

Modélisation et simulation des microclimats urbains : Étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers

Khaled Athamena

▶ **To cite this version:**

Khaled Athamena. Modélisation et simulation des microclimats urbains : Étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers. Architecture, aménagement de l'espace. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2012. Français. NNT : 498-231 . tel-00811583

HAL Id: tel-00811583

https://theses.hal.science/tel-00811583

Submitted on 10 Apr 2013

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.

Ecole Centrale de Nantes

ECOLE DOCTORALE :
SCIENCE POUR L'INGENIEUR, GEOSCIENCES, ARCHITECTURE

*Année **2012***

Thèse de DOCTORAT

Spécialité : ARCHITECTURE

FILIERE DOCTORALE : AMBIANCES ARCHITECTURALES ET URBAINES

Présentée et soutenue publiquement par :

KHALED ATHAMENA

Le 11/10/2012

À **l'Ecole Centrale de Nantes**

TITRE

MODELISATION ET SIMULATION DES MICROCLIMATS URBAINS : ÉTUDE DE L'IMPACT DE LA MORPHOLOGIE URBAINE SUR LE CONFORT DANS LES ESPACES EXTERIEURS. CAS DES ECO-QUARTIERS.

JURY

PRESIDENT	**LUC ADOLPHE**	Professeur, INSA de Toulouse
RAPPORTEURS	**BERTRAND CARISSIMO**	Chercheur Senior, CEREA de Paris
	CHRISTIAN INARD	Professeur, l'Université de La Rochelle
EXAMINATEURS	**JAQUES TELLER**	Professeur, l'Université de Liège
	JEAN-FRANÇOIS SINI	Professeur, l'Ecole Centrale de Nantes
	MARJORIE MUSY	Ingénieur de recherche, CERMA Nantes
INVITE	**SERGE SALAT**	Docteur, Architecte et Urbaniste, CSTB Paris
	JULIEN GUILHOT	Ingénieur, CSTB Nantes

Directeur de thèse : **Pr. JEAN-FRANÇOIS SINI**
Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique (LHEEA), Ecole Centrale de Nantes, 1 Rue de la Noë, 44300 Nantes.

N° ED 498-231

Modélisation et simulation des microclimats urbains : Étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers.

-Khaled ATHAMENA-

"Si nous n'arrivons pas à faire passer notre message aux parents et aux dirigeants d'aujourd'hui, nous risquons fort de miner le droit fondamental de nos enfants à vivre dans un environnement enrichissant et vivifiant[1] "

[1] **Gro Harlem Bruntland**, avant-propos de la présidente au rapport des Nations unies, Notre avenir à tous, 1987.

Remerciements

« رب أوزعني أن أشكر نعمتك التي أنعمت علي وعلى والدي وأن أعمل صالحا ترضاه وأدخلني برحمتك في عبادك الصالحين »

الحمد لله رب العالمين ، والصلاة والسلام على خاتم الأنبياء والمرسلين ، المبعوث رحمة للعالمين، محمد وعلى آله وصحبه أجمعين . أما بعد :

Les remerciements, c'est toujours un moment émouvant…! Cela signifie que je suis arrivé à la fin de mon parcours de doctorant ☺!

De nombreuses personnes ont contribué à l'achèvement de ce travail. Je tiens à les remercier très chaleureusement, et tout particulièrement :

- Mon directeur de thèse, **Jean François SINI**, qui a su orienter mes recherches en me faisant découvrir le domaine de la mécanique des fluides à travers son regard d'expert dans les transferts thermo-aérauliques urbains. Tes remarques et tes conseils m'ont été très bénéfiques. Je te remercie pour ta patience et la confiance que tu m'as accordée tout au long de ce travail ainsi que pour la sympathie que tu as eu à mon égard.
- Mes rapporteurs de thèse **Christian INARD** et **Bertrand CARISSIMO** pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail. C'est un honneur pour moi de recevoir leurs analyses et leurs critiques. Merci également aux autres membres du jury notamment le président, **Luc ADOLPHE**, qui ont accepté d'évaluer ce travail.
- Le CSTB Nantes et son équipe pour leur accueil, notamment mes deux encadrant de thèse : **Julien GUILHOT** pour sa disponibilité et ses conseils et **Maeva SABRE** pour son soutien moral et technique permanent. Je remercie aussi Fabrice DE OLIVEIRA et Sylvain AGUINAGA pour leur assistance et leur appui.
- Mes deux amis de bureau qui ont joué un rôle important dans ce travail de recherche. Tout d'abord, **Nicolas LE ROUX** pour avoir consacré de son temps et de sa patience à la lecture et à la correction de mon manuscrit. Grâce à lui et à sa famille, je garderai un très bon souvenir du "peuple Breton". Jamais je n'oublierai tes crêpes et les très agréables séjours à la petite villa de Mazou et à Brest chez la famille Le Hir. Puis, **Adrien COURBOIS** pour ses conseils dans le domaine de l'ingénierie et par son pragmatisme. Avec toi, jamais je n'oublierai notre weekend en Holland, notre concert "Main Square" et nos séjours à la petite maison des Courbois, dans la prairie lilloise.
- Marjorie MUSY, Laurent MALYS, Julien BOUYER du CERMA et Jean Michel ROSANT du LHEEA qui ont toujours trouvé le temps pour répondre à mes questions et orienter mes choix.

J'en profite également pour dédier ce travail à mes chers parents notamment à mon père qui a toujours cru en moi et qui m'a toujours encouragé pour aller loin dans mes études. Ce travail est aussi dédié à tous mes amis de Nantes (Alban, Laëtitia, Jaime, Nabil, Amine, Malik, Mohamed…) et d'Algérie (Imad et Hamza). Enfin, je le dédie à toi, Souhila (If I go your way or you come to mine, come let's create a new humankind).

Résumé

Les éléments bâtis du tissu urbain modifient fortement les paramètres microclimatiques à l'échelle locale en perturbant la distribution de l'écoulement du vent et en amplifiant les transferts de chaleur entre les surfaces. Le bilan énergétique thermo-radiatif des espaces extérieurs est ainsi étroitement lié à la nature et à la morphologie des arrangements de bâtiments. Ce travail de recherche vise à étudier par le biais de la modélisation et de la simulation numérique la relation entre la morphologie urbaine spécifique des éco-quartiers, le microclimat et le confort ou l'inconfort thermique dans les espaces publics extérieurs.

Pour caractériser cet impact, nous avons développé une approche numérique basée sur un couplage entre un modèle CFD (*Code_Saturne* développé par EDF) et un modèle thermo-radiatif (*Solene* développé par le laboratoire CERMA). Les paramètres physiques simulés (température de surface, température de l'air, vitesse du vent et énergie cinétique turbulente) permettant d'évaluer les indices de confort du milieu extérieur ont été comparés avec les données de mesure obtenues durant la campagne expérimentale EM2PAU (Nantes, 2010-2011) afin de valider la pertinence et la robustesse du modèle numérique développé.

Nous avons par la suite appliqué le modèle numérique développé à trois configurations d'éco-quartiers représentatives d'une forme urbaine particulière afin d'analyser leurs impacts sur le confort extérieurs. Les résultats de cette étude ont été croisés avec ceux de l'étude des indicateurs physico-morphologiques menée en parallèle pour évaluer les effets de la géométrie urbaine sur les ambiances dans les espaces extérieurs. Les conclusions de cette recherche ont abouti à l'élaboration de quelques recommandations sur la conception des éco-quartiers pour les architectes et les urbanistes.

Mots clés :

Morphologie urbaine, éco-quartiers, modélisation et simulation numérique, microclimat urbain, confort thermique extérieur.

Abstract

The building elements of urban fabric induce significant change in the microclimatic parameters at local scale by affecting the local wind field and increasing the heat transfers between walls, ground and air. The thermo-radiative energy balance of outdoor spaces is closely linked to the nature and morphology of the building arrangement. This research work aims to study the relationship between urban forms of eco-districts, microclimate and outdoor thermal comfort in public outdoor spaces through modeling and numerical simulations.

To characterize this impact, we developed a numerical approach based on a coupling of a CFD model (*Code_Saturne* software developed by E.D.F) and thermo-radiative model (*Solene* software developed by CERMA laboratory). The results of variables allowing evaluating comfort parameters (surface and air temperature, wind speed and turbulent kinetic energy) were compared with in situ data obtained during the EM2PAU campaign, aiming to validate the relevance and robustness of the numerical model.

Then we applied this numerical model on three eco-district configurations to analyze their impact on outdoor comfort. The physical results of this study were crossed with those of the physic-morphological indicators study that we carried out in parallel, to evaluate the effects of urban geometry on outdoor space environment. The findings of this research led in the elaboration of some recommendations on the eco-districts conception for architects and urban planners.

Keywords:

Urban morphology, eco-districts, numerical modeling and simulation, urban microclimate, outdoor thermal comfort.

Sommaire

Résumé 7

Introduction générale 15

Chapitre I :

La morphologie urbaine et ses interactions avec le microclimat et le confort extérieur

I.1 Introduction 20

I.2 La morphologie urbaine et son impact sur l'atmosphère locale 20

I.3 L'influence de la morphologie urbaine sur le microclimat 23

I.3.1 Le bilan radiatif Q* 23

I.3.2 Le flux de chaleur sensible QH 26

I.3.3 Le flux de chaleur latente QE 26

I.3.4 Le terme de stockage de la chaleur ΔQS 27

I.3.5 Le flux de chaleur anthropique QF 28

I.4 L'influence de la morphologie urbaine sur le confort extérieur 28

27 I.4.1 Facteurs morphologiques influant sur le rayonnement solaire et sur la température de surface 29

I.4.2 Facteurs morphologiques influant sur la température de l'air 41

I.4.3 Facteurs morphologiques influant sur la vitesse du vent 43

I.5 Formes urbaines génériques et leur impact sur le confort 49

I.5.1 Les formes compactes 49

I.5.2 Les formes pavillonnaires 52

I.5.3 Les formes verticales et répétitives 54

I.5.4 Les formes traversantes 57

I.6 Conclusion 58

Chapitre II :

Eco-quartiers : définitions, objectifs et analyse typo-morphologique de plusieurs configurations représentatives

II.1 Introduction 62

II.2 Qu'est-ce qu'un éco-quartier et quels sont ces critères ? 62
II.2.1 Définition d'un éco-quartier 62
II.2.2 Critères d'un éco-quartier 64
II.2.3 Conclusion 67
II.3 Analyse urbaine d'éco-quartiers exemplaires en Europe 67
II.3.1 Corpus d'études 67
II.3.2 Classification des éco-quartiers par rapport aux formes urbaines génériques 68
II.3.3 Analyse Typo-morphologique des éco-quartiers 72
II.3.4 Synthèse de l'analyse typo-morphologique 94
II.3.5 Etude des indicateurs morphologiques 97
II.4 Choix et présentation des cas d'études 101
II.4.1 Le quartier Lyon Confluence 102
II.4.2 Le quartier Tripode à Nantes 105
II.4.3 Le quartier Bottière Chénaie 107
II.5 Conclusion 110

Chapitre III :

Présentation des modèles de simulation et méthodologie du couplage itératif

III.1 Introduction 112
III.2 Modélisation et simulation avec le modèle thermo-radiatif *Solene* 112
III.2.1 Présentation 112
III.2.2 Modélisation de la géométrie 113
III.2.3 Simulation des flux solaires directs et diffus incidents 114
III.2.4 Simulation des inter-réflexions solaires 114
III.2.5 Calcul des facteurs de forme 115
III.2.6 Simulation thermo-radiative dans le code *Solene* 116
III.3 Modélisation et simulation avec le modèle CFD *Code_Saturne* 121
III.3.1 Présentation 121
III.3.2 Modélisation de l'écoulement d'air 121
III.3.3 Modélisation de la turbulence 123
III.3.4 Modélisation de la végétation 125

III.4 Les différentes procédures de couplage entre la simulation thermo-radiative et la simulation thermo-aéraulique et principe de couplage itératif développé 125
III.4.1 Les différentes méthodes de couplage 126
III.4.2 Différentes méthodes d'échange de données entre les deux modèles 128
III.4.3 Principe du couplage itératif développé 129
III.5 Conclusion 131

Chapitre IV :

Validation par la campagne expérimentale EM2PAU

IV.1 Introduction 134
IV.2 Présentation de la campagne EM2PAU 134
IV.2.1 Le site de mesure 134
IV.2.2 Architecture de la maquette 134
IV.3 La campagne de mesures et l'instrumentation 136
IV.3.1 Mesures des températures 136
IV.3.2 Mesures du vent 138
IV.3.3 Mesures du rayonnement 139
IV.4 Modélisation numérique du domaine de calcul et conditions initiales et aux limites 140
IV.4.1 Période d'étude 140
IV.4.2 Description du domaine de calcul 142
IV.4.3 Les conditions aux limites du modèle thermo-radiatif 143
IV.4.4 Les conditions aux limites physiques du modèle thermo-aéraulique 148
IV.4.5 Les paramètres numériques du calcul 151
IV.5 Validation du modèle de couplage 152
IV.5.1 Validation statistique 153
IV.5.2 Validation par comparaisons locales aux données expérimentales 154
IV.6 Effet de l'orientation des parois sur leur comportement thermo-radiatif 184
IV.6.1 Analyse de la température moyenne des surfaces du canyon 184
IV.6.2 Analyse du flux convectif et infrarouge émis pour deux journées (ensoleillée et couverte) 186
IV.6.3 Impact de forçage thermique des surfaces sur l'écoulement du vent à (l'intérieur de la rue 188
IV.7 Conclusion 191

Chapitre V:

Caractérisation du confort extérieur à l'échelle des éco-quartiers et indicateurs morphologiques de dépendance

V.1 Introduction 194

V.2 Domaines de calcul et conditions physiques initiales et aux limites 195

V.2.1 Choix des journées représentatives des deux climats d'étude 195

V.2.2 Description des domaines de calcul 198

V.2.3 Conditions aux limites physiques du modèle thermo-radiatif 199

V.2.4 Conditions aux limites physiques du modèle thermo-aéraulique 202

V.2.5 Les paramètres numériques et hypothèses de calcul 206

V.3 Choix des indicateurs physico-morphologiques 206

V.3.1 Durée moyenne d'ensoleillement 207

V.3.2 Facteur moyen de vue du ciel 209

V.3.3 Albédo solaire moyen 211

V.3.4 La porosité des tissus 213

V.3.5 Conclusion de l'analyse morphologique 214

V.4 Caractérisation des paramètres de confort des trois quartiers pour les deux scénarios 215

V.4.1 Analyse des résultats de l'écoulement d'air 215

V.4.2 Analyse des températures de surface 220

V.4.3 Analyse des températures de l'air 224

V.4.4 L'humidité de l'air 225

V.5 Caractérisation du confort à l'échelle des trois quartiers étudiés 226

V.5.1 Indices de confort choisis et méthodologie de calcul 226

V.5.2 Analyse du confort 228

V.6 Dépendance et indépendance des indicateurs morphologiques avec le confort extérieur : lectures et corrélations 236

V.7 Conclusion 238

Conclusion générale et perspectives 241

Bibliographie 247

Annexes 257

Introduction générale

Depuis quelques années, on observe une multiplication des études scientifiques sur le thème de la «maîtrise des ambiances» et particulièrement sur la prise en compte du confort thermique des personnes par l'analyse qualitative, la prédiction et la représentation de la perception des environnements intérieurs et extérieurs. Le contrôle et l'amélioration des ambiances dans les espaces extérieurs en relation avec le confort des usagers, de la qualité de l'air ou de la demande énergétique des bâtiments au sein d'une ville nécessitent une bonne connaissance du microclimat urbain et de son impact sur les structures bâties. Le microclimat résulte d'une interaction complexe entre les phénomènes physiques (vent, ensoleillement, etc.) et la nature de l'objet « ville » qui comprend les formes urbaines, les éléments naturels (végétation, eau, sol…), les aménagements urbains et l'activité humaine qui se développe en son sein.

