réalisés ici pour le cas d'une journée ont montré en effet l'importance de l'inertie et de l'effet de confinement dans les variations temporelles des conditions de la rue et des parois.

Chapitre 5

Modélisation des écoulements dominants en milieu urbain

La modélisation des écoulements dominants en milieu urbain est complexe du fait notamment de l'hétérogénéité du milieu. Des scénarii, pour le cas classique d'une rue de type canyon, sont donc définis. Des modèles empiriques de champs de vitesse sont alors proposés pour ces différentes configurations. La confrontation de ces modèles empiriques à des mesures réalisées sur site dans le cadre du projet européen Urbvent nous permet d'adapter et de vérifier la validité de notre approche. Cette approche aboutit à la définition d'un algorithme que nous intégrons dans notre outil de simulation pour déterminer le champ de vitesse empirique pour la rue de type canyon.

5.1 Mesures sur site pour des rues de type canyon

5.1.1 SCÉNARIIS D'ÉCOULEMENT

La circulation d'air en milieu urbain est généralement complexe. La géométrie anguleuse des bâtiments est source de nombreuses perturbations qui interfèrent entre elles dans le cas de constructions denses.

Dans ce chapitre, l'écoulement dominant considéré est provoqué par des phénomènes météorologiques d'échelle supérieure à l'échelle locale. Ce vent correspond à un mouvement d'air horizontal d'une zone haute pression vers une zone basse pression.

Pour aborder ces écoulements complexes au niveau des bâtiments, différentes approches ont été retenues. Une première approche consiste à définir le sens de l'écoulement aux abords des bâtiments en fonction de l'incidence de l'écoulement dominant non perturbé. Les zones de recirculation sont alors localisées par une inversion du sens de l'écoulement d'air moyen. Sur un obstacle isolé, la forme de l'écoulement est bien définie avec ses différentes zones de recirculation et de sillage (Hosker 1984; Rockle 1990). Des travaux et des développements plus récents (Rockle 1990; Kaplan et Dinar 1996; Brown et Streit 1998) établissent les limites de ces zones, déterminées par la géométrie de l'obstacle et l'angle d'incidence du vent. Pour un ensemble quelconque de bâtiments, il est alors possible de combiner ces zones élémentaires, comme dans l'approche développée par (Kaplan et Dinar 1996), pour définir approximativement la configuration de l'écoulement perturbé. Pour une rue de type canyon, ce type d'analyse des résultats expérimentaux peut être menée et les paramètres géométriques pertinents retenus sont : la hauteur moyenne des bâtiments H , la largeur de la rue W et la longueur de la rue L . Les zones perturbées de l'écoulement principal peuvent être alors définies en fonction des rapports d'aspect adimensionnels W/H et L/H et de la densité de construction s^*/S^* . Deux scénarii d'écoulement principaux, représentés Figure 5-1, pour une rue de type canyon sont définis : un écoulement transversal entraînant une recirculation entre les deux bâtiments et un écoulement dans l'axe du canyon.

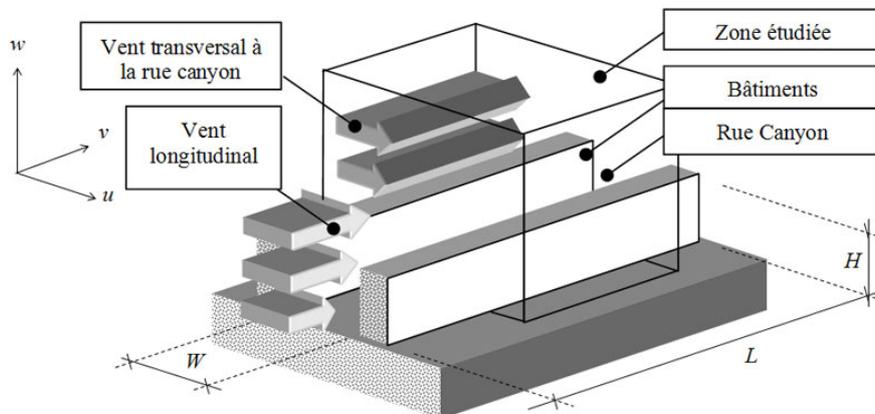


Figure 5-1 - Les différents scénarii d'écoulement dans une rue de type canyon

Ces deux types d'écoulements sont explicités par de nombreuses études (Hotchkiss et Harlow 1973; Nicholson 1975; Oke 1987). Le troisième scénario regroupe les cas intermédiaires, i.e. l'écoulement à une incidence oblique par rapport à l'axe principal de la rue. Ce dernier cas est décrit beaucoup moins précisément par les modèles empiriques et les observations expérimentales restent assez approximatives. Une recirculation en spirale est couramment observée dans ce cas (Vardoulakis et al. 2003).

5.1.2 MESURES SUR SITE : ÉTUDE DE RUES CANYON À ATHÈNES

Des mesures thermoaérauliques pour des rues de type canyon ont été menées dans le cadre du projet Européen Urbvent coordonné par le LEPTAB. Ce projet avait pour objectif de déterminer les potentialités de ventilation naturelle en milieu urbain. Des corrélations ont été proposées à partir des mesures effectuées pour ce projet et, dans ce chapitre, nous développons et validons une nouvelle approche simplifiée d'écoulement pour une rue de type canyon.

Les mesures retenues ont concerné cinq rues situées dans le centre de la ville d'Athènes et repérées sur la Figure 5-2 : rues Ermou, Miltiadou, Voukourestiou, Kaniggos et Dervenion.

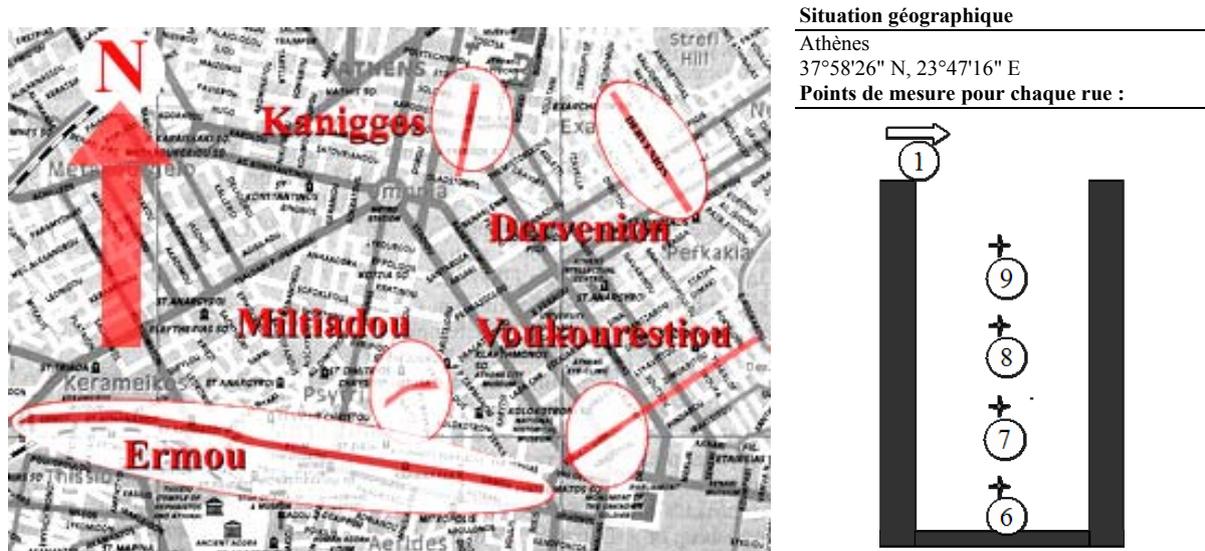


Figure 5-2 - Situation des rues étudiées dans le centre de la ville d'Athènes (plan de gauche) et points de mesure pour chaque canyon (schéma de droite)

Pour chacune des rues, des mesures de température, de vitesse d'air et d'orientation du vent ont été effectuées en différents points, dont la position est représentée en Figure 5-1. Les vitesses et l'orientation du vent sont étudiées ici en toiture, point de mesure noté (1), et au centre de la rue à 3,5 m, 7,5 m, 11,5 m, et 15,5 m, points repérés respectivement (6), (7), (8) et (9). Les dimensions des rues données par le Tableau 5-1 permettent de prévoir des écoulements dominants de type rasant d'après le rapport d'aspect W/H , selon la Figure 2-14 (Oke 1987).

Tableau 5-1- Géométrie des rues étudiées par l'Université d'Athènes dans le cadre du projet Urbvent

Rue	Hauteur H [m]	Largeur W [m]	Longueur L [m]	W/H	Orientation par rapport au nord
Ermou	20	10	200	0,50	92°
Miltiadou	15	5	100	0,33	45°
Voukourestiou	15	10	100	0,66	45°
Kaniggos	22	9	70	0,41	12°
Dervenion	23	7	200	0,30	327°

Les longueurs données, longueurs d'étude inférieures aux longueurs complètes des rues, correspondent bien au cas classique de la géométrie canyon avec une longueur grande par rapport aux dimensions transversales.

Les mesures ont été réalisées durant l'été 2001 sur trois journées, parfois non consécutives, pour chacune des cinq rues, avec des mesures sur la vitesse d'air toutes les 30 secondes. Parallèlement, des mesures météorologiques ont été réalisées sur le site de l'université d'Athènes. Le site de l'Université, dont le plan détaillé et la situation sont représentés à la Figure 5-3, est situé à environ 5 kilomètres à l'ouest du centre de la ville d'Athènes où se trouvent les rues étudiées.

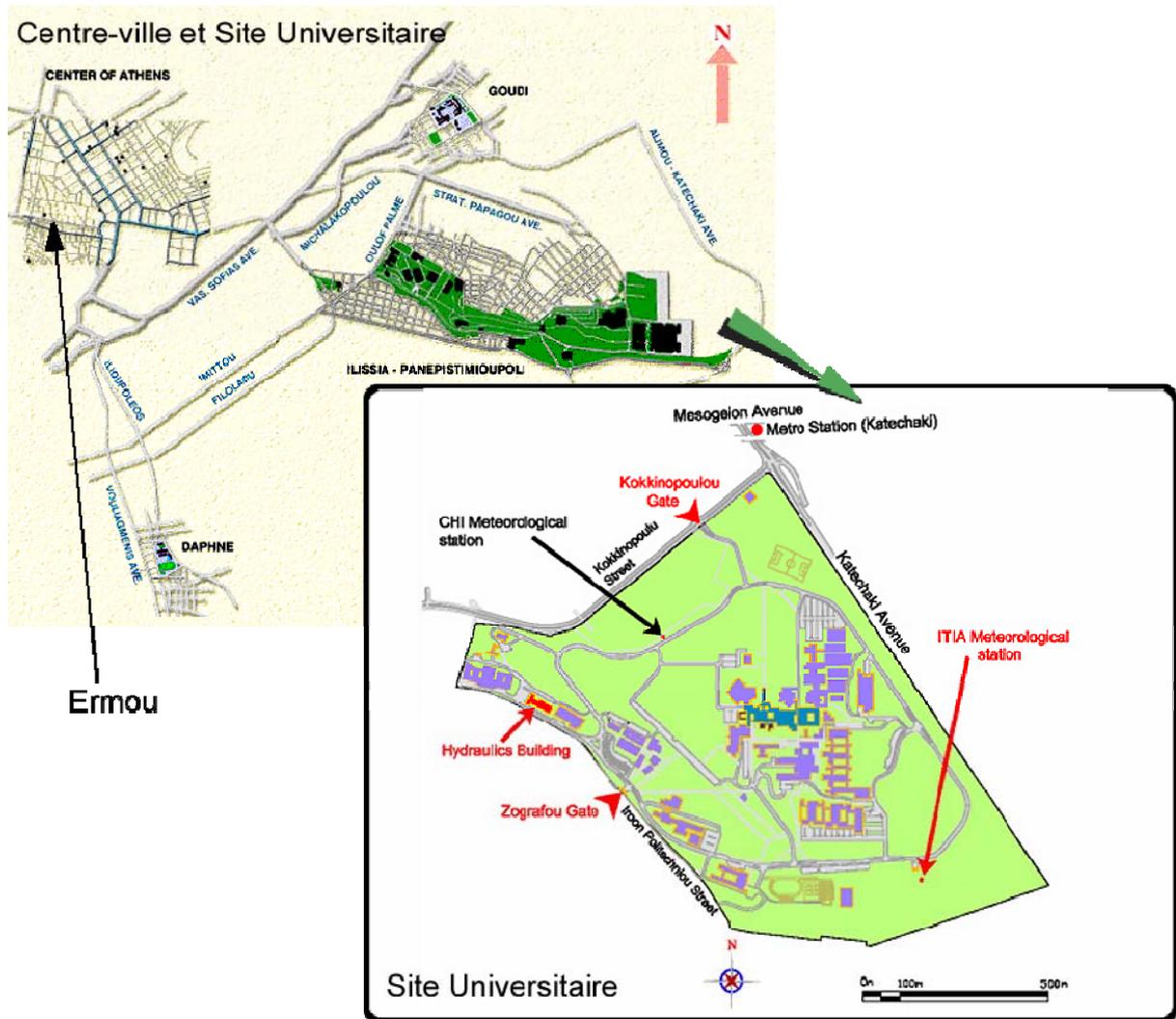


Figure 5-3 - Situation géographique du site universitaire par rapport au centre-ville d'Athènes (plan de gauche) et situation de la station météorologique d'ITIA sur le campus universitaire (plan de droite)

Pour compléter ces mesures, en dehors des périodes de l'étude expérimentale précédente, les relevés météorologiques d'une autre équipe de l'Université d'Athènes, groupe de recherche ITIA, sont utilisés ici et consultables directement sur le site Internet <http://www.meteo.ntua.gr/>.

5.1.3 ANALYSE DE LA CORRÉLATION ENTRE LA VITESSE INSTANTANÉE EN TOITURE ET DANS LA RUE

La variation stochastique des vitesses et de l'orientation du vent aux abords des bâtiments en milieu urbain rend difficile la modélisation empirique du phénomène à partir de données expérimentales. En première approche, deux modèles empiriques proposés par la littérature ont été confrontés aux mesures par l'Université d'Athènes. Différents scénarii ont été identifiés, à chaque instant, et les valeurs calculées à cet instant par les modèles empiriques ont été confrontées aux valeurs mesurées aux différents points de la rue considérée. Cette comparaison a conduit à la proposition d'un algorithme de prédiction du champ de vitesse instantanée dans une rue canyon.

Mesures de la vitesse de vent

Nous exploitons par la suite les mesures de l'évolution de la vitesse et de l'orientation du vent, mesurées par l'Université d'Athènes, en toiture et en différents points de la rue. La Figure 5-4 donne l'exemple des évolutions mesurées en toiture, pour le cas de la rue Dervenion, que nous avons représentées pour les trois journées consécutives de mesure.

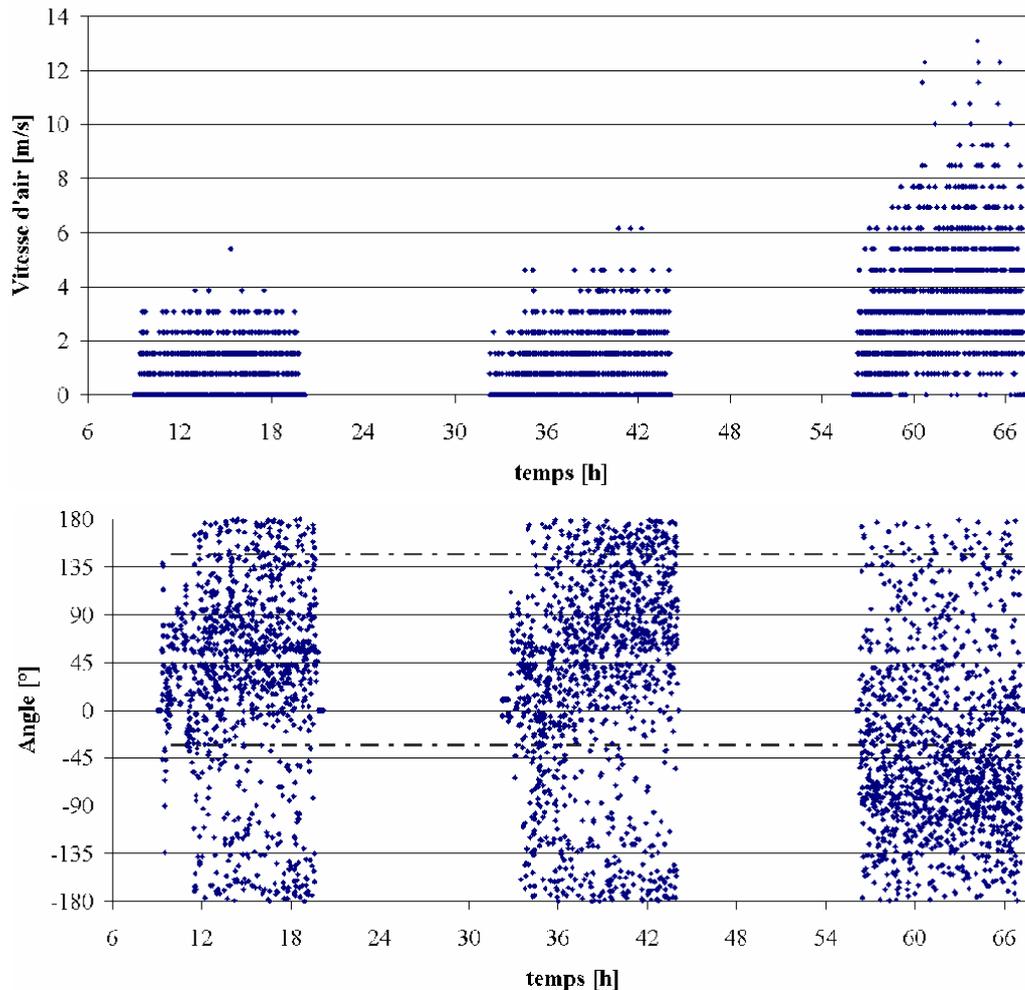


Figure 5-4 - Vitesse et orientation par rapport au nord du vent mesurée en toiture (1) sur 3 jours consécutifs pour la rue Der-venion (l'axe de la rue est représenté en trait discontinu)

Cet exemple montre, comme l'étude des autres rues, que l'amplitude de variation de la vitesse d'air et de la direction est forte au niveau des toitures. De façon générale, on constate que lorsque le vent est oblique par rapport à l'axe de la rue en partie haute, celui-ci a tendance à devenir parallèle à l'axe au centre de la rue, repéré en trait discontinu sur les diagrammes. Ce phénomène est d'autant plus évident que le point de mesure se trouve en partie basse de la rue. De plus, Lorsque l'incidence est transversale à la rue, une inversion du sens de circulation au centre du canyon peut être observée, à partir d'une hauteur variable. Néanmoins, la corrélation entre la vitesse en toiture et la vitesse en bas du canyon semble difficile à établir, surtout pour des vitesses faibles.

Modèles empiriques utilisés

Deux modèles sont étudiés ici :

- ❖ Le modèle de Nicholson (Nicholson 1975), équations (2.13) et (2.15), donne une estimation de la vitesse du vent en milieu urbain valable lorsque l'écoulement est dans l'axe du canyon.
- ❖ Le modèle de Hotchkiss et Harlow (Hotchkiss et Harlow 1973) évalue les composantes horizontales et la composante verticale de la vitesse en fonction des paramètres géométriques de la rue. Ce modèle permet de décrire la recirculation, schématisée à la Figure 5-5, dans le canyon en considérant que le centre de celle-ci se trouve dans l'axe du canyon.

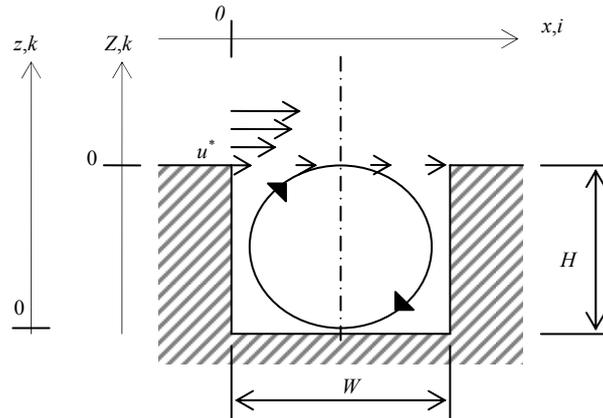


Figure 5-5 - Dimensions et repères transversaux pour une rue de type canyon

Les composantes transversales U_i et U_k de la vitesse d'air sont modélisées par le modèle de Hotchkiss et Harlow par les équations suivantes :

$$U_i = \frac{A}{k_H} \left(e^{k_H Z} (1 + k_H Z) - \beta e^{-k_H Z} (1 - k_H Z) \right) \sin(k_H x) \quad (5.1)$$

$$U_k = -AZ \left(e^{k_H Z} - \beta e^{-k_H Z} \right) \cos k_H x \quad (5.2)$$

où β , A et k_H sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} \beta = e^{-2k_H H} \\ A = \frac{k_H u_0}{1 - \beta} \\ k_H = \frac{\pi}{W} \end{cases} \quad (5.3)$$

avec u_0 la vitesse transversale en O. La composante longitudinale est modélisée par une évolution logarithmique suivante :

$$U_j = U_{jr} \frac{\ln\left(\frac{Z}{z_0} + 1\right)}{\ln\left(\frac{z_r}{z_0} + 1\right)} \quad (5.4)$$

avec U_{jr} la composante longitudinale de la vitesse à l'altitude de référence Z_r .

Dans ce même repère, la vitesse longitudinale donnée par le modèle de Nicholson (Nicholson 1975) s'écrit :

$$U_j = \frac{u_j^*}{\kappa} \ln\left(\frac{Z + Z_d + z_{0N}}{z_{0N}}\right) \text{ avec } Z_d = H - z_d \quad (5.5)$$

Soit, d'après l'équation (2.10) et en considérant $z_H = H$:

$$Z_d = z_{0N} (x_N - 1) \quad (5.6)$$

Comparaison des valeurs expérimentales avec les valeurs calculées

L'analyse de ces mesures proposée dans le cadre du projet Urbvent a été réalisée par plage de vitesse de 1 m/s et pour les trois scénarii d'incidence à l'axe du canyon : parallèle, oblique et transverse. Pour des vitesses extérieures inférieures à 4 m/s, la corrélation avec les vitesses relevées à l'intérieur du canyon est difficile à établir et les deux modèles empiriques exposés précédemment ont été confrontés aux valeurs mesurées à partir de 4 m/s. En effet, pour les faibles vitesses de vent les phénomènes perturbateurs comme les forces de poussée thermique peuvent devenir non négligeables.

Le modèle de Hotchkiss et le modèle de Nicholson ont été confrontés dans le cas d'un vent d'incidence parallèle pour chacune des rues, comme dans l'exemple de la rue Dervenion à la Figure 5-6.

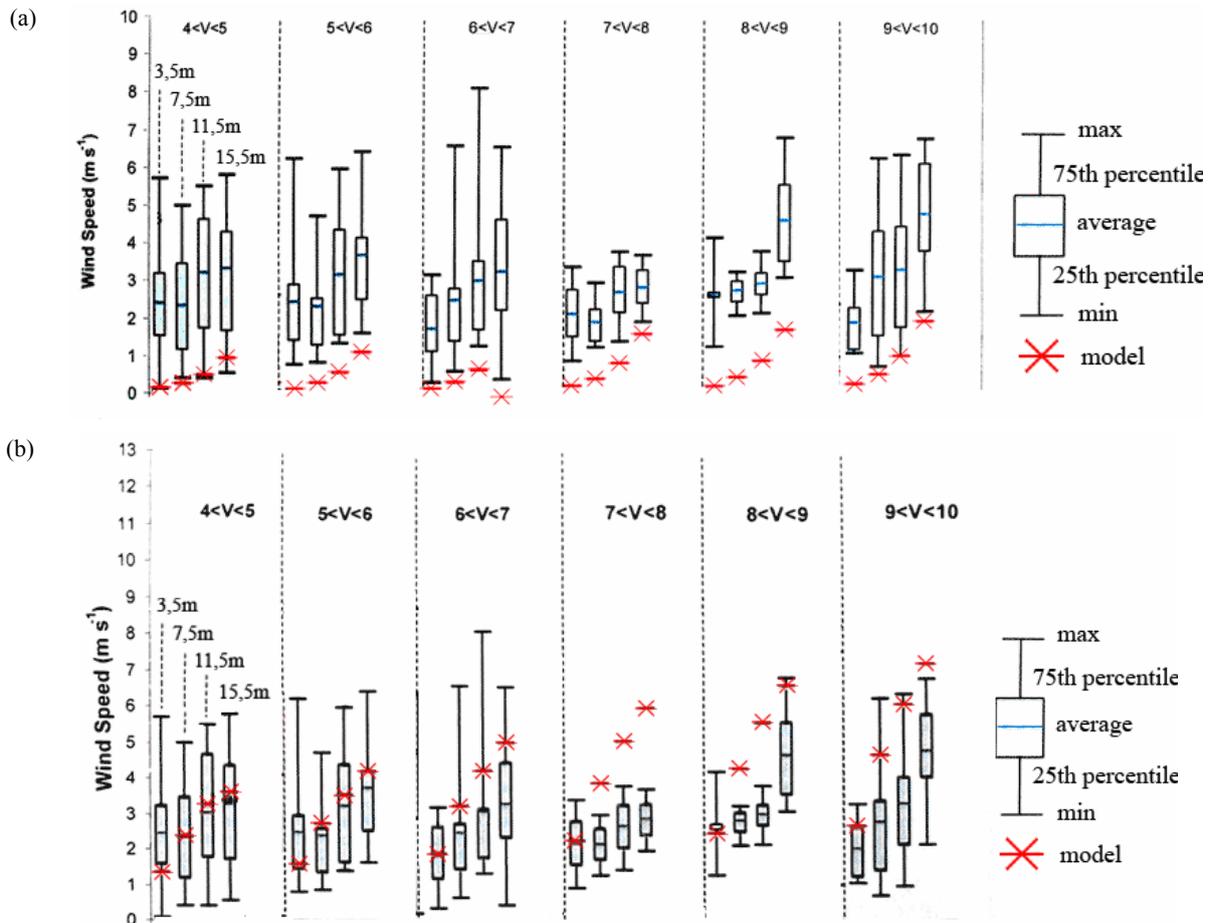


Figure 5-6- Rue Dervenion : cas du vent extérieur à la rue d'incidence parallèle à l'axe du canyon et de vitesse supérieure à 4 m/s – (a) modèle de Nicholson et valeurs mesurées – (b) modèle de Hotchkiss et valeurs mesurées aux différents points – source : rapport final d'Urbvent (Allard et Ghiaus 2004; Georgakis et Santamouris 2005)

L'exemple de la rue Dervenion pour une vitesse de vent extérieur à la rue supérieure à 4 m/s montre que le modèle de Nicholson sous-estime la vitesse dans le cas d'un vent longitudinal, Figure 5-6-a, mais que son évolution suit la même tendance que les valeurs mesurées. Les écarts constatés ici sont de l'ordre de 2 à 3 m/s en valeur absolue. Les valeurs de vitesse obtenues par le modèle de Hotchkiss, Figure 5-6-b, sont ici plus proches de la valeur moyenne de vitesse mesurée dans le cas de vitesses comprises entre 4 et 6 m/s. Au-delà de cette valeur, les valeurs ainsi calculées sont très largement surestimées, avec des écarts relatifs dépassant 100 % de la valeur mesurée.

Pour le cas d'un vent d'angle d'incidence transversal, cas de la rue Dervenion à la Figure 5-7, le modèle de Hotchkiss seul a été confronté aux mesures.

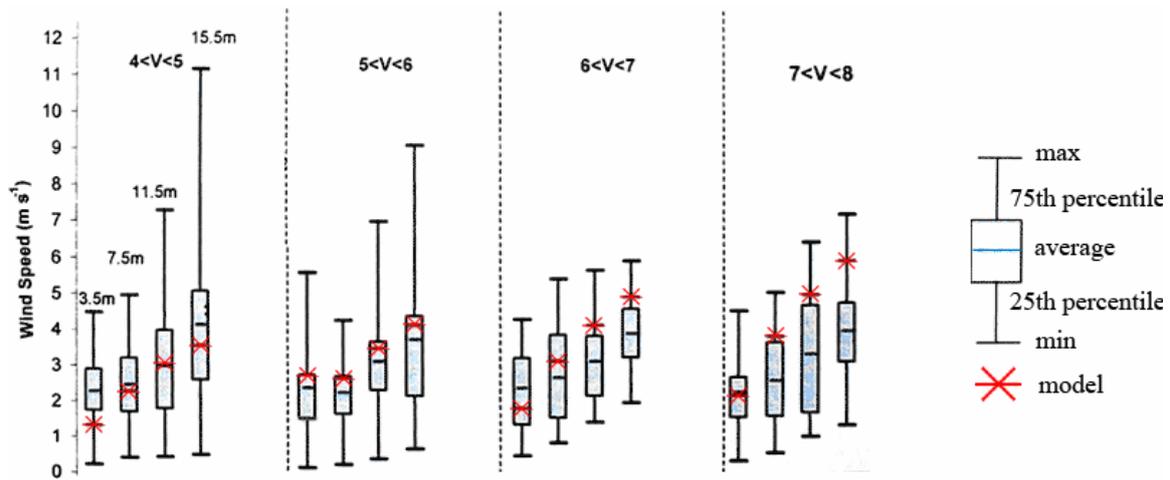


Figure 5-7- Rue Dervention : cas du vent extérieur à la rue d'incidence transversale à l'axe du canyon et de vitesse supérieure à 4 m/s – modèle de Hotchkiss et valeurs mesurées aux différents points – source : rapport final d'Urbvent (Allard et Ghiaus 2004; Georgakis et Santamouris 2005)

Les valeurs ainsi calculées sont proches de la valeur moyenne, des écarts plus importants, supérieurs à 3 m/s étant néanmoins constatés lorsque la vitesse en toiture est supérieure à 7 m/s. Cette différence avec les valeurs mesurées s'accroît avec la hauteur du point de mesure dans la rue.

Enfin, dans le cas d'un vent d'angle d'incidence oblique par rapport à la rue, le modèle de Hotchkiss a été confronté aux mesures ; la Figure 5-8 représente les résultats obtenus pour la rue Dervention.