La complexité spatiale et morphologique des tissus urbains et leur interaction avec les phénomènes environnementaux suscite des difficultés pour les concepteurs, maîtres d'œuvres ou maîtres d'ouvrages (intégration des bâtiments au tissu urbain et interactions avec l'environnement), lors du processus de la conception et de la prise de décisions. Ce constat a favorisé le développement de la recherche dans le domaine de la morphologie urbaine.

Toutefois, l'approche morphologique pratiquée jusqu'ici reste très liée à l'histoire et attachée à l'étude des formes urbaines anciennes (**Benevolo**, 1995) (**Ratti** *et al.,* 2003) (**Harzallah**, 2007) et à la connaissance des formes traditionnelles de la ville du passé, à quelques exceptions près (**Mangin**, 1996). Par ailleurs, les transformations urbaines qui se sont déroulées ces dernières années ont été d'une ampleur considérable provoquant un bouleversement spatial dans l'organisation urbaine et posant de nouveaux défis à l'aménagement. L'étalement urbain et la mobilité croissante se heurtent aux nouvelles préoccupations environnementales et la problématique du développement durable interroge les formes urbaines du futur. Ces nouvelles réalités devraient stimuler la recherche pour accompagner les architectes et les urbanistes, en ouvrant de nouveaux terrains d'investigation à partir des acquis obtenus, et en allant plus loin dans la connaissance de la forme urbaine, de ses structures et de ses modalités de formation et de transformation.

En effet, cette décennie a été marquée par l'avènement d'une nouvelle génération de configurations urbaines connue sous l'appellation d'«éco-quartier». Dans ces nouveaux espaces, les aménageurs ont favorisé l'émergence d'une nouvelle façon de concevoir, construire, faire évoluer et gérer l'espace urbain. Cette nouvelle façon de construire s'est rapidement traduite par une remise en cause de la forme de l'îlot, unité de base de la forme urbaine. Exceptés dans les pays scandinaves et la Hollande où les aménageurs préfèrent constituer de vastes îlots fermés entourant des paysages intérieurs protégés des agitations climatiques, dans les pays de sud, et

particulièrement en France, les aménageurs ont favorisé la traversée des îlots et l'autonomie des immeubles. Les îlots sont généralement denses, voire très denses, mais jamais refermés sur eux-mêmes. Cette nouvelle théorie a engendré plusieurs typologies de formes urbaines dites «traversantes», différentes les unes des autres.
Ainsi, à partir des éléments que nous venons de souligner, deux question peuvent être posées :

Quelles sont les formes les plus représentatives de cette nouvelle théorie d'ouverture des îlots et quelles sont les conséquences induites par cette modification sur les paramètres physiques de confort extérieur ?
Parmi ces différentes formes, lesquelles peut-on retenir ou adapter pour produire une forme urbaine cohérente avec l'évolution des modes de vie et répondre aux défis environnementaux ?

Pour concevoir un environnement thermique extérieur confortable, les concepteurs ont besoin d'outils robustes qui permettent de prédire de façon correcte la distribution des paramètres physiques (température de surface, rayonnement solaire, vitesse et température de l'air et humidité) de confort. Les modèles thermo-radiatifs et CFD (Computational Fluid Dynamics) permettent de simuler pour les premiers la température des surfaces et les rayonnements solaire et infrarouge, et pour les seconds la vitesse et la température de l'air. Ils fournissent ainsi les informations complémentaires indispensables à l'évaluation de la performance thermique des espaces urbains. L'intégration de ces deux types d'outils permet d'éliminer certaines hypothèses simplificatrices utilisées séparément par chacun d'eux et leur couplage devrait améliorer la qualité des résultats de simulation, et donc optimiser la conception dans les phases amont du projet ou lors d'aménagement d'espaces existants.

L'objectif de ce travail de recherche consiste, en couplant des outils de simulation numérique, à caractériser l'impact des différentes formes urbaines représentatives des éco-quartiers sur le confort de leurs espaces extérieurs.
Pour répondre à cette problématique et à l'objectif fixé, cette étude a été divisée en cinq parties :

Dans le chapitre 1, le rapport morphologie urbaine/microclimat et confort extérieur est analysé. Nous abordons tout d'abord, la notion du microclimat à travers l'étude des interactions entre la forme urbaine et l'environnement climatique et les modifications engendrées sur le bilan énergétique. Ensuite les différentes caractéristiques morphologiques responsables de la modification du confort extérieur sont récapitulées et analysées et nous dressons un inventaire des indicateurs physico-morphologiques en relation avec les paramètres physiques de confort. Enfin, les formes urbaines génériques caractérisant la majorité des villes européennes sont identifiées et nous analysons leur différenciation spatiale et morphologique et leur impact sur les changements des paramètres climatiques liés au confort extérieur.

Le chapitre II tente de dresser un état de l'art sur le terme "éco-quartiers". Dans un premier temps, différentes définitions scientifiques et institutionnelles sont présentées. A partir de la littérature, les critères communs caractérisant la majorité des opérations d'éco-quartier en Europe sont déterminées et analysées. Ce tour d'horizon nous conduit à proposer une définition simplifiée. La grande variété des formes urbaines dans les éco-quartiers ne permet pas de définir des configurations vraiment représentatives. Ce constat nous conduit à une analyse typo-morphologique basée sur les critères définis par **Panerai** *et al.,* (1997) à partir de plusieurs opérations exemplaires d'éco-quartiers en Europe. Cette analyse nous permet de distinguer trois sous-configurations de la forme urbaine dite «traversante», représentative de trois éco-quartiers en France choisis pour caractériser le confort au sein de leurs espaces extérieurs.

Le chapitre III présente les outils numériques mis en œuvre dans notre étude : le Code *Solene* développé par le laboratoire CERMA et le modèle CFD *Code_Saturne* développé par EDF. Différentes stratégies de couplage thermo-aéraulique sont discutées et une méthodologie de couplage est proposée. Nous présentons enfin les différents ajustements apportés aux deux modèles couplés.

Dans le chapitre IV, nous tentons une validation du modèle de couplage par comparaison aux mesures expérimentales obtenues in situ lors de la campagne EM2PAU qui a eu lieu en 2010-2012 sur le site de l'IFSTTAR dans la banlieue nantaise. Le site expérimental et les instruments de mesure sont d'abord présentés. On discute ensuite des conditions aux limites physiques issues des mesures et des paramètres numériques nécessaires pour les calculs couplés. Notons que dans cette étude l'humidité et la stabilité atmosphérique ne sont pas prises en compte. Les résultats de simulation sur les paramètres physiques (température de surface des bâtiments et du sol, température de l'air, vitesse du vent, énergie cinétique turbulente) permettant d'évaluer les indicateurs de confort, sont analysés et comparés aux données expérimentales. L'effet de l'orientation des parois sur leur comportement thermo-radiatif et celui du forçage thermique des surfaces sur l'écoulement du vent à l'intérieur de la rue canyon sont analysés et de comparés avec des travaux similaires issus de la bibliographie.

Dans le chapitre V, nous appliquons la méthode numérique développée à l'étude de trois éco-quartiers que nous avons sélectionnés. L'objectif est de caractériser les paramètres physiques de confort afin d'établir une cartographie des différentes perceptions thermiques ressenties par un individu via l'indice de confort PET (Température Physiologique Equivalente). Enfin, les résultats sur les paramètres de confort sont croisés avec ceux de l'étude des indicateurs physico-morphologiques menée en parallèle afin déterminer les indicateurs les plus pertinents du confort extérieur.

« On dessine afin de pousser à l'intérieur, dans sa propre histoire, les choses vues. Une fois les choses entrées par le travail du crayon, elles restent dedans pour la vie ; elles sont écrites, elles sont inscrites[2]»

Chapitre 1

La morphologie urbaine et ses interactions avec le microclimat et le confort extérieur

Sommaire

I.1 Introduction 20
I.2 La morphologie urbaine et son impact sur l'atmosphère locale 20
I.3 L'influence de la morphologie urbaine sur le microclimat 23
I.4 L'influence de la morphologie urbaine sur le confort extérieur 28
I.5 Formes urbaines génériques et leur impact sur le confort 49
I.6 Conclusion 58

[2] **Le Corbusier**, l'architecture pour émouvoir. Jean JENGER. Edition Gallimard Arts, 2004, p 25

I.1 Introduction

Dans un contexte urbain, l'objectif principal de la conception environnementale est la création de zones urbaines offrant des espaces extérieurs confortables. Cependant, contrairement aux espaces intérieurs des bâtiments, définis par des conditions thermiques relativement régulières et contrôlables, les espaces urbains extérieurs sont caractérisés par d'importantes variations quotidiennes et saisonnières des paramètres microclimatiques, bien plus difficiles à appréhender (température de l'air, vent et rayonnement par exemple). Les spécificités du milieu urbain engendrent des modifications climatiques perceptibles à tous les niveaux. C'est pourquoi, la compréhension des relations entre la morphologie urbaine et les paramètres physiques du microclimat local est primordiale.

Dans un premier temps, ce chapitre présente la définition de la morphologie urbaine ainsi que ses différents types de formes associées. Les couches limites urbaines résultant des perturbations thermiques et aérodynamiques liées à la morphologie urbaine sont aussi discutées dans cette première partie

Dans un second temps, on définit le lien entre la morphologie urbaine et le microclimat en présentant le bilan énergétique urbain, les flux associés et l'analyse de l'impact de la morphologie urbaine sur ces flux.

Dans un troisième temps, les indicateurs morphologiques influençant les paramètres de confort (rayonnement solaire, température de l'air et de surface, vitesse de vent) sont identifiés. Ce croisement des paramètres physiques et morphologiques a pour objectif de distinguer les indicateurs morphologiques les plus influents.

Enfin, les typologies urbaines les plus courantes caractérisant la majorité des tissus urbains sont identifiées et analysées. Cette étape est importante pour comprendre la genèse et l'évolution des formes à travers l'histoire de l'urbanisme. En parallèle, une analyse des situations climatiques vis-à-vis du confort extérieur, relatives à chaque typologie considérée, est présentée afin d'identifier le caractère climatique de chaque tissu.

I.2 La morphologie urbaine et son impact sur l'atmosphère locale

Qu'est-ce qu'une morphologie urbaine ?

Le **CERTU**[3] définit la morphologie urbaine comme étant le résultat des conditions historiques, politiques, culturelles et plus particulièrement architecturales dans lesquelles la ville a été créée et s'est agrandie. Elle est le fruit d'une évolution spontanée ou planifiée par la volonté des pouvoirs publics. Les notions voisines de "structure urbaine" et de "forme urbaine" ne sont pas toujours claires et les définitions varient souvent d'un auteur à l'autre.

[3] Centre d'Etude sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques.

Selon **Lévy** (2005), l'objet principal de la morphologie est de permettre la lecture de la ville en comprenant l'évolution de la forme urbaine. Cette dernière constitue un objet d'étude construit à partir d'une hypothèse de définition, d'une représentation et d'un point de vue sur la forme. Selon **Lévy** (2005), la forme urbaine est une notion polymorphe qui peut être saisie de différents aspects selon le point de vue pris par chaque urbaniste et la définition adoptée. En croisant les différents points de vue, **Lévy** (2005) a distingué cinq approches ou registres de la forme urbaine présentés ci-dessous.

- L'approche de la forme urbaine comme forme des *paysages urbains*, pour laquelle l'espace urbain est saisi visuellement (couleur, style, etc.) dans sa tridimensionnalité (volumétrie et gabarits) et dans son style architectural (mouvement moderne ou high-tech par exemple) (**Lynch**, 1960 ; **Castex** *et al.,* 1980).

- L'approche de la forme urbaine comme *forme sociale*, pour laquelle l'espace urbain est étudié dans son occupation par les divers groupes sociaux, démographiques, ethniques ou religieux (**Grafmeyer** *et* **Joseph**, 1984 ; **Roncayolo**, 1996).

- L'approche de la forme urbaine comme *forme des tissus urbains*, qui consiste à étudier les corrélations entre les éléments composant l'espace urbain (parcellaire, voiries, rapport espaces libres/espaces bâtis et morphologie des îlots par exemple) (**Panerai** *et* **langé**, 2001).

- L'approche de la forme urbaine comme *forme des tracés* (**Pinon**, 1994 ; **Lévy**, 1996). Cette approche renvoie à la forme géométrique du plan de la ville (plan organique, plan en damier ou plan radioconcentrique par exemple).

- L'approche de la forme urbaine comme *forme bioclimatique*, pour laquelle la forme urbaine est traitée dans sa dimension environnementale, comme microclimat urbain, tant dans ses variations géographiques par quartier, que dans sa diversité liée aux types de tissu (ouvert, fermé, vertical), selon l'orientation (héliothermique), selon le site (eau, relief, végétation) (**Escourrou**, 1980 ; **Escourrou**, 1991)

L'approche *bioclimatique* a conduit à un important débat sur les formes urbaines du futur (formes étalée ou compacte) initié autour de l'enjeu du développement durable, du surcroît de la consommation d'énergie et ses conséquences sur le climat et récemment avec l'optimisation des ambiances physiques dans les espaces urbains. Selon **Lévy** (2005), elle est en étroite relation avec les autres approches, notamment celle des *tissus urbains*. En effet, Les éléments composant les formes des *tissus urbains* et des *tracés* agissent comme des facteurs de variation du microclimat urbain et induisent une distribution fluctuante des paramètres de confort (température de l'air, vitesse du vent et rayonnement incident par exemple).

La couche limite urbaine

A l'échelle de la ville, l'interaction entre la forme urbaine et le climat produit différentes échelles de couches d'air superposées dans l'atmosphère. La stabilité de ces couches dépend de la stratification thermique.

La couche limite de surface

Cette couche s'étend sur plusieurs dizaines de mètres au-dessus des bâtiments et se décompose en deux sous-couches d'écoulement (**Figure I. 1**): la sous-couche inertielle et la sous-couche de rugosité. La première se caractérise par l'homogénéité des flux turbulents verticaux et dépend essentiellement de la vitesse de frottement et de la hauteur des bâtiments (**Taha**, 2000). Quant à la sous-couche de rugosité, elle se situe à proximité immédiate de la surface et son épaisseur varie entre 1,5 et 3,5 fois la hauteur des bâtiments environnants (**Rotach**, 2000).

La canopée urbaine

La canopée urbaine (**Figure I. 1**) correspond à l'échelle d'étude considérée dans notre travail. Cette échelle fait référence au tissu urbain intégrant le sol urbain (rue, espaces verts), les structures bâties (bâtiments, îlot ou quartier) et les espaces ouverts (cours ou places publiques). Elle est souvent très perturbée, en raison des mouvements turbulents engendrés par l'interaction des paramètres micro-météorologiques avec les structures urbaines.

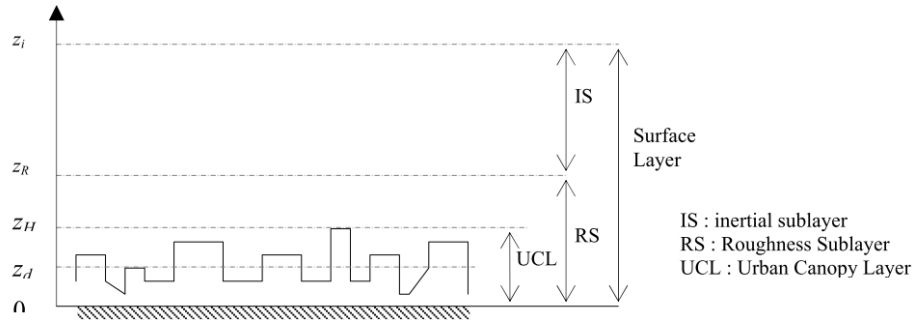


Figure I. 1 Répartition verticale des différentes couches de circulation d'air au-dessus d'un milieu urbain (**Rotach**, 2000).

I.3 L'influence de la morphologie urbaine sur le microclimat

Le bilan énergétique urbain

A l'échelle urbaine, la diversité des formes urbaines et celle des propriétés physiques des revêtements de surface rendent difficile le calcul du bilan d'énergie. Le bilan énergétique d'une surface urbaine est égal à la somme algébrique des flux énergétiques qu'elle échange avec son environnement. Ainsi, l'équation du bilan énergétique d'une surface urbaine (**Figure I. 2 à droite**) peut s'écrire en termes de flux (W/m^2) (**Oke**, 1988 ; **Arnfield** *et* **Grimmond**, 1998 ; **Masson** *et al.,* 2002) :

$$Q^* + Q_F = Q_H + Q_E + \Delta Q_S + \Delta Q_A \qquad (\mathbf{I.1})$$

où Q^* est le bilan radiatif appelé aussi le rayonnement net, Q_F est le flux de chaleur anthropique, Q_H et Q_E correspondent respectivement aux flux turbulents de chaleur sensible et latente, ΔQ_S est le stockage de chaleur et ΔQ_A est le terme advectif. Ce dernier est souvent négligé à cause d'une part de la difficulté liée à sa mesure et d'autre part à sa valeur relativement faible à l'échelle urbaine (**Eliasson** *et al.,* 1999). Ces différents flux sont explicités dans ce qui suit.

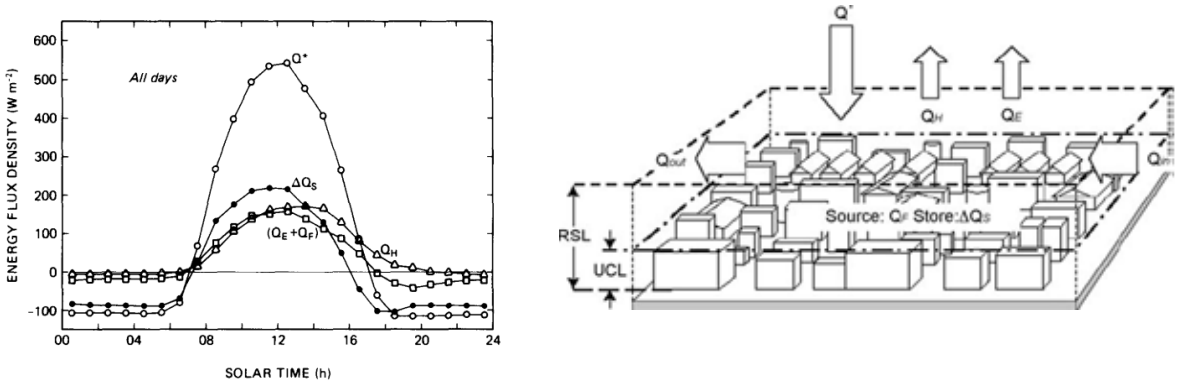


Figure I. 2 A gauche : Bilan énergétique du quartier Tacubaya à Mexico pour 25 jours (du 3 Février au 31 Mars 1985) (**Grimmond** *et al.,*1991). **A droite :** Représentation des différents flux du bilan énergétique dans le milieu urbain (**Oke**, 1987).

I.3.1 Le bilan radiatif Q^*

Dans le bilan énergétique urbain, les échanges radiatifs représentent la composante la plus importante en valeur absolue (**Figure I. 2 à gauche**). Le bilan radiatif d'une surface urbaine représente la somme des flux solaires (direct, diffus et réfléchi) et infrarouge en provenance du ciel absorbés par la surface, à laquelle est soustraite son émission en flux de grandes longueurs d'onde. Il est donné par l'équation **I. 2**:

$$Q^* = K_s(1-\alpha) + L\downarrow - L\uparrow \quad \textbf{(I .2)}$$

où K_s est le flux solaire global incident (W/m^2), α est l'albédo[4] moyen de la surface urbaine (-), $L\downarrow$ représente le flux infrarouge atmosphérique (W/m^2) et $L\uparrow$ représente le flux infrarouge émis par la surface (W/m^2).

I.3.1.1 Le flux solaire global incident K_s

Le flux solaire global incident K_s s'écrit comme la somme de trois composantes:

$$K_s = K_{solaire_direct} + K_{solaire_diffus} + K_{solaire_réfléchi} \quad \textbf{(I .3)}$$

où $K_{solaire_direct}$ est le flux solaire direct en provenance de la voûte céleste (W/m^2), $K_{solaire_diffus}$ est le flux solaire diffusé par les particules atmosphériques (W/m^2) et $K_{solaire_réfléchi}$ est le flux solaire réfléchi provenant des autres surfaces urbaines (W/m^2).
Les flux solaires direct et diffus peuvent être mesurés sur site ou estimés en utilisant des modèles théoriques ou des relations empiriques faisant notamment intervenir les propriétés optiques de l'air et la composition de l'atmosphère en aérosols (**Aida**, 1977). A l'échelle urbaine, le flux solaire incident mesuré est atténué de 2 à 20 % par rapport à un site rural. D'après **Delaunay** (1995), ce constat est dû aux particules polluantes émises par les bâtiments et les véhicules. La pollution se manifeste par une augmentation des aérosols et des noyaux de condensation. Ces derniers favorisent la création de nuages ou de brouillards réduisant la quantité d'énergie solaire incidente et augmentant ainsi l'énergie solaire diffuse.

Par ailleurs, le rayonnement solaire réfléchi dépend des propriétés réflectives des matériaux de surface (albédo α), mais aussi de la forme du tissu urbain. Selon **Miguet** (1996), l'albédo équivalent d'une surface urbaine peut être calculé par :

$$\alpha_{équivalent} = 1 - \frac{\emptyset_{absorbé}}{\emptyset_{global\ incident}} \quad \textbf{(I .4)}$$

où $\emptyset_{absorbé}$ est le flux solaire absorbé après multi-réflexion (W/m^2), $\emptyset_{global\ incident}$ représente le flux global incident (W/m^2).

Dans la littérature, l'albédo des villes européennes et américaines varie généralement entre 0,10 et 0,25 avec une valeur moyenne de 0,15, inférieure à celle d'une zone rurale de l'ordre de 0,42 (**Taha**, 1997). Cette différence peut s'expliquer par le piégeage radiatif observé dans les sites urbains, engendré par les inter-réflexions produites par les surfaces urbaines (**Figure I. 3**).

[4] L'albédo d'une surface est le ratio entre le flux de courte longueur d'onde global réfléchi et le flux incident correspondant.

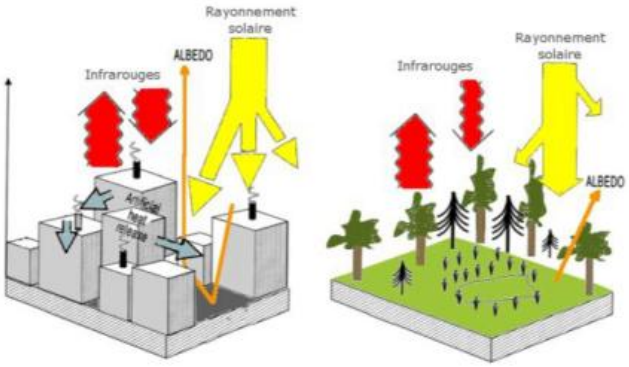


Figure I. 3 Flux radiatif au-dessus d'une zone urbaine et d'une zone rurale (**Colombert**, 2008).

I.3.1.2 Le flux infrarouge atmosphérique $L\downarrow$

L'atmosphère émet un rayonnement infrarouge appelé le flux infrarouge atmosphérique $\boldsymbol{L}\downarrow$. Il est produit essentiellement à partir du rayonnement émis par les particules de vapeur d'eau, par le gaz carbonique et par les aérosols en suspension dans la couche limite atmosphérique. Le flux solaire atmosphérique peut être mesuré sur site par des capteurs appropriés (Pyrgéomètre par exemple) ou calculé par le biais de formules empiriques (**Delaunay**, 1995 ; **Vinet**, 2000).

I.3.1.3 Le flux infrarouge émis par les surface urbaines $L\uparrow$

Les surfaces urbaines se comportent comme un corps gris[5]. Lorsqu'elles reçoivent l'énergie solaire et infrarouge atmosphérique, elles en absorbent une partie et en réfléchissent une autre. L'intensité du flux émis par chaque surface obéit à la loi de Stefan-Boltzmann donné par

$$\boldsymbol{R} = \boldsymbol{\varepsilon \sigma T_s^4} \qquad \textbf{(I. 5)}$$

où $\boldsymbol{R}$ est l'intensité du rayonnement infrarouge émis (W/m^2), $\boldsymbol{T_S}$ est la température des surfaces (K), $\boldsymbol{\varepsilon}$ est leur émissivité (-) et $\boldsymbol{\sigma}$ est la constante de Stefan-Boltzmann ($5{,}67\ 10^{-8}\ W\ m^{-2}K^{-4}$).
En général, la température des surfaces est plus élevée en ville qu'à la campagne, induisant ainsi un flux infrarouge émis plus important en zone urbaine et en milieu de journée. Selon **Delaunay** (1995), des mesures effectuées aux Etats-Unis ont indiqué que le flux infrarouge émis par les surfaces en ville est supérieur de 20 % à celui enregistré en rase campagne. Par ailleurs, comme le flux $\boldsymbol{L}\uparrow$ est en partie absorbé par les polluants contenus dans l'atmosphère urbaine, il y a une élévation de la température de l'air et donc une augmentation du flux $\boldsymbol{L}\downarrow$.

[5] Un corps gris ne peut pas absorber ou réémettre toute l'énergie radiative incidente, il en réfléchit une partie.