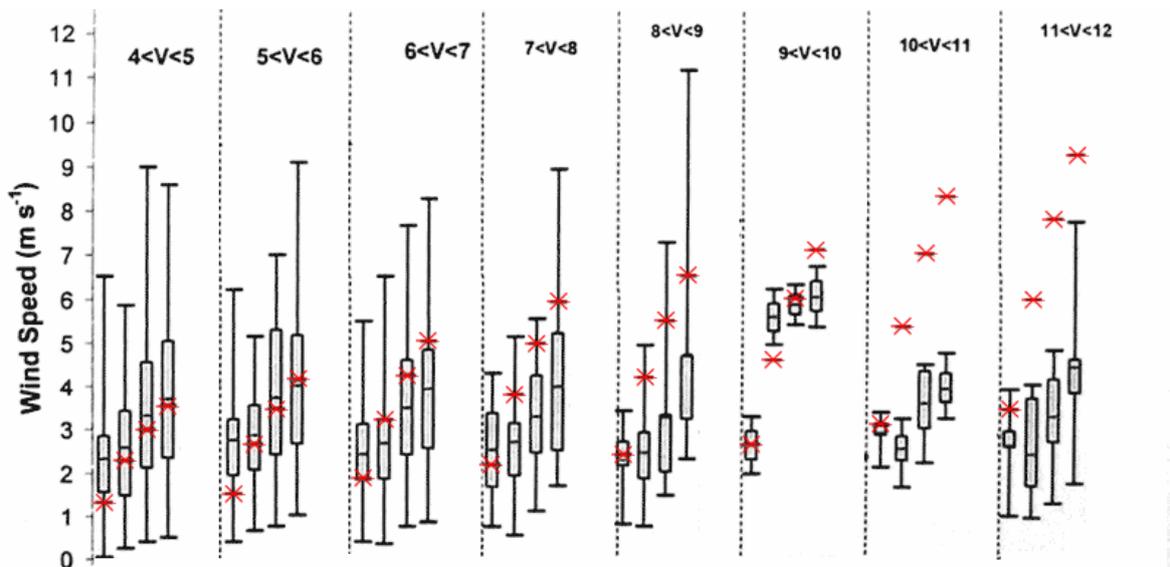


Figure 5-8- Rue Dervention : cas du vent extérieur à la rue d'incidence oblique à l'axe du canyon et de vitesse supérieure à 4 m/s – modèle de Hotchkiss et valeurs mesurées aux différents points – source : rapport final d'Urbvent (Allard et Ghiaus 2004; Georgakis et Santamouris 2005)

Les vitesses calculées par le modèle de Hotchkiss aux différents points de mesure sont, pour ce cas aussi, très proches des valeurs moyennes lorsque la vitesse en toiture est comprise entre 4 et 6 m/s. La différence entre valeurs calculées et valeurs mesurées devient, par contre, très élevée à partir de 9 à 10 m/s, avec des écarts de 4 à 7 m/s.

Proposition d'un algorithme de détermination du champ de vitesse

L'analyse précédente a conduit à la proposition d'un algorithme de détermination du champ de vitesse pour une rue de type canyon en fonction de la vitesse de référence extérieure à la rue. Cette méthode définie dans le cadre du projet Urbvent (Georgakis et Santamouris 2005), et représenté à la Figure 5-9, distingue les différents scénarii identifiés précédemment et permet de déterminer à chaque instant la vitesse en un point de la rue en corrélation avec la vitesse de référence à l'extérieur de la rue.

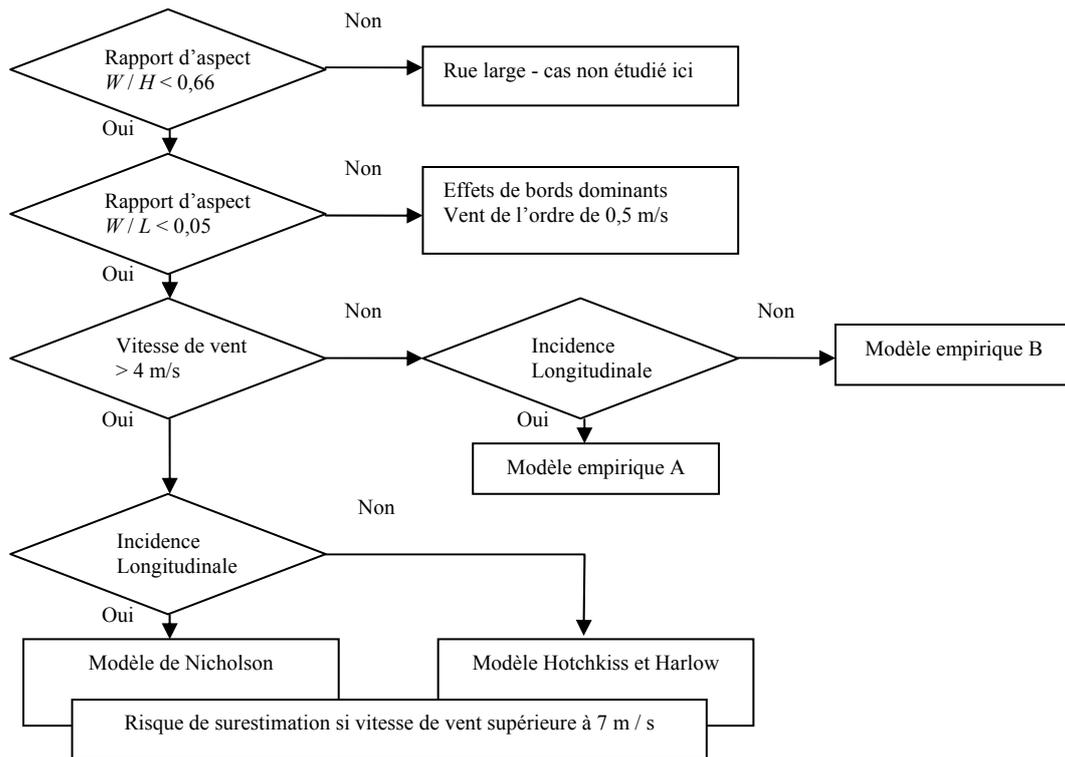


Figure 5-9 - Algorithme d'estimation de la vitesse de vent dans une rue canyon, d'après Urbvent (Georgakis et Santamouris 2005)

Le rapport d'aspect caractérise la géométrie étudiée, correspondant ici à la forme classique d'un canyon dont les dimensions transversales sont suffisamment faibles par rapport à la longueur pour pouvoir négliger les effets de bord, d'après (Georgakis et Santamouris 2005).

Pour le cas d'une vitesse de référence comprise entre 0,5 m/s et 4 m/s, une modélisation a été établie à partir des données expérimentales (Georgakis et Santamouris 2005), modélisation repérée sur l'organigramme, Figure 5-9, par les modèles A et B et détaillée à l'Annexe B. Cette modélisation a été formalisée sous la forme d'une table de correspondance entre l'ordre de grandeur de la vitesse de référence et la vitesse en partie basse et haute du canyon.

Lorsque la vitesse de référence est supérieure à 4 m/s, l'utilisation des modèles empiriques, présentés en début de chapitre, donne des résultats satisfaisants, jusqu'à une limite de 7 m/s où la vitesse corrélée dans le canyon peut être fortement surestimée. Ainsi, pour le cas où l'incidence est sensiblement parallèle au canyon, à plus ou moins 15°, les vitesses obtenues par le modèle de Nicholson (Nicholson 1975) sont proches des valeurs mesurées. Lorsque le vent est perpendiculaire ou oblique à l'axe du canyon, le modèle de Hotchkiss et Harlow est alors utilisé (Hotchkiss et Harlow 1973).

Cette analyse montre toutefois que la corrélation entre le champ de vitesse à l'extérieur du canyon et celui à l'intérieur est difficile à établir pour les faibles vitesses. Outre les phénomènes perturbateurs, à faible vitesse, « l'inertie » du volume d'air étudié est plus grande, et la décorrélation entre les vitesses en différents points à un instant donné est aussi élevée. Par ailleurs, les relevés de mesure de vitesse présentent de très fortes variations angulaires et d'amplitude de la vitesse d'air au cours du temps, Figure 5-4, variations qui ne sont pas nécessairement instantanément répercutées dans l'espace confiné du canyon.

Nous nous proposons dans la suite d'étudier l'évolution temporelle des caractéristiques thermoaérauliques considérées en valeur moyenne sur un pas de temps horaire ; cette approche explicitée dans la partie suivante peut permettre de pallier à cette éventuelle décorrélation temporelle.

5.1.4 ANALYSE DE L'ÉVOLUTION DE LA VITESSE MOYENNE

Dans cette partie, nous analysons les évolutions moyennes des vitesses de vent, sur un pas de temps horaire, pour mettre en évidence les corrélations entre les différents points de mesure. Le champ de vi-

tesse, moyenné sur une heure, correspond à un transfert de masse moyen sur la zone étudiée en conditions isothermes. Ce choix nous permet par la suite d'envisager des calculs sur de longues périodes et présente l'avantage d'estomper les perturbations dues aux turbulences locales.

Variation moyenne de la vitesse de vent

La Figure 5-10 représente, pour chaque rue étudiée, l'évolution de la moyenne horaire de la vitesse de vent aux différents points de mesure dans l'axe du canyon et en toiture, sur trois journées.

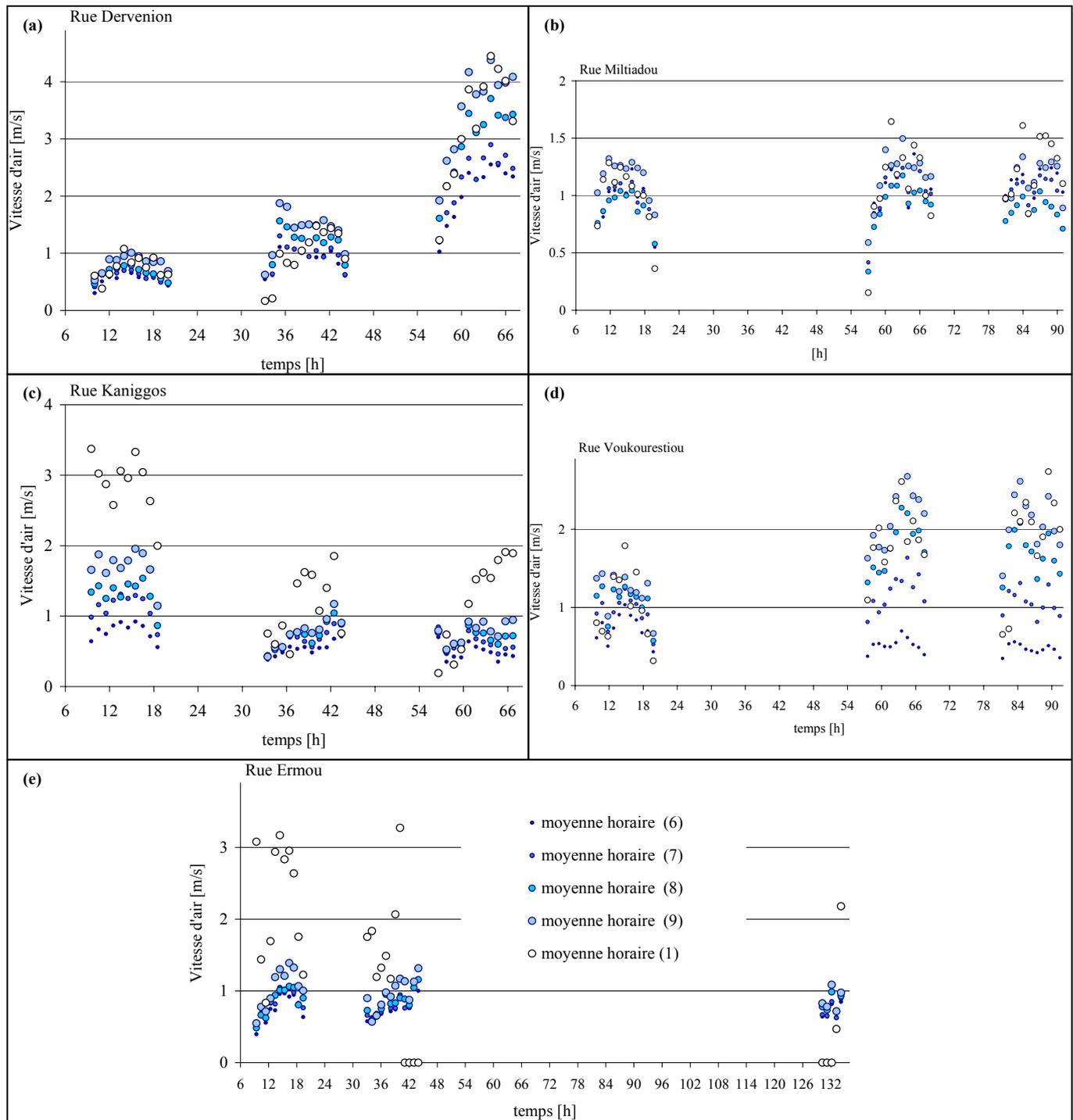


Figure 5-10- Évolution des vitesses moyennes pour les cinq rues canyons étudiées, sur trois journées et en différentes hauteurs au centre de la rue : 3,5 m, 7,5 m, 11,5 m et 15,5 m pour les points repérés (6), (7), (8) et (9) respectivement
 – Les points sont représentés par des cercles de rayon croissant avec la hauteur
 – la vitesse d'air en toiture est repérée par le point (1)

Pour tous les cas représentés ici, la vitesse moyenne décroît avec la hauteur du point de mesure, du point (9) au point (6) de l'axe de la rue. Cette vitesse moyenne dans le canyon est parfois très atténuée par rapport à celle mesurée en toiture, point (1), comme dans le cas de la rue Ermou par exemple. Globalement la vitesse d'air dans la rue canyon suit la même évolution que la vitesse en toiture, mais la réduction de vitesse dans le canyon ne correspond pas toujours au faible rapport d'aspect du canyon. En effet, pour les rues Dervenion et Miltiadou, Figure 5-10-a et b, qui ont les plus faibles rapports d'aspect, environ 0,3, la diminution de vitesse est faible. Par contre, la rue Voukourestiou, Figure 5-10-d, d'un rapport d'aspect de 0,66 donc d'effet de confinement très marqué, présente des variations de vitesses moyennes très fortes en fonction de la hauteur dans la rue, en particulier pour les deuxièmes et troisièmes journées. Cette différence peut s'expliquer notamment par les variations de l'angle d'incidence du vent par rapport à l'axe de la rue.

L'observation de la dispersion des vitesses mesurées en fonction des points de mesure, comme le montre la Figure 5-11 pour la vitesse mesurée en toiture et en bas de la rue Kaniggos, montre que de façon générale les perturbations sont très réduites en partie basse du canyon par rapport à celles constatées en toiture.

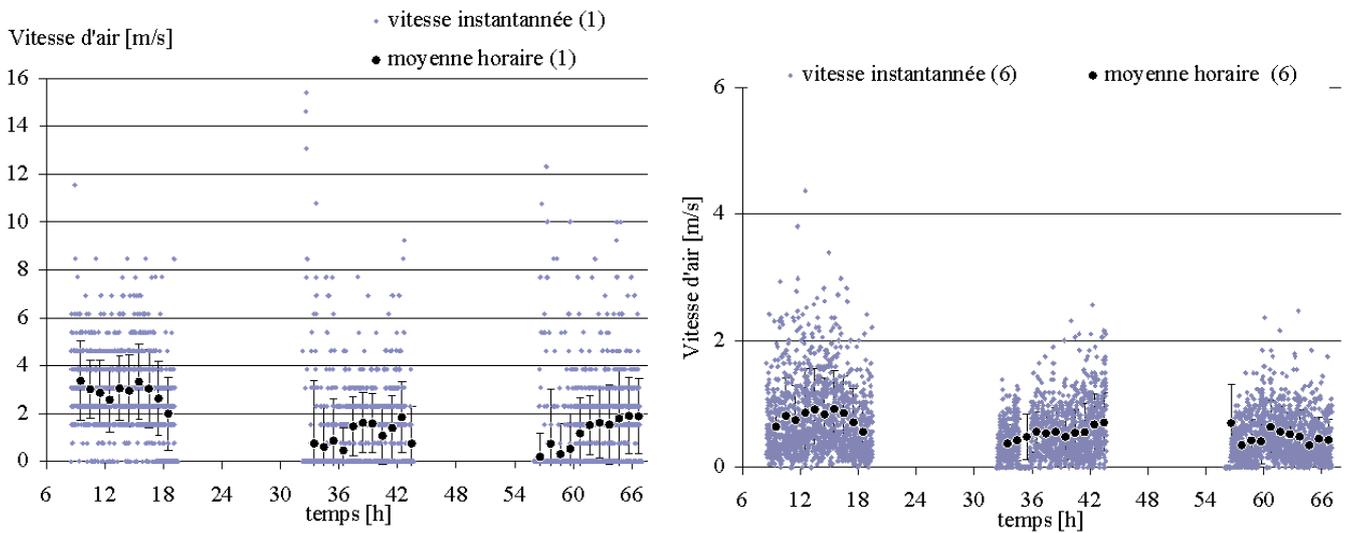


Figure 5-11- Vitesse horaire moyenne d'air et dispersion en toiture (1) et en partie basse de la rue (6) sur 3 jours consécutifs pour la rue Kaniggos

Dans le cas de la rue Kaniggos, représenté ici, la dispersion observée varie de 3 m/s en moyenne en toiture à 1 m/s en partie basse. Ponctuellement, de très fortes variations de vitesses sont relevées en dehors du canyon, avec des écarts dépassant 10 m/s. Cependant, ces variations sont atténuées en valeur moyenne et la dispersion horaire reste bien inférieure.

Variation moyenne de l'orientation du vent

L'angle d'incidence α du vent par rapport à l'axe du canyon est l'un des paramètres déterminant de l'effet de confinement dans la cavité constituée par le canyon. L'angle moyen horaire est calculé à partir du cosinus et du sinus moyen, de l'angle mesuré α sur le site, selon le schéma présenté à la Figure 5-12.

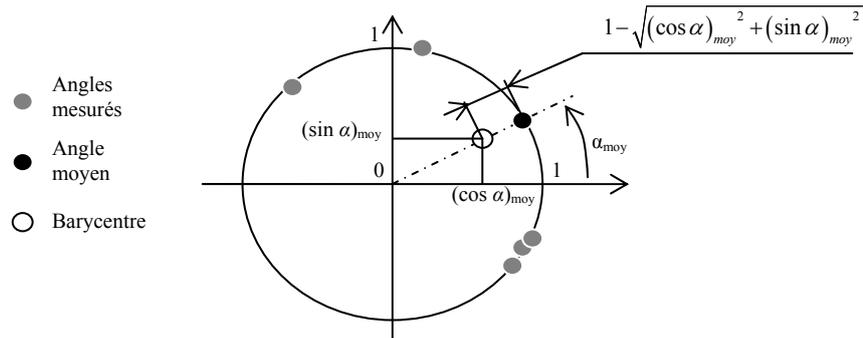
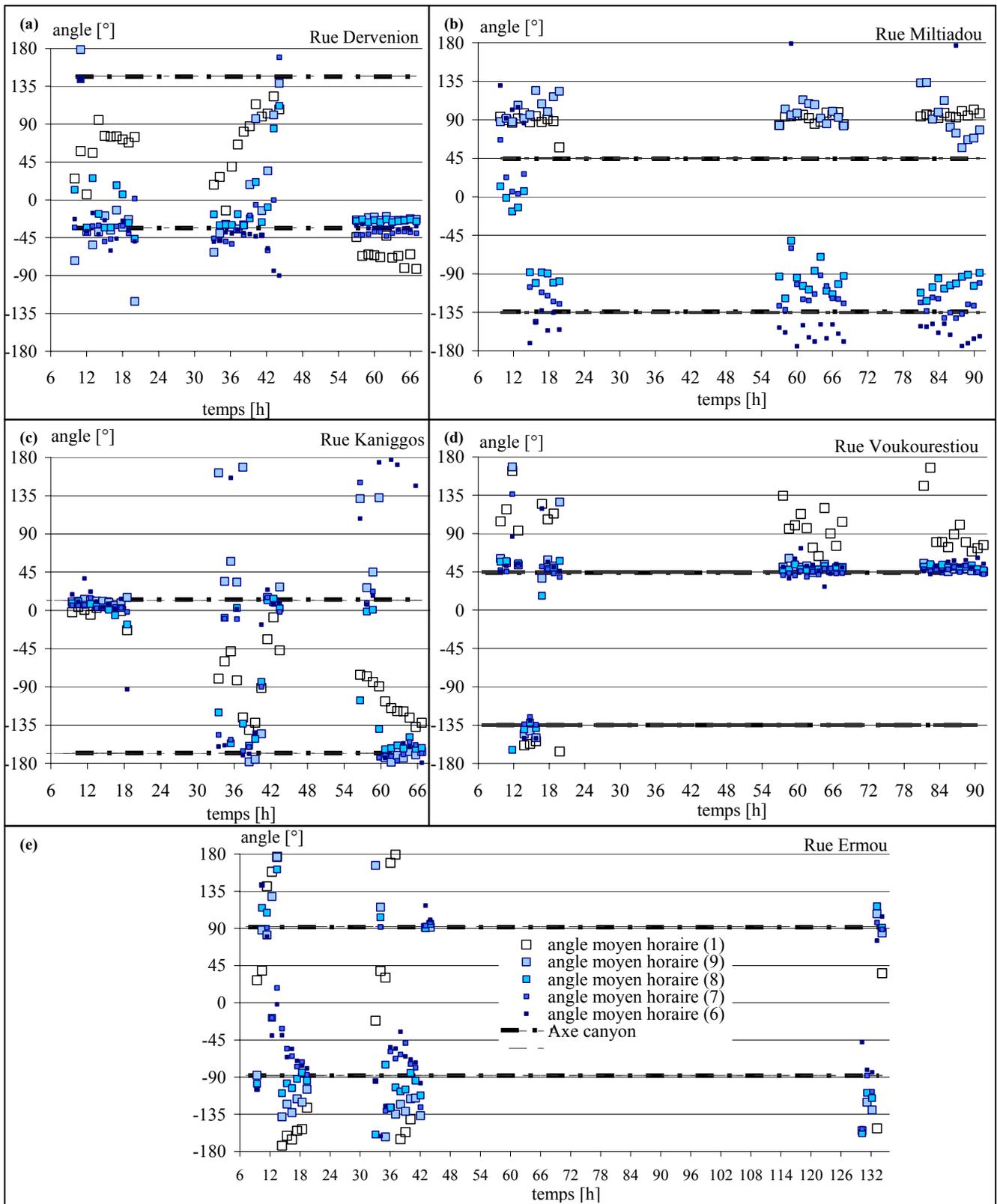


Figure 5-12 - Détermination de l'orientation moyenne barycentre des orientations instantanées et de la dispersion déterminée proportionnellement à la distance du barycentre au bord du cercle.

Ces deux valeurs $(\cos \alpha)_{\text{moy}}$ et $(\sin \alpha)_{\text{moy}}$ nous permettent alors de définir une direction moyenne d'angle α_{moy} , et la dispersion angulaire par rapport à cette moyenne peut être définie en degrés par l'expression suivante :

$$360 \cdot \left(1 - \sqrt{(\cos \alpha)_{\text{moy}}^2 + (\sin \alpha)_{\text{moy}}^2} \right) \quad (5.7)$$

L'évolution des angles moyens ainsi calculés est représentée à la Figure 5-13 pour chacune des rues et pour chaque point de mesure, dans l'axe de la rue et en toiture.



de vents obliques ou perpendiculaires par rapport à l'axe du canyon. Dans la rue Miltiadou, Figure 5-13-b, ce phénomène est observé à partir du point (8), pour une incidence oblique moyenne de 45° . Cette inversion correspond à la recirculation modélisée dans l'expression du champ de vitesse empirique de Hotchkiss et Harlow, Figure 5-5.

L'orientation de l'écoulement dans le sens du canyon, dans le cas d'une incidence oblique, peut s'accompagner d'une dispersion réduite autour de l'axe du canyon comme dans le cas de la rue Dervenion, Figure 5-14.

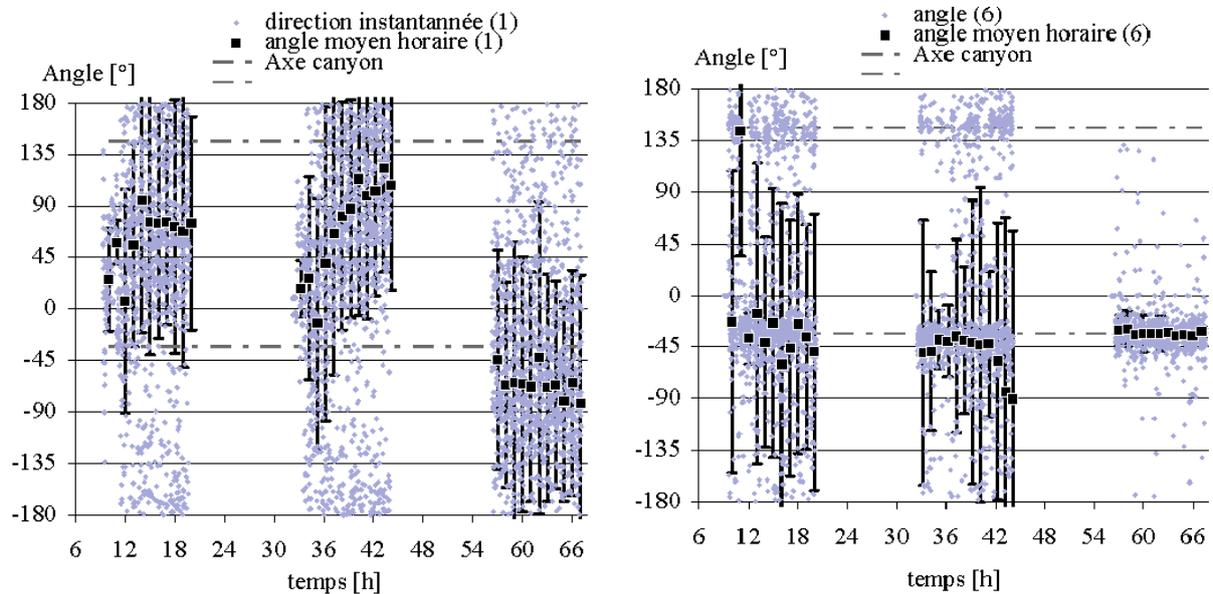


Figure 5-14 - Orientation moyenne du vent et dispersion en toiture (1) et en partie basse de la rue (6) sur 3 jours consécutifs pour la rue Dervenion

De même, L'angle d'incidence moyen du vent, en toiture, par rapport à l'axe de la rue Voukourestiou est oblique, représenté à la Figure 5-15.

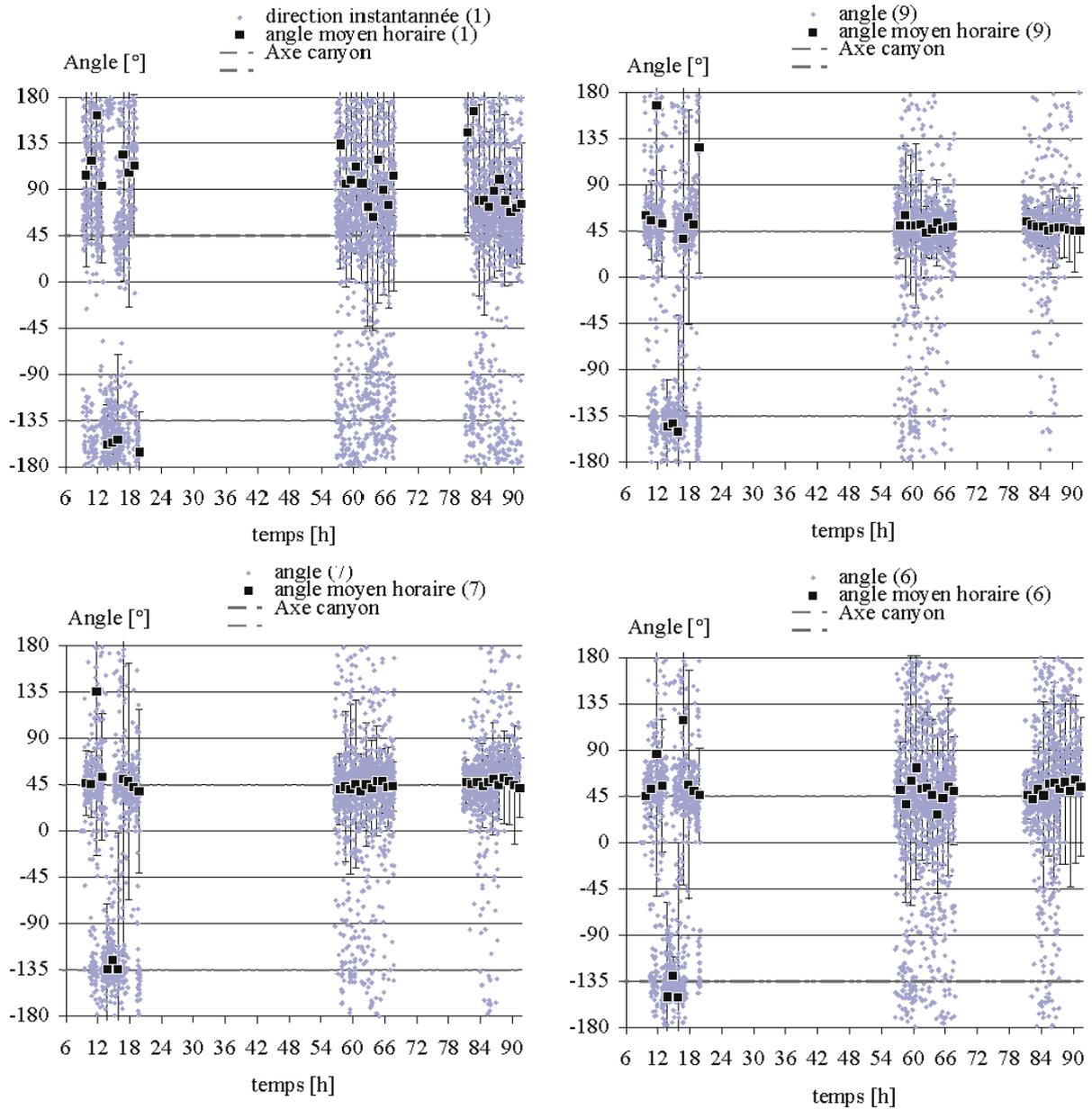


Figure 5-15 – Évolution de l'orientation moyenne du vent et dispersion de haut en bas dans l'axe de la rue Voukourestiou, aux points (9), (7) et (6) et en toiture (1) – pour 3 jours – l'axe de la rue est situé à 45°/-135°

Le vent s'oriente dans l'axe du canyon en valeur moyenne dès le point de mesure (9), à 15,5 m, phénomène qui s'accroît aux points (7) et (6). L'évolution de la dispersion de l'orientation moyenne du vent dans la rue diminue fortement avec la hauteur du point (9), à 15,5 m, au point (7), à 11,5 m. Cependant, en partie basse, point (6), cette dispersion augmente à nouveau. Des phénomènes perturbateurs près du sol peuvent partiellement expliquer cette dispersion.