I.3.2 Le flux de chaleur sensible Q_H

La convection est un phénomène dynamique engendré par des gradients thermiques. On distingue deux types de mouvements de convection: naturelle, lorsque la différence entre la masse volumique de l'air chaud et froid engendre un courant d'air et forcée, lorsque l'air est aussi mis en mouvement sous l'action d'une force mécanique comme la force de pression par exemple.
En milieu urbain, en raison de la différence entre la température de surface (T_s) et la température de l'air (T_{air}), une partie de l'énergie thermique est transportée par convection turbulente dans l'atmosphère sous forme de chaleur sensible. Cette dernière s'exprime par :

$$Q_H = h_c(T_s - T_{air}) \quad \textbf{(I. 6)}$$

où h_c représente un coefficient d'échange convectif (W m^{-2} K^{-1}). Celui-ci dépend du régime d'écoulement (laminaire ou turbulent), du type de convection (naturelle, forcée ou mixte) et de la disposition spatiale et géométrique des surfaces (horizontales, verticales ou inclinées). De nombreuses corrélations empiriques, dépendant généralement de la température de l'air et de la vitesse du vent, sont proposées dans la littérature en fonction des configurations considérées (**Rowley** *et al.,* 1930 ; **Allard**, 1987 ; **Inard**, 1988 ; **Hénon**, 2008).

I.3.3 Le flux de chaleur latente Q_E

L'effet d'une zone urbaine sur l'humidité atmosphérique est plus difficile à prédire. Généralement, l'air des villes est souvent plus sec le jour et plus humide la nuit. Ce phénomène apparaît le plus nettement en été. Un îlot d'humidité nocturne se crée dans la ville, son intensité diminue avec l'augmentation de la vitesse du vent. L'humidification de l'air apparait généralement dans les zones urbaines à forte densité végétale comme les parcs publics ou dans les opérations d'aménagements d'éco-quartiers présentant une faible minéralisation par rapport aux quartiers traditionnels
Pour caractériser l'état de l'humidité d'un site urbain, un nombre adimensionnel appelé le nombre de Bowen est utilisé, correspondant au rapport entre le flux de chaleur sensible et celui de chaleur latente dans la direction verticale.

$$\beta = \frac{Q_H}{Q_E} \quad \textbf{(I. 7)}$$

Lorsque le rapport est supérieur à 1 ($\beta > 1$) , la disponibilité en eau est limitée. La chaleur est donc transportée dans l'air par convection sous forme de chaleur sensible. Cette situation caractérise principalement un climat chaud. A contrario, lorsque le rapport est inférieur à 1 ($\beta < 1$) , la disponibilité de l'eau est abondante. Dans ce cas, la chaleur transportée vers l'air est

majoritairement sous forme latente. Ce transfert de chaleur ne contribue pas forcément au réchauffement de l'air, mais il augmente le niveau d'humidité (**Robitu**, 2005).

I.3.4 Le terme de stockage de la chaleur ΔQ_S

Les surfaces urbaines sont constituées de matériaux de revêtements variés (asphalte, béton, briques, bois, verre, etc.) et de géométries hétérogènes (parois verticales ou horizontales, toits plats ou inclinés par exemple). De plus, l'ensoleillement de ces surfaces est très variable en fonction des paramètres météorologiques et morphologiques. Il est donc très difficile de mesurer avec précision le flux de chaleur absorbé par une surface urbaine. Pour cela, différentes corrélations empiriques ont été proposées, notamment par **Oke** (1981) et **Grimmond** *et al.*, (1991), pour des échelles de travail allant de l'îlot urbain au quartier.

Tout d'abord, un paramétrage du stockage de la chaleur en milieu urbain pendant la journée et la nuit a été formulé par **Oke** (1981). L'enquête a été réalisée sur un quartier présentant des formes pavillonnaires homogènes dans la banlieue sud de Vancouver. Ce paramétrage s'appuie sur une relation linéaire entre le bilan radiatif net $\boldsymbol{Q}^*$ et le terme de stockage de la chaleur par les surfaces urbaines $\Delta \boldsymbol{Q}_s$. Des coefficients d'occupation de sol pour les espaces verts et les surfaces bâties ont été considérés. Les équations **I. 8 et I. 9** correspondent aux formulations définies pour la journée et pour la nuit, respectivement.

$$\boldsymbol{\Delta Qs = [\,0.20\,a\, + 0.33b\,]\,Q^* + \,3a\, - \,24b} \qquad \textbf{(I. 8)}$$

$$\boldsymbol{\Delta Qs = [0,54a\, + 0,90b]Q^*} \qquad \textbf{(I. 9)}$$

où $\boldsymbol{Q}^*$représente le flux radiatif net, $\boldsymbol{a}$ et $\boldsymbol{b}$ correspondent respectivement aux fractions des espaces verts et des espaces bâtis. Notons que dans cette étude, les flux ($\boldsymbol{Q}^*$, $\boldsymbol{Q_H}$ et $\boldsymbol{Q_E}$) ont été obtenus de façon indépendante. La performance générale de ce modèle linéaire est satisfaisante, surtout s'il est utilisé pour des périodes d'une journée ou plus. Toutefois, il n'est pas en mesure de prédire l'évolution temporelle de stockage de chaleur car la forme linéaire du modèle ne permet pas d'observer de déphasage dans le temps entre $\boldsymbol{\Delta Qs}$ et $\boldsymbol{Q}^*$ (**Figure I. 4**).

Afin d'améliorer le modèle linéaire, notamment en prenant en compte les déphasages observés, **Grimmond** *et al.*, (1991) ont établi un nouveau modèle, appelé OHM (Objective Hystérésis Model), permettant de prédire les flux de stockage de chaleur précisément et instantanément. Il s'écrit par l'équation non linéaire **I. 10** entre le stockage de chaleur dans les zones urbaines et le bilan radiatif net.

$$\boldsymbol{\Delta Qs = a_1\, Q^* \,+\, a_2 \frac{\partial Q^*}{\partial t} + \,a_3} \qquad \textbf{(I. 10)}$$

où $\frac{\partial Q^*}{\partial t}$ représente la dérivée temporelle de flux radiatif. a_1 et a_3 correspondent respectivement aux fractions des espaces verts et des espaces bâtis. a_2 correspond au coefficient d'hystérésis (**Figure I. 4**). Un développement du modèle est suggéré par **Grimmond** *et al.,* (1991) afin d'inclure la chaleur anthropique et la forme tridimensionnelle des surfaces bâties.

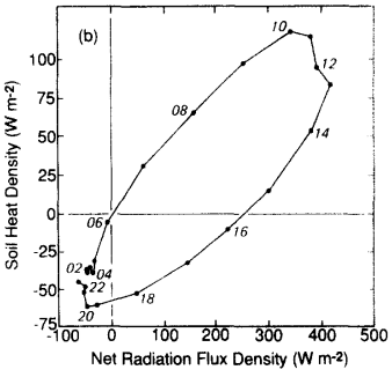


Figure I. 4 Courbe d'hystérésis présentant la relation entre le flux radiatif net $\mathbf{Q}^*$ et flux de stockage de chaleur $\mathbf{\Delta Qs}$ **Grimmond** *et al.,* (1991). Note : Les valeurs indiquées sur la courbe correspondent aux heures de la journée.

I.3.5 Le flux de chaleur anthropique Q_F

La chaleur anthropique correspond à la somme des productions de chaleur par les véhicules, l'industrie, les bâtiments et les équipements urbains. La quantité de chaleur anthropique émise dépend de la saison, du mode de déplacement utilisé par les individus, de la densité de la population, du niveau d'industrialisation de la ville et de sa topographie environnante.
Notons que la chaleur anthropique a pour effet de diminuer la charge de chauffage en hiver. En été, elle engendre une augmentation de la température urbaine ambiante et de la pollution favorisant ainsi l'apparition de l'îlot de chaleur urbain (**Escourrou**, 1980). Des études sont encore en cours afin de prendre en compte ce flux de chaleur anthropique.

I.4 L'influence de la morphologie urbaine sur le confort extérieur

Les relations entre l'individu et son environnement extérieur sont déterminantes dans l'estimation des situations de confort. La prise en compte de l'environnement extérieur nécessite la connaissance de quatre paramètres microclimatiques importants : la température radiante moyenne (calculée à partir du rayonnement solaire incident et la température de surface), la température de l'air, la vitesse du vent et l'humidité de l'air (**Vinet**, 2000 ; **Ali-Toudert et Mayer**, 2007). La modification du processus perceptif du corps humain dépend de l'intensité de ces composantes environnementales extérieures. Les réponses de l'organisme apparaissent, avec la modification de la température cutanée, de la température interne du corps, de la sudation et de la vitesse de la circulation sanguine.

A l'échelle urbaine, de nombreux paramètres morphologiques, spatio-temporels, optiques ou encore thermiques liés aux matériaux de revêtement sont à l'origine des modifications des paramètres de confort. Dans les sections suivantes, les modifications engendrées par la morphologie urbaine sont examinées. La végétation n'est pas considérée dans cette étude, l'humidité de l'air n'est donc pas prise en compte dans cette analyse.

I.4.1 Facteurs morphologiques influant sur le rayonnement solaire et sur la température de surface

I.4.1.1 Paramètres liés à l'irrégularité des formes urbaines

Le terme "irrégularité" n'est pas couramment utilisé pour caractériser la forme urbaine. Cependant, avec le développement des approches morphologiques de l'environnement urbain, ce terme devient d'usage pour désigner la rugosité ou la discontinuité d'une surface par rapport à une plateforme horizontale lisse (**Ben Messaoud**, 2009). Deux irrégularités sont observées à l'échelle urbaine : les irrégularités horizontales et verticales.

I.4.1.1.1 Les irrégularités horizontales du tissu urbain

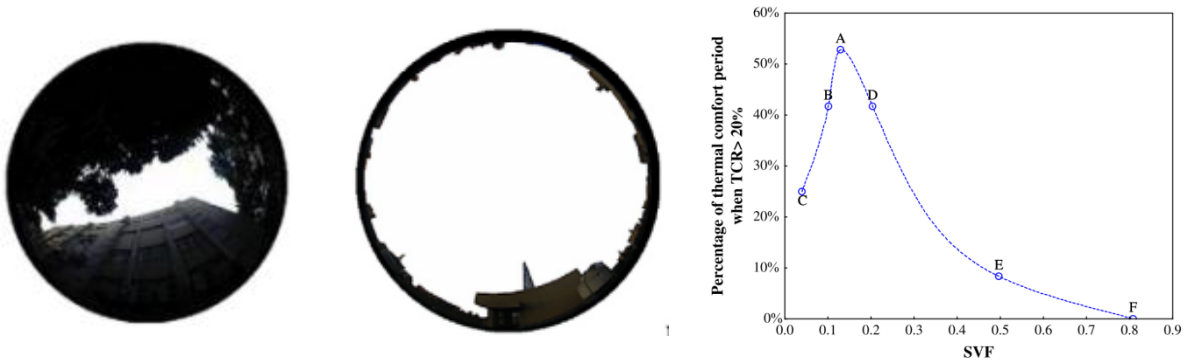
a) Variation du facteur de vue du ciel

Le Facteur de Vue du Ciel (FVC) (**Figure I. 5**) est une mesure de l'angle solide sous lequel le ciel est vu depuis un point de l'espace urbain (**Sarradin**, 2004). C'est un paramètre sans dimension compris entre 0 et 1 (**Oke**, 1988). Il détermine les échanges de chaleur par rayonnement entre le lieu considéré et le ciel. Un FVC égal à 1 signifie que la vue du ciel est dépourvue de toute obstruction (champ sans relief). Par conséquent, les températures de l'air seront très proches des valeurs météorologiques. En revanche, un SVF égal à 0 signifie que, la vue du ciel est totalement obstruée et que les températures seront ainsi fortement influencées par le contexte urbain.



Figure I. 5 Vue sur le ciel visible d'une rue à Boston au Etats-Unis (**Ratti** *et al.*, 2003).

Ainsi, le facteur de vue du ciel affecte le confort dans les espaces extérieurs. **Tzu-Ping** *et al.,* (2010) ont étudié expérimentalement le confort thermique estival dans les espaces extérieurs d'un campus universitaire à Taiwan en utilisant l'indice de confort PET[6] (Température Physiologique Equivalente). Ils ont croisé les résultats de l'indicateur FVC et le pourcentage des périodes thermiquement confortables pour divers endroits sur le campus. Les résultats ont montré que la place A (**Figure I. 6 (a)**), dont FVC est de 0,13, présente le plus grand pourcentage de périodes confortables avec plus de 53 % (**Figure I. 6 (c)**). Ce pourcentage diminue avec l'augmentation du FVC des surfaces jusqu'à atteindre 0 % pour la place F (**Figure I. 6 (b)**) dont le FVC vaut 0,81. Inversement, lorsque les valeurs de FVC sont inférieures à 0,13, le pourcentage diminue et atteint 25 % pour un FVC de 0,04. Ainsi, les espaces présentant des surfaces avec un grand FVC risquent de provoquer des situations d'inconfort en été.



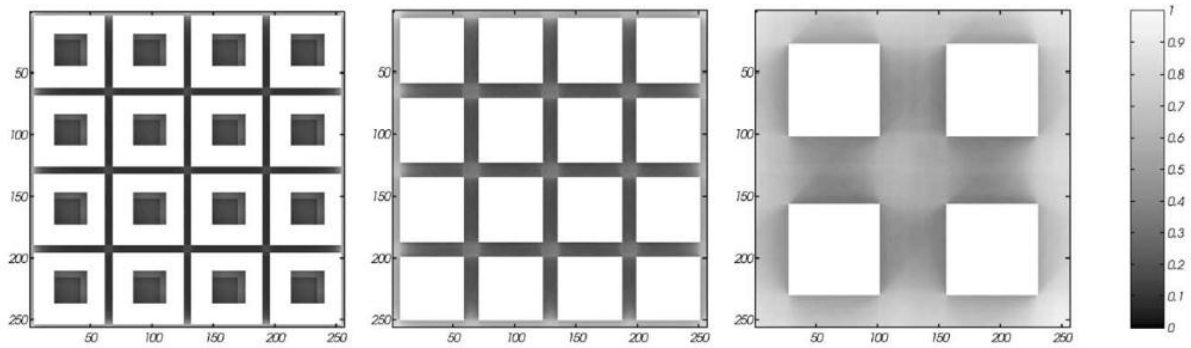
(a) **(b)** **(c)**

Figure I. 6 (a) Le facteur de vue du ciel de la place A (FVC = 0,13). **(b)** Le facteur de vue du ciel de la place F (FVC = 0,81). **(c)** la relation entre le facteur de vue du ciel et le pourcentage de périodes de confort (**Tzu-Ping** *et al.,* 2010).

Par ailleurs, **Ratti** *et al.,* (2003) ont montré l'existence d'un lien étroit entre le FVC et les températures des surfaces urbaines, en étudiant numériquement trois configurations différentes dans les régions chaudes et arides. La première présente des formes géométriquement fermées avec des cours intérieures, similaires aux formes urbaines observées dans les anciens centre-ville européens (**Figure I. 7 (a)**). Dans la seconde configuration, les cours intérieures ont été supprimées, présentant ainsi des formes compactes (**Figure I. 7 (b)**). Notons que, ces deux configurations présentent un tissu dense avec une densité surfacique bâtie élevée et des rues étroites. En revanche, la troisième configuration présente un tissu ouvert avec des formes aérées représentatives des formes pavillonnaires (**Figure I. 7 (c)**).

[6] Le PET pour un lieu donné (intérieur ou extérieur) est défini comme la température de l'air à laquelle, dans un local typique intérieur, sans vent et rayonnement solaire, le bilan d'énergie du corps humain est équilibré avec les mêmes températures interne et de peau que celles obtenues dans les conditions à évaluer (**Höppe**, 1999).

Les résultats obtenus pour ces configurations montrent que les formes fermées avec des cours intérieures présentent les valeurs les plus faibles du FVC de l'ordre de 0,13, alors qu'il est de 0,23 pour les formes compactes et de 0,48 pour les formes pavillonnaires. Les températures de surfaces les plus élevées sont obtenues pour les formes pavillonnaires avec des valeurs de l'ordre de 40,5°C. Cette valeur maximale est supérieure de 5,3°C par rapport aux formes compactes et de 8,6°C par rapport aux formes fermées avec des cours intérieures. **Ratti** *et al.,* (2003) suggèrent alors d'ouvrir les tissus urbains afin de favoriser la dissipation de la chaleur et d'éviter ainsi les risques d'inconfort thermique dans ces espaces.



(a) **(b)** **(c)**

Figure I. 7 Le facteur de vue du ciel pour les trois configurations étudiées. Formes fermées avec cours intérieures **(a)**, formes compactes **(b)** et formes pavillonnaires **(c)** (**Ratti** *et al.,* 2003).

De plus, **Ratti** *et al.,* (2003) ont montré le rôle prépondérant de l'agencement des tissus sur leur pourcentage de FVC. **Athamena** *et al.,* (2009) ont montré numériquement que l'organisation serrée et fractionnée des bâtiments du projet Lyon Confluence (**Figure I. 8**) réduit le FVC des façades et du sol par rapport à une organisation ouverte et aérée. Ils ont montré aussi que les géométries présentant un fort pourcentage de surfaces horizontales, notamment les toitures et les terrasses, sont caractérisées par des valeurs élevées de FVC.

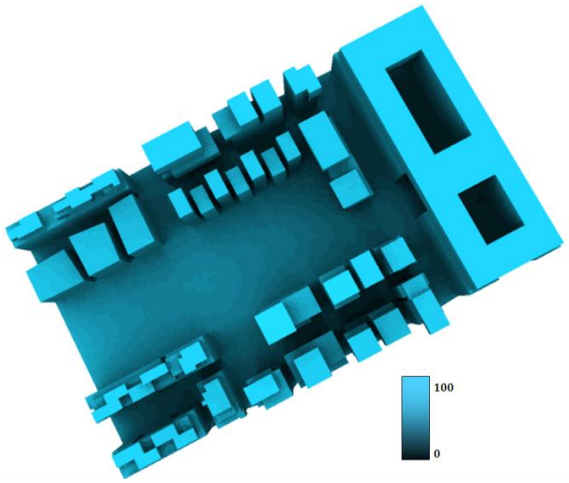
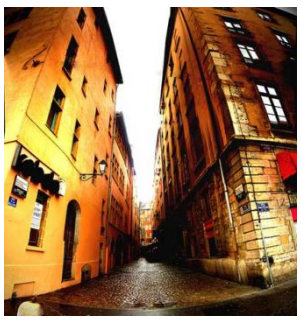


Figure I. 8 Facteur de vue du ciel de la phase 1 du projet Lyon confluence (**Athamena** *et al.,* 2009).

b) Variation du rapport H/W des rues canyons

La rue canyon, constituant la forme élémentaire la plus typique des tissus urbains (**Figure I. 9 à gauche**), représente une rue bordée d'immeubles, dont la hauteur est au moins deux fois supérieure à la largeur de la rue (**Izard**, 1999). Comme illustré sur la **Figure I. 9 à droite**, un canyon urbain est défini par trois principaux paramètres : la hauteur des bâtiments (H), la largeur (W) et la longueur (L) de la rue. A partir de ces paramètres, la description géométrique du canyon peut être effectuée par le biais d'indicateurs morphologiques, comme le rapport d'aspect H/W par exemple. Celui-ci affecte considérablement la quantité de rayonnement solaire incidente ou absorbée par un canyon. En effet, des études expérimentales faites par **Aida** (1982) et **Aida** *et* **Gotoh**, (1982) sur des rues canyon présentant différents rapports d'aspect H/W ont montré une réduction d'absorption de l'énergie solaire incidente de 27% à 13 % lorsque le rapport H/W passe de 0,5 à 2 (**Figure I. 10**). Des résultats similaires ont été obtenus plus récemment par **Bourbia** *et* **Awbi**, (2004). Ils ont alors observé qu'une rue avec un rapport H/W égal à 0,5 reçoit un pourcentage élevé d'énergie solaire direct notamment les surfaces verticales des bâtiments atteignant un pic de température de surface de 53°C. Ce captage thermique diminue lorsque le rapport H/W est égal à 2 où les pics de température ne dépassent pas 46°C.



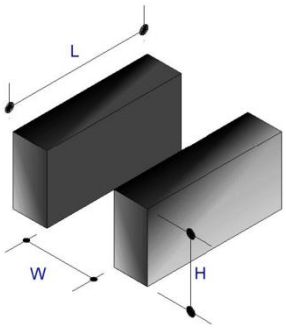


Figure I. 9 A gauche : Canyon urbain à Paris (**internet**). **A droite** : paramètres géométriques d'une rue canyon.

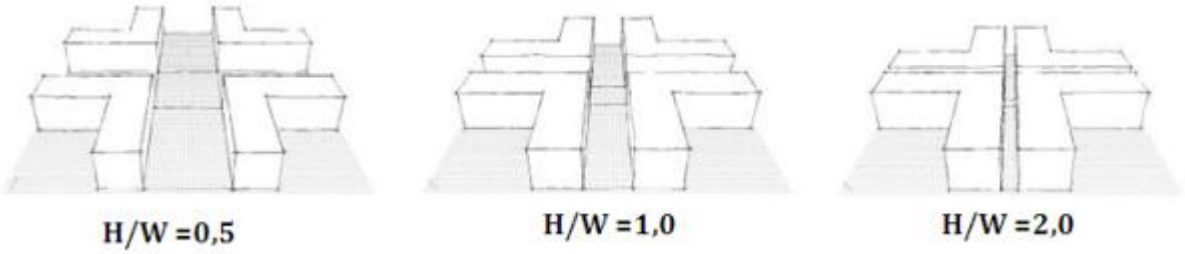


Figure I. 10 Différents rapports d'aspect H/W de rues canyon (**Bougiatioti**, 2006).

Cependant, un faible rapport H/W engendre un autre phénomène thermique important, à savoir le piégeage de la chaleur au sein de la rue. L'étude de l'effet du rapport d'aspect d'une rue sur son environnement thermique intérieur montre que plus le rapport H/W est grand, plus le phénomène de stockage de chaleur est marqué (**Sakakibara**, 1996). La différence de quantité de chaleur restituée entre un canyon présentant un rapport H/W de 2 et un canyon avec un rapport de H/W égal à 0,7 serait de 50 W/m^2.

Une synthèse sur l'impact des différences de rapport H/W par rapport aux conditions thermiques effectuée par **Tiraoui** (2000) est présentée dans le **Tableau .I. 1.** Ces conclusions sont spécifiques à une rue canyon localisée à la latitude de 45° Nord et orientée Nord-Sud.

	H/W	Avantages
L'accessibilité solaire	**0,5 à 2**	l'absorption solaire est comprise entre 13 % (H/W = 0,5) et 27 % (H/W = 2) lorsque l'albédo de surface est égal à 0,4.
	0,58	Le rapport H/W est représentatif des villes de latitude 45°N.
Gain de chaleur	**0,4**	le gain de chaleur est de 30 % par rapport à une situation de surface dégagée (H/W =0).
	0,7	Le gain de chaleur est de 50 % par rapport au cas H/W=0.
	1,0	Le gain de chaleur est de 70 % par rapport au cas H/W=0.

Tableau .I. 1 Relations entre le rapport d'aspect de la rue canyon et les conditions thermiques (**Tiraoui**, 2000).

c) Variation de la densité surfacique urbaine

La densité surfacique urbaine rend compte de l'occupation des structures bâties dans le milieu urbain. Celle-ci correspond au rapport entre la surface construite et la surface totale urbaine. Morphologiquement, la densité surfacique urbaine varie selon le mode d'occupation de l'espace. A l'échelle de la ville, ce dernier est fondé sur une progression des formes urbaines du plus compact et dense au centre-ville vers l'habitat individuel périphérique plus ouvert, avec des formes urbaines de transition. La variation des densités entre les différentes portions urbaines

fait ainsi émerger des espaces publics extérieurs de dimensions variées. D'un point de vue climatique, la densité surfacique urbaine interfère avec certaines préoccupations climatiques urbaines comme l'îlot de chaleur urbain. En effet, une étude menée par **Boukhezer** (2002) sur trois tissus urbains présentant des densités d'occupation de sol différentes dans la ville d'Oran en Algérie a montré que la densité surfacique des bâtis agit sur la quantité d'énergie journalière absorbée par les bâtiments. Le centre historique de la ville caractérisé par son tissu organique, sa forte minéralisation et sa densité surfacique élevée, présente de plus grandes quantités d'énergie solaire absorbée par rapport aux tissus urbains en damier et dispersés.

Par ailleurs, **Aida et Gotoh** (1982) ont abordé la densité surfacique urbaine de manière plus simplifiée à travers le rapport W1/W2 (où W1 est la largeur des toitures W2 est la largeur des rues) (**Figure I. 11 en haut**). Cet indicateur a été étudié par la suite sur une configuration de rue canyon en faisant varier les paramètres W1 et W2. L'objectif était de quantifier sa variation sur la quantité d'énergie solaire réfléchie par les surfaces. Les résultats donnés sur la **Figure I. 11** montrent que les valeurs d'albédo équivalent diminuent progressivement avec l'augmentation du rapport W1/W2. Autrement dit, l'albédo des surfaces augmente avec la densité des surfaces bâties. En effet, cette densité engendre moins d'échange d'énergie entre les surfaces que dans le cas d'une géométrie fractionnée.

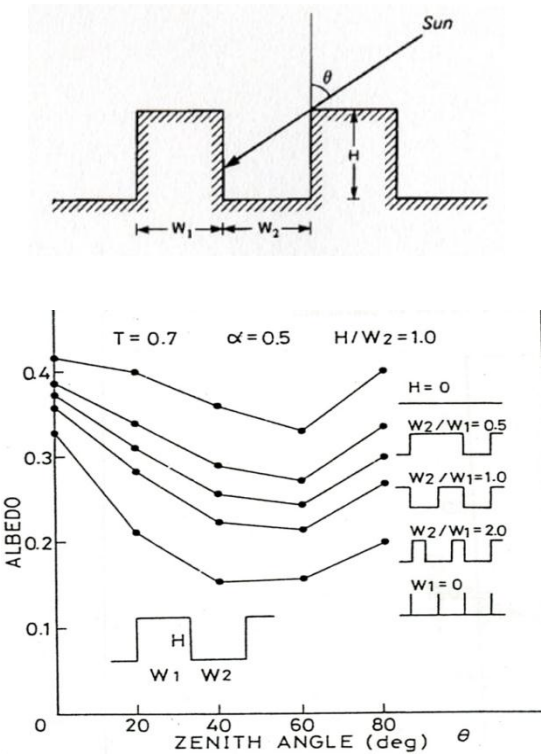


Figure I. 11 Relation entre l'albédo et la hauteur solaire (**Aida et Gotoh**, 1982).

I.4.1.1.2 Les irrégularités verticales du tissu urbain

a) Variation de la façade des rues canyons

En milieu urbain, les rues ne présentent pas toutes une forme semi-infinie avec des largeurs et des hauteurs homogènes. Limiter les recherches sur ces configurations théoriques, réduit la pertinence et l'applicabilité des résultats. Ainsi, **Ali-Toudert et Mayer** (2007) ont étudié numériquement l'impact de l'irrégularité des façades sur le confort thermique au sein d'une rue canyon, en utilisant le modèle ENVI-Met. Le confort thermique a été évalué par le biais de la température physiologique équivalente (PET). Le panel d'étude comprend trois rues canyons présentant toutes des galeries piétonnes. Le première rue comporte des façades homogènes et symétriques avec un rapport H/W égal à 2 (**Figure I. 12, cas I**), la seconde est asymétrique avec une façade en gradins (**Figure I. 12, cas II**) et la dernière configuration est composée de deux façades différentes avec des dispositifs de surplomb (balcons ou terrasses par exemple) (**Figure I. 12,** cas III).