Dans le cas de la rue Miltiadou, Figure 5-16, pour une direction en toiture peu dispersée, la dispersion dans le canyon devient très importante.

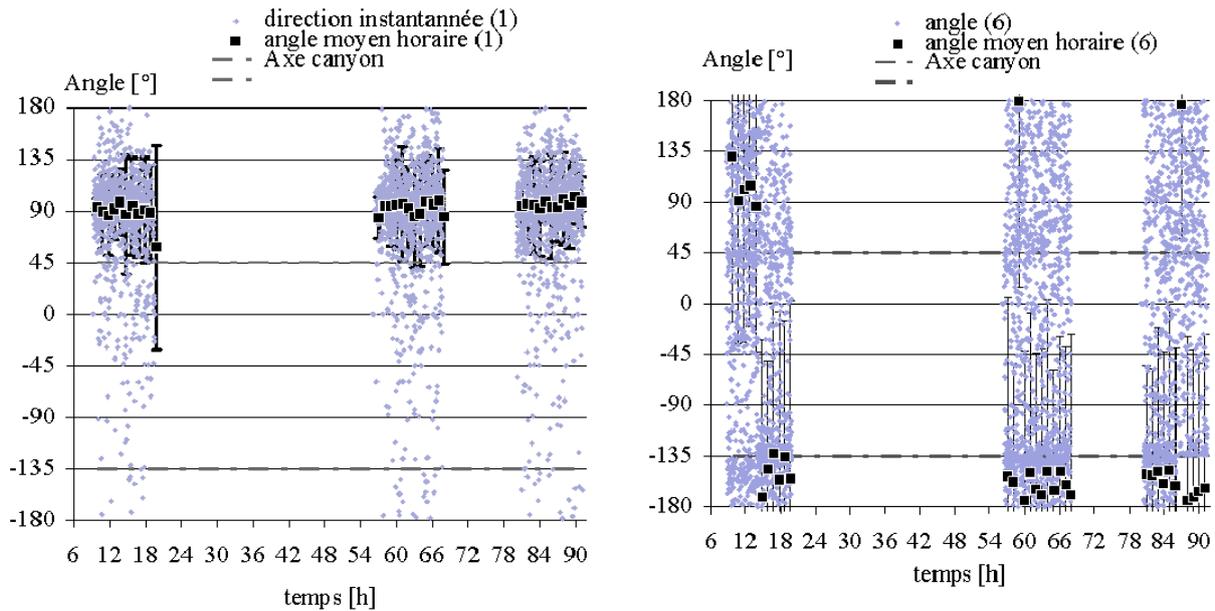


Figure 5-16 - Orientation moyenne du vent et dispersion en toiture (1) et en partie basse de la rue (6) sur 3 jours consécutifs pour la rue Miltiadou, l'axe de la rue est situé à 45°/-135°

Les valeurs de vitesse moyenne, Figure 5-10, sont ici très faibles, de l'ordre de 1 m/s, et les perturbations thermiques alors plus sensibles peuvent expliquer ces perturbations. Ce phénomène est particulièrement remarquable en partie basse de la rue où des éléments perturbateurs comme la circulation ou les éléments de surface peuvent modifier l'écoulement, en donnant naissance à des écoulements secondaires.

Les angles moyens calculés dans les différentes rues démontrent l'importance de la géométrie canyon dans l'orientation moyenne de l'écoulement dominant à l'intérieure de celle-ci. Dans la suite, nous proposons une nouvelle approche de modélisation empirique sur la base de ces valeurs moyennes de vitesse. En effet, les problèmes de corrélation entre vitesse en toiture et dans la rue observée dans le cadre de l'approche citée précédemment, paragraphe 5.1.3, sont ici atténués par l'analyse en valeur moyenne. La modélisation empirique proposée au paragraphe suivant sera enfin confrontée aux valeurs moyennes calculées ici.

5.2 Modélisation de l'écoulement moyen pour une rue de type canyon

Nous nous proposons dans cette partie d'élaborer un modèle d'écoulement moyen pour les rues de type canyon de façon à l'intégrer dans le modèle thermoaérodynamique zonal. Les relevés expérimentaux présentés dans la partie précédente montrent que même pour des vitesses moyennes très faibles, moins d'un mètre par seconde pour certains cas, une certaine corrélation entre la direction de l'écoulement moyen et celle du canyon peut être observée ainsi que pour l'évolution de la vitesse moyenne en fonction de la hauteur dans le canyon.

5.2.1 ÉLABORATION D'UN NOUVEL ALGORITHME DE DÉTERMINATION DU CHAMP DE VITESSE MOYEN POUR UNE RUE DE TYPE CANYON

Expression du champ de vitesse moyen

Nous nous plaçons ici toujours dans la configuration d'une rue de type canyon et nous reprenons les 2 scénarii de base décrits dans la partie précédente :

- ❖ Cas de l'écoulement longitudinal : le modèle exponentiel puis logarithmique de Nicholson est adopté ici, relations (2.13) et (2.15).
- ❖ Cas de l'écoulement perpendiculaire à l'axe du canyon : le modèle de recirculation de Hotchkiss et Harlow permet de décrire la recirculation transversale par la détermination des composantes verticales et transversales dans le canyon, relations (5.1) et (5.2). En dehors de l'enceinte du canyon, la description logarithmique de l'écoulement par le modèle de Nicholson de type logarithmique au dessus de la canopée urbaine est reprise.

Lorsque l'écoulement extérieur à la rue est oblique par rapport à l'axe du canyon, les recirculations observées expérimentalement pour l'écoulement transversal ont une composante longitudinale : ceci traduit une recirculation hélicoïdale dans l'axe du canyon, représentée Figure 5-17.

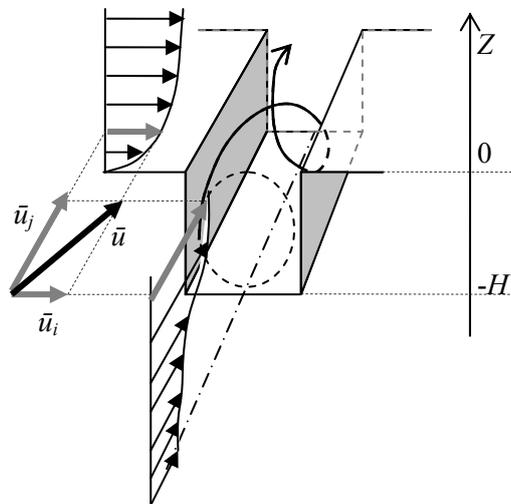


Figure 5-17 - Modélisation de l'écoulement hélicoïdal dans la rue canyon

Cet écoulement hélicoïdal peut être modélisé par une combinaison des deux modèles précédents, à partir des projections axiale \bar{u}_i et transversale \bar{u}_j de la vitesse moyenne de référence \bar{u} .

Soit d'après (2.15), (5.1) et (5.2) et si $-H < Z < 0$:

$$\begin{cases} \bar{u}_i = \frac{A}{k_H} \left(e^{k_H Z} (1 + k_H Z) - \beta e^{-k_H Z} (1 - k_H Z) \right) \sin(k_H x) \\ \bar{u}_j = U_0 \cdot e^{\frac{Z+H}{Z_0}} \\ \bar{u}_k = -AZ \left(e^{k_H Z} - \beta e^{-k_H Z} \right) \cos k_H x \end{cases} \quad (5.8)$$

En utilisant la relation (5.5), et pour $Z > 0$, on obtient :

$$\begin{cases} \bar{u}_i = \frac{u_i^*}{\kappa} \ln \left(\frac{Z + Z_d + z_{0N}}{z_{0N}} \right) \\ \bar{u}_j = \frac{u_j^*}{\kappa} \ln \left(\frac{Z + Z_d + z_{0N}}{z_{0N}} \right) \\ \bar{u}_k = 0 \end{cases} \quad (5.9)$$

Dans l'axe du canyon, la vitesse U_0 peut se déterminer par continuité au niveau des toitures :

$$U_0 = u_j^* \frac{\ln \left(\frac{Z_d}{z_{0N}} + 1 \right)}{\kappa e^{\frac{H}{Z_0}}} \quad (5.10)$$

D'autre part, u_j^* est défini pour la hauteur de référence Z^* au dessus des toitures, soit d'après (5.8) :

$$\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{Z^* + Z_d}{z_{0N}} + 1 \right) = 1 \quad (5.11)$$

soit d'après (5.6) :

$$Z^* = z_{0N} \left(e^\kappa - x_N \right) \quad (5.12)$$

Dans notre approche, nous nous sommes ici limités à des valeurs positive ou nulle de Z^* , i.e. si l'expression (5.12) donne une valeur négative alors la vitesse de couche limite rugueuse u^* est supposée mesurée au niveau des toitures, soit $Z^* = 0$. Par continuité des vitesses en toiture, l'expression suivante de U_0 est obtenue pour ce cas particulier :

$$U_0 = \frac{u_j^*}{e^{\frac{H}{Z_0}}} \quad (5.13)$$

et d'après (5.9) le paramètre Z_d devient alors :

$$Z_d = z_{0N} \left(e^\kappa - 1 \right) \quad (5.14)$$

On peut alors déterminer de façon complète le champ de vitesse moyen dans la zone de la rue canyon à partir de la vitesse en toiture u^* , mesurée à la hauteur Z^* et de son incidence moyenne par rapport à

l'axe du canyon. Cependant, cette valeur de u^* n'est pas toujours disponible. Néanmoins, à partir de la vitesse de référence u_{10} , mesurée à une hauteur de 10 mètres au dessus des toitures, et du modèle de Nicholson, on obtient :

$$u^* = \frac{\kappa \cdot u_{10}}{\ln\left(\frac{10 + Z_d}{z_{0N}} + 1\right)} \quad (5.15)$$

5.2.2 CONCEPTION D'UN MODULE DE CALCUL D'ÉCOULEMENT CANYON

Pour la modélisation thermoaéraulique retenue, le volume d'étude est partitionné en cellules aux interfaces desquelles les débits massiques doivent respecter l'équation de conservation de la masse. Le champ de vitesse proposé respecte cette condition en considérant que les variations spatiales du volume massique de l'air sont négligeables. Le module présenté permet donc le calcul des débits volumiques dus au vent aux interfaces du maillage défini dans le code thermoaéraulique.

Expression des débits volumiques moyens dans un maillage volumique du canyon

On considère une cellule ijk , ou sous volume, du maillage étudié compris entre les coordonnées x_i et x_{i+1} , y_j et y_{j+1} , Z_k et Z_{k+1} , représentée à la Figure 5-18.

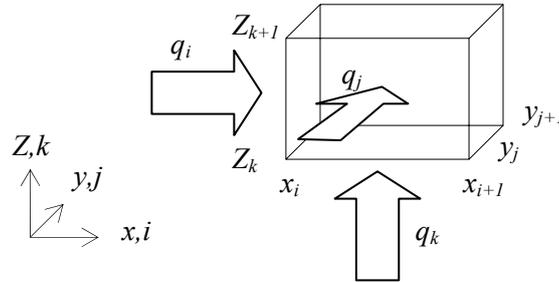


Figure 5-18 - Définition des débits volumiques q_i , q_j et q_k pour la cellule ijk

L'intégration du champ de vitesse moyen aux interfaces donne les débits volumiques aux interfaces, soit pour Z compris entre $-H$ et 0 :

$$\begin{cases} q_i = \frac{A}{k_H} \sin(k_H x_i) \left[Z (e^{k_H Z} - \beta e^{-k_H Z}) \right]_{Z_k}^{Z_{k+1}} \cdot (y_{j+1} - y_j) \\ q_j = U_0 Z_0 \left[e^{\frac{Z+H}{Z_0}} \right]_{Z_k}^{Z_{k+1}} \cdot (x_{i+1} - x_i) \\ q_k = -AZ_k (e^{k_H Z_k} - \beta e^{-k_H Z_k}) \left[\frac{\sin(k_H x)}{k_H} \right]_{x_i}^{x_{i+1}} \cdot (y_{j+1} - y_j) \end{cases} \quad (5.16)$$

et pour Z supérieur à 0 :

$$\left\{ \begin{array}{l} q_i = \frac{u_i^*}{\kappa} \left[(Z + Z_d + z_{0N}) \left(\ln \left(\frac{Z + Z_d + z_{0N}}{z_{0N}} \right) - 1 \right) \right]_{Z_k}^{Z_{k+1}} \cdot (y_{j+1} - y_j) \\ q_j = \frac{u_j^*}{\kappa} \left[(Z + Z_d + z_{0N}) \left(\ln \left(\frac{Z + Z_d + z_{0N}}{z_{0N}} \right) - 1 \right) \right]_{Z_k}^{Z_{k+1}} \cdot (x_{i+1} - x_i) \\ q_k = 0 \end{array} \right. \quad (5.17)$$

Le calcul des débits peut donc se faire pour l'ensemble des facettes du volume étudié, schématisé à la Figure 5-19, en fonction des grandeurs caractéristiques du canyon étudié, du site urbain concerné, et des conditions de vent moyen en dehors du canyon u_i^* et u_j^* .

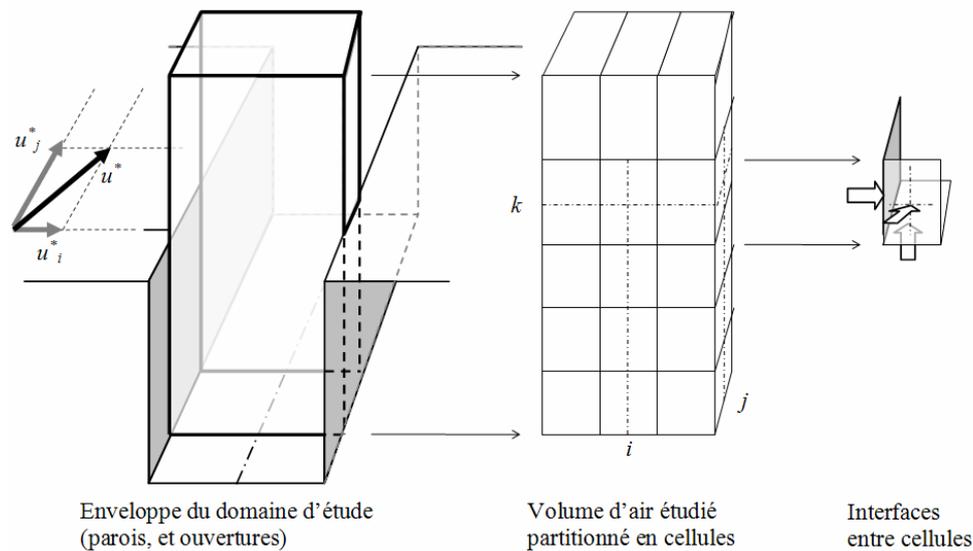


Figure 5-19 - Définition des interfaces entre cellules pour lesquelles les débits dus à l'écoulement dominant sont déterminés pour un écoulement moyenné sur une heure

Le champ de vitesse, moyenné par facette et par pas de temps d'une heure dans le volume d'étude, est ainsi reconstitué. L'écoulement ainsi déterminé respecte la loi de conservation de la masse en conditions isothermes, i.e. pour la cellule repérée ijk :

$$q_i - q_{i+1} + q_j - q_{j+1} + q_k - q_{k+1} = 0 \quad (5.18)$$

Mise en œuvre du module de calcul

Le module de calcul du champ aéraulique est réalisé en programmation orientée objet, avec le langage de programmation VisualC++. L'algorithme de calcul, Figure 5-20, reprend la démarche décrite précédemment.

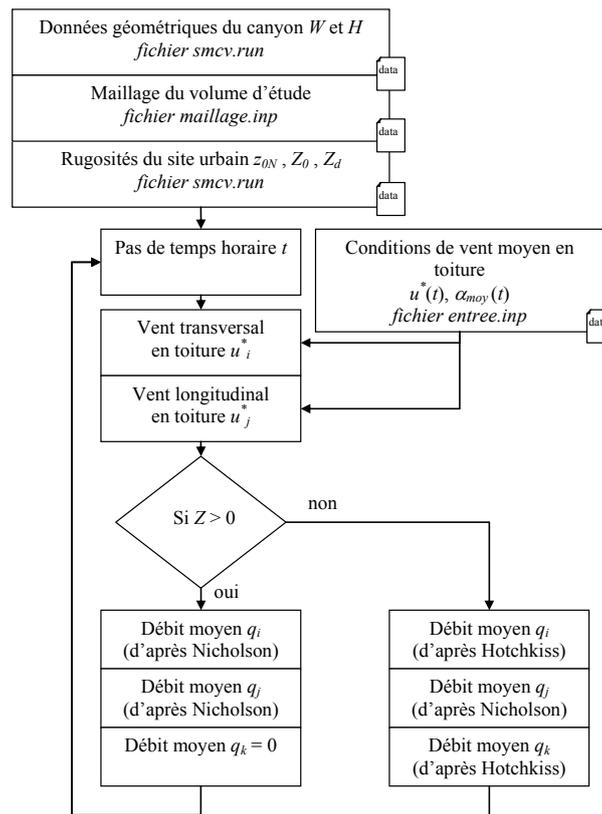


Figure 5-20 - Algorithme du module de calcul du champ des débits moyens d'une rue canyon

Les fichiers d'entrée du module sont les suivants :

- ❖ *maillage.inp* : définition du nombre de mailles et de leurs dimensions, soit la dimension du volume d'étude.
- ❖ *entree.inp* : pour chaque pas de temps d'une heure, on donne pour le vent en toiture la vitesse moyenne u^* et l'orientation moyenne α_{moy} .
- ❖ *smcv.run* : définition de la période de simulation, pas de temps horaire, des noms de fichier d'entrée et de sortie, *entree.inp* et *flow_wind_SMCV.inp*, ainsi que des dimensions du canyon.

En sortie, le module écrit les valeurs des débits dans le fichier *flow_wind_SMCV.inp*, pour chaque interface, en colonne et pour chaque pas de temps, en ligne. Le format des valeurs calculées est compatible avec le format de la plateforme de simulation SimSpark (Mora 2003; Mora et al. 2003), et notamment l'outil d'exploitation graphique des résultats. On note alors les débits aux interfaces *flw_or_i_j_k* avec *or* l'orientation de l'interface considérée, i.e. *sn* ou *eo* ou *bh* pour les orientations sud/nord ou est/ouest ou bas/haut, et *i, j* et *k* correspondent à l'indice de l'interface considérée dans le maillage défini pour le volume d'étude.

Ce module peut donc être utilisé indépendamment pour déterminer l'évolution de l'écoulement dans une rue de type canyon à partir de fichiers météo et des caractéristiques d'un site donné. Il peut aussi être couplé avec différents outils de calcul thermoaéroulrique a posteriori.

5.3 Comparaison du modèle d'écoulement moyen avec les valeurs expérimentales

5.3.1 MODÉLISATION DES RUES ÉTUDIÉES EXPÉRIMENTALEMENT

La période de simulation pour chaque rue étudiée concerne l'ensemble de la période incluant les journées de mesures. Les relevés météorologiques de l'Université d'Athènes, à quelques kilomètres du centre de la ville où se situent les rues concernées, permettront de compléter ces mesures en dehors des périodes d'expérimentation. Les paramètres géométriques des canyons sont donnés par le Tableau 5-1.

Calcul de la rugosité

La rugosité du site urbain, variable pour chaque rue, est difficile à évaluer étant donnée l'hétérogénéité des constructions et le manque de définition des alentours. Aussi, cette valeur est évaluée à partir de la valeur de vitesse moyenne à 10 mètres u_{10} mesurée sur le site universitaire, de la vitesse moyenne en toiture u^* et du modèle empirique de Nicholson, équation (5.9). La vitesse de référence est supposée identique sur le site de la rue à 10 mètres au dessus des bâtiments et sur le site universitaire à 10 mètres du sol, en terrain considéré homogène. L'erreur due à cette hypothèse est variable en fonction de la rugosité plus ou moins forte de la rue étudiée, mais elle est atténuée par la diminution de la perturbation de surface avec la hauteur de la valeur mesurée. Soit, d'après la relation (5.15) :

$$\frac{10}{z_{0N}} + \frac{Z_d + z_{0N}}{z_{0N}} = e^{\kappa \frac{u_{10}}{u^*}} \quad (5.19)$$

Dans l'hypothèse où l'expression (5.12) de Z^* est positive, Z_d peut être exprimé à partir des paramètres z_{0N} et x_N par la relation (5.6) ; d'où la nouvelle expression de (5.19) :

$$\frac{10}{z_{0N}} + x_N = e^{\kappa \frac{u_{10}}{u^*}} \quad (5.20)$$

Par ailleurs, x_N peut être estimé en fonction de z_{0N} (Nicholson 1975) par la relation (2.10) en considérant que la hauteur moyenne z_H des bâtiments environnants correspond à la hauteur du canyon H . On en déduit, à partir de l'équation (5.20), l'expression suivante de x_N :

$$\frac{10}{H} \sqrt{10x_N \ln(x_N)} + x_N = e^{\kappa \frac{u_{10}}{u^*}} \quad (5.21)$$

La rugosité du site z_{0N} est alors évaluée à partir de la relation (2.10), connaissant la hauteur de la rue H et le paramètre x_N calculé.

Cependant, si la valeur de Z^* déterminée par la relation (5.12) est négative, celle-ci est alors fixée à 0 et Z_d est définie par la relation (5.14). z_{0N} s'exprime alors à partir de (5.19) :

$$z_{0N} = \frac{10}{e^{\kappa \frac{u_{10}}{u^*}} - e^{\kappa}} \quad (5.22)$$

Par ailleurs, la rugosité Z_0 peut, d'après (Nicholson 1975), être estimée par (2.12), soit :

$$Z_0 \approx \frac{W \cdot H}{z_{0N}} \quad (5.23)$$

Enfin, les valeurs de z_{0N} peuvent ainsi être déterminées pour chaque pas de temps horaire où l'on dispose des valeurs moyennes de u^* sur le site étudié et de u_{10} en sur le site de la station météorologique.

En première approche nous utiliserons pour la modélisation la valeur moyenne calculée de z_{0N} pour chaque rue considérée, Tableau 5-2.

Tableau 5-2- Rugosité z_{0N} moyenne calculées à partir des valeurs moyennes de vitesses pour les rues étudiées à Athènes

Rue	Ermou	Miltiadou	Voukourestiou	Kaniggos	Dervenion
z_{0N} [m]	13,8	0,9	5,8	13,0	8,8

Dans le cadre d'un projet non bâti ou en l'absence de valeurs mesurées, il faudrait utiliser un modèle empirique de détermination des paramètres de rugosité. Cependant de fortes variations d'une rue à une autre sont observées ponctuellement ; cela vient notamment de la dépendance entre z_{0N} et l'incidence du vent α par rapport à l'axe de la rue. Un autre paramètre influent est la vitesse du vent de référence u^* , et une étude expérimentale suffisamment complète permettrait d'établir une relation $z_{0N}(\alpha, u^*)$ pour la rue considérée. Dans notre cas, pour une même rue, les scénarii d'orientation moyenne de vent varient peu, et nous nous limitons donc aux valeurs moyennes calculées des paramètres de rugosité.

Détermination des scénarii de vent pour la période considérée

La vitesse de référence utilisée dans le modèle d'écoulement est ici la vitesse en toiture considérée comme étant égale à u^* . Pour les pas de temps horaires où celle-ci n'est pas mesurée, la nuit et les jours intermédiaires sans mesures, sa valeur est estimée à partir de la relation (5.15) et des paramètres moyens de rugosité déterminés précédemment. La vitesse moyenne à 10 mètres utilisée correspond alors à la valeur relevée sur le site universitaire d'Athènes, et l'orientation du vent peut être faussée.

Pourtant, pour les différentes rues, les valeurs calculées suivent très bien les valeurs moyennes, comme dans le cas de la rue Miltiadou, Figure 5-21, où l'écart moyen est de 0,16 m/s et au maximum de 0,5 m/s.

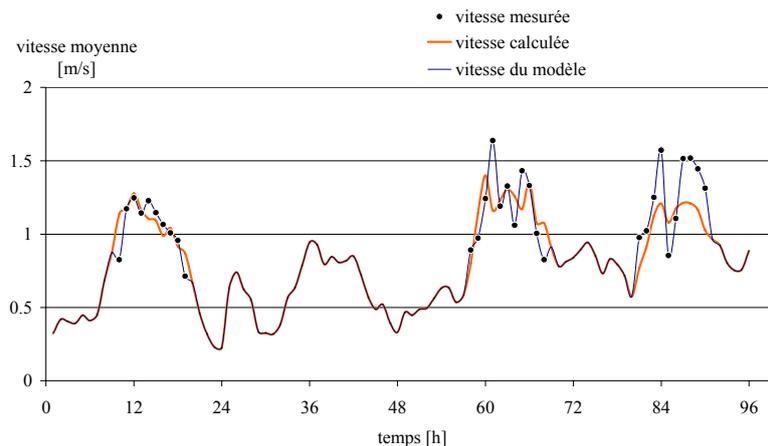


Figure 5-21 - Cas de la rue Miltiadou : vitesse moyenne en toiture déterminée à partir des mesures et par le calcul à partir des données météorologiques en dehors de la ville. La valeur utilisée dans le modèle sera la valeur moyenne de mesure lorsqu'elle est disponible.

Pour plus de précision dans la simulation, nous utilisons les valeurs mesurées sur site disponibles, complétées par les valeurs interpolées dans le cas où il n'y a pas de relevé sur site.

5.3.2 CALCULS ET COMPARAISONS AVEC LES VALEURS EXPÉRIMENTALES

Les fichiers d'entrées sont générés à partir des données sur le vent moyen en toiture, angle et vitesse, ainsi que de la définition du site étudié, géométrie du canyon, paramètres de rugosité du site. Le code de calcul génère alors en sortie un fichier contenant les débits pour chaque pas de temps qui permet de décrire complètement les transferts dus au vent aux interfaces des volumes du maillage choisi. L'écoulement moyen obtenu peut être alors représenté à partir des écoulements obtenus à chaque interface du maillage, comme sur la Figure 5-22 à un instant donné.

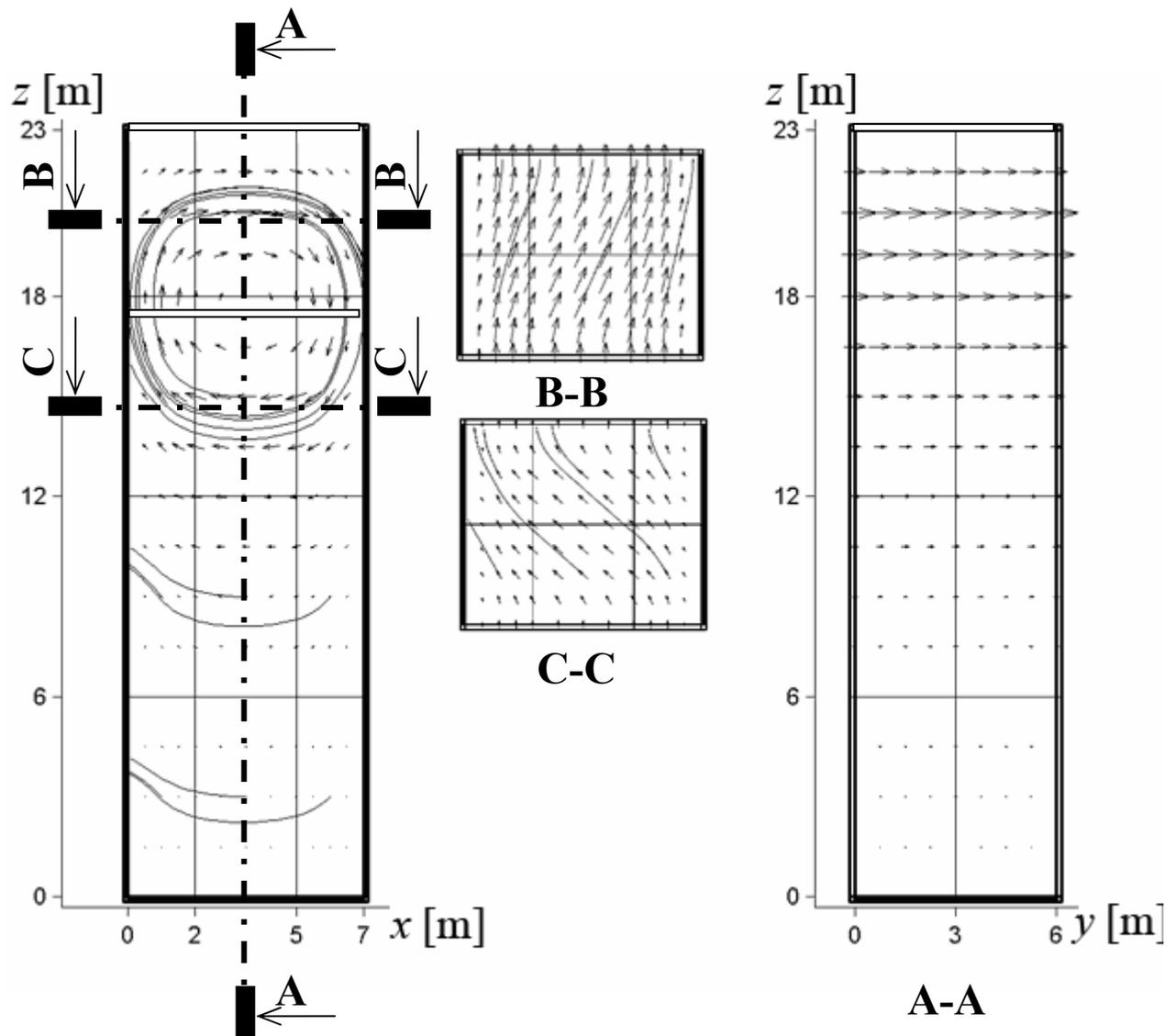


Figure 5-22- Exemple de champ de vitesse moyen déterminé pour la rue Dervenion et un angle d'incidence oblique par rapport à l'axe de la rue.

La visualisation de l'évolution du champ de vitesse moyen montre bien ici la recirculation due à la composante transverse de la vitesse de vent ainsi que l'évolution exponentielle dans l'enceinte du canyon pour l'écoulement longitudinal au centre sur l'axe de la rue. Les coupes horizontales révèlent l'effet d'écoulement hélicoïdal dû à la combinaison des trois composantes.

Pour l'ensemble des rues, la comparaison des vitesses calculées et des vitesses mesurées montre, comme dans le cas de la rue Kaniggos Figure 5-23, une bonne concordance entre le modèle et les mesures.

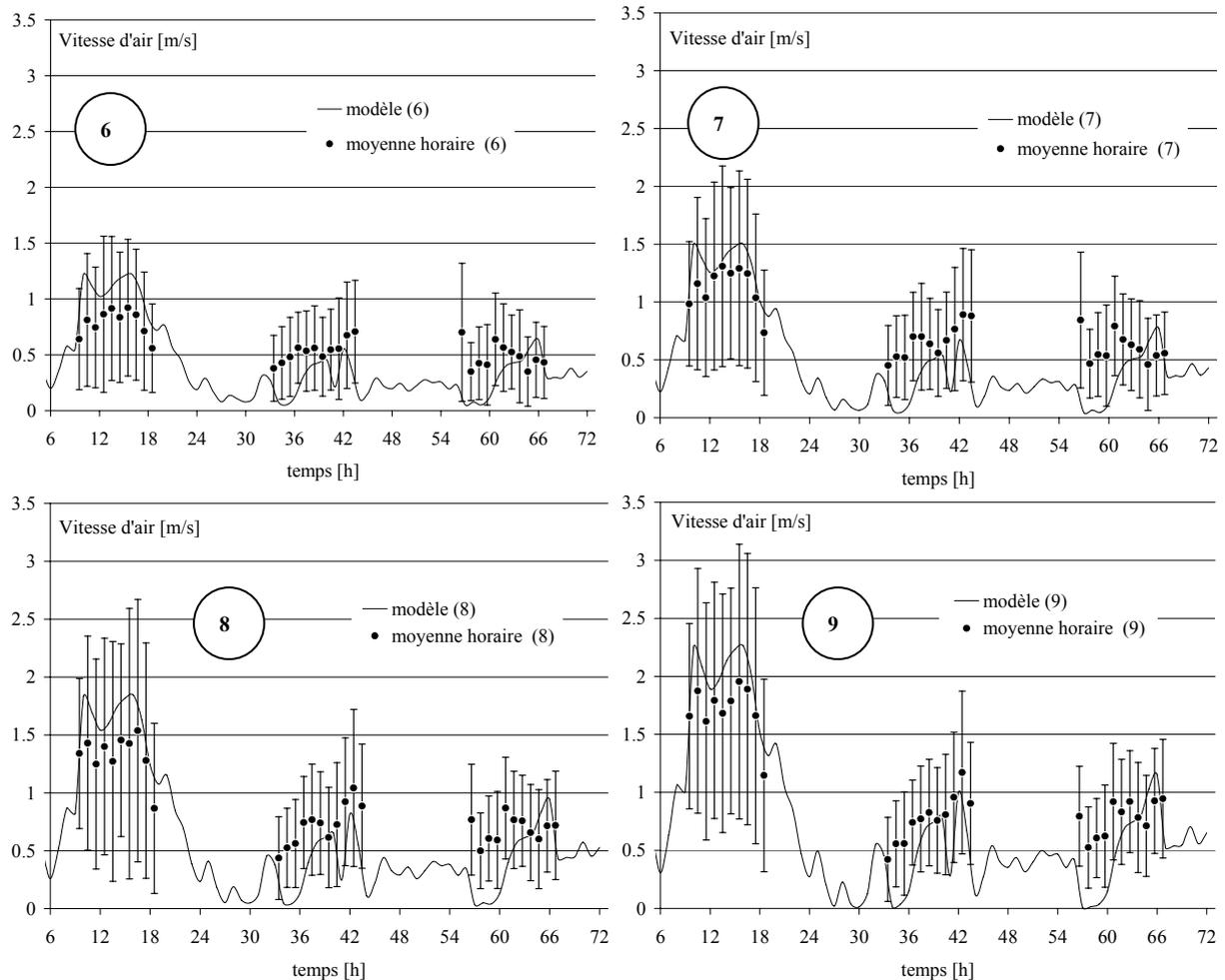


Figure 5-23 - Cas de la rue Kaniggos, variation de la vitesse moyenne déterminée par le modèle empirique proposé et par les mesures.

Les valeurs de vitesse moyenne calculées par le modèle restent le plus souvent dans la marge de dispersion des valeurs mesurées avec un écart relatif moyen aux points de mesure (6), (7), (8) et (9), respectivement de 11,9 %, 22,7 %, 15,4 % et 12,7 % par rapport à la vitesse moyenne calculée. La différence, entre les résultats du modèle et les valeurs moyennes mesurées, est au maximum de 0,7 m/s. Néanmoins, l'atténuation de la vitesse dans le canyon apparaît de la même façon pour les valeurs moyennes calculées et mesurées. De plus, les écarts relevés ne sont pas directement corrélés avec la hauteur du point de mesure, ni avec la vitesse moyenne en dehors de la zone d'étude. Ils sont pour tous les points de mesure du même ordre, et les écarts maximums sont relevés simultanément sur ces points, ce qui peut correspondre à des phénomènes perturbateurs non pris en compte ou à une erreur systématique du modèle pour certains scénarii de vent.

Dans le cas de cette rue, selon la Figure 5-24, la circulation d'air est principalement axiale.

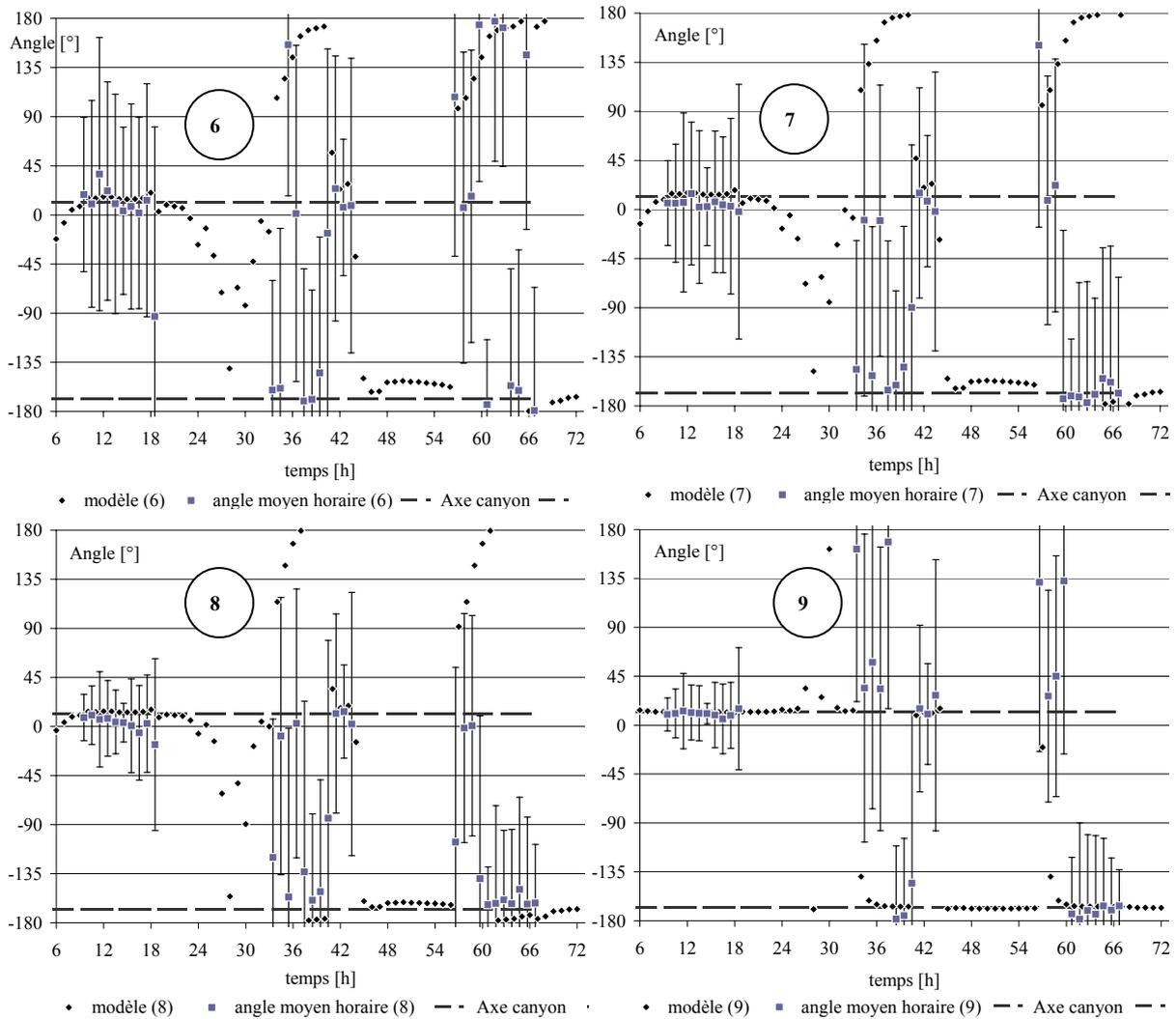


Figure 5-24 - Cas de la rue Kaniggos, variation de l'orientation moyenne de l'écoulement en partie basse, points (6) et (7), et en partie haute du canyon, points (8) et (9), déterminée par le modèle et par les mesures.

Les angles calculés par le modèle sont généralement très proches des valeurs moyennes de mesure, sauf pour certaines heures qui coïncident avec les erreurs maximales sur l'estimation de la valeur de la vitesse. La différence moyenne, entre valeurs expérimentales et valeurs calculées sur la période de mesure, pour les points de mesure (6), (7), (8) et (9) est respectivement de 40° , 48° , 50° et 31° . Ces écarts sont amplifiés par les erreurs sur la vitesse constatée précédemment. Néanmoins, le modèle décrit ici correctement le comportement général de l'écoulement qui devient axial à l'intérieur du canyon pour des angles d'incidence obliques en toiture, comme c'est le cas pour le deuxième et le troisième jour d'après la Figure 5-13-c.

De même, pour le cas des autres rues, les corrélations reproduisent correctement l'évolution des vitesses dans la hauteur de l'axe du canyon, avec des différences ponctuellement élevées dans la détermination de l'orientation de l'écoulement, qui est parfois inversée. Il se peut qu'il se produise des recirculations secondaires, principalement en partie basse de la rue, ce qui pourrait expliquer un sens de recirculation prédit par notre modèle empirique erroné en certains points. Ce phénomène de recirculations multiples est d'autant plus probable que la rue est profonde.

5.4 Bilan et perspectives pour le module de calcul du champ de vitesse dû au vent

L'analyse du champ de vitesse moyenne nous a permis d'identifier des corrélations entre l'évolution de l'écoulement en toiture et à l'intérieur de rues de type canyon, même pour de très faibles vitesses. Le modèle empirique utilisé donne des résultats satisfaisants pour l'évolution des vitesses car il traduit bien la variation de vitesse moyenne dans la profondeur du canyon. Cependant, des écarts notables sont ponctuellement observés, lorsque l'orientation moyenne de l'écoulement est oblique par rapport à l'axe de la rue principalement. En effet, les expériences ont permis de montrer que la géométrie canyon avait tendance à canaliser l'écoulement, phénomène qui pourrait être intégré dans le calcul des composantes horizontales transverses et longitudinales. Les erreurs systématiques engendrées par l'utilisation d'un tel modèle permettent toutefois d'envisager son utilisation pour des études paramétriques sur des configurations simples de rues de type canyon. Ces équations empiriques simples seront utilisées dans la suite pour une étude plus complète des transferts thermoaérauliques dans une rue en condition non isothermes. Les perturbations thermiques liées à l'ensoleillement, abordé au Chapitre 4, seront couplées à l'écoulement dominant ainsi défini.

Pour que le modèle soit plus précis la distorsion de l'orientation du champ de vitesse, par la forme du canyon, devrait être prise en compte, et pourrait se traduire par la mise en place d'un coefficient réducteur sur le calcul de la composante transversale qui serait d'autant plus important que l'incidence serait proche de l'axe du canyon. Cet effet tridimensionnel dépend aussi de la longueur du canyon, et dans le cas d'une rue de longueur relativement peu importante, par rapport à la largeur et à la hauteur, ou d'une rue canyon composée de nombreuses intersections, l'effet de distorsion peut être variable sur la longueur.

Ce modèle simplifié de recirculation due à l'écoulement dominant dans une rue canyon, pourrait donc être amélioré et généralisé :

- ❖ pour tenir compte de la longueur du canyon et des effets de bord,
- ❖ pour des bâtiments de hauteur différente de part et d'autre de la rue : le même type d'approche pourrait être utilisé, avec une adaptation du modèle pour décrire les recirculations secondaires,
- ❖ pour d'autres formes urbaines proches du canyon, telles que les blocs avec cour intérieure,
- ❖ la combinaison de modèles empiriques peut être envisagée pour modéliser l'écoulement autour de formes plus complexes.

Ainsi la constitution d'une bibliothèque de modèles empiriques pour les formes urbaines classiques permettrait d'envisager une étude plus complète de solutions architecturales et d'urbanisme. Cependant pour permettre une comparaison entre différentes configurations il faut veiller à ce que les erreurs systématiques des modèles simplifiés utilisés restent faibles ou varient de façon similaire.

Chapitre 6

Étude couplée des phénomènes thermoaérauliques pour

une rue de type canyon - application à l'étude énergétique

de bâtiment en milieu urbain

Dans l'étude du comportement thermoaéraulique d'une rue au cours d'une saison, des périodes de ventilation due à un écoulement dominant de grande échelle alternent avec des périodes de stabilité atmosphérique pour lesquelles l'ensoleillement devient le principal moteur des écoulements locaux. Entre ces différentes périodes, une superposition de ces phénomènes peut se produire, sans que l'un ne soit complètement prédominant et que l'autre ne soit négligeable. L'étude de ces scénarii météorologiques et de leur interaction avec les bâtiments est essentielle dans le contexte du microclimat urbain et du phénomène d'îlot de chaleur, critique en période estivale.

Dans ce chapitre, nous développons le couplage des modèles simplifiés de rayonnement solaire et d'écoulement dominant avec l'approche zonale présentée dans les chapitres précédents. Cette modéli-

sation est alors appliquée au cas réel de la rue canyon et comparé aux résultats expérimentaux obtenus dans le cadre du projet Urbvent (Santamouris et al. 2001a). Enfin, les possibilités d'utilisation de cette méthode pour l'étude du phénomène d'îlot de chaleur, ainsi que de son impact sur les sollicitations climatiques en façade de bâtiment, sont ensuite détaillées pour le cas de la rue Dervenion à Athènes, sur une période totale de simulation de 28 jours en été.

6.1 Principe d'intégrations des phénomènes microclimatiques dans le calcul des échanges thermoaérauliques

6.1.1 DÉFINITION EMPIRIQUE DU COUPLAGE DES FORCES DE POUSSÉE THERMIQUE ET DE L'ÉCOULEMENT DOMINANT

L'approche zonale développée au Chapitre 3 nous a permis de modéliser, au Chapitre 4, l'impact de l'ensoleillement sur l'écoulement et les transferts thermiques dans une rue de type canyon pour une journée type. Ces mouvements d'air dus à la convection naturelle se superposent aux mouvements d'air dû à des perturbations de plus grande échelle comme le vent ou à d'autres éléments tels que la circulation automobile ou un système de conditionnement d'air. En fonction de la forme de l'écoulement dominant et de l'élément de paroi considéré, la combinaison de ces deux phénomènes peut avoir différentes conséquences sur l'écoulement d'air total dans la cellule considérée. Ce calcul de l'écoulement s'effectue en plusieurs étapes selon le schéma représenté à la Figure 6-1.

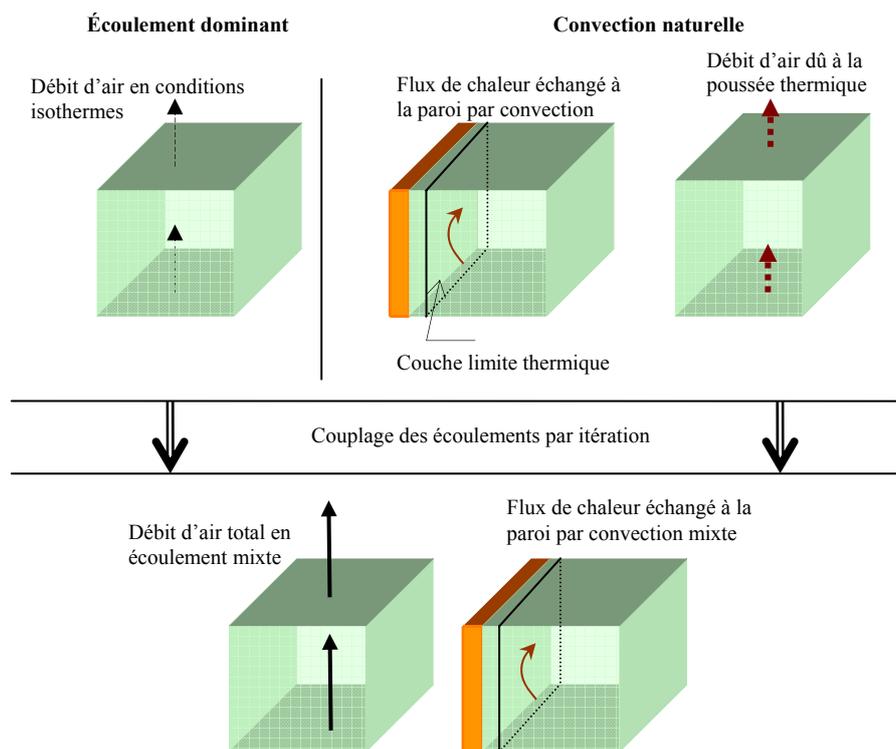


Figure 6-1- Couplage des écoulements dominants et de la convection naturelle par itération pour un volume d'air en contact avec un élément de paroi

L'écoulement dominant, déterminé en conditions isothermes, permet de définir des débits d'air aux interfaces. L'air au contact d'un élément de paroi échange par convection, les conditions de température en surface étant liées à l'ensoleillement et aux phénomènes de conduction. Une fine couche limite thermique se forme alors en convection naturelle ; celle-ci est déterminante dans les échanges convectifs. Les transferts thermiques par convection et transport permettent alors de déterminer les conditions de température et de pression dans le volume d'air considéré ; ces conditions déterminent l'écoulement moyen dû à la poussée thermique. Le calcul des nouvelles conditions de température et de pression à partir de la somme des écoulements dominants et de convection naturelle modifie les échanges de cha-

leur aux interfaces du volume d'air considéré. Les échanges par convection au niveau des parois sont aussi modifiés. La résolution itérative ou simultanée des équations de transfert thermique et de transport permettent de définir une solution d'écoulement global associée à des échanges convectifs et un bilan thermique équilibré. Le résultat de ce couplage n'est pas toujours évident a priori, comme dans le cas où un écoulement dominant descendant s'oppose à une force de poussée thermique ascendante.

Dans la suite de l'étude, cette méthode est mise en œuvre pour le cas d'un écoulement moyen établi sur des pas de temps horaires et, à cette échelle de temps, l'écoulement moyen est assimilé à un régime établi. Les débits et les flux de chaleur ainsi calculés permettent d'estimer l'évolution des températures moyennes par zones et par surfaces et donc une appréciation de la charge énergétique d'un bâtiment qui pourra éventuellement être couplée avec l'étude d'un système de traitement des ambiances intérieures.

6.1.2 INTÉGRATION AU MODÈLE ZONAL DU COUPLAGE DES ÉCOULEMENTS DOMINANTS ET DE LA CONVECTION NATURELLE

Dans la méthode zonale en pression définie au Chapitre 3 les lois de conservation et les modèles empiriques permettent de déterminer les cinq variables d'état suivantes :

- ❖ La masse volumique de l'air ρ_{ijk} pour chaque cellule ijk ,
- ❖ La température de l'air T_{ijk} pour chaque cellule ijk ,
- ❖ L'écart de pression entre chaque cellule, moteur de l'écoulement, Δp_u aux interfaces,
- ❖ Le débit massique d'air aux interfaces Q_u ,
- ❖ La température de surface des éléments de paroi ou facettes T_{su} .

Le calcul de ces variables pour chaque pas de temps horaire est réalisé à partir des cinq relations principales établies au Chapitre 3 : la conservation de la masse, équation (3.55), la loi d'écoulement en pression, équations (3.56) et (3.57), la loi des gaz parfaits, équation (3.58), la loi de conservation de l'énergie thermique, équation (3.59), et les bilans thermiques de paroi décrits au paragraphe 3.4.3.

L'intégration d'un écoulement dominant à ce modèle général doit s'effectuer en accord avec les différentes lois physiques précédentes. Le modèle de vent dominant décrit au chapitre précédent donne une prédiction du champ de vitesse moyen en conditions isothermes. Le code de calcul développé donne ces résultats sous la forme des débits volumiques moyens horaires aux interfaces qui s'expriment aussi sous la forme de débits massiques $Q_{u,vent}$ en fonction de la densité ρ_{ijk} de la cellule concernée. L'hypothèse d'isothermie, densité moyenne constante sur l'ensemble du domaine étudié, nous permet de définir un champ de vitesse dû au vent qui respecte la conservation de la masse, i.e. :

$$\sum_u Q_{u,vent} = 0 \quad (6.1)$$

Le débit massique total Q'_u est alors défini pour l'interface u en fonction du débit dû à l'écoulement local Q_u et à l'écoulement dominant $Q_{u,vent}$:

$$Q'_u = Q_u + Q_{u,vent} \quad (6.2)$$

avec Q_u défini d'après les équations de conservation de la masse et la loi d'écoulement en pression. Le débit total Q'_u respecte donc lui aussi la loi de conservation de la masse. La loi des gaz parfaits est appliquée aussi ici pour déterminer la densité en fonction de la température d'air.

Le bilan de l'enthalpie s'exprime alors pour une cellule ijk en fonction des flux ϕ'_u entrant ou sortant du volume de contrôle aux interfaces u :

$$\rho_{ijk} c_v V_{ijk} \frac{\partial T_{ijk}}{\partial t} = \sum_u (\phi'_u + \phi_{conv,u}) + \phi_{source} \quad (6.3)$$

et au niveau de l'interface u de surface S_u , en négligeant la diffusion thermique par rapport au flux de transport pour l'air, ϕ'_u s'exprime en fonction de l'écart de température entre la cellule ijk et la cellule adjacente, de température T_u , ainsi que le flux de convection en cas de contact avec une paroi :

$$\phi'_u = c_v Q'_u (T_u - T_{ijk}) + h_{conv,u} S_u (T_{su} - T_{ijk}) \quad (6.4)$$

Les températures de surface T_{su} des parois sont toujours définies par le bilan thermique des facettes dans lequel intervient le flux thermique de convection.

Les cinq variables définies auparavant sont donc calculées par les mêmes équations de conservation modifiées par l'écoulement dominant.

La résolution de ce problème peut être menée avec l'outil SPARK ; ces équations définissent alors des classes génériques associées à des objets tels que cellules, interfaces ou facettes. Dans la définition des classes macroscopiques pour un modèle zonal décrites par Mora (Mora 2003) il faut ajouter l'influence de l'écoulement dominant et modifier en conséquence les classes d'écoulement comme décrit en Annexe A. Cette modification de la librairie de modèles SPARK nécessite aussi une réécriture des fichiers de spécification de problème pour SPARK. C'est dans ces fichiers que sont spécifiés les liens entre classes macroscopiques ainsi que leur utilisation dans le volume étudié et les liens avec les conditions aux limites et initiales du problème. Un outil tel que SimSPARK (Mora et al. 2003) permet de générer ces fichiers de simulation dans le cadre de l'étude des ambiances intérieures des bâtiments, et pourrait être complété par la prise en compte de ces nouveaux phénomènes propres à l'environnement extérieur. Cependant la résolution de ces nouvelles équations par SPARK peut se révéler ardue de par la difficulté de convergence des solutions lors de fortes variations météorologiques dues à l'ensoleillement direct ou au vent dominant. Pour limiter ces variations il est alors possible de résoudre le problème sur un pas de temps plus fin ou variable.

Nous avons retenu ici une résolution simplifiée itérative développée en VisualC++ et utilisée précédemment pour l'étude de l'impact de l'ensoleillement. Sur la Figure 6-2 est explicitée l'intégration dans cet algorithme général de la modification de l'écoulement total par l'écoulement dû au vent dominant. À partir des températures, définies par des variables d'itération, le calcul de l'écoulement en pression propre à la modélisation zonale permet de définir les débits massiques associés aux interfaces. L'intégration des débits massiques dus au vent dans le bilan thermique des cellules permet alors de définir de nouvelles conditions de température. L'écoulement en pression est donc modifié ainsi que le bilan thermique au niveau des parois. Lorsque les critères de convergence sont atteints, i.e. le régime est établi, le pas de temps est incrémenté d'une heure.

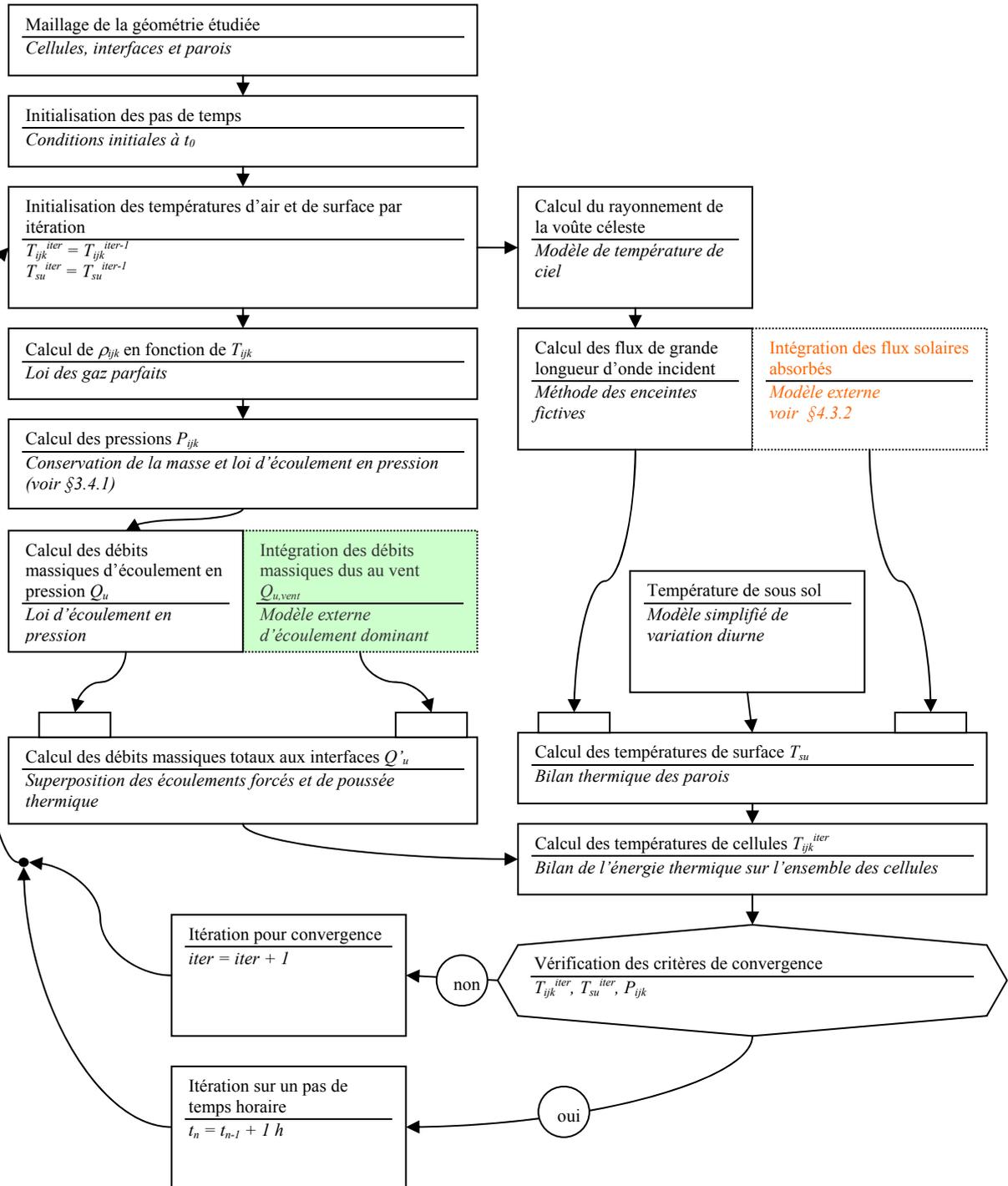


Figure 6-2- Algorithme de couplage des écoulements dans une modélisation thermoaéroulrique zonale résolue par une méthode itérative

6.2 Comparaison du modèle thermoaéraulique couplé avec les mesures

6.2.1 DÉFINITION DU DOMAINE D'ÉTUDE

La méthode de couplage thermoaéraulique développée ici est appliquée dans cette partie à l'étude de la rue Dervenion, à Athènes, dont l'étude expérimentale menée en 2001 dans le cadre du projet européen URBVENT a été décrite au chapitre précédent. Les mesures ont été réalisées en journée du 4 au 6 septembre 2001. Aussi, nous nous proposons de réaliser une simulation sur cette rue de type canyon pendant une période de 28 jours, du 10 août au 6 septembre, ce qui permet d'avoir les conditions pour les jours de mesure en tenant compte des conditions climatiques antérieures. Ce type de simulation est intéressant pour l'étude du comportement thermoaéraulique sur une saison complète, et les résultats peuvent s'avérer utiles pour l'étude énergétique globale des bâtiments de par et d'autre de la rue. Ainsi, dans cette première approche, la simulation donne une estimation des températures de surface en façade ainsi que les transferts de chaleur avec la rue, données essentielles pour la détermination des charges des locaux adjacents.

L'étude porte sur un tronçon de la rue, en partie courante, selon un maillage en $5 \times 3 \times 6$ cellules dont les dimensions sont données à la Figure 6-3.