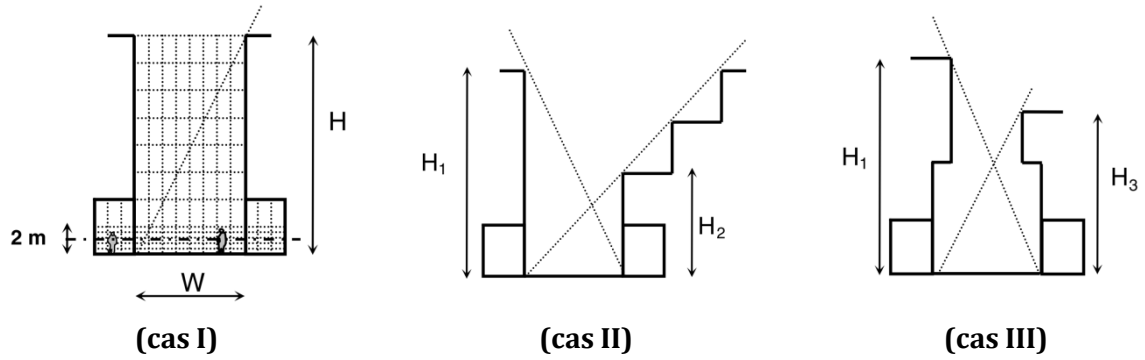


Figure I. 12 Schématisation des configurations étudiées par **Ali-Toudert** *et al.,* (2007).

Pour la rue symétrique (cas I), durant la journée, le pourcentage des zones confortables d'été dans les surfaces couvertes de galerie est supérieur à celui obtenu au milieu de la rue en raison de sa durée ensoleillement élevée. D'après **Ali-Toudert et Mayer** (2007), ce pourcentage est étroitement lié au rapport géométrique H/W de la rue et aux dimensions des galeries (hauteur et largeur). Toutefois, durant la nuit, le pourcentage des zones confortables enregistrées dans les galeries reste inférieur à celui des surfaces de la rue. Les chercheurs ont attribué cette différence à la faible ventilation des galeries par rapport à la rue et à leur capacité de piégeage de la chaleur émise par le sol revêtu d'asphalte.

Par ailleurs, des sensations de chaleur ont été identifiées dans la rue asymétrique présentant une façade en gradins (cas II) en raison de sa grande ouverture vers le ciel. En effet, cette ouverture entraîne un captage de l'énergie solaire plus important que dans la configuration

symétrique (cas I). En revanche, lorsque les rayons solaires sont obstrués par les façades, la rue asymétrique présente un meilleur confort thermique que le cas I.
Enfin, les résultats optimaux de sensation de confort ont été obtenus pour la rue présentant des dispositifs de façades surplombant la rue. Ceci est dû à la morphologie de la rue qui présente un faible facteur de vue du ciel générant davantage de surfaces ombragées au niveau de la rue et des galeries.

b) Variation de la forme et de la hauteur des espaces publics extérieurs

La forme géométrique urbaine des places publiques a fait l'objet d'une étude numérique thermo-radiative dans les climats chaud et aride par **Masmoudi et Mazouz** (2004), pour trois places de forme rectangulaire, carrée et circulaire. Dans un premiers temps, la hauteur des bâtiments encadrant les places est considérée constante et égale à 16,6 m. La forme circulaire présente les résultats optimaux de flux solaire absorbée. En effet, la quantité d'énergie solaire absorbée par la place circulaire à 13h00 est la plus faible avec seulement 81 Wh/m^2, en comparaison avec les valeurs de l'ordre de 114 Wh/m^2 obtenues pour les places en forme de rectangle et de carré. Des conclusions analogues sont tirées pour les températures radiantes moyennes, égales respectivement à 36°C, 38°C et 39°C, pour la place circulaire, rectangulaire et carrée.

Dans un second temps, trois hauteurs d'immeubles ont été considérées : 16,6 m, 25 m et 50 m. Cette modification géométrique a très peu d'effet sur l'absorption des façades des places. Cependant, au niveau du sol, la quantité d'énergie solaire absorbée est alors réduite de façon quasi-homogène pour toutes les places.

c) Hétérogénéité de la hauteur des structures bâties

L'effet de la hauteur des bâtiments sur la quantité d'énergie solaire absorbée a été étudié par **Kondo** *et al.,* (2001) pour trois configurations. La première configuration présente des bâtiments de formes carrées (**Figure I. 13 à gauche**), présentant une hauteur homogène de 25 m. La seconde et la troisième, présentent des hauteurs de bâtiments variées (**Figure I. 13 à droite**), mais avec des pourcentages de bâtis homogène. Cette étude numérique a montré que, la quantité d'énergie solaire absorbée est plus grande pour les configurations présentant des hauteurs hétérogènes. D'après **Kondo** *et al.,* (2001), cela provient du fait qu'une fraction des flux réfléchis par les toitures est interceptée par les parois verticales adjacentes plus hautes, augmentant ainsi les inter-réflexions et par conséquent la quantité d'énergie solaire absorbée. Notons aussi que **Chimklai** *et al.,* (2004) ont montré que la variation de la hauteur des formes urbaines joue un rôle très prépondérant sur la quantité d'énergie solaire réfléchie.



Figure I. 13 A gauche : le modèle de bâtiment en forme de carré utilisé pour l'étude numérique. **A droite** : la seconde configuration d'étude présentant des hauteurs différenciées (**Kondo** *et al.,* 2001).

I.4.1.2 Paramètres liés à des facteurs spatio-temporels

I.4.1.2.1 L'orientation des façades urbaines

L'orientation d'un tissu urbain est un paramètre spatial permettant d'analyser l'accessibilité de l'énergie solaire et de la lumière du jour au sein d'un tissu urbain. Elle engendre des surfaces ombragées et ensoleillées entrainant des variations des températures ambiantes et de surfaces. Morphologiquement, cet indicateur produit des formes de protection ou d'exposition solaire dans les espaces urbains. Ces protections sont souvent efficaces, uniquement en début et en fin de journée, en fonction de l'orientation du bâtiment. En effet, lorsque le soleil est au zénith, les surfaces ombragées sont très réduites.

D'un point de vue climatique, l'impact de l'orientation solaire sur le comportement thermique des surfaces urbaines a fait l'objet de plusieurs études dans les régions de basses latitudes rapportées dans la littérature. Selon **Aida et Gotoh**, (1982), la hauteur solaire affecte la quantité du flux solaire réfléchi. De même, **Kondo** *et al.,* (2001) ont constaté que lorsque la hauteur solaire est importante, la valeur de l'énergie solaire réfléchie d'un tissu urbain augmente, indépendamment de la valeur des coefficients de réflexion des surfaces. En revanche, lorsque la hauteur solaire est faible, la quantité d'énergie solaire réfléchie diminue dans le cas où les surfaces des bâtiments ont des coefficients de réflexion modérés.

Par ailleurs, **Ali-Toudert et Mayer**, (2006) ont minimisé le rôle de l'orientation solaire d'une rue canyon sur son comportement thermique. En effet, selon eux, lorsque le rapport d'aspect de la rue est de H/W=0.5, le confort thermique urbain est presque indépendant de l'orientation. En revanche, lorsque le rapport H/W est égal à 4, le confort est optimal de façon identique pour les deux orientations Est-Ouest et Nord-Sud, fournissant ainsi un bien meilleur environnement thermique.

I.4.1.2.2 L'ombre des surfaces

Les structures urbaines ainsi que les structures végétales constituent des sources de génération d'ombres, dépendant de la hauteur solaire et de l'orientation des tissus par rapport au soleil (paramètre spatio-temporel). Pour les configurations éparpillées, uniquement le sol et les façades masquées peuvent bénéficier de zones ombragées. Cependant, pour les configurations denses, les zones ombragées peuvent caractériser plusieurs façades, voire toutes, et le sol est protégé des rayons solaires le plus souvent. Selon **Ait-Ameur** (2002), l'espace ombragé n'est pas favorable à l'accumulation thermique (inertie ou stockage) et limite les hausses de températures de l'air générées par l'action du rayonnement solaire direct. Par ailleurs, **Vinet** (2000) et **Robitu** (2005) ont notamment mentionné que, dans les espaces urbains extérieurs, les surfaces ombragées enregistrent les indices de confort les plus favorables.

I.4.1.3 Paramètres liés aux caractéristiques optiques et thermiques des surfaces urbaines

La diversité des types de matériaux des surfaces rend plus complexe les échanges thermiques entre les structures urbaines et leur environnement extérieur. En effet, exposés aux flux solaires incidents, ces matériaux deviennent des sources de réflexion des rayonnements solaires et d'émission des rayonnements infrarouges. Ces apports dépendent de l'albédo des matériaux ainsi que de l'inertie des enveloppes urbaines.

I.4.1.3.1 L'albédo des surfaces

Akbari *et al.,* (2003), puis **Synnefa** *et al.,* (2007), ont montré que l'augmentation de la réflexion des matériaux des surfaces urbaines (façades et toitures) est liée à leur couleur, à leurs états d'utilisation et à la nature des surfaces urbaines.

a) Impact de la couleur des surfaces sur l'albédo

Les matériaux de couleurs claires ont un albédo supérieur à celui des matériaux sombres. C'est pourquoi les villes du Sud ont en général un albédo plus fort (0,30 à 0,45) que celles du Nord (0,10 à 0,20) (**Taha**, 1997). **Synnefa** *et al.,* (2007) ont mesuré l'albédo de toitures de différentes couleurs. Ainsi, les toitures peintes avec des revêtements blancs ont une forte réflectivité, pouvant atteindre 72 %, contre 26 % pour des toitures noires.

Par ailleurs, **Akbari** *et al.,* (2003) ont étudié l'impact de la couleur des façades sur la température des surfaces. Pendant les heures de plein soleil, les façades peintes en noir peuvent atteindre des températures supérieures de 7°C par rapport à celles peintes en blanc. **Simpson** *et*

McPherson, (1997) ont étudié l'impact de la couleur des toitures dans le désert d'Arizona aux Etats Unis. Dans ce cas, les toitures blanches avec un albédo de 0,75 étaient jusqu'à 20°C plus froides que les toits gris (albédo de l'ordre de 0,30) et jusqu'à 30°C plus froides que celles des toits sombres (albédo de 0,10). La **Figure I. 14** ci-dessous montre clairement que la température d'un matériau diminue avec l'augmentation de l'albédo (**Taha** *et* **Bornstein**, 1999).

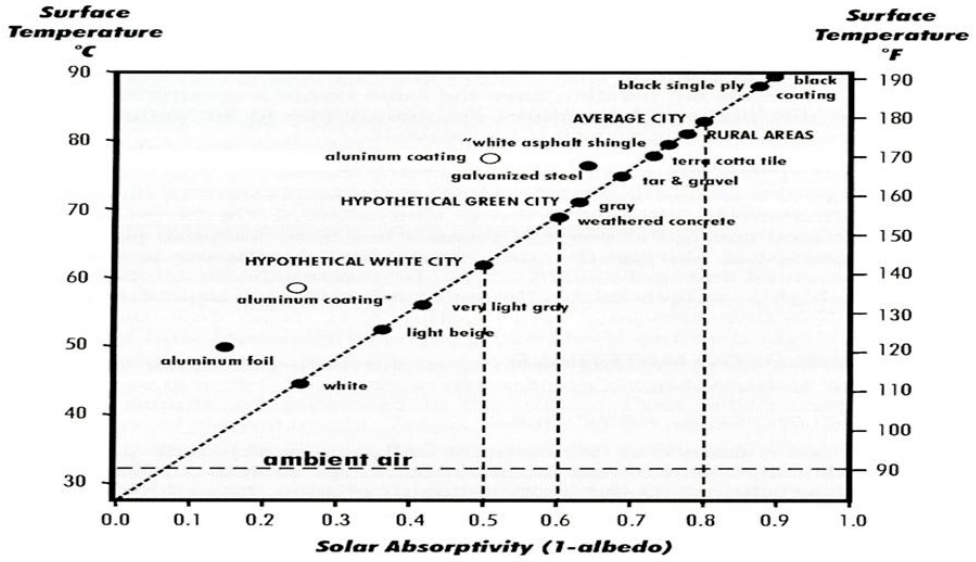
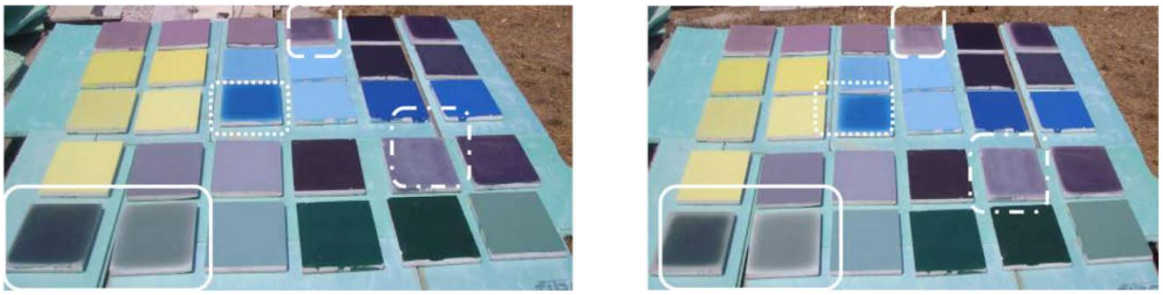


Figure I. 14 La quantité d'énergie solaire absorbée en fonction de la température de surface pour plusieurs matériaux (**Taha** *et* **Bornstein**, 1999).

b) L'impact de l'optimisation et de la détérioration des surfaces sur l'albédo

L'albédo des matériaux sombres ou colorés peut être optimisé, notamment par l'ajout de pigments réfléchissants dans les peintures de revêtement (**Synnefa** *et al.,* 2007) ou par l'utilisation de revêtements thermo-chromiques. Ces derniers changent leurs couleurs en fonction de leur environnement thermique, en passant de couleurs sombres (**Figure I. 15 (a)**) à des couleurs plus claires lorsque la température de surface augmente au-delà d'un seuil de transition (**Figure I. 15 (b)**) (**Azari et Bierman**, 2005 ; **Watts** *et al.,* 2006). Une étude expérimentale du potentiel des matériaux thermo-chromiques sur la quantité d'énergie absorbée a été menée par (**Karlessi** *et al.,* 2009). Cette étude a montré que la quantité d'énergie absorbée augmente lorsque la température de surface est inférieure à la température de transition de 30°C et qu'elle diminue lorsque la température dépasse le seuil de transition.