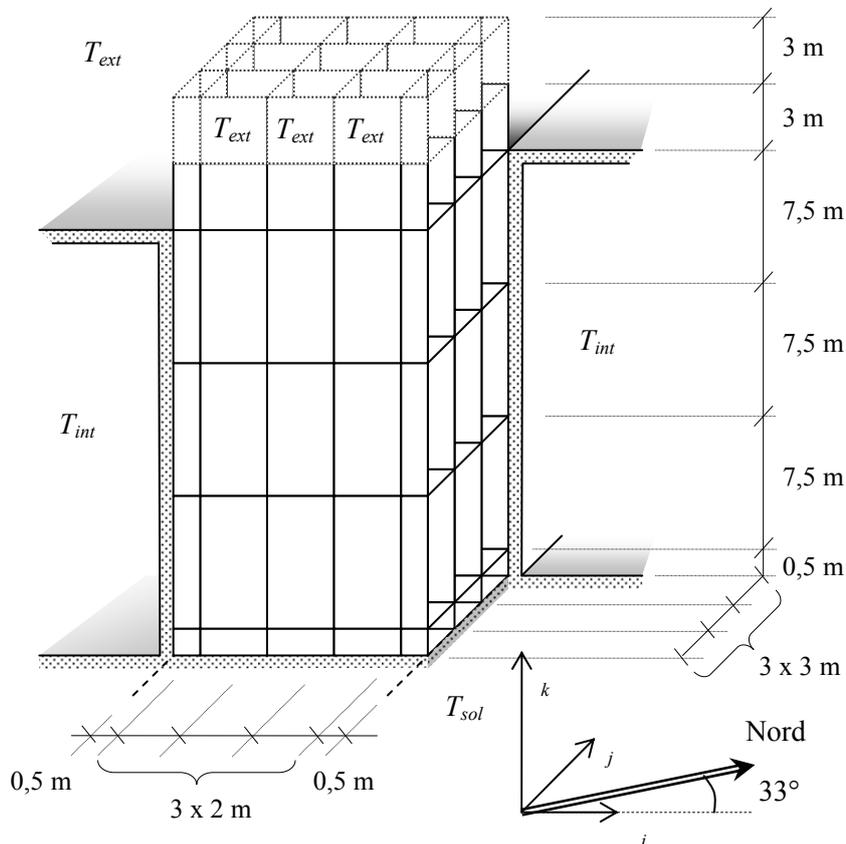


Figure 6-3- Maillage du tronçon d'étude de la rue Dervenion selon les directions i, j et k

La géométrie de la rue est simplifiée sans prise en considération d'éléments spécifiques de façade tels que balcons ou anfractuosités, ainsi que les obstacles éventuels au niveau du sol. Cependant, pour permettre un calcul plus précis des échanges convectifs, au niveau des parois, le maillage est resserré ; en effet le flux de chaleur convecté dépend de l'écart entre la température de la surface et la température moyenne de l'air proche de cette surface. Une modélisation précise de l'écoulement d'air près des façades nécessiterait une description complète de la forme de la surface ainsi que l'intégration d'un modèle complémentaire de couche limite. Dans le sens longitudinal, le maillage est décomposé en trois tronçons, les conditions en pression du tronçon central sont alors définies en fonction des condi-

tions atmosphériques déterminées par la simulation de part et d'autre de ce tronçon. Le volume de la rue est ainsi partitionné en trois zones principales dans la hauteur, ce qui permet d'étudier les recirculations principales ainsi que de différencier l'évolution des températures et des flux de chaleur en partie basse, centrale et haute de la rue. Un niveau intermédiaire de cellules a été défini au niveau des toitures de façon à prendre en compte les transferts entre la cavité du canyon et la couche limite atmosphérique qui est considérée ici comme un puits et dont la température est imposée à la température extérieure du site.

Aux limites, la température d'air extérieur au volume étudié est définie par les données météorologiques du site sur la période considérée. L'intérieur des bâtiments est supposé maintenu en température par un système de conditionnement des ambiances à $T_{int} = 25^{\circ}\text{C}$, sachant que sur la période de simulation la température extérieure du site varie de 25 à 35°C environ.

6.2.2 CONDITIONS DE VENT EN TOITURE ET DANS LA RUE

Les conditions de vent dominant en toiture sont définies par les caractéristiques de rugosité du site selon la méthode proposée au chapitre précédent, ce qui permet de définir une vitesse de référence sur toute la période de simulation, Figure 6-4, à partir des données météorologiques de la station du site universitaire d'Athènes localisé en dehors du centre-ville. Ce vent moyen reste relativement faible et varie de façon périodique chaque journée, ce qui traduit un régime de brise thermique, plus fort généralement en fin de journée.

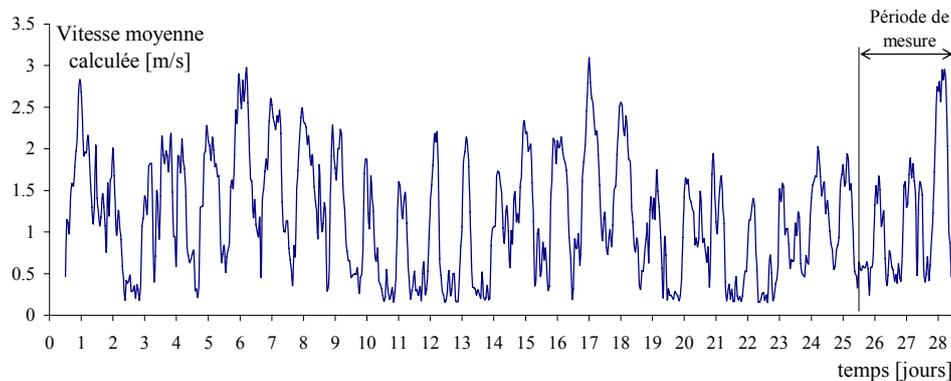


Figure 6-4- Vitesse de référence du vent en toiture de la rue Dervenion, du 10 août au 6 septembre 2001, établie par interpolation (voir Chapitre 5).

Sur les trois journées de mesure, Figure 6-5, l'interpolation est corrigée par les valeurs mesurées pour obtenir les valeurs de vitesse les plus justes en entrée du modèle.

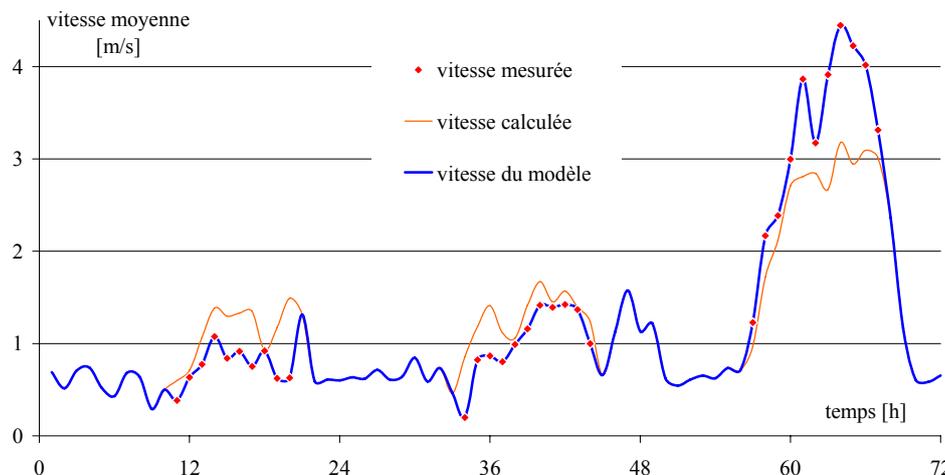


Figure 6-5- Conditions de vent en toiture mesurées (4 au 6 septembre), calculées et valeurs utilisées comme entrée du modèle de calcul aéraulique.

De même pour la direction d'incidence du vent en toiture, le profil d'évolution est reconstruit par extrapolation sur toute la durée d'étude (voir Chapitre 5). Pour les trois jours d'expérimentation en particulier, le vent mesuré est principalement axial à la rue Dervenion, selon les valeurs calculées à la Figure 5-13-a, et le mouvement d'air entraîné transversalement est donc faible et couplé avec le mouvement de convection naturelle. Néanmoins, sur toute la période d'étude les différents scénarii d'orientation du vent en toiture sont observés et pris en considération. Le calcul des débits, dans le volume étudié, dus à cet écoulement de grande échelle est ensuite effectué pour toute la période par un programme réalisé en VisualC++ selon l'algorithme décrit au Chapitre 5. Les débits ainsi calculés sont formatés comme données d'entrée pour le modèle thermoaéraulique couplé comme débit d'air aux interfaces, noté $Q_{u,vent}$.

6.2.3 DÉFINITION DES CONDITIONS D'ENSOLEILLEMENT

Le logiciel de simulation Solene est utilisé ici pour déterminer de façon précise le rayonnement solaire incident sur les parois après inter-réflexions. La géométrie est construite par l'interface du programme selon le même découpage en facette que celui de la modélisation thermoaéraulique, Figure 6-3, selon la hauteur pour le tronçon central, et étendu de part et d'autre de ce tronçon sur la longueur de la rue pour tenir compte des inter-réflexions. Les valeurs de flux solaire surfacique absorbé au niveau de ce tronçon seront utilisées comme données pour le modèle zonal. Ces facettes sont donc triangulées, voir Figure 6-6, avec une précision accrue pour le tronçon central pour permettre une meilleure prise en compte de l'évolution des effets de masque.

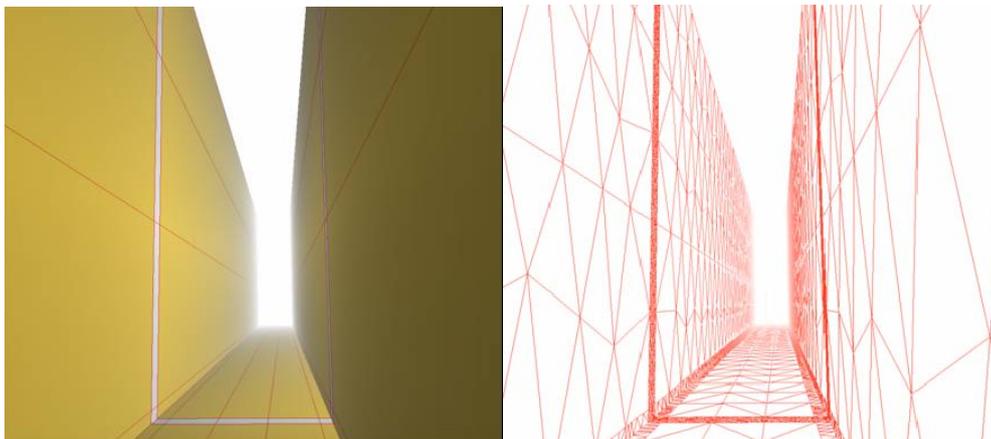


Figure 6-6- Maillage en facettes de la rue Dervenion et triangulation sous Solene avec prise en compte de toute la longueur de la rue de part et d'autre de la section étudiée, soit 200 m au total

Les coefficients de réflexion et d'absorption solaire des façades peintes sont respectivement de 0,4 et 0,6 et pour le sol en asphalté les valeurs retenues sont 0,1 et 0,9. Le modèle de voûte céleste utilisé est un ciel clair de type CIE sur toute la durée de la simulation.

À partir des données géométriques, des caractéristiques des parois et de la situation géographique, un programme en VisualC++ permet de piloter la simulation, Solene exécutant les simulations sur une journée complète, sur toute la période d'étude en déterminant pour chaque jour de simulation les heures de lever et de coucher de soleil. Les valeurs de flux surfacique obtenues sont ensuite moyennées par facette et formatées selon le format de donnée d'entrée du programme de simulation thermoaéraulique.

Cependant, étant donnée la variation des conditions atmosphériques, le flux solaire incident sur une surface horizontale calculé par Solene avec un modèle de ciel clair est différent des données de flux solaire incident de la station météorologique de référence. On effectue alors le rapport du flux calculé et du flux mesuré pour définir un ratio qui traduit le facteur de trouble atmosphérique du site. Cette correction permet d'approcher les valeurs réelles bien qu'elle ne tienne pas compte de l'orientation des parois exposées et de la non-isotropie de la voûte céleste. Ce ratio est alors appliqué à l'ensemble des valeurs calculées de flux absorbé pour chaque facette.

Le flux solaire absorbé par les éléments de parois, ou facettes, ainsi déterminé sur la période de simulation est sensiblement régulier pour chaque journée, comme le montre la Figure 6-7 pour les trois

jours d'expérimentation. L'axe de la rue Dervenion est orienté est/ouest, et, du fait du faible rapport d'aspect W/H , les effets de masque sont importants.

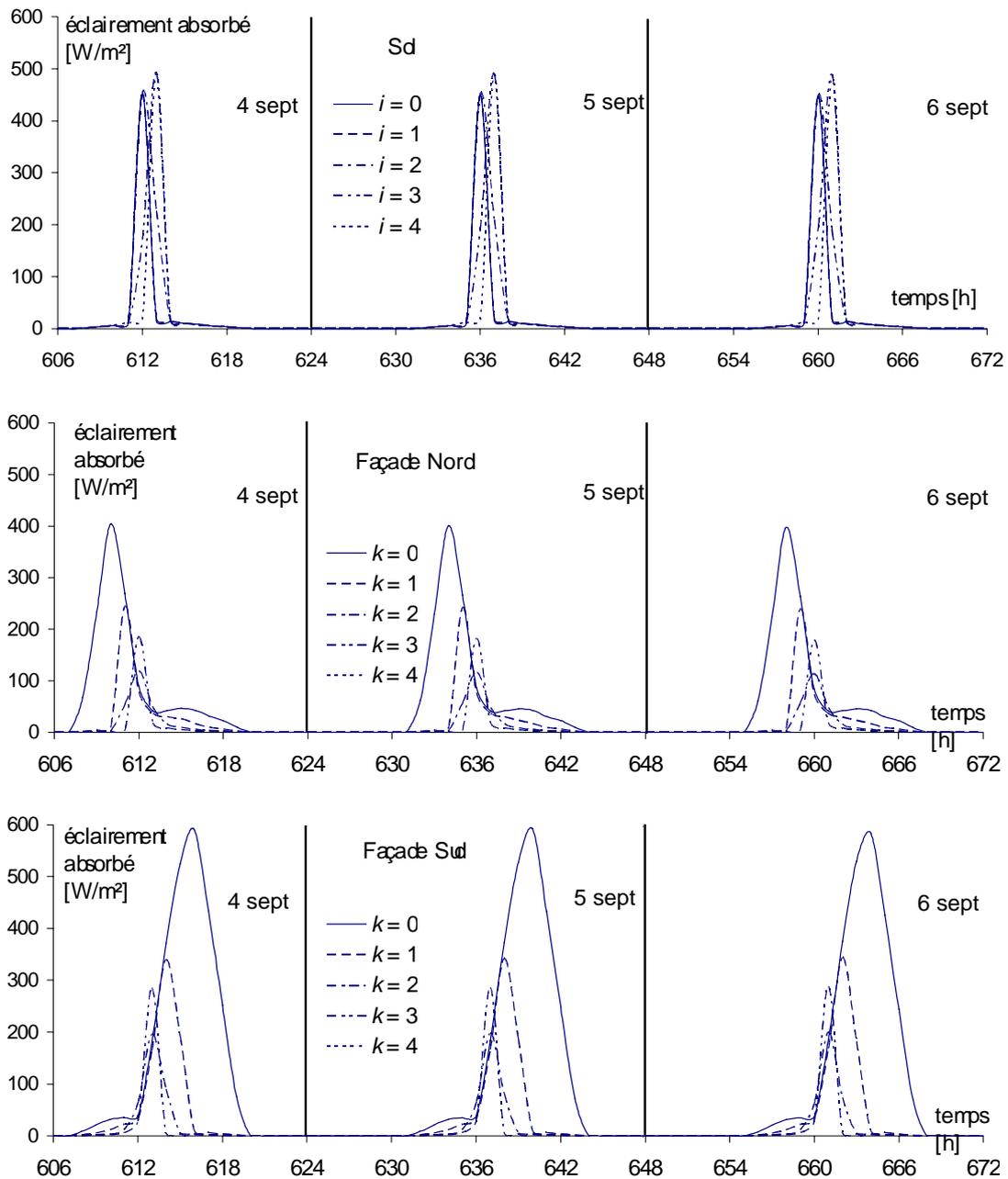


Figure 6-7- Éclairage solaire absorbée par le sol et les façades au cours des trois jours de mesure du 4 au 6 septembre 2001

Ainsi le sol reste ombragé durant une grande partie de la journée, bien que l'énergie absorbée soit forte en milieu de journée. La façade nord, légèrement orientée à l'est, est fortement exposée en matinée au flux solaire direct, principalement en partie haute, et bénéficie de l'effet des inter-réflexions avec la façade sud le reste de la journée. La façade orientée au sud, légèrement sud-ouest, est évidemment la plus exposée au cours de la journée, bien qu'en partie basse les effets de masque atténuent fortement le flux absorbé.

6.2.4 LES TEMPÉRATURES AUX LIMITES DU DOMAINE

Les valeurs de température moyenne d'air heure par heure, représentées à la Figure 6-8, sont disponibles pour la station météorologique de référence située sur le domaine universitaire à l'écart du centre urbain d'Athènes et utilisées comme conditions aux limites de la simulation. L'évolution quotidienne est périodique avec un écart diurne moyen de l'ordre de $7,5^{\circ}\text{C}$, et un maximum de $9,5^{\circ}\text{C}$.

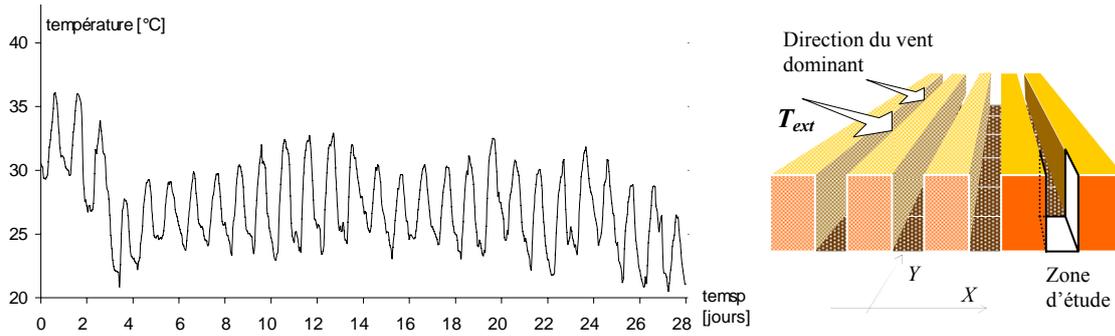


Figure 6-8- Évolution des températures à Athènes, station météorologique, du 10 août au 6 septembre 2001, et utilisation comme condition limite pour la zone d'étude.

Cette température est utilisée comme condition limite, T_{ext} , du site pour la simulation thermoaéraulique en partie haute du maillage, i.e. pour la température de la couche limite atmosphérique au dessus de la canopée urbaine. Les conditions de température d'air entrant dans le volume d'étude aux limites dans les directions X et Y sont définies par la température d'air sortant de ce volume de façon itérative jusqu'à convergence des paramètres d'état pour chaque pas de temps horaire. Cette méthode permet de prendre en compte la stratification thermique suivant la longueur de la rue ainsi que d'estimer l'effet des rues adjacentes dans le sens transversal à la direction du vent, tel que représenté à la Figure 6-8.

6.2.5 TEMPÉRATURE AU NIVEAU DES PAROIS

Les transferts thermiques au niveau des façades de bâtiment, supposées opaques, sont modélisés par un modèle simplifié, par analogie électrique, qui tient compte de la conduction et de l'inertie mais pas des infiltrations. Au niveau du sol ces transferts conductifs sont déterminés à partir d'une loi simplifiée établie par réduction modale.

Conduction thermique dans les parois en façade de bâtiment

Les parois extérieures des bâtiments sont modélisées ici simplement par un mur de béton banché de 12 cm d'épaisseur non isolé. Cette simplification ne tient pas compte de la surface de vitrage, qui participe généralement de façon non négligeable aux apports thermiques pour les locaux climatisés. L'impact sur la charge thermique intérieure peut en effet varier en fonction de la composition des parois et de leur niveau d'isolation, très faible ici, ou du type d'isolation, intérieure ou extérieure. Dans une première approche cette simplification nous permet d'aborder simplement le comportement général du bâti en interaction avec le microclimat, et la validation de cette approche peut permettre d'envisager des études paramétriques ultérieures en fonction des nombreux paramètres de cette étude. La paroi est alors modélisée simplement, par analogie électrique, par un modèle 3R2C (Roux 1984), la température correspondant à un potentiel en un nœud du modèle, le flux de chaleur au courant au travers du circuit équivalent, la conductance thermique à la conductance électrique et la capacité thermique à la capacité électrique. Pour la paroi de béton considérée le modèle peut être représenté par le schéma équivalent donné à la Figure 6-9.

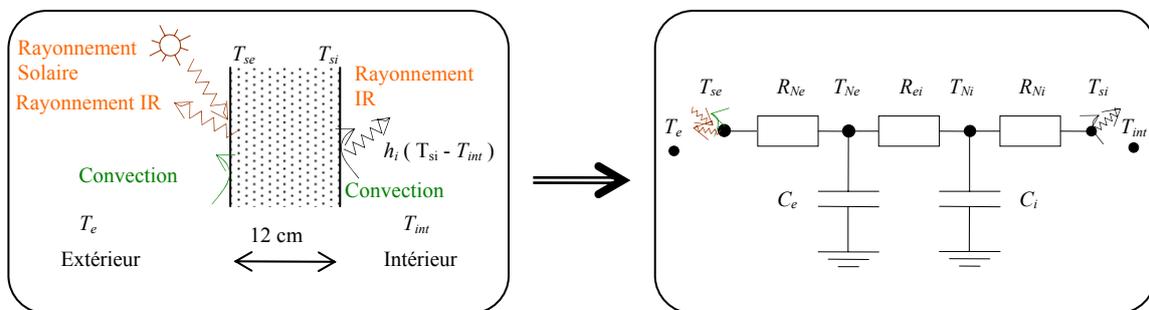


Figure 6-9- Modélisation des transferts dans la paroi en régime dynamique par analogie électrique.

La conductivité thermique du béton étant de $1,75 \text{ W/mK}$ et sa diffusivité de $0,792 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, épaisseur de 12 cm, les paramètres du schéma électrique sont définis pour approcher au mieux la réponse à un

échelon de température. Pour la paroi de béton modélisée, le calcul des résistances R_{Ne} , R_{ei} et R_{Ni} , d'après (Roux 1984), donne alors respectivement $0,008 \text{ m}^2\text{K/W}$, $0,051 \text{ m}^2\text{K/W}$ et $0,010 \text{ m}^2\text{K/W}$, la somme correspondant à la résistance totale de la paroi. Les capacités C_e et C_i sont respectivement égales à $114203 \text{ J/m}^2\text{K}$ et $304692 \text{ J/m}^2\text{K}$. Les températures aux nœuds N_e et N_i au pas de temps $n + 1$ sont alors calculées à partir de la discrétisation de l'expression donnée par le schéma électrique équivalent :

$$T_{Ne}^{n+1} = \frac{\alpha_i V_{M1} + \frac{1}{R_{ei}} V_{M2}}{\alpha_i \alpha_e - \frac{1}{R_{ei}^2}} \quad \text{et} \quad T_{Ni}^{n+1} = \frac{\alpha_e V_{M2} + \frac{1}{R_{ei}} V_{M1}}{\alpha_i \alpha_e - \frac{1}{R_{ei}^2}} \quad (6.5)$$

Avec α_e , α_i , V_{M1} et V_{M2} des coefficients déterminés en fonction des paramètres du schéma électrique et des températures au pas de temps précédent n et de la température T_{si} définie par les échange simplifiés au niveau du nu intérieur, avec un coefficient d'échange linéarisé h_i de $9 \text{ W/m}^2\text{K}$ (valeur courante pour un local), par la relation suivante :

$$T_{si} = \frac{h_i T_{int} + \frac{T_{Ni}}{R_{Ni}}}{h_i + \frac{1}{R_{Ni}}} \quad (6.6)$$

La température de surface extérieure T_{se} est aussi définie à partir du bilan thermique en surface, soit :

$$T_{se} = \frac{h_{conv,u} T_e + \frac{T_{Ne}}{R_{Ne}} - \varphi_{net,u} + \alpha_{u,clo} E^u}{\frac{1}{R_{Ne}} + h_{conv,u}} \quad (6.7)$$

où $\varphi_{net,u}$ et $\alpha_{u,clo} E^u$ sont respectivement les flux radiatifs de grande et de courte longueur d'onde émis et absorbés au nu extérieur de la façade. Le calcul de la température de surface est effectué de façon itérative de même que la température d'air selon la procédure décrite par l'organigramme à la Figure 6-2, pour tenir compte de l'ensemble des échanges thermiques dans le volume de la rue.

Température du sous-sol

Le sol est soumis en surface aux sollicitations climatiques dont les échanges convectifs avec l'air ambiant et les échanges radiatifs avec l'environnement, la voûte céleste et le soleil. Les perturbations de climatiques de surface sont atténuées en profondeur et la température peut se représenter par une variation périodique sinusoïdale telle que décrite au Chapitre 3, paragraphe 3.5.2. Pour limiter le déphasage avec la température en surface et l'effet d'inertie, donc la période de simulation nécessaire à l'établissement d'un régime variable établi, l'épaisseur de sol considérée est de 20 cm. Le sol est supposé argileux et sec, pour la durée de la période simulée, soit une diffusivité thermique de $0,002 \text{ cm}^2/\text{s}$ et une profondeur de variation diurne de 40 cm, d'après le Tableau 3-1. La température de sous-sol utilisée alors comme condition limite est calculée selon la formulation de l'équation (3.66) avec ΔT_{su} et $T_{su,moy}$ définis par les valeurs moyennes de la période de simulation.

6.2.6 CALCULS ET COMPARAISONS AVEC LES RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Le champ de température et de vitesse d'air obtenu par la simulation est représenté ici Figure 5-10, Figure 5-11 et Figure 5-12 pour les trois journées d'expérimentation. Le vent est sensiblement dans l'axe de la rue sur ces trois journées, le couplage avec les mouvements convectifs transversaux est donc important. La forme de l'écoulement dû au vent transversal est identique à chaque instant, car liée au modèle d'écoulement développé au Chapitre 5 ; seule son intensité, son sens et son influence sur l'écoulement résultant varient au cours de la journée. Cet écoulement global dépend aussi des for-

ces de poussée thermiques et des échanges convectifs pris en compte dans le modèle zonal en pression dont l'écoulement est représenté à chaque pas de temps.

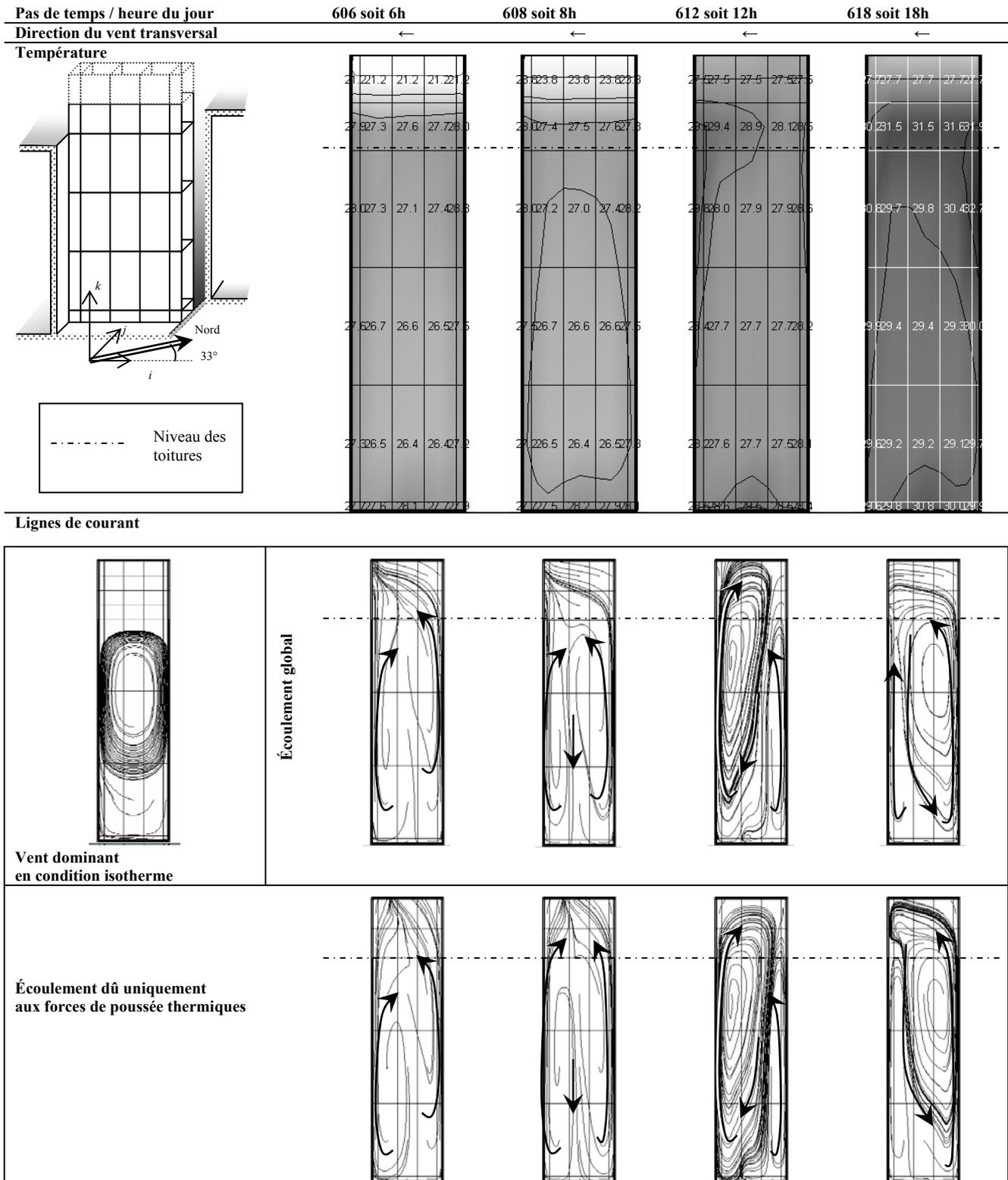


Figure 6-10- Champ de température et lignes de courant de vitesse moyenne totale, vitesse due au vent dominant et vitesse due à la convection le 4 septembre.

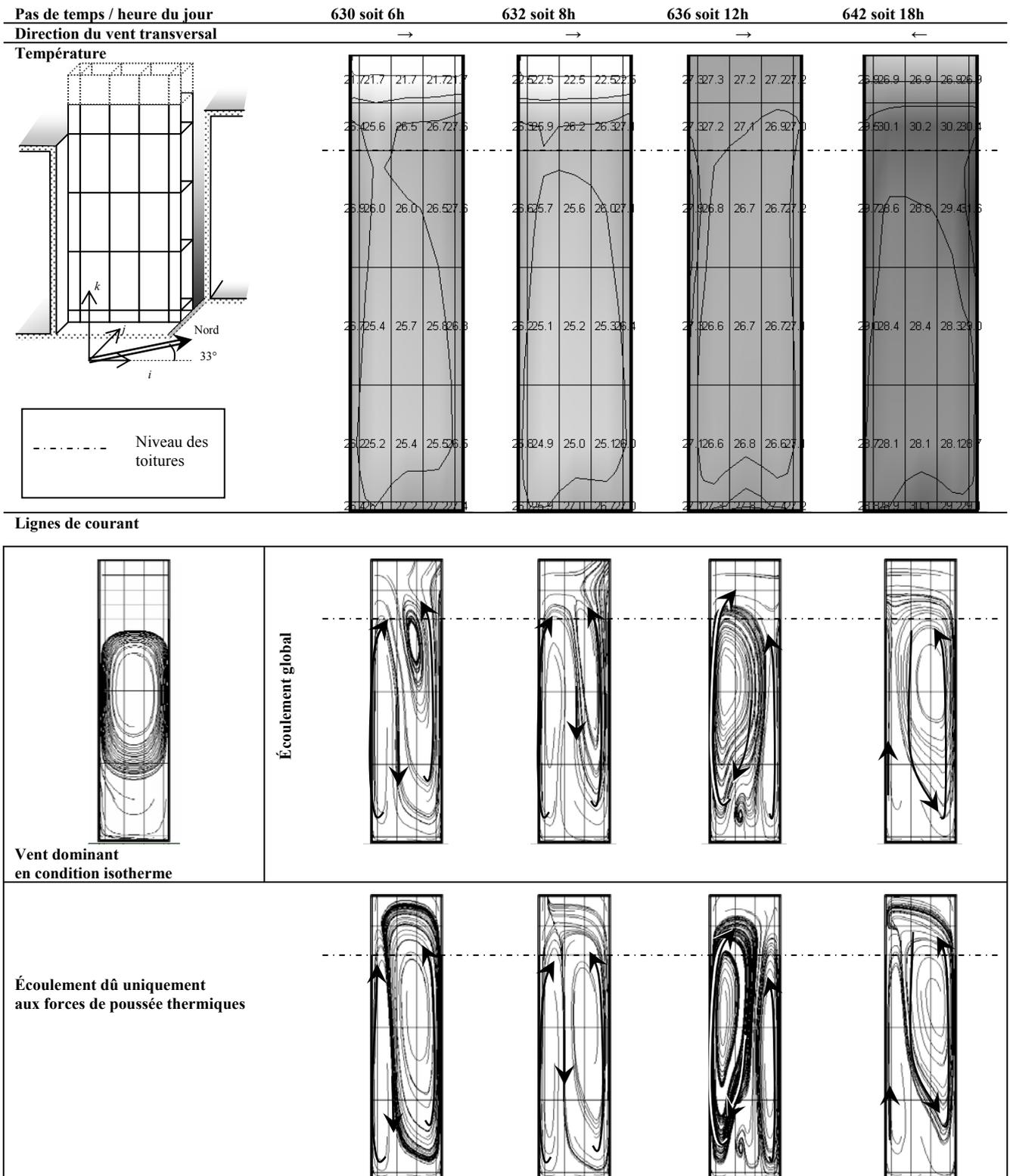


Figure 6-11- Champ de température et lignes de courant de vitesse moyenne totale, vitesse due au vent dominant et vitesse due à la convection le 5 septembre.

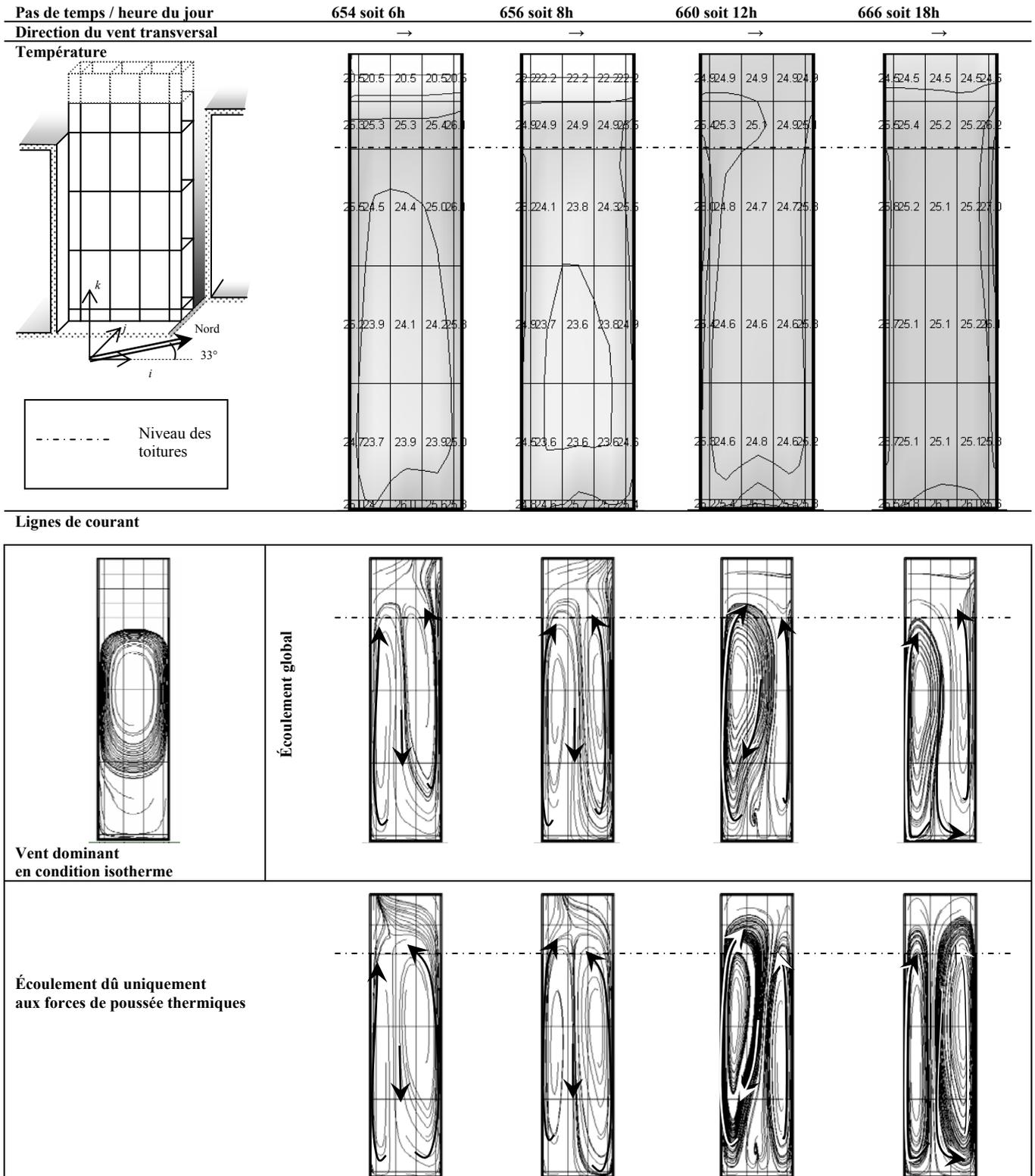


Figure 6-12- Champ de température et lignes de courant de vitesse moyenne totale, vitesse due au vent dominant et vitesse due à la convection le 6 septembre.

Pour la journée du 4 septembre à 6h, Figure 6-10, la chaleur restituée par les façades, du fait de l'enseillement de la journée précédente, induit deux faibles recirculations de par et d'autre de la rue, peu modifiées par le vent transversal quasiment nul. À 8h, le haut de la façade Nord, légèrement orientée à l'Est est ensoleillé et les mouvements de convection le long des façades s'accroissent. Cette amplification des échanges convectifs est aussi liée à la légère diminution de la température de l'air dans le canyon au contact des parois durant la nuit. L'écoulement global est néanmoins légèrement modifié

par le vent dominant. Les apports solaires de la matinée contribuent au développement du mouvement de convection le long de la façade nord, au détriment de celui de la façade sud, comme le montre la Figure 6-10 pour le milieu de journée. En cours d'après-midi cette tendance s'inverse, la façade orientée au sud, légèrement sud-ouest, bénéficiant alors d'apports solaires. La partie basse de la rue près du sol, exposée pendant une courte durée en milieu de journée reste à une température élevée, et l'air chaud s'élève le long des façades.

Le matin du jour suivant à 6h, le 5 septembre, Figure 6-11, la température dans le canyon est globalement plus basse que celle du jour précédent à la même heure. En effet la température d'air relevée par la station météorologique sur ces deux journées a diminué par rapport aux journées précédant les mesures, d'après l'évolution donnée à la Figure 6-8, et le canyon subit un rafraîchissement général, l'ensoleillement quotidien étant relativement régulier. Le mouvement de convection du côté de la façade nord est donc atténué alors que la façade sud exposée en fin de journée précédente continue à restituer la chaleur accumulée, entraînant une forte recirculation ascendante le long de la paroi mais atténuée par le vent dominant transversal. À 8h, la convection le long de la façade nord exposée au soleil est renforcée et amplifiée par le vent transversal. Ce phénomène se prolonge dans la matinée comme pour la journée précédente, une faible recirculation s'établissant au niveau du sol au centre la rue en milieu de journée à midi. En fin de journée, à 18h l'écoulement est similaire à celui de la journée du 4 septembre.

La journée du 6 septembre, Figure 6-12, le vent dominant devient plus important et le rafraîchissement du canyon dû à la chute de température s'accroît. La stratification thermique dans la hauteur de la rue est beaucoup plus faible du fait de ce renouvellement d'air accru. Cependant, dans le sens transversal à la rue le vent dominant étant très faible les mouvements d'air sont principalement dus aux mouvements de convection qui suivent alors une évolution similaire à celle du 4 septembre. Ces mouvements sont néanmoins moins développés et ne se développent pas au dessus du canyon où l'écoulement dû au vent prédomine.

De façon générale les façades, exposées au rayonnement solaire principalement en partie haute d'après la Figure 6-7, s'échauffent en cours de journée. L'air au contact de celles-ci subit alors un mouvement de convection ascendant, tandis que le renouvellement d'air longitudinal et transversal à l'axe de la rue rafraîchit la zone centrale. Deux recirculations de part et d'autre de la rue s'établissent alors du fait des mouvements de convection. Ces recirculations sont plus ou moins importantes en fonction de l'amplitude du vortex induit par le vent dominant en toiture.

Les transferts thermoaérauliques modélisés ici sont cohérents bien que difficilement vérifiables. Néanmoins, la comparaison des températures au centre du canyon avec les valeurs mesurées permet d'avoir quelques éléments de validation du modèle (comparaison menée au paragraphe 6.3.2), bien que de nombreux paramètres ne soient pas précisément définis par rapport aux réalités du site. Ainsi, il faudrait définir de façon plus précise les conditions d'ambiance intérieure des bâtiments ainsi que les débits d'air et les ouvrants en façade. Au niveau du sol il faudrait tenir compte d'obstacles éventuels et des mouvements d'air dus à la circulation ou à d'autres activités. La modélisation pourrait être donc être améliorée par une meilleure définition des conditions aux limites, comme les écoulements de couche limite, et la modélisation de phénomènes complémentaires.

Ce type d'approche donne néanmoins une prédiction du comportement thermoaéraulique qui traduit bien l'effet de confinement de la rue canyon, ainsi que le maintien d'une certaine fraîcheur dans ce cas particulier par rapport à la température relevée en toiture. Cette méthodologie peut alors permettre de comparer différentes configurations et établir un niveau de sollicitation microclimatique d'un bâtiment, au niveau de la façade du moins. Une application de cette approche est ainsi présentée par la suite.

6.3 Application à l'estimation de l'îlot de chaleur urbain

La température en site urbain est généralement plus élevée que la température relevée en périphérie, l'écart étant variable entre le jour et la nuit. Le cas de la rue Dervenion, située au centre d'Athènes, est étudié ici à partir des mesures réalisées sur le site au-dessus des toitures et des résultats de simulation obtenus précédemment pour l'intérieur du canyon.

6.3.1 ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE EN SITE URBAIN D'APRÈS LES MESURES AU DESSUS DES TOITURES

La température en toiture, sur le site de la rue Dervenion, est très différente de celle mesurée à l'extérieur de la ville par la station météorologique. Ce phénomène d'îlot de chaleur urbain, décrit au Chapitre 1, peut être quantifié à partir de l'écart de température entre les deux points de mesure, noté ici $\Delta T_{ur,toiture}$. Cette différence a été modélisée par certains auteurs (Oke 1987) en fonction de la population d'une ville. Cependant, il est difficile de quantifier la part de la production anthropique de cet écart, et l'influence de nombreux autres paramètres, tels que les caractéristiques des zones périurbaines, est très importante (Montávez et al. 2003). Disposant des valeurs de températures mesurées en journée en toiture, sur le site de la rue Dervenion, ainsi que des températures aux mêmes heures sur le site de la station météorologique, l'évolution de la différence des températures mesurées est représentée à la Figure 6-13-a.

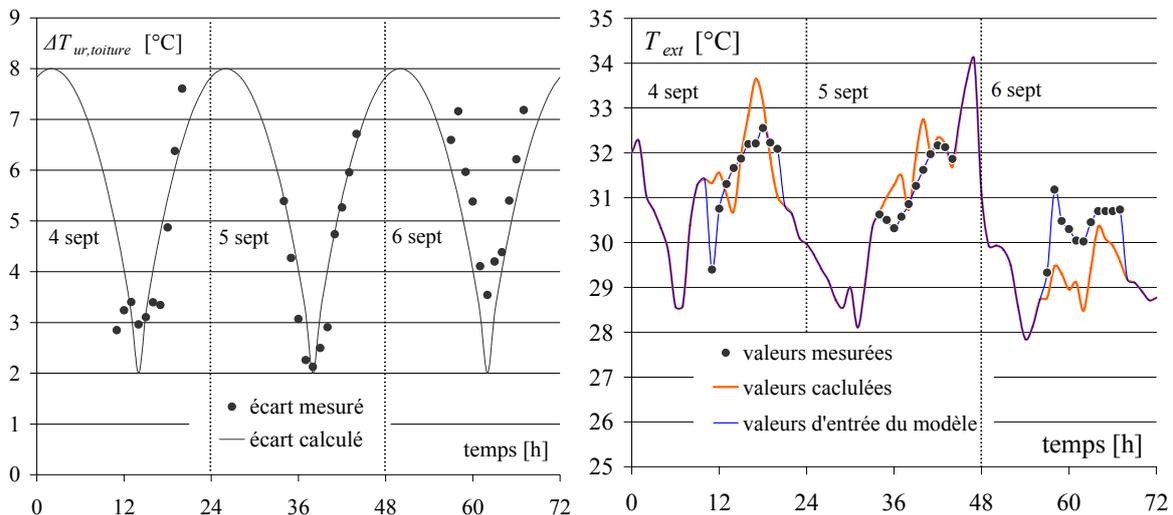


Figure 6-13-a : Évolution de l'écart de température, calculé et mesuré, entre le site de la rue Dervenion et la station météorologique. -b : Évolution de la température mesurée, calculée et d'entrée du modèle pour le site de la rue Dervenion.

Alors que l'évolution des températures mesurées en toiture est très variable pour les trois journées, selon la Figure 6-13-b, l'évolution de $\Delta T_{ur,toiture}$ semble par contre périodique. Un profil empirique d'évolution diurne de l'écart de température a donc été établi. L'écart mesuré est approché par la variation périodique suivante, avec t l'heure du jour :

$$\Delta T_{ur,toiture} = 6 \cos^{0,8} \left(\frac{t-2}{24} \pi \right) + 2 \quad (6.8)$$

Ce calcul permet de reconstruire l'évolution estimée de température en dehors des périodes de mesure sur site, Figure 6-13-b. Les températures moyennes mesurées sont donc complétées par les valeurs calculées la nuit, ainsi que sur toute la période étudiée les jours précédents, Figure 6-14.

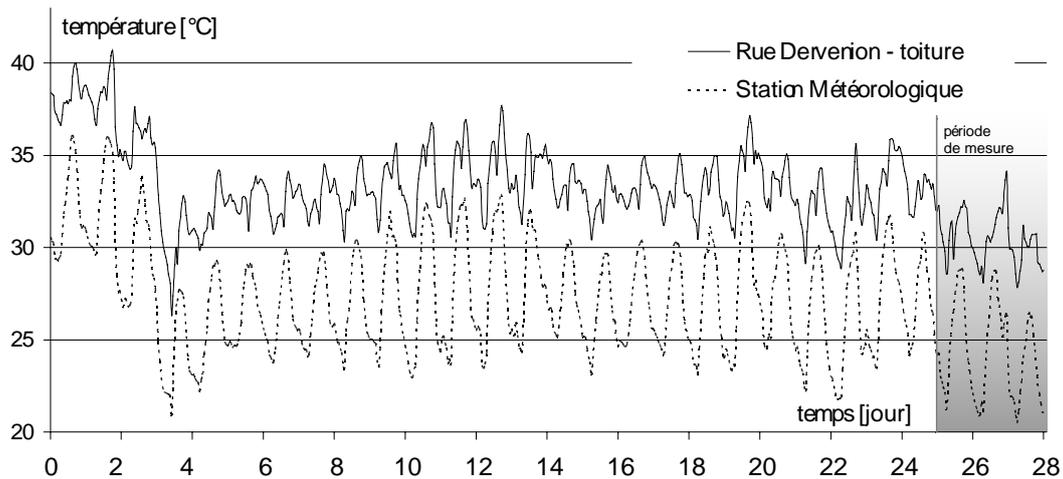


Figure 6-14- Évolution de la température extérieure relevée par la station météorologique et calculée pour le site de la rue Dervenion, du 10 août au 6 septembre 2001

L'évolution quotidienne de la température extérieure ainsi définie est en moyenne de 33°C, le minimum et le maximum moyen journalier sont respectivement de 30,8°C et 35,4°C. Cette évolution montre aussi l'atténuation forte de la variation diurne de la température en milieu urbain, définie ici au-dessus des toitures de bâtiments.

6.3.2 ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE DANS LA RUE DERVENION DÉTERMINÉE PAR LA SIMULATION

L'évolution des températures à l'intérieur de la rue, dans l'axe du canyon, est étudiée ici à partir des mesures et des résultats de simulation. L'effet d'îlot de chaleur urbain est étudié du point de vue de la différence de température entre l'intérieur de la rue et le site de la station météorologique, noté $\Delta T_{ur,canyon}$, et comparé à la différence précédemment définie $\Delta T_{ur,toiture}$.

Comparaison de l'évolution des températures dans l'axe du canyon avec les mesures

La température calculée pour les différentes cellules du maillage correspond à une température moyenne de chaque macro volume. La température dans l'axe du canyon aux différents points de mesure à 3,5 m, 7,5 m, 11,5 m et 15,5 m, repérés sur la Figure 5-2, est estimée à partir des résultats de simulation par interpolation linéaire sur le maillage du modèle zonal.

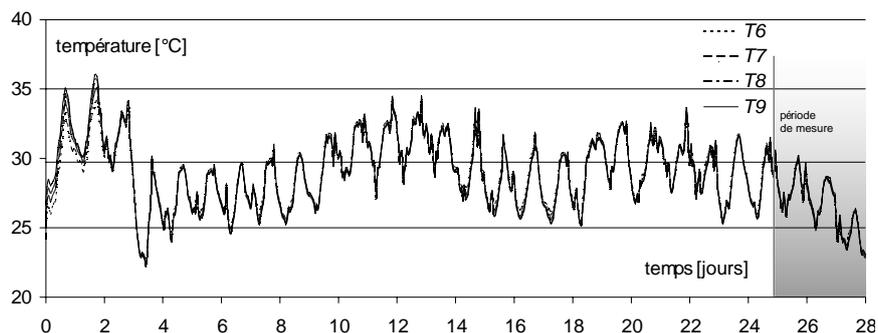


Figure 6-15- Évolution de la température d'air calculée dans l'axe du canyon à 3,5m, 7,5m, 11,5m et 15,5m de hauteur correspondant respectivement aux points 6, 7, 8 et 9.

Ces températures évoluent entre 21°C et 37°C sur la période d'étude de ces températures, avec des écarts diurnes qui sont au maximum de 9°C et en moyenne de 5°C. La variation quotidienne des températures est donc, comme pour celle constatée en toiture, atténuée dans le canyon par rapport aux variations relevées par la station météorologique.

L'évolution de la température sur les trois jours de mesure, Figure 6-16, suit une évolution similaire à la température mesurée avec une nette différence entre la température du canyon et la température me-

surée en toiture. La rue Dervenion d'un rapport d'aspect $W/H = 0,30$, donc relativement faible, a tendance à atténuer l'effet d'îlot de chaleur dans la rue.

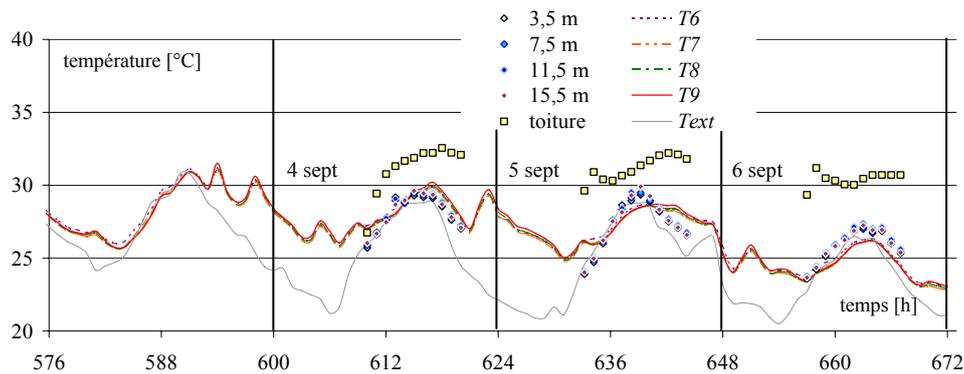


Figure 6-16- Évolution de la température d'air calculée, courbes, et points mesurés, losanges, dans l'axe du canyon à 3,5m, 7,5m, 11,5m et 15,5m de hauteur, pour les 3 jours d'expérimentation, et température relevée par la station météorologique T_{ext}

La différence entre la température ainsi calculée et la moyenne mesurée aux différents niveaux de la rue est inférieure à 1°C en moyenne avec un maximum de $2,5^{\circ}\text{C}$. Cependant, pour les trois jours étudiés la température mesurée dans le canyon et par la station météorologique sont très proches, l'effet d'îlot de chaleur étant surtout notable durant la nuit. La différence de température $\Delta T_{ur,canyon}$, très faible en matinée, s'accroît durant l'après-midi. Cet effet est légèrement surestimé le premier jour et sous-estimé le troisième jour de mesure. La définition du domaine d'étude a été ici très simplifiée et localement de nombreux paramètres peuvent expliquer les différences constatées. Ainsi le couplage avec la circulation et toutes autres activités au niveau du sol peut être non négligeable, de même que l'impact du couplage avec l'utilisation des locaux, leur ventilation, ainsi que la forme des façades. En amont de l'écoulement les différentes charges anthropiques ainsi que la morphologie du quartier et de la ville sont aussi des facteurs importants surtout dans le cas où la vitesse de vent est élevée. Sur les trois journées de mesure dans la rue Dervenion, les deux premiers jours la vitesse de vent est faible tandis que le troisième elle augmente significativement, selon l'évolution moyenne représentée à la Figure 6-5. La simplification du modèle en amont de la zone étudiée peut ici expliquer en partie la sous-estimation des températures.

Qualification de l'effet d'îlot de chaleur dans la rue canyon par l'écart de température moyen $\Delta T_{ur,canyon}$

L'effet d'îlot de chaleur peut être mis en évidence par la différence de température $\Delta T_{ur,canyon}$. La température d'air est généralement mesurée par les stations météorologiques à une certaine hauteur de référence ou en zone non perturbée, donc par exemple au-dessus des toitures en site urbain. Pourtant les températures dans les rues de type canyon peuvent être significativement différentes de celles mesurées en toiture, du fait du confinement notamment. La Figure 6-17 représente l'évolution de cette différence $\Delta T_{ur,canyon}$, ainsi que l'évolution de $\Delta T_{ur,toiture}$ définie précédemment, durant les 28 jours étudiés.

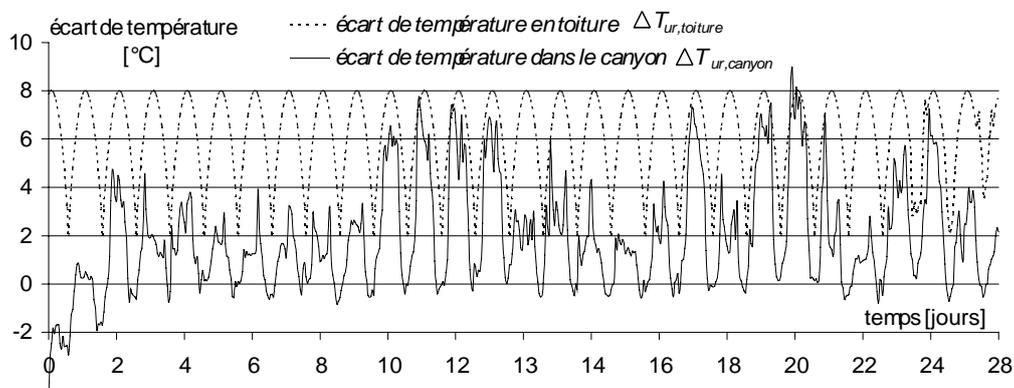


Figure 6-17- Évolution sur 28 jours des écarts ΔT_{ur} entre la température mesurée par la station météorologique et la température sur le site de la rue Dervenion, estimée en toiture et moyenne des résultats de simulation dans le canyon

Le calcul de $\Delta T_{ur,canyon}$ pour les deux premiers jours n'est pas représentatifs ici, car l'effet d'inertie des parois ne prend pas en compte les variations de température des jours précédents. L'évolution générale de $\Delta T_{ur,canyon}$ suit ensuite la même tendance que $\Delta T_{ur,toiture}$, avec cependant des amplitudes très variables. Ainsi, pour les trois jours de mesure, alors qu'en toiture l'évolution est assez régulière, elle est, dans le canyon, fortement irrégulière. Pour ce cas de la rue Dervenion nous constatons aussi que l'effet du vent dominant est important par rapport à ce phénomène de confinement, et la comparaison avec l'évolution de la vitesse du vent, à la Figure 6-4, montre que les jours de grande différence de température $\Delta T_{ur,canyon}$ correspondent à des périodes où la vitesse de vent est faible, tandis que $\Delta T_{ur,canyon}$ reste faible les jours de vent dominant fort.

L'impact des variations de ce phénomène d'îlot de chaleur sur les sollicitations climatiques des bâtiments est étudié dans la partie suivante. L'effet de la prise en compte ou non de la température en différents points du site de l'étude est alors envisagé.

6.4 Application à l'estimation de la charge thermique en façade

La méthode de calcul présentée précédemment permet d'envisager l'estimation des consommations énergétiques de bâtiment liées aux charges de climatisation, tout en tenant compte de l'effet d'îlot de chaleur urbain ainsi que des particularités dues à la forme de la rue canyon. Dans cette partie, trois aspects sont abordés : la prise en compte de l'écart de température $\Delta T_{ur,toiture}$, les particularités du microclimat dans une rue de type canyon tenant compte de la différence $\Delta T_{ur,canyon}$, et l'interaction du bâtiment et du système de climatisation avec le microclimat.

Pour une étude de système de climatisation, différentes charges enthalpiques doivent être déterminées dont principalement les charges dues à l'utilisation des locaux, les apports par renouvellement d'air et les apports par transmission par les parois. Dans l'étude simplifiée du microclimat de la rue canyon menée précédemment, la modélisation des locaux a été très simplifiée et seule la charge thermique de conduction au travers des façades est ici modélisée. L'impact réel est sous-estimé car les apports dus aux vitrages et au renouvellement d'air ne sont pas pris en considération et participent généralement de façon importante à la charge totale. Toutefois cette première approche permet d'estimer l'impact des différents niveaux de précision dans la prise en compte des phénomènes météorologiques sur le dimensionnement et la consommation énergétique liée à la climatisation.

6.4.1 IMPACT DE LA PRISE EN COMPTE DE L'EFFET D'ÎLOT DE CHALEUR SUR LA DEMANDE ÉNERGÉTIQUE LIÉE AUX TRANSFERTS EN FAÇADE DU BÂTI

Le calcul des charges climatiques sur le bâti peut être mené à partir des données météorologiques de l'évolution de température, donnée ici sur 28 jours, Figure 6-8. De façon simplifiée les différents flux thermiques dans les parois sont alors calculés par la même modélisation que précédemment avec une température d'air imposée dans le volume du canyon et supposée connue pour le site étudié, comme représenté à la Figure 6-18.

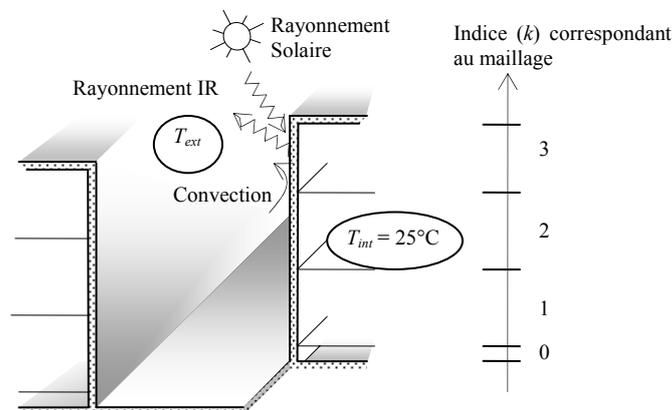


Figure 6-18- Calcul simplifié des charges climatiques en différents niveaux de la façade avec une température extérieure d'air dans le canyon définie par des données météorologiques.

Le calcul d'ensoleillement des façades est donc ici le même que celui décrit au paragraphe 6.2.3, les effets de masque étant pris en compte dans la simulation. Les conditions intérieures du local sont, comme précédemment, simplifiées et la température intérieure résultante est supposée constante et maintenue à 25°C par le système de climatisation. La charge thermique est calculée au nu intérieur de la façade pour chaque niveau du maillage, indice k , à chaque pas de temps horaire à partir du modèle simplifié 3R2C défini en 6.2.5 :

$$\phi_i = \frac{T_{Ni} - T_{Si}}{R_i} \quad (6.9)$$

Les flux thermiques calculés heure par heure, intégrés ici pour chaque journée, nous permettent d'obtenir la demande énergétique quotidienne, exprimée en wattheure par mètre carré de paroi et par jour, liée aux transferts en façade. L'évolution de cette demande énergétique pour la façade nord et la façade sud est représentée à la Figure 6-19 dans le cas où la température extérieure T_{ext} est donnée par

la station météorologique de référence. Dans la suite de l'étude, cette simulation à partir de la température donnée par la station météorologique est désignée comme le cas de référence, référence par rapport à laquelle sont comparés les résultats des autres cas de simulation.