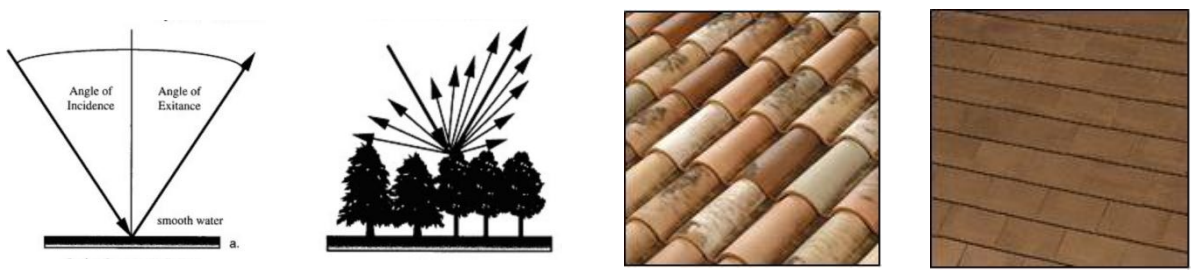
(a) **(b)**

Figure I. 15 Les phases de changement de couleur des revêtements thermo-chromiques. **(a)** L'état coloré au-dessous de 30°C. **(b)** le début de l'éclaircissement des couleurs au-dessus de 30°C (**Karlessi** *et al.,* 2009).

Les surfaces peuvent aussi perdre de leur pouvoir de réflexion initial. Cette détérioration est due à plusieurs facteurs tels que les conditions météorologiques locales et l'encrassement des moisissures réduisant l'efficacité des matériaux (**Berdahl** *et al.,* 2005). Par exemple, l'albédo varie en fonction de la quantité d'eau contenue dans le matériau. Celle-ci accroît l'absorption du flux solaire incident et diminue le pouvoir de réflexion du matériau. Un sable sec à une valeur d'albédo de 35 %, alors que lorsqu'il est humide, la valeur diminue jusqu'à 25 % (**Berdahl** *et al.,* 2005).

c) L'impact de la nature des surfaces sur l'albédo

En plus de dépendre de la couleur des matériaux, l'albédo dépend également de la nature des matériaux. **Akbari** *et al.,* (2008) ont montré que les toitures avec des tuiles plates reflètent plus d'énergie solaire que les toitures à tuiles concaves ou convexes. L'effet de la rugosité a aussi été étudié par **Berdahl et Bretz,** (1997). Les chercheurs ont constaté que la rugosité diminue fortement la réflexion solaire. Il est avéré que la réflexion d'un matériau à surface lisse de l'ordre de 79 % chute à 51% lorsque sa surface est rugueuse. En effet, si la surface est rugueuse, les rayons solaires effectuent plusieurs réflexions, appelées réflexions diffuses avant de s'échapper. Ceci diminuerait la quantité d'énergie solaire réfléchie. Une surface lisse engendre des réflexions spéculaires qui s'échappent sans inter-réflexions.



(a) **(b)** **(c)**

Figure I. 16 (a) Réfléxion spéculaire sur une surface lisse. **(b)** Réfléxion diffuse sur une surface rugueuse. **(c)** Deux modèles de toiture convexe et plane (**Akbari** *et al.,* 2008).

I.4.1.3.2 L'inertie des enveloppes urbaines

L'inertie d'une paroi urbaine dépend de la capacité thermique des matériaux à emmagasiner la chaleur et à la restituer. Plus le stockage de chaleur et sa restitution sont longs et plus le matériau est inerte. Les parois urbaines présentent une forte inertie thermique induisant une forte capacité de stockage de la chaleur et un amortissement des ambiances thermiques dans l'espace urbain. Cet amortissement se traduit par des montées et des descentes très lentes des températures (**Ait_Ameur**, 2002). De plus, l'inertie thermique engendre un déphasage des températures entre l'environnement thermique intérieur et extérieur des bâtiments et entre la nuit et le jour. Ce déphasage thermique maintient une partie de la matinée des températures fraîches produites par le refroidissement nocturne et une partie de la nuit des températures plus chaudes produites par l'accumulation thermique en journée. Selon **Ait_Ameur** (2002), ce phénomène d'inertie thermique est davantage présent dans les espaces étroits présentant une faible ouverture au ciel tels que les rues ou les cours intérieures.

I.4.2 Facteurs morphologiques influant sur la température de l'air

I.4.2.1 Impact de la densité urbaine

Le champ de température de l'air en milieu urbain est la résultante de l'ensemble des échanges thermiques produits entre les surfaces urbaines et l'atmosphère. Ceux-ci sont largement dominés par les flux solaires incidents. Les écarts recensés entre les centres-villes et la périphérie sont souvent importants notamment au niveau des stations météorologiques aéroportuaires, de l'ordre de 5 à 10°C (**Oke**, 1987 ; **Akbari** *et al.*, 1997 ; **Santamouris** *et* **Doulos**, 2001). Ces différences illustrent l'effet énergétique de l'urbanisation sur la température de l'air, connu sous le nom d'îlot de chaleur urbain présenté sur la **Figure I. 17**.

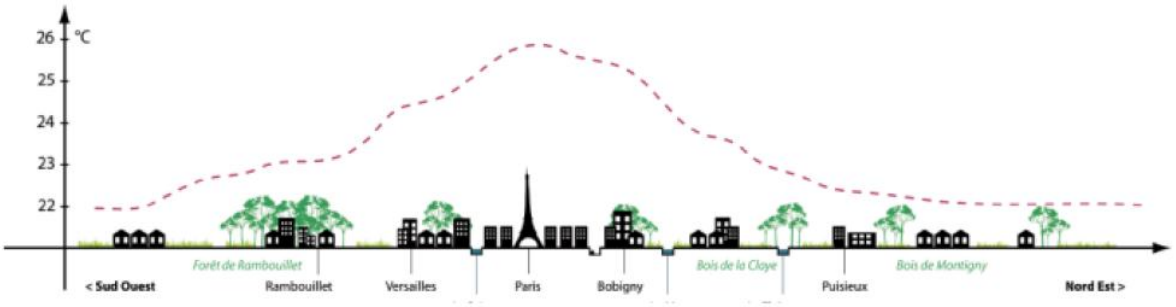


Figure I. 17 Schéma de l'îlot de chaleur au-dessus de l'agglomération parisienne (www.iau-idf.fr).

Ce phénomène a été largement observé dans la littérature. **Akbari** *et al.,* (1992) ont constaté que les températures dans les zones urbaines sont généralement plus élevées que celles des zones rurales proches, de l'ordre de 1 à 4°C. Ce phénomène constitue un avantage en hiver car il permet de diminuer la consommation d'énergie liée au chauffage. Parallèlement, il augmente la production de brouillard. Cependant, dans les climats chauds, une augmentation de la température entraîne une augmentation de la demande énergétique de conditionnement d'air.

De plus, une étude menée par **Oke** (1988) sur 30 villes américaines et européennes de moyennes latitudes a montré que l'ouverture ou la fermeture d'un tissu urbain affecte l'îlot de chaleur urbain. **Oke** (1988) propose une corrélation empirique permettant de caractériser en termes d'îlot de chaleur un tissu urbain de type rue canyon en fonction de leur rapport d'aspect H/W par l'équation **I. 11**:

$$\Delta T_{ur_max} = 7.54 - 3.97\, ln\,(H/W) \qquad \textbf{(I. 11)}$$

où ΔT_{ur_max} représente l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (en C°)

I.4.2.2 Impact des surfaces urbaines chaudes

A l'échelle urbaine, l'hétérogénéité des surfaces fait varier localement les échanges thermiques entre la paroi et l'air. Ces échanges dépendent principalement des caractéristiques optiques et thermiques de chaque face, ainsi que de son orientation par rapport au soleil. **Synnefa** *et al.,* (2007) ont montré expérimentalement sur des bâtiments revêtus de béton que l'augmentation de l'albédo de 0,30 à 0,65 permet de diminuer la température de l'air de 2,2°C. Par ailleurs, **Niachou** *et al.,* (2008) ont étudié expérimentalement les caractéristiques thermiques d'une rue canyon orientée dans la direction Nord-Est et Sud-Ouest. Ils montrent alors que la température de l'air mesurée près des façades varie suivant l'orientation et la réflexion des matériaux de parois (**Figure I. 18**). La température de l'air à proximité de la façade Sud-Ouest est plus élevée que celle de la façade Nord-Est, la différence moyenne des températures instantanées entre les deux façades au cours de la journée est proche de 3°C, alors que la différence maximale absolue de la température de l'air est de 5,4°C au cours de la journée. Des conclusions similaires sont rapportées par **Oke** *et* **Nakamura**, (1988) pour une rue canyon orientée Est-Ouest. La température de l'air près de la paroi Nord face au soleil est supérieure à la température de l'air ambiant, en raison des transferts convectifs et radiatifs.

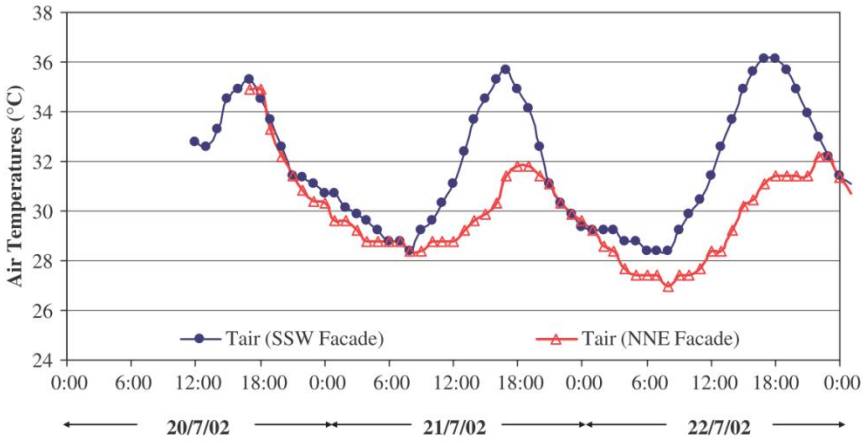


Figure I. 18 Evolution de la température de l'air à proximité des façades d'une rue (**Niachou** *et al.,* 2008).

I.4.3 Facteurs morphologiques influant sur la vitesse du vent

Un des facteurs le plus influant sur les conditions de confort des piétons dans les espaces extérieurs est le vent et son caractère turbulent. Celui-ci varie constamment en direction et en grandeur. Les effets du vent sur un individu peuvent être divisés en deux catégories : les effets dynamiques et les effets thermiques (**Penwarden** *et* **Wise**, 1975). Les effets dynamiques induits par le vent modifient le comportement de l'individu et ses mouvements. Ces gênes peuvent être ressenties avec des vitesses du vent supérieures à 5 m/s. Au-dessus de 10 m/s, la marche devient difficile et au-dessus de 15 m/s, il existe un risque d'accident (**Bejerregard** *et al.,* 1981). Par ailleurs, l'intensité du vent perturbe les échanges thermiques entre le corps humain et le milieu extérieur. Selon le climat, un vent d'une certaine intensité pourrait être perçu comme une gêne ou un générateur de confort. Dans des climats froids, le vent diminuera presque toujours les conditions de confort à l'extérieur, tandis que l'inverse est vrai dans des climats chauds. La force du vent et son caractère turbulent peuvent être amplifiés ou diminués par plusieurs paramètres morphologiques liés aux structures bâties et détaillés dans ce qui suit.

I.4.3.1 L'influence de la rugosité urbaine

En conditions neutres, le profil vertical de vitesse moyenne U_z du vent observé en site homogène peut être assimilé à une fonction logarithmique de l'altitude, donnée par **Launder et Spalding**, (1972) :

$$U_z = \frac{U^*}{\kappa} ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \qquad \textbf{(I. 12)}$$

où U^* en (m/s) représente la vitesse de frottement, z_0 en (m) est la longueur de rugosité et κ est la constante de Von Kármán égale à 0,41. Le paramètre z_0 varie de quelques millimètres sur une surface marine calme jusqu'à quelques mètres sur une zone urbaine.
Lorsque les éléments de rugosité sont rapprochés (bocage d'arbres par exemple), c'est-à-dire lorsqu'ils occupent une surface au sol supérieure à 25 % de la surface totale, le profil de la vitesse est décalée d'une hauteur z_d, appelée la hauteur de déplacement. L'introduction de cette hauteur donne une nouvelle formulation à l'équation **I. 12** du profil vertical de vitesse :

$$U_z = \frac{U^*}{k} ln\left(\frac{z - z_d}{z_0}\right) \qquad \textbf{(I. 13)}$$

Cependant, en milieu urbain, la forte rugosité de l'aménagement urbain produit des forces de frottement qui réduisent ou accélèrent la vitesse du vent avec amplification de la turbulence locale. Ces agitations tourbillonnaires sont le résultat des variations de pression entre les différentes zones des bâtiments. Cette forte rugosité rend très difficile une formulation du profil de vent (**Figure I. 19**) ainsi que ses paramètres de rugosité. **Grimmond** *et* **Oke**, (1999) ont montré que la hauteur de déplacement z_d et la longueur de rugosité z_0 peuvent être estimées à partir de valeurs caractéristiques pour différents types de zones urbaines répertoriées dans la littérature. Ils présentent une zone urbaine comme un assemblage de plusieurs zones bâties où les seuls paramètres qui les diffèrent sont la hauteur des immeubles et la densité bâtie. Les résultats de cette étude sont présentés dans le **Tableau .I. 2**.