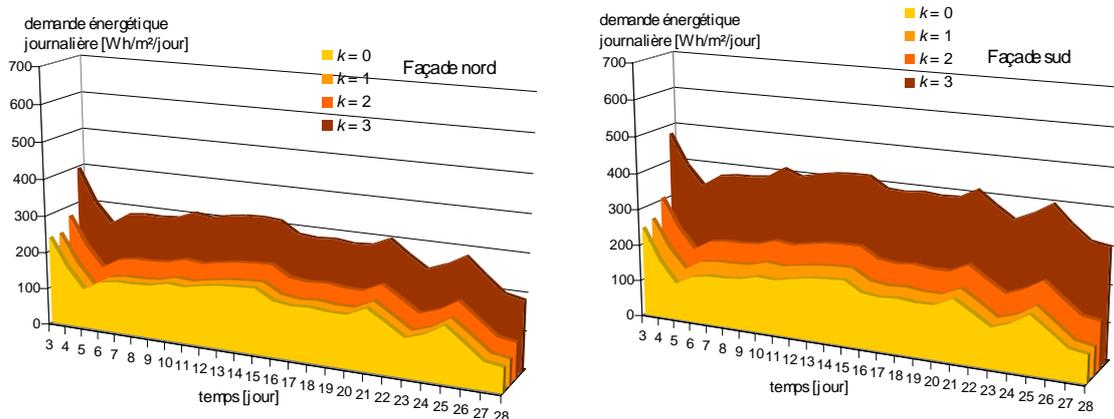


Figure 6-19- Évolution de la demande énergétique quotidienne de climatisation en façade par niveau dans la rue en Wh/m^2 par jour sur la période de simulation, sur la base des données météorologiques de référence

Les conditions d'ensoleillement quotidiennes étant régulières sur les 28 jours d'étude, les variations de la demande énergétique sont principalement dues aux variations de température, représentées à la Figure 6-8. Les deux premiers jours ne sont pas représentés car la demande est fortement sous-estimée par la non prise en compte de la période antérieure. Ces évolutions sont similaires entre les différents niveaux de la façade, et seule l'amplitude varie du fait des masques et de l'ensoleillement variable suivant la hauteur. La demande énergétique en façade Nord et Sud suit aussi la même évolution, la différence d'exposition expliquant la variation d'amplitude. Pour la façade Nord l'énergie totale ainsi calculée sur les 28 jours est de 5602 Wh/m^2 , avec en partie basse, indice $k=0$, 3990 Wh/m^2 et en partie haute, $k=3$, 7928 Wh/m^2 , soit près de 99 % de plus. Pour la façade sud, l'énergie calculée atteint 6936 Wh/m^2 , soit 24 % de plus qu'en façade nord, avec 4062 Wh/m^2 en partie basse et 10683 Wh/m^2 en partie haute, soit 163 % de plus. L'impact de l'ensoleillement est en effet beaucoup plus important sur cette dernière façade. Le troisième jour, l'énergie calculée est maximale avec 300 Wh/m^2 en façade nord et 347 Wh/m^2 en façade sud soit une différence de 17 % seulement. L'écart entre les deux façades est effectivement dû aux journées où la charge est plus faible.

La même démarche a été menée, Figure 6-8, en prenant comme température extérieure la température estimée sur site, et mesurée sur les trois journées d'expérimentation, dont l'évolution est représentée Figure 6-14.

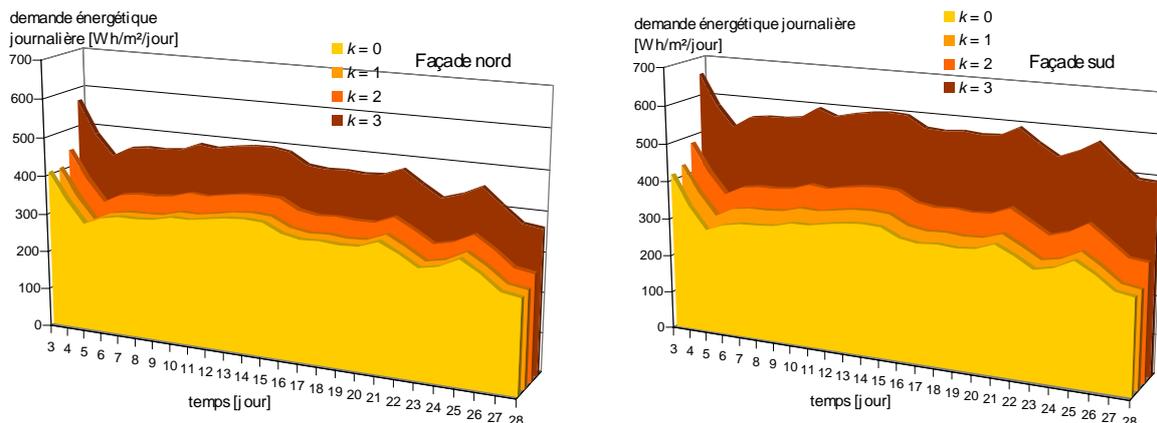


Figure 6-20- Évolution de la demande énergétique quotidienne de climatisation en façade par niveau dans la rue en Wh/m^2 par jour sur la période de simulation, sur la base de la température estimée en toiture

Sur les 28 jours la demande énergétique quotidienne, pour la façade nord et la façade sud, est respectivement de 10442 Wh/m^2 et de 11839 Wh/m^2 , soit 86 % et 71 % de plus que celle du cas de référence.

La différence entre le bas et le haut de la rue, entre l'exposition nord et sud, varie respectivement de 45 % et de 78 %. Cette variation relativement plus faible que dans le cas précédent s'explique par la part plus importante de l'impact de la température extérieure sur la demande énergétique totale. Le troisième jour de simulation est toujours le jour de demande énergétique maximale, avec 472 Wh/m² et 520 Wh/m² pour les façades nord et sud respectivement, soit 57 % et 50 % de plus que les maxima relevés dans le cas de référence.

Les différences relevées ici démontrent l'impact fort que peut avoir la non prise en compte de l'effet d'îlot de chaleur urbain sur le calcul des sollicitations climatiques au niveau des façades. Le calcul des charges par renouvellement d'air des locaux, directement liées à la température extérieure du bâti, serait affecté de la même façon par ce phénomène et donc, a posteriori, le dimensionnement éventuel d'un système de traitement des ambiances intérieures.

Cependant, la température d'air utilisée dans cette simulation correspond à la température estimée, ou mesurée, en toiture, et, d'après les résultats précédents, la température calculée dans la rue est souvent inférieure. Aussi, dans la suite, la charge, et donc la demande énergétique, est calculée à partir du couplage avec les transferts thermoaérauliques dans le canyon qui prennent en compte l'effet du renouvellement d'air de la zone dû au vent dominant.

6.4.2 CALCUL DE LA DEMANDE ÉNERGÉTIQUE COUPLÉE AUX PHÉNOMÈNES DE TRANSFERT THERMOAÉRAULIQUES DE FAÇADE

La rue canyon étudiée est d'un faible rapport d'aspect $W/H = 0,3$, et elle est protégée du rayonnement solaire. Ce confinement se remarque aussi sur la circulation d'air et les mouvements de convection décrits précédemment. L'évolution des températures dans le canyon est donc liée au couplage de ces différents paramètres qui peuvent varier fortement d'un jour sur l'autre.

L'évolution de la demande énergétique quotidienne en façade représentée à la Figure 6-21 montre une nette différence avec les résultats précédents.

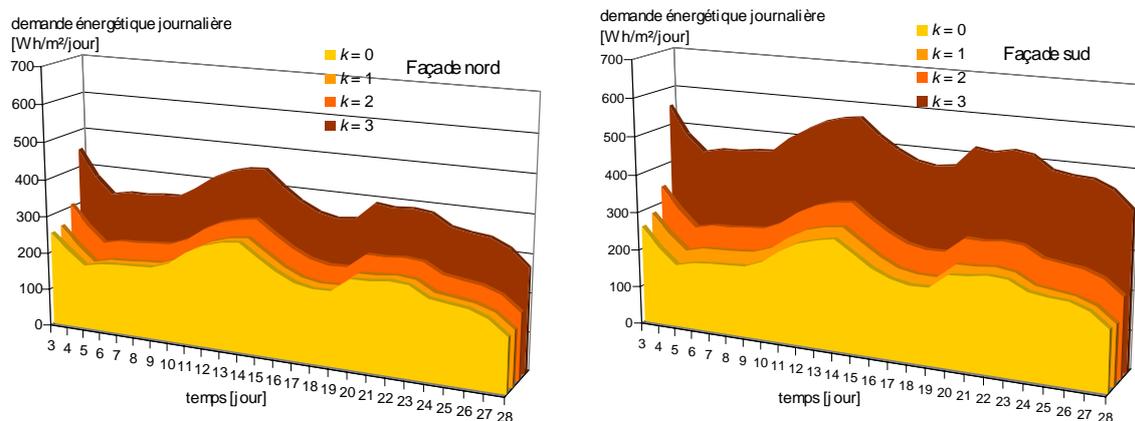


Figure 6-21- Évolution de la demande énergétique quotidienne de climatisation en façade par niveau dans la rue en Wh/m² par jour sur la période de simulation, calculée à partir de la simulation aéraulique

Sur la période de simulation de 28 jours, la demande énergétique pour la façade nord et la façade sud est respectivement de 7642 et 9146 Wh/m², soit 36 % et 32 % de plus que celle du cas de référence. Cet écart élevé reste néanmoins largement inférieur à celui obtenu par le calcul avec une température extérieure du site donnée par la température en toiture. La variation entre le bas et le haut de la façade est ici de 72 % et 123 % pour les façades nord et sud. Contrairement aux cas précédents, la demande énergétique maximale n'est pas obtenue le 3^{ème} jour, mais le 14^{ème} jour de simulation avec une moyenne sur les façades nord et sud de 354 et 410 Wh/m², soit seulement 18 % de plus que pour le cas de référence.

Outre l'influence de l'évolution de température de la zone étudiée, la comparaison avec l'évolution des vitesses de vent du site, représentée Figure 6-4, montre la concordance entre les maxima de demande énergétique et les périodes de faible vitesse d'air. Le confinement thermoaéraulique dû à la forme de la rue peut aussi influencer l'impact des charges anthropiques produites dans celles-ci. Dans

la partie suivante, la même simulation est effectuée avec l'étude de l'impact d'un système de climatisation simplifié.

6.4.3 COUPLAGE DE LA SIMULATION THERMOAÉRAULIQUE AVEC LE FONCTIONNEMENT D'UN SYSTÈME DE CLIMATISATION

Dans cette partie, le cas de la rue Dervenion est repris en considérant que les locaux sont climatisés par des systèmes simple, de type monobloc de fenêtre ou « windows », représentés selon le maillage de la rue à la Figure 6-22.

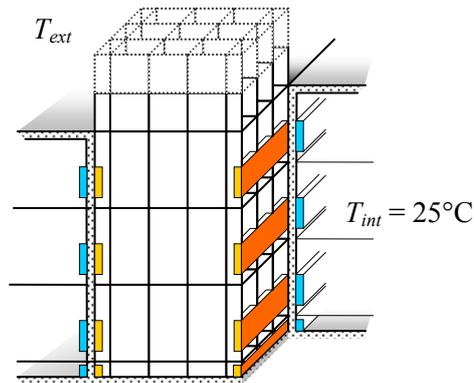


Figure 6-22- Intégration simplifiée dans la simulation d'un système de climatisation de type « windows »

Le fonctionnement de ces systèmes est alors couplé avec la simulation thermoaéraulique, ce qui permet d'estimer l'impact de leur fonctionnement sur la température dans la rue. La température intérieure est maintenue à 25°C et, tous les locaux étant climatisés, les échanges par les parois autres que la façade sont négligés, ainsi que toutes les autres charges. Le condenseur, échangeur fluide frigorigène/air, se situe en façade, en vis-à-vis de l'évaporateur situé à l'intérieur du bâtiment. De façon simplifiée, on suppose que l'énergie thermique absorbée par la façade est échangée par le condenseur avec l'air dans le volume de la rue. Aussi pour la cellule adjacente à la façade concernée une source de chaleur équivalente est prise en considération dans le bilan thermique de l'air. Ce flux thermique ϕ_{source} est supposé égal au flux thermique calculé au nu intérieur de la façade $S_u \phi_i$.

L'évolution de la température d'air dans le canyon, représentée dans l'axe de celui-ci à la Figure 6-23, suit une évolution similaire à l'évolution sans condenseur en façade, mais avec des pics de température plus marqués.

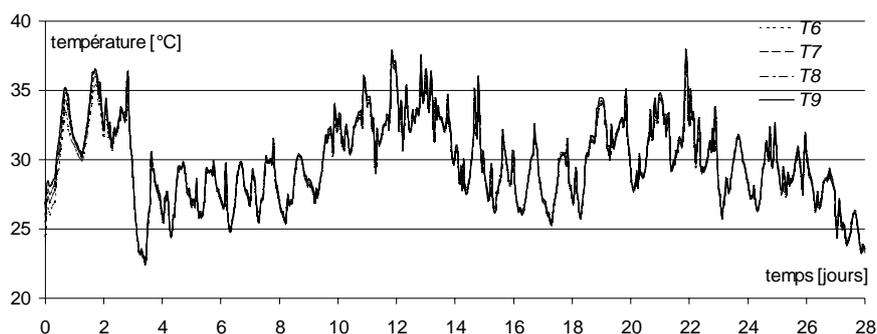


Figure 6-23- Évolution de la température d'air calculée dans l'axe du canyon à 3,5m, 7,5m, 11,5m et 15,5m de hauteur, avec l'influence d'un système de climatisation.

La différence, observée avec la Figure 6-15, entre la température d'air ainsi calculée et celle calculée précédemment, sans système de climatisation, s'accroît d'autant plus que la température est supérieure à 25°C. Les écarts de température diurnes sont au maximum de 9°C, comme pour le cas sans climatiseur, mais plus élevés en moyenne avec 6°C.

L'évolution de la demande énergétique quotidienne en façade obtenue par cette simulation, Figure 6-24, est similaire à la précédente, les pics étant plus marqués, de même que pour les températures.

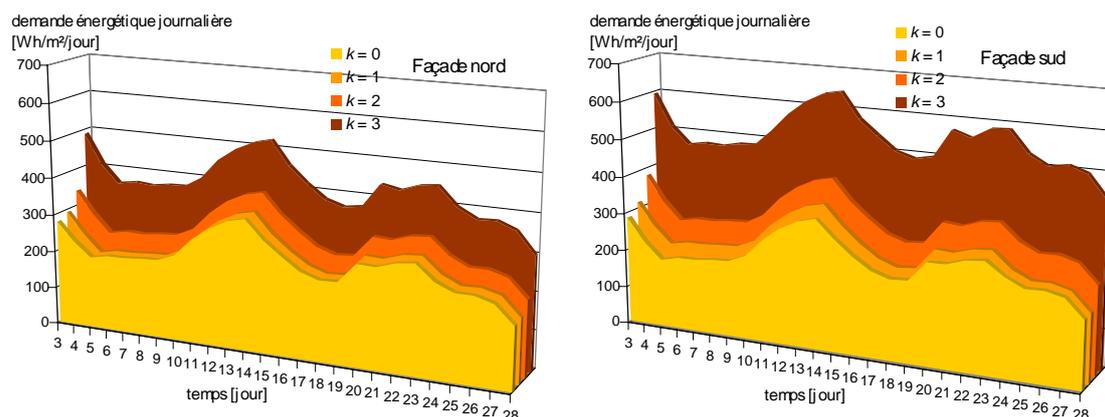


Figure 6-24- Évolution de la demande énergétique quotidienne de climatisation en façade par niveau dans la rue en Wh / m² par jour sur la période de simulation, calculée à partir de la simulation aéraulique couplée avec le fonctionnement théorique d'un système de climatisation

Sur la période de 28 jours la façade nord et la façade sud ont une demande énergétique de 8595 et 10116 Wh/m², soit 53 % et 46 % de plus que pour le cas de référence. Cet écart est aussi nettement supérieur à celui calculé sans système de climatisation, ce qui montre bien l'impact du système de climatisation sur la température extérieure et donc sur la demande énergétique calculée. La demande énergétique quotidienne maximale est ici aussi relevée pour le 14^{ème} jour de simulation avec 422 et 479 Wh/m², soit 41 % et 38 % de plus que le cas de référence. La différence est nettement plus marquée que pour le cas sans système de climatisation.

Cet impact des systèmes de climatisation sur le microclimat urbain, abordé au Chapitre 1, constitue une charge anthropique particulière car elle est plus ou moins amplifiée, en fonction des phénomènes d'inertie, lors des pics d'apport thermique mis en évidence sans système de climatisation.

L'étude menée dans cette partie démontre l'importance de la prise en compte de différents niveaux de précision, dans la définition des sollicitations climatiques sur le bâti, sur la demande énergétique en façade. Cette approche peut être complétée par un couplage plus complet avec le fonctionnement d'un local et d'un éventuel système de traitement des ambiances ou d'un dispositif de rafraîchissement passif ou de ventilation naturelle. Les évolutions relevées ici ne tiennent en effet pas compte du couplage complet, mais dans le cas d'un dispositif comprenant des entrées d'air en façade les différentes tendances mises en évidence seraient certainement amplifiées.

6.5 Conclusion

Les simulations présentées dans ce chapitre nous ont permis d'aborder le phénomène de couplage thermoaéraulique nécessaire à l'évaluation du microclimat urbain et de son impact sur les bâtiments. La méthode simplifiée détaillée ici a été appliquée au cas d'une rue de type canyon sur une période de 28 jours, sur laquelle les phénomènes ont été simulés en régime variable. Les résultats de simulation ont montré un couplage complexe entre convection naturelle et convection forcée, notamment pour les périodes de vent faible.

L'étude de l'évolution des températures a mis en évidence le phénomène connu d'îlot de chaleur urbain, qui reste cependant délicat à modéliser du fait de la difficulté à définir les charges anthropiques extérieures à la zone d'étude. Une comparaison avec les trois journées d'expérimentation a montré une certaine cohérence avec l'évolution des températures obtenues par le calcul. Cependant, cette comparaison n'est pas suffisante pour valider le modèle, en effet le phénomène d'îlot de chaleur urbain est principalement sensible la nuit, période durant laquelle les mesures étaient interrompues.

Néanmoins, cette approche a été appliquée à l'estimation des charges de climatisation en façade des bâtiments suivant différents niveaux de définition des conditions en température extérieure. La demande énergétique globale, sur toute la période, a été comparée, selon la Figure 6-25, par rapport au cas de référence défini par les conditions données par la station météorologique.

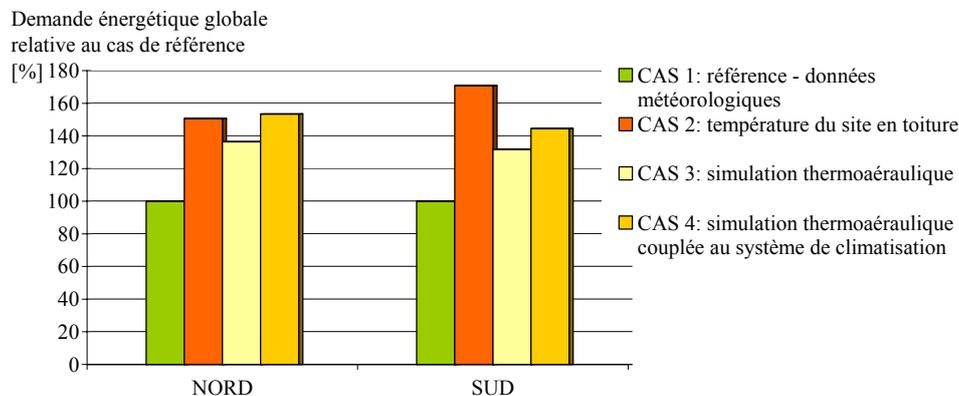


Figure 6-25- Comparaison, en pourcentage, de la demande énergétique calculée sur les 28 jours d'étude pour les différents niveaux de détermination des conditions extérieures par rapport au cas de référence

Les résultats obtenus, ont démontré l'importance de l'effet d'îlot de chaleur, ainsi que de la prise en compte des phénomènes de transfert thermoaéraulique dans la rue sur la demande énergétique. Pour le cas de la façade sud, Figure 6-25, cette différence est élevée par rapport au cas de référence, cas 1. Le choix d'une température extérieure fixée peut alors donner des résultats fortement sous-estimés, cas de référence, ou fortement surestimés, cas d'une température de référence au dessus des toitures. Enfin, le couplage de cette modélisation avec un modèle simplifié de fonctionnement de climatiseur en interaction avec la rue montre l'impact non négligeable de cette interaction sur le microclimat et donc sur la demande énergétique finale.

Pour améliorer cette modélisation, une prise en compte plus complète des charges anthropiques en milieu urbain ainsi qu'une meilleure définition des conditions limites et du couplage avec le bâti peut être envisagée. Cette approche pourrait aussi être couplée avec un modèle de plus grande échelle englobant l'ensemble de la ville, type de modélisation appelée aussi multi-échelle. Par ailleurs, des études expérimentales complémentaires permettraient d'étudier le phénomène d'îlot de chaleur de façon plus précise et sur de plus longues périodes. La mesure des transferts de masse et de chaleur dans la rue confrontée aux résultats de simulation permettrait de valider plus complètement les simulations. Enfin l'étude de différents systèmes de conditionnement des ambiances intérieures, dont leur consommation effective, permettrait d'établir la capacité de notre approche à discriminer correctement différentes solutions architecturales ou des choix de systèmes.

Notre approche nous permet en effet d'envisager des études paramétriques sur les constructions, le traitement des surfaces, ainsi que sur le choix et l'élaboration d'un système de traitement des ambiances intérieures et l'étude de scénari de fonctionnement sur des saisons complètes.

Conclusions et perspectives

Notre étude de l'impact du microclimat urbain sur le bâti nous a amené à définir les spécificités de ce microclimat et de l'effet d'îlot de chaleur urbain, phénomène critique en période estivale. L'approfondissement de cette problématique, au Chapitre 1, nous a permis d'identifier différents paramètres caractéristiques de ce phénomène, dont la production anthropique de chaleur en milieu urbain, ainsi que l'effet des principaux paramètres climatiques : l'écoulement d'air et l'ensoleillement. Au travers de l'étude bibliographique des couches limites atmosphériques, différentes échelles caractéristiques des phénomènes ont été définies, notamment pour le milieu urbain et la sous couche atmosphérique urbaine. Pour la suite de l'étude, nous avons fait le choix de modèles empiriques d'écoulement de grande échelle en conditions isothermes. À l'échelle microclimatique, la morphologie de la ville et des bâtiments intervient sur les écoulements d'air et l'ensoleillement. Nous avons retenu pour domaine d'étude le cas typique d'une rue canyon : cette forme est caractéristique de nombreux centres urbains et participe à l'effet de confinement des villes, tant au point de vue de l'écoulement aérodynamique que du rayonnement solaire. De plus, ce choix nous a permis d'étudier l'interaction du bâtiment avec son environnement proche.

La modélisation des transferts thermoaérodynamiques pour le domaine considéré a été ensuite développée à partir d'une modélisation zonale. Cette approche, intermédiaire entre la modélisation nodale et les codes fins de dynamique des fluides, offre la possibilité d'intégrer la connaissance empirique des phénomènes microclimatiques, tels qu'un modèle empirique d'écoulement dominant. De plus, des simulations sur de longues périodes ont pu être réalisées avec cette modélisation, tout en conservant un niveau de finesse compatible avec l'étude énergétique des bâtiments. Ce niveau de modélisation a été appliqué à la détermination de l'impact de l'ensoleillement sur les transferts thermoaérodynamiques dans une rue canyon, sans écoulement dominant. La modélisation du rayonnement dans le canyon utilise une méthode simplifiée de calcul des inter-réflexions, appelée « méthode des enceintes fictives ». Elle a été choisie afin de conserver un niveau de précision et des temps de calcul cohérents avec l'approche intermédiaire retenue. Les résultats de cette méthode simplifiée ont été confrontés à ceux obtenus par

la méthode précise des radiosités et ont montré la nécessité d'adapter la méthode pour une utilisation dans un environnement ouvert. Les nouveaux résultats obtenus se sont révélés suffisamment précis par rapport à l'énergie globale absorbée par les parois du canyon, bien que les variations de l'effet du confinement observé par le calcul précis ne soient pas précisément décrites sur chaque façade. Nous avons ensuite mis en évidence l'intérêt du couplage de ces modèles simplifiés, en particulier pour le calcul des inter-réflexions de grande longueur d'onde, en l'appliquant à l'étude des transferts thermo-aérauliques dans une rue canyon sur une journée type.

Pour compléter l'étude des écoulements d'air dans une rue canyon, nous avons effectué une étude des écoulements dominants, basée sur des données expérimentales établies dans le cadre du projet européen Urbvent pour cinq rues canyon situées dans le centre d'Athènes. L'analyse de l'écoulement moyen dans les rues et l'utilisation de modèles empiriques nous ont conduit à la définition d'une méthode de calcul de l'écoulement dominant moyen en conditions isothermes. Les résultats obtenus par cette approche ont été confrontés aux mesures de vitesses d'air et l'évolution des valeurs obtenues s'est révélée, pour l'ensemble des cas, cohérente avec l'évolution des valeurs mesurées, malgré la présence de perturbations thermiques lorsque la vitesse de vent est faible. La modélisation simplifiée de l'écoulement, en conditions supposées isothermes, a été ensuite couplée au modèle thermo-aéraulique de la rue canyon. Le couplage des modèles simples, des écoulements de grande échelle et des phénomènes de convection naturelle, a été mis en œuvre pour l'étude d'une rue canyon à Athènes, la rue Dervenion. Les temps de calcul réduits nous ont permis de réaliser une simulation sur une période de 28 jours avec un pas de temps horaire. Les résultats obtenus ont été utilisés d'une part pour l'estimation de l'effet d'îlot de chaleur et d'autre part pour l'étude de la demande énergétique des bâtiments en façade.

L'exploitation des résultats pour l'étude de l'effet d'îlot de chaleur urbain, du point de vue de la température à l'intérieur de la rue, a montré une bonne adéquation aussi bien au niveau de l'évolution que des valeurs calculées de température en différents points de mesure du canyon. L'étude a aussi mis en évidence l'importance de l'effet, sur l'évolution de la température d'air, de la géométrie du canyon et du couplage du modèle thermo-aéraulique avec les effets de l'écoulement dominant : cette évolution peut effectivement se révéler très différente de celle observée en toiture.

Finalement, la simulation réalisée pour une rue canyon a aussi permis d'estimer la demande énergétique liée aux transferts thermiques par conduction en façade pour des bâtiments climatisés. Les résultats ont été comparés avec ceux obtenus par une température de référence fixée, donnée par une station météorologique. La prise en compte dans notre simulation de l'ensemble des phénomènes microclimatiques, caractéristiques de la rue canyon, a montré, pour notre cas d'étude, un accroissement de la demande énergétique globale sur 28 jours de 31,9 à 36,4 %, pour chaque façade et par conduction thermique uniquement, par rapport au cas de référence précédent. De plus, nous avons montré l'effet sur les paramètres thermo-aérauliques de la zone étudiée du couplage du modèle avec le fonctionnement d'un système de climatisation, modélisé de façon simplifiée. Cette simulation a ainsi permis de quantifier l'impact relatif du fonctionnement de la climatisation sur les conditions de température extérieure, et donc la demande énergétique en façade de bâtiment qui s'est révélée supérieure de 44,4 à 53,4 %, pour chaque façade et par conduction thermique uniquement, par rapport au même cas de référence que précédemment. Nous avons ainsi montré l'importance de la modélisation suffisamment fine des conditions thermo-aérauliques aux abords des bâtiments dans l'étude de la demande énergétique en période estivale.

L'ensemble du travail réalisé dans cette étude ouvre de nombreuses perspectives tant au niveau du développement des modèles simplifiés proposés, qu'au niveau des applications dans l'étude énergétique des bâtiments et des microclimats urbains.

La modélisation de l'effet du rayonnement et de la circulation d'air pourrait ainsi être affinée et d'autres phénomènes pourraient être intégrés aux modèles proposés. Une meilleure prise en compte du confinement améliorerait la précision des résultats dans le calcul simplifié des inter-réflexions du rayonnement à l'intérieur d'une rue canyon. De plus, le développement de cette approche permettrait d'envisager des formes plus complexes, comme par exemple des architectures optimisées par rapport aux apports solaires. De même, la modélisation empirique de l'écoulement dominant, développée ici pour la rue canyon, pourrait être étudiée pour des motifs urbains différents. Ces développements nécessiteraient de définir une classification des formes urbaines courantes, avec pour chacune un modèle

empirique adapté et validé. Pour l'étude et le développement de formes originales de bâtiment, nous pourrions aussi utiliser des modèles simplifiés de calcul des écoulements tels que ceux proposés par Rockle (Rockle 1990; Kaplan et Dinar 1996), qui permettent le développement de codes dont les faibles temps de calcul sont compatibles avec notre modélisation simplifiée. Enfin, dans le cadre d'une étude plus détaillée d'une configuration précise, la modélisation fine de l'écoulement par un code de dynamique des fluides peut être envisagée en conditions isothermes. Par ailleurs, des modèles empiriques simples peuvent être intégrés pour une meilleure définition des transferts thermoaérauliques au niveau des façades. L'étude de ces transferts doit, pour être précise, tenir compte des effets des infiltrations, mais aussi des phénomènes de couche limite le long des parois verticales. La modélisation des transferts thermiques couplés aux transferts hydriques, au niveau des parois et du sol notamment, permettrait aussi d'envisager des études saisonnières plus complètes. Cette étude serait particulièrement intéressante pour la détermination de l'impact de la végétalisation des zones urbaines sur l'effet d'îlot de chaleur urbain. La modélisation de la dispersion de polluants en milieu urbain, couplée aux phénomènes thermoaérauliques, pourrait aussi être développée de façon similaire aux phénomènes de transport d'humidité.

Pour l'optimisation énergétique des bâtiments et du microclimat à l'échelle d'une rue, l'approche simplifiée proposée offre aussi des perspectives très intéressantes. En effet, de nombreuses études paramétriques sont envisageables dans la recherche de réduction des besoins de climatisation : étude et optimisation des scénarii de fonctionnement d'un système de climatisation ou de ventilation naturelle ou bien encore étude de la conception des façades et du traitement des surfaces urbaines. Les informations données par le modèle, sur les conditions de température, de vitesse d'air et d'ensoleillement, peuvent aussi être exploitées pour l'évaluation du confort extérieur.

Enfin, l'application de cette démarche à l'échelle d'un quartier ou d'une ville pourrait être envisagée. Ainsi, la conception d'un ensemble de bâtiments pourrait être menée en tenant compte de l'interaction entre les différentes zones dans une démarche générale d'optimisation énergétique. Cette démarche de conception pourrait alors s'intégrer dans une perspective plus globale et émergente de qualité environnementale de la construction qui intègre de nombreux paramètres énergétiques et environnementaux.

Références bibliographiques

- Akbari, H., M. Pomerantz et H. Taha** (2001). "Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas." *Solar Energy* 70(3), pp. 295-310.
- Allard, F.** (1987). *Contribution à l'étude des transferts de chaleur dans les cavités thermiquement entraînées: application aux cellules d'habitation*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, INSA de Lyon.
- Allard, F.** (Ed.) (1998). *Natural ventilation in buildings: a design handbook*. Ltd. Altener DG XVII. Published by James&James, London, ISBN 1 873936 72 9.
- Allard, F. et C. Ghiaus** (2004). *Final Report of the URBVENT project*. Brussels, European Commission Directorate General For Research, June 2004.
- Allard, F., C. Inard et A. Roldan** (1985). *Caractérisation théorique et expérimentale du comportement thermique d'une cellule d'habitation perturbée par des rayonnements de courtes et grandes longueurs d'onde*, Laboratoire équipement de l'habitat, INSA de Lyon, sept 1985.
- Allwine, K. J., J. H. Shinn, G. E. Streit, K. L. Clawson et M. J. Brown** (2002). "Overview of urban 2000." *Bulletin of the American Meteorological Society* 83(4), pp. 521-536.
- Antoine, M.-J. et D. Groleau** (1998). *Assessing solar energy and environmental variables in urban outdoor spaces : a simulation tool*. Eurosolar, 5th european conference on solar energy in architecture and urban plan, Bonn, Germany, pp. 108-110, 27-30 may 1998.
- Aubé, M.** (2002). *Initiation à la télédétection et à la modélisation de l'atmosphère (Version Préliminaire)*, Groupe de recherche et d'application en physique au collège de Sherbrooke, Mai 2002.
- Belarbi, R.** (2000). *Development of strategies for efficient use of solar passive ventilation in urban buildings*, Solvent Report, Université de La Rochelle, LEPTAB, April 2000.
- Bird, R. B., W. E. Stewart et E. N. Lightfoot** (1960). *Transport Phenomena*, John Wiley & Sons, Inc.
- Bonnet, C.** (2004). *Untersuchung Der Himmelstemperatur Bei Der Prüfung Von Sonnenkollektoren - Etude de l'influence de la température du ciel sur les tests de capteurs solaires thermiques*. Diplomarbeit. Wien, Österreichisches Forschung - und Prüfzentrum Arsenal G.m.b.H. et Département GEN, INSA de Lyon, Septembre 2004.
- Bottema, M.** (1996). "Roughness parameters over regular rough surfaces: Experimental requirements and model validation." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 64(2-3), pp. 249-265.
- Bottema, M.** (1997). "Urban roughness modelling in relation to pollutant dispersion." *Atmospheric Environment* 31(18), pp. 3059-3075.
- Bottema, M. et P. G. Mestayer** (1998). "Urban roughness mapping - validation techniques and some first results." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 74-76, pp. 163-173.
- Brown, M. J. et G. E. Streit** (1998). *Emergency Responders' "Rules-of-Thumb" for Air Toxics Releases in Urban Environments*, Report LA-UR-98-4539, Los Alamos National Laboratory, University of California, United States.
- Bulh, W. F., A. E. Erdem et F. Winkelmann** (1993). *Recent improvements in SPARK: Strong component decomposition, multivalued objects, and graphical interface*. Third International IB-PSA Conference, Adelaide, Australia, pp. 283-289.
- Ca, V. T., T. Asaeda, M. Ito et S. Armfield** (1995). "Characteristics of wind field in a street canyon." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 57(1), pp. 63-80.
- Cadiergues, R.** (1998). *Recueil des démarches et formules du guide AICVF N°2 - Calcul des charges de climatisation et conditionnement d'air*. Collection des guides de l'AICVF, ISSN 1147-4378. 222 pp. Editions PYC Livres, Paris, ISBN 2 911008 23 5.
- Capeluto, I. G., A. Yezioro et E. Shaviv** (2003). "Climatic aspects in urban design--a case study." *Building and Environment* 38(6), pp. 827-835.
- Carrilho da Graca, G., Q. Chen, L. R. Glicksman et L. K. Norford** (2002). "Simulation of wind-driven ventilative cooling systems for an apartment building in Beijing and Shanghai." *Energy and Buildings* 34(1), pp. 1-11.
- Chen, Q. Y.** (2004). "Using computational tools to factor wind into architectural environment design." *Energy and Buildings* 36(12), pp. 1197-1209.
- Chimklai, P., A. Hagishima et J. Tanimoto** (2004). "A computer system to support Albedo Calculation in urban areas." *Building and Environment* 39(10), pp. 1213-1221.

- CITEPA (2001). *Le CITEPA a 40 ans*. CITEPA, Centre Interprofessionnel Technique d'étude de la Pollution Atmosphérique.
- Fan, H. et D. J. Sailor (2005). "Modeling the impacts of anthropogenic heating on the urban climate of Philadelphia: a comparison of implementations in two PBL schemes." *Atmospheric Environment* 39(1), pp. 73-84.
- Gadgil, A. J. (1980). *On convective heat transfer in building energy analysis*. PhD Thesis, Lawrence Berkeley Laboratory, University of California.
- Gandemer, J. (1981). "The aerodynamic characteristics of windbreaks, resulting in empirical design rules." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 7(1), pp. 15-36.
- Georgakis, C. et M. Santamouris (2005). *Canyon effects: Calculation of wind speed in an urban street canyon with the aid of a semi-empirical model based on experimental data*. International Conference "Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment", Santorini, Greece, May 2005.
- Germano, M., C.-A. Roulet, F. Allard et C. Ghiaus (2002). *Potential for natural ventilation in urban context: an assessment method*. EPIC 2002 AIVC, Lyon, France, 23-26 october.
- Glockner, S., J.-P. Caltagirone et P. Morel (1999). "Modélisation d'écoulements dans des espaces urbains." *International Journal of Thermal Sciences* 38(8), pp. 703-711.
- Goodridge, J. D. (1992). "Urban bias influences on long-term California air temperature trends." *Atmospheric Environment. Part B. Urban Atmosphere* 26(1), pp. 1-7.
- Grimmond, C. S. B. et T. R. Oke (1999). "Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form." *Journal of Applied Meteorology* 38(9), pp. 1262-1292.
- Haghighat, F., J. Rao et P. Fazio (1991). "The influence of turbulent wind on air change rates--a modelling approach." *Building and Environment* 26(2), pp. 95-109.
- Hanna, S. R. et J. C. Chang (2004). *Use of urban field study data*. The 84th AMS Annual Meeting, Seattle, WA, 13 January.
- Heino, R. (1999). "Homogeneity of the long-term urban data records." *Atmospheric Environment* 33(24-25), pp. 3879-3883.
- Hosker, R. P. J. (1984). *Flow and Diffusion Near Obstacles*, Atmospheric Science and Power Production - DOE/TIC-27601, U.S. Dept. Of Energy, Wash., DC.
- Hotchkiss, R. S. et F. H. Harlow (1973). *Air pollution transport in street canyons*, Technical Report EPA-R4-73-029, NTIS PB-233 252, Prepared by Los Alamos National Laboratory for U.S. Environmental Protection Agency.
- Inard, C. (1988). *Contribution à l'étude du couplage thermique entre une source de chaleur et un local*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées, INSA de Lyon.
- Jeong, S. J. et M. J. Andrews (2002). "Application of the k- ϵ turbulence model to the high Reynolds number skimming flow field of an urban street canyon." *Atmospheric Environment* 36(7), pp. 1137-1145.
- Jiang, Y. et Q. Chen (2002). "Effect of fluctuating wind direction on cross natural ventilation in buildings from large eddy simulation." *Building and Environment* 37(4), pp. 379-386.
- Kaplan, H. et N. Dinar (1996). "A lagrangian dispersion model for calculating concentration distribution within a built-up domain." *Atmospheric Environment* 30(24), pp. 4197-4207.
- Karl, T. R. et P. D. Jones (1989). "Urban bias in area-averaged surface air temperature trends." *Bulletin - American Meteorological Society* 70(3), pp. 265-270.
- Kim, J.-J. et J.-J. Baik (2001). "Urban street-canyon flows with bottom heating." *Atmospheric Environment* 35(20), pp. 3395-3404.
- Knowles, R. L. (2003). "The solar envelope: its meaning for energy and buildings." *Energy and Buildings* 35(1), pp. 15-25.
- Kolokotroni, M., R. Watkins, M. Santamouris, K. Niahou, F. Allard, R. Belarbi, C. Ghiaus, S. Alvarez et J. M. Salmeron-Lissen (2002). *Passive ventilation cooling in urban buildings: an estimation of potential environmental impact benefits*. EPIC 2002 AIVC, Lyon, France, pp. 531-536, 23-26 october.
- Landsberg, H. E. (1979). "Atmospheric changes in a growing community (the Columbia, Maryland experience)." *Urban Ecology* 4(1), pp. 53-81.

- Landsberg, H. E.** (1981). *The urban climate*, Academic Press. International geophysics series, ISSN 0074-6142, 28, New-York, Edited by J. Van Mieghem, H. L. Hales and W. L. Donn. 275 pp. A Subsidiary of Harcourt Brace Jovanovich, Publishers, ISBN 0-12-435960-4.
- Lauret, A. J. P., T. A. Mara, H. Boyer, L. Adelard et F. Garde** (2001). "A validation methodology aid for improving a thermal building model: case of diffuse radiation accounting in a tropical climate." *Energy and Buildings* 33(7), pp. 711-718.
- Lebrun, J.** (1970). *Exigences physiologiques et modalités physiques de la climatisation par source statique concentrée*. Thèse de Doctorat.
- Lettau, H. H.** (1969). "Note on aerodynamic roughness-parameter estimation on the basis of roughness-element description." *Journal of Applied Meteorology*(8), pp. 828-832.
- Martin, M. et P. Berdahl** (1984). "Characteristics of Infrared Sky Radiation in the United States." *Solar Energy* 33(3-4), pp. 321-336.
- Meinders, E. R., K. Hanjalic et T. H. Van Der Meer** (1998). *Similarity and dissimilarity between the surface heat transfer and the flow structure in turbulent flows over surface-mounted cubes*. Heat Transfer, proceedings of 11th IHTC.
- Mestayer, P. G., J.-F. Sini, C. Rey, S. Anquetin, S. M. Badri Kusuma, D. Lakehal et C. Moulinec** (1993). "Pollutant dispersion in the urban atmosphere: simulation of turbulent flows using a k-eps model." *ERCOFTAC Bulletin* 16, pp. 22-28.
- Miguet, F. et D. Groleau** (2002). "A daylight simulation tool for urban and architectural spaces-- application to transmitted direct and diffuse light through glazing." *Building and Environment* 37(8-9), pp. 833-843.
- Montávez, J. P., J. F. González-Rouco et F. V. Valero** (2003). *A set of equations for determining the maximum intensity of nocturnal urban heat island*. Fifth International Conference on Urban Climate, ICUC-5, Todz, 1-5 september 2003.
- Mora, L.** (2003). *Prédiction des performances thermo-aérauliques des bâtiments par association de modèles de différents niveaux de finesse au sein d'un environnement orienté objet*. Thèse de Doctorat. Laboratoire d'Étude des Phénomènes de Transfert Appliqués au Bâtiment (LEP-TAB), Université de La Rochelle.
- Mora, L., K. C. Mendonça, E. Wurtz et C. Inard** (2003). *Simspark: an object-oriented environment to predict coupled heat and mass transfers in buildings*. Building Simulation'03 Conference, Eindhoven, The Netherlands, pp. 903-910, August 2003.
- Murakami, S.** (2004). "Indoor/outdoor climate design by CFD based on the Software Platform." *International Journal of Heat and Fluid Flow* 25(5), pp. 849-863.
- Musy, M.** (1999). *Génération automatique de modèles zonaux pour l'étude du comportement thermo-aéraulique des bâtiments*. Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle.
- Nicholson, S. E.** (1975). "A pollution model for street-level air." *Atmospheric Environment* (1967) 9(1), pp. 19-31.
- Offerle, B., C. S. B. Grimmond, K. Fortuniak, T. R. Oke et K. Klysik** (2003). *Temporal variability in heat fluxes over a northern european downtown*. Fifth International Conference on Urban Climate, ICUC-5, Todz, 1-5 september 2003.
- Oke, T. R.** (1987). *Boundary layer climates*, Second Edition. 435 pp. University press, Cambridge, ISBN 0 415 04319 0.
- Okeil, A.** (2004). *In Search for energy efficient urban forms: the residential solar block*. CIB World Building Congress 2004, Toronto, Ontario, Canada, May 2-7.
- Pardijak, E. R., M. J. Brown et N. Bagal** (2004). *Improved Velocity Deficit Parameterizations for a Fast Response Urban Wind Model*. 84th American Meteorological Society Annual Meeting, Seattle, WA, January 13, 2004.
- Perez, R., R. Seals, P. Ineichen, R. Stewart et D. Menicucci** (1987). "A New simplified version of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces." *Solar Energy*(39), pp. 221-231.
- Perez-Garcia, M.** (2004). "Simplified modelling of the nocturnal clear sky atmospheric radiation for environmental applications." *Ecological Modelling* 180(2-3), pp. 395-406.
- Plate, E. J. et H. Kiefer** (2001). "Wind loads in urban areas." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 89(14-15), pp. 1233-1256.

- Raga, G. B., T. Castro et D. Baumgardner** (2001). "The impact of megacity pollution on local climate and implications for the regional environment: Mexico City." *Atmospheric Environment* 35(10), pp. 1805-1811.
- Ratti, C., D. Raydan et K. Steemers** (2003). "Building form and environmental performance: archetypes, analysis and an arid climate." *Energy and Buildings* 35(1), pp. 49-59.
- Robitu, M., C. Inard, D. Groleau et M. Musy** (2004). "Energy balance study of water pond and its influence on building environment." *Building Serv. Eng. Res. Technol.* 25(3), pp. 171-182.
- Rockle, R.** (1990). *Bestimmung der Stömungsverhältnisse im Bereich komplexer Bebauungsstrukturen*. Ph.D. thesis, Vom Fachbereich Mechanik, der Technischen Hochschule Darmstadt, Germany.
- Rotach, M. W.** (1999). "On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion." *Atmospheric Environment* 33(24-25), pp. 4001-4008.
- Roux, J.-J.** (1984). *Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments*. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 201 pp.
- Sailor, D. J. et L. Lu** (2004). "A top-down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas." *Atmospheric Environment* 38(17), pp. 2737-2748.
- Samaali, M.** (2002). *Évaluation d'un modèle de couche limite atmosphérique 3D dans un cas homogène: application à une parcelle agricole de soja*, École Polytechnique Universitaire de Marseille, Université de Provence.
- Santamouris, M., K. Papakonstantinou et C. Georgakis** (2001a). *Natural ventilation in urban-areas*, URBVENT report, Contribution to Task 1.1.1.-2.1.1. and 2.1.2., University of Athens, March 2001.
- Santamouris, M., N. Papanikolaou, I. Livada, I. Koronakis, C. Georgakis, A. Argiriou et D. N. Assimakopoulos** (2001b). "On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings." *Solar Energy* 70(3), pp. 201-216.
- Sini, J.-F., S. Anquetin et P. G. Mestayer** (1996). "Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons." *Atmospheric Environment* 30(15), pp. 2659-2677.
- Smagorinsky, J.** (1963). "General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment." *Monthly Weather Review*(91), pp. 99-164.
- Small, G.** (1982). *Turf Town - Solar zoning and ecological concerns for gridiron development for Southpark in downtown Los Angeles*. Artwork exhibited in L.A. county museum of science and industry and L.A. planning department.
- Strawbridge, K. B. et B. J. Snyder** (2004). "Planetary boundary layer height determination during Pacific 2001 using the advantage of a scanning lidar instrument." *Atmospheric Environment* 38(34), pp. 5861-5871.
- Theurer, W.** (1999). "Typical building arrangements for urban air pollution modelling." *Atmospheric Environment* 33(24-25), pp. 4057-4066.
- Tsai, M. Y. et K. S. Chen** (2004). "Measurements and three-dimensional modeling of air pollutant dispersion in an Urban Street Canyon." *Atmospheric Environment* 38(35), pp. 5911-5924.
- Vachon, G.** (2001). *Transferts des polluants des sources fixes et mobiles dans la canopée urbaine: évaluation expérimentale*. Thèse de Doctorat. Nantes, École Centrale de Nantes, 210 pp.
- Vardoulakis, S., B. E. A. Fisher, K. Pericleous et N. Gonzalez-Flesca** (2003). "Modelling air quality in street canyons: a review." *Atmospheric Environment* 37(2), pp. 155-182.
- Walton, G. N.** (1980). "A New algorithm for radiant interchange in rooms loads calculations." *ASH-RAE Transactions* 86(2), pp. 190-208.
- William, G. P. et L. W. Gold** (1977). *CBD-180-F. Les températures de sol-* Digeste de la construction au Canada- <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd180f.html>, Institut de Recherche en Construction, février 1977.
- Wurtz, E.** (1995). *Modélisation tridimensionnelle des transferts thermiques et aérauliques dans le bâtiment en environnement orienté objet*. Thèse de Doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France.
- Xie, X., Z. Huang, J. Wang et Z. Xie** (2005). "The impact of solar radiation and street layout on pollutant dispersion in street canyon." *Building and Environment* 40(2), pp. 201-212.

Annexe A

Description de classes macroscopiques de SPARK pour la résolution thermoaéraulique couplée d'un problème

La résolution d'un problème thermoaéraulique avec l'outil informatique SPARK a conduit à la définition de classes macroscopiques, ou objets, pour le cas des ambiances intérieures. La définition de ces objets a conduit au développement d'une librairie intégrée dans un outil de pilotage de projets SPARK : SimSPARK. Nous définissons ici une modification de la classe interface pour permettre la prise en compte d'un écoulement dominant défini empiriquement ou par un modèle tiers.

La définition d'un problème sous SPARK

La définition d'un problème sous SPARK se fait principalement par la définition des liens entre objets ou classes macroscopiques dans un fichier de projet, extension *.pr*. Dans ce fichier sont déclarés l'ensemble des cellules, notées *cell*, *cel* ou *c*, et interfaces, notées *interf* ou *i*, du domaine étudié ainsi que les parois, notées *paroi*. Les dimensions du maillage sont associées aux différents objets et repérées par *l*, *w* et *h*. Les données caractéristiques des surfaces de parois sont repérées par le terme *param*. Un fichier de projet se décompose principalement en quatre parties détaillées sur la figure A-1 : la déclaration des objets qui font références aux classes macroscopiques associées, les variables intermédiaires qui forment des liens entre les différents éléments du maillage, les données liées aux caractéristiques de parois et les données liées aux dimensions du domaine.

Projet SPARK	
Objets (declare)	
<i>c_x_y_z</i>	(cell)
<i>i_eo_x_y_z</i>	(interf_v) ou (paroi_am_v_RAY) ou (paroi_av_v_RAY) ou (ouv_v_am_dfixe_RAY) ou ...
<i>i_sn_x_y_z</i>	(interf_v) ou (paroi_am_v_RAY) ou (paroi_av_v_RAY) ou (ouv_v_am_dfixe_RAY) ou ...
<i>i_bh_x_y_z</i>	(interf_h) ou (paroi_am_h_RAY) ou (paroi_av_h_RAY) ou (ouv_h_am_dfixe_RAY) ou ...
<i>c_sn_x_y_z</i>	(cel_ext_debit_fixe) ou (cel_ext_p_fixee)
Variables intermédiaires (liens)	
<i>cel_x_y_z</i>	<i>c_x_y_z.cel, i_or_x_y_z.cel_av, i_or_x_y_z.cel_am</i>
<i>cel_x_y_z</i>	<i>c_or_x_y_z.cel, (i_or_x_y_z.cel_av ou i_or_x_y_z.cel_am)</i> cas des cellules hors limites
<i>flow_or_x_y_z</i>	<i>i_or_x_y_z.flow, c_x_y_z.f_or</i>
<i>cel_or_x_y_z</i>	<i>c_or_x_y_z.cel, (i_or_x_y_z.cel_am ou i_or_x_y_z.cel_av)</i>
<i>surf_i_or_x_y_z</i>	<i>i_or_x_y_z.surf_i, ray.surf_i_or_x_y_z</i>
<i>surf_i_or_x_y_z</i>	<i>i_or_x_y_z.surf_i, ray.surf_i_or_x_y_z</i>
Données (liens)	
<i>param_or_x_y_z</i>	<i>i_or_x_y_z.param, ray.param_or_x_y_z</i>
Données (inputs)	
<i>l_or_x_y_z</i>	(<i>i_or_x_y_z.l1</i> ou <i>i_or_x_y_z.l2</i>) (amont ou aval)
<i>l_x_y_z</i>	<i>c_x_y_z.l, i_or_x_y_z.l1, i_or_x_y_z.l2, i_or_x_y_z.w</i>
<i>w_x_y_z</i>	<i>c_x_y_z.w, i_or_x_y_z.l1, i_or_x_y_z.l2, i_or_x_y_z.w</i>
<i>h_x_y_z</i>	<i>c_x_y_z.h, i_or_x_y_z.h1, i_or_x_y_z.h2, i_or_x_y_z.h</i>

Figure A-1- Description d'un fichier de projet SPARK

Des éléments spécifiques apparaissent, comme le cas d'ouvertures sur l'extérieur, notées *ouv*, qui peuvent correspondre à une bouche de soufflage ou une grande ouverture. Les flux entre cellules sont repérés par la classe d'objets *flow*. L'orientation des éléments d'interface sont repérés en fonction de leur orientation *or* qui correspond à ouest/est, sud/nord ou bas/haut correspondant respectivement aux axes *x*, *y* et *z* et notées *eo*, *bh* et *sn*.

Définition de la classe macroscopique cellule

Dans la modélisation zonale, les conditions de température et de pression sont considérées comme homogènes sur chacun des sous-volumes du maillage appelés cellules et dont la classe macroscopique associée *.cell* est détaillée à la figure A-2. Sur chacun de ces sous-volumes on vérifie les équations de bilan de masse, classe macroscopique *bmasse_as* pour l'air sec et *bmasse_ve* pour la vapeur d'eau, ainsi que l'équation de bilan de l'énergie thermique, notée *bilan_energie_dyn*, et la loi des gaz parfaits, *idealgas*. Les connections de l'objet *.cell* avec les autres éléments de la simulation sont appelés des « ports », ces ports correspondent aux variables ou données géométriques qui permettent la résolution des équations caractérisant l'objet cellule et chaque port est lié à un port d'un ou plusieurs sous objets ou équations. Les équations caractéristiques de la cellule sont définies par d'autres classes d'objets de la librairie. Certaines variables sont communes à plusieurs équations et liées par la définition de variables intermédiaires ou liens. D'autres sont des constantes fixées et lues dans des fichiers d'entrée et déclarées comme « inputs ».

.cell			
Ports		Variables intermédiaires (liens)	
.cel	.t	gp.t, ps.T, hr.t, i1.x	rhodot_ve = bmasse_ve.rhodot = i2.xdot tdot = benergie.tdot = i1.xdot dt = i1.dt = i2.dt PsatAbs = ps.P = hr.psat
	.p	gp.p	
	.rho	s1.c	
	.x	q.c	
	.phi	hr.phi	Données (inputs)
	.rho_as	gp.rho_as, s1.a, q.b, benergie.rho	
	.rho_ve	gp.rho_ve, s1.b, q.a, i2.x, hr.rho_ve	
.f_or (x6)	.flux	benergie.ft_or	mve_source = bmasse_ve.debit_source
	.flow_as	bmasse_as.debit_or	flt_source = benergie.ft_source
	.flow_ve	bmasse_ve.debit_or	
.l	benergie.l, bmasse_ve.l		
.w	benergie.w, bmasse_ve.w		
.h	benergie.h, bmasse_ve.h		
Équations			
bmasse_as (bilan_masse)	$\sum debit_{or} = 0$	(CM)	
bmasse_ve (bilan_masse_dyn)	$\sum debit_{or} + debit_{source} = lwh \cdot rhodot$	(CM)	
bilan_energie_dyn (benergie)	$\sum flt_{or} + flt_{source} = CP \cdot AS \cdot rho \cdot lwh \cdot thodot$	(CE)	
idealgas (gp)	$p = (rho_{as} \cdot R_{as} + rho_{ve} \cdot R_{VE})(t + 273,15) - PATM$	(GP)	
psat_mw (ps)	$p = p_{psat_mw}(T)$		
HR (hr)	$phi = rho_{ve} \cdot R_{VE} \cdot (t + 273,15) / psat$		
s1 (sum)			
q (quot)			
i1, i2 (bd4)			

Figure A-2- Description de la classe macroscopique .cell

Définition de la classe macroscopique modifiée d'interface

C'est au niveau des interfaces entre cellules que l'on définit les flux de masse et de chaleur. Aussi l'écoulement forcé dû à un écoulement de grande échelle tel que le vent est intégré ici dans les classes macroscopiques d'interfaces verticales et horizontales *interf_v* et *interf_h* ou les interfaces ouvertes repérées *ouv*. Le débit dû au vent ou un autre écoulement forcé est un port d'entrée de la classe d'interface et est ici noté *flow_wind*, intégré dans les flux de masse *flow* comme dans l'exemple de l'interface verticale Figure A-3. Le débit total d'air sec *flow_aswind* est alors lié au flux d'air de l'équation de conservation de la masse, objets *s2* et *s3*, ainsi qu'à l'équation de bilan de l'énergie thermique et au transport d'énergie thermique *ft*. Le débit d'air sec dû aux mouvements de convection naturelle et noté *flow_as* est lié à la loi d'écoulement en pression du modèle zonal *debl*. Le débit dû au vent est lié à un fichier d'entrée, déclaré comme INPUT et calculé par un code indépendant.

.Interf_v_wind			
Ports		Variables intermédiaires (liens)	
.flow	.flow_aswind	s3.c (flow_wind+flow_as), deb2.mas,ft.debit, s2.a	phi_d = fd.phi = s1.a
	.flow_wind	input	phi_t = ft.phi = s1.b
	.flux	s1.c (flux_diff+flux_transp)	debit = s2.c
	.flow_as	deb1.debit_i, s3.b	
	.flow_ve	deb2.mve, s2.b	
.cel_am	.t	fd.t1, ft.t1	
	.p	deb1.p1	
	.rho	deb1.rho1, deb2.rho1	
	.rho_as	deb1.rho_i1, deb2.rho_as1	
	.rho_ve	deb2.rho_ve1	
.cel_av	.t	fd.t2, ft.t2	
	.p	deb1.p2	
	.rho	deb1.rho2, deb2.rho2	
	.rho_as	deb1.rho_i2, deb2.rho_as2	
	.rho_ve	deb2.rho_ve2	
.l1	fd.l1, deb2.l1		
.l2	fd.l2, deb2.l2		
.h	fd.h, deb1.h, deb2.h		
.w	fd.w, deb1.w, deb2.w		
Équations			
deb1 (debit_non_lineaire_DC)	$debit_i = CD \cdot rho_i1 \cdot \sqrt{2 \cdot p1 - p2 / rho1}$	(LEP)	
deb2 (debit_ve) > .mve	debit_transp_ve + debit_diff_ve,	(CME) eau	
fd (flux_diff_kc)	$phi_d = K_AS \cdot w \cdot h \cdot (t1 - t2) / ((l1 + l2) / 2)$	(CE)	
ft (flux_transp)	$phi_t = CP_AS \cdot debit \cdot (t1 \text{ si debit pos; } t2 \text{ sinon})$	(CE)	
s1 (sum)	s1.c = s1.a + s1.b	(CE)	
s2 (sum)	s2.c = s2.a + s2.b	(CM)	
s3 (sum)	s3.c = s3.a + s3.b	(CM)	
		.flow.flow_wind = s3.a	

Figure A-3- Description de la classe macroscopique d'interface verticale Interf_v_wind intégrant un débit dû à un écoulement dominant

Annexe B

Modèles empirique de vent dans une rue de type canyon

Lorsque la vitesse de vent en toiture est faible, en deçà de 4 m/s et plus élevée que 0,5 m/s, la corrélation entre cette vitesse et les vitesses d'air dans la cavité de la rue canyon est difficile à établir. Bien que ce champ de vitesse soit de type stochastique, l'analyse de données expérimentales a conduit (Georgakis et Santamouris 2005) à établir une estimation empirique de ces vitesses d'air.

La première estimation est donnée par le tableau suivant, et dénommé modèle empirique A, pour le cas où l'angle d'incidence du vent à l'extérieur du canyon est parallèle à l'axe de celui-ci.

Valeurs de vitesse d'air à l'intérieur du canyon lorsque le vent incident est dans l'axe du canyon, d'après le rapport final d'Urbvent (Allard et Ghiaus 2004; Georgakis et Santamouris 2005)

Vitesse de Vent en toiture (U)	Vitesse de vent à l'intérieur du canyon	Valeur Typiques dans le canyon	
		En partie basse	En partie haute
$0 < U < 1$	0.3m/s - 0.7 m/s	0.3 m/s	0.7 m/s
$1 < U < 2$	0.4m/s - 1.3 m/s	0.4 m/s	1.3 m/s
$2 < U < 3$	0.4m/s - 1.5 m/s	0.4 m/s	1.5 m/s
$3 < U < 4$	0.4m/s - 2.2 m/s	0.4 m/s	2.2 m/s

Ce tableau récapitule les ordres de grandeur de vitesse d'air pouvant être utilisés dans le canyon.

De même, dans le cas où le vent est perpendiculaire ou oblique à l'axe du canyon, le tableau suivant est alors utilisé (modèle empirique B) :

Valeurs de vitesse d'air à l'intérieur du canyon lorsque le vent incident est perpendiculaire ou oblique à l'axe du canyon, d'après le rapport final d'Urbvent (Allard et Ghiaus 2004; Georgakis et Santamouris 2005)

Vitesse de Vent en toiture (U)	Vitesse de vent à l'intérieur du canyon		
	Près de la façade au vent du canyon		Près de la façade sous le vent
	En partie basse	En partie haute	
$0 < U < 1$	0.4 m/s	0.7 m/s	0.4 m/s
$1 < U < 2$	0.4 m/s	1.3 m/s	0.4 m/s
$2 < U < 3$	0.6 m/s	1.5 m/s	0.6 m/s
$3 < U < 4$	0.7 m/s	3 m/s	0.7 m/s