Types de zones urbaines	Hauteur de déplacement z_d (m)	Longueur de rugosité z_0(m)
Densité et hauteur faibles (bâtiments à 1 ou 2 étages)	**2 - 4**	**0,3 - 0,8**
Densité et hauteur faibles (bâtiments à 2 ou 3 étages)	**3,5 - 8**	**0,7 - 1,5**
Forte densité et grande hauteur (bâtiments à 6 étages)	**7 – 15**	**0,8 – 1,5**
Immeubles de grande hauteur	**>12**	**>2,0**

Tableau .I. 2 Propriétés aérodynamiques typiques pour des zones urbaines homogènes (**Grimmond** *et* **Oke**, 1999).

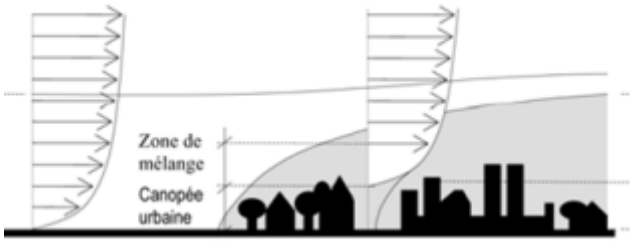


Figure I. 19 Profil moyen de la vitesse horizontale du vent dominant en site homogène et en site urbain (**Plate** *et* **Kiefer**, 2001).

I.4.3.2 L'influence de la volumétrie des bâtiments

Les écoulements autour d'un bâtiment résultent des interactions entre le vent et la structure bâtie. Par sa forme et sa disposition, un bâtiment modifie la distribution des différentes zones de pression comme illustré sur la **Figure I. 20** (**Gandemer**, 1981). Ainsi, sur la face au vent d'un bâtiment, apparaît une zone de surpression caractérisée par un contournement de l'écoulement vers le haut et sur les côtés du bâtiment et l'apparition d'un rouleau tourbillonnaire résultant de l'interaction avec le sol. Au niveau des arêtes des bâtiments, des zones de décollement apparaissent, caractérisées par leurs dépressions relativement constantes avec la hauteur du bâtiment. Cependant, sous la face du bâtiment, le vent forme des mouvements tourbillonnaires à l'origine du sillage. Ces tourbillons s'atténuent en aval du bâtiment où l'écoulement retrouve ses caractéristiques en amont. La **Figure I. 20** présente une schématisation du contournement par le vent d'une construction isolée.

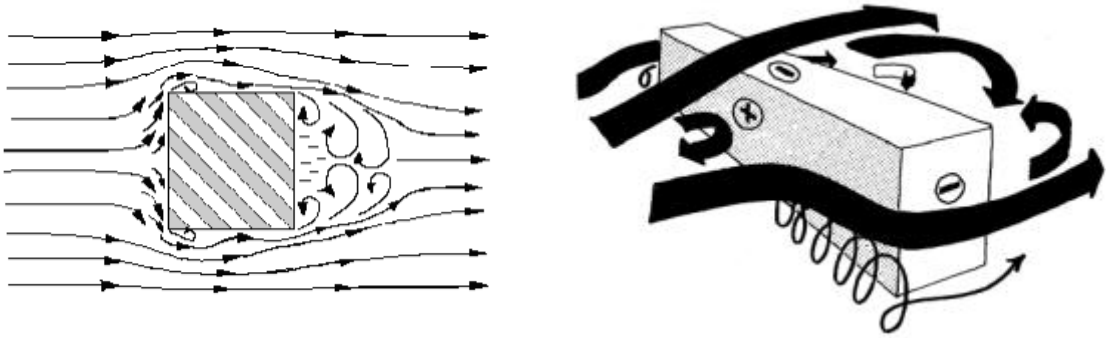


Figure I. 20 Schématisation du contournement d'une structure bâtie par le vent (**Gandemer**, 1981).

I.4.3.3 L'influence de l'agencement urbain

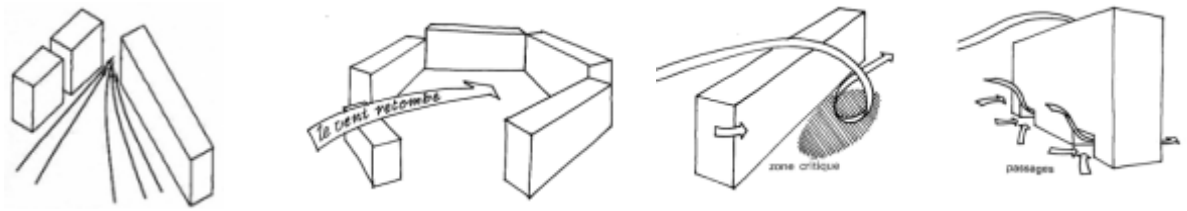
Au niveau des piétons, des effets de gêne liés à l'écoulement du vent peuvent être engendrés par la façon dont les bâtiments sont associés. En effet, les dimensions, les formes et les juxtapositions des ensembles bâtis conditionnent la distribution de la vitesse du vent et l'intensité turbulente autour des obstacles. Une bonne connaissance des effets du vent sur les structures bâties permet de comprendre l'aspect aérodynamique des espaces extérieurs et de d'aboutir à des configurations urbaines génératrices de situation de confort ou d'inconfort. Pour répondre à cette problématique, le Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB Nantes) a effectué plusieurs essais en soufflerie sur plusieurs juxtapositions de bâtiments afin d'étudier leur impact sur l'écoulement d'air. Cette étude a permis d'observer plusieurs effets aérodynamiques (**Gandemer**, 1976) tels que :

- **l'effet venturi** : c'est un phénomène engendré par des bâtiments dessinant un angle convergent dans la direction du vent. La zone critique pour le confort se situe à l'étranglement (**Figure I. 21 (a)**) qui représente une zone de survente.

- **l'effet de maille** : c'est un effet provoqué par une juxtaposition des bâtiments en forme de poche ou d'alvéole. Cet effet diffère selon les dimensions de la maille, selon sa forme (ouvert, fermé, parallèle au vent par exemple) et la direction du vent (**Figure I. 21 (b)**).

- **l'effet des barres** : c'est une déviation en vrille de l'écoulement au passage d'une barre pour une incidence voisine de 45°. Le phénomène est généré dans le cas où la barre est isolée ou dans le cas de plusieurs barres de hauteur voisines si les espacements entre les constructions sont inférieurs ou égaux à la hauteur des bâtiments (**Figure I. 21 (c)**).

- **l'effet de passages sous les immeubles** : c'est un phénomène d'écoulement qui s'observe dans les trous ou dans les passages sous immeuble qui relient l'avant du bâtiment en suppression et son arrière en dépression. La hauteur des structures bâties joue un rôle important sur le renforcement de la gêne dans ces orifices. En effet, plus les bâtiments sont élevés, plus le confort diminue dans ces porches. Il est assimilable à l'effet Venturi. (**Figure I. 21 (d)**).



(a) **(b)** **(c)** **(d)**

Figure I. 21 Quelques effets aérodynamiques du vent : **(a)** effet venturi, **(b)** effet de maille, **(c)** effet de barre, **(c)** effet de passages sous les immeubles (**Gandemer**, 1976).

I.4.3.4 L'influence de l'orientation des tissus urbains par rapport aux vents incidents

L'orientation des structures bâties permet de déterminer le régime de vent et contrôler sa vitesse. En effet, si l'orientation est parallèle, la vitesse augmente d'avantage que si les structures sont perpendiculaires au vent. L'exemple de la rue canyon a fait l'objet de plusieurs études afin de déterminer la nature du régime du vent en fonction de l'orientation de la rue (**Oke** *et* **Nakamura**, 1988 ; **Santamouris** *et al.,* 2001). Il a été constaté que, lorsque l'écoulement est parallèle à la direction de la rue, un effet de canalisation est observé (**Figure I. 22 à gauche)**. Selon **Gandemer** (1976), pour que l'effet soit observé, le couloir canalisant doit être étanche et composé de parois peu poreuses, doté d'une largeur inférieure ou égale à l'épaisseur des bâtiments et enfin, la hauteur des bâtiments doit être supérieure ou égale à 6 m. Par ailleurs, **Gandemer** (1976) précise que, la canalisation ne constitue pas une gêne en soi. Elle devient problématique lorsqu'elle est associée à une anomalie aérodynamique, lors d'une association canalisation-Venturi par exemple (**Figure I. 22 à droite**).

En revanche, lorsque l'écoulement est perpendiculaire à la direction de la rue, l'écoulement d'air forme un ou plusieurs vortex qui se caractérisent par un mouvement en spirale. Ce mouvement peut être accéléré par l'augmentation de la vitesse de vent et aussi par les effets thermiques liés aux parois chauffées par le soleil. En effet, l'air chaud remonté est remplacé par l'air plus frais qui circule au-dessus des toits permettant éventuellement d'évacuer la chaleur de la rue (**Figure I. 23**). Suivant le rapport d'aspect H/W d'une rue, **Oke et Nakamura**, (1988) a distingué trois types d'écoulements : un écoulement de rugosité isolé lorsque ce rapport est inférieur à 1,54 (**Figure I. 24 (a)**), un écoulement à interface de sillage lorsque le rapport est compris entre 1,54 et 2,5 (**Figure I. 24 (b)**) et enfin un écoulement rasant lorsque le rapport est supérieur à 2,5 (**Figure I. 24 (c)**).



Figure I. 22 A gauche : Canalisation du vent par la direction de la rue. A droite : Présentation d'une anomalie aérodynamique "canalisation-Venturi" (**Gandemer**, 1976)**.**

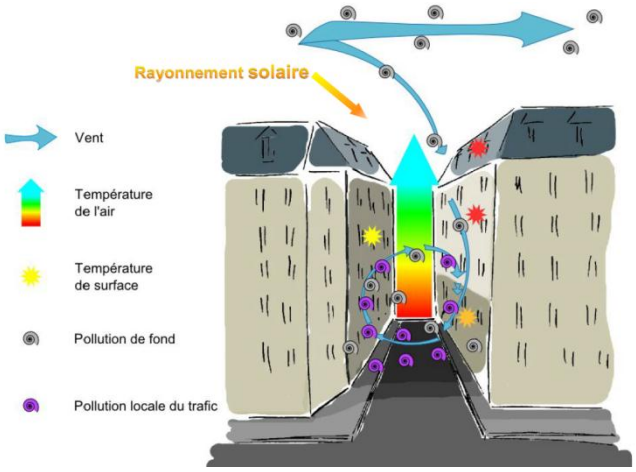


Figure I. 23 Schéma de la circulation du vent lorsque le vent et perpendiculaire à une rue canyon (www.iau-idf.fr).

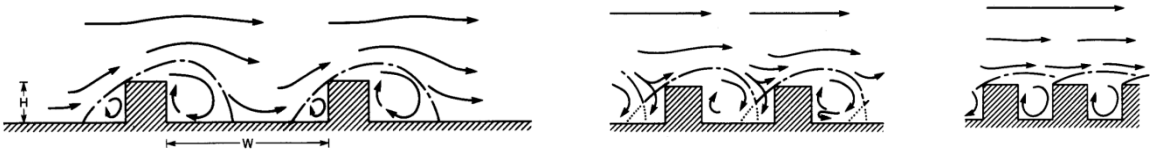


Figure I. 24 Profil de la circulation de l'air dans une rue canyon en fonction du rapport d'aspect H/W de la hauteur et de sa largeur : **(a)** écoulement à rugosité isolée, **(b)** un écoulement à interface de sillage, **(c)** écoulement rasant (**Oke** *et* **Nakamura**, 1988).

I.4.3.5 L'influence de la densité ou porosité d'un tissu urbain

La mesure de la densité d'un tissu urbain permet d'évaluer sa porosité par rapport au vent. Dans les tissus compacts et resserrés, seuls les toits et les terrasses constituent des probables zones d'inconfort. Un groupement de construction à décrochement organisé de manière verticale peut engendrer un effet de pyramide définit par **Gandemer** (1976) (**Figure I. 25 à droite**). Cette forme semble judicieuse car elle ne produit pas d'inconfort, elle dissipe le maximum d'énergie du vent dans tous les azimuts et diminue les survitesses dans les niveaux inférieurs des immeubles et aux niveaux des terrasses.

Cependant, les tissus poreux ou ouverts engendrent des perturbations aérodynamiques qui s'étendent sur de longues distances. En effet, la porosité horizontale ou verticale des tissus urbains (cours, espaces résidentiels par exemple) ainsi que la porosité des immeubles (pilotis, trous par exemple) modifient l'écoulement de l'air et créent des zones à risques liées à de forts courants d'air. Afin de limiter ces risques, il faut que l'ouverture d'un tissu urbain soit inférieure à 0,25 fois son périmètre et qu'il soit constitué de bâtiments de hauteurs voisines (**Gandemer**, 1976) (**Figure I. 25 à gauche**).

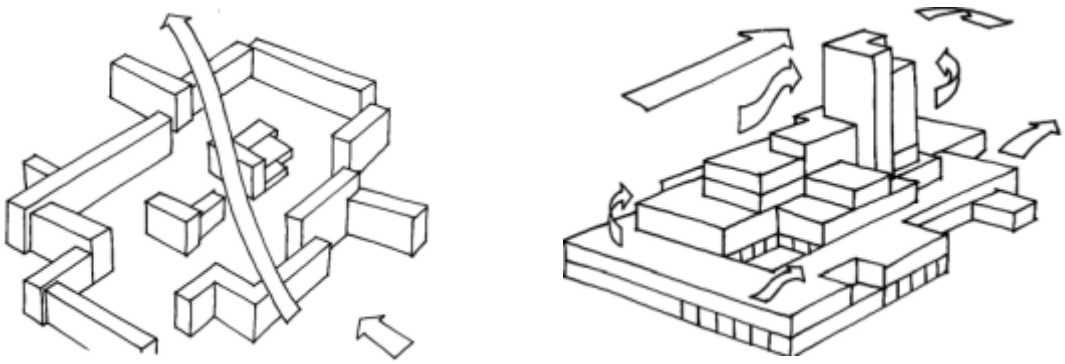


Figure I. 25: A gauche : Un tissu poreux présentant des bâtiments de hauteurs homogènes. **A droite :** Un effet de pyramide sur un groupement de construction à caractère pyramidal (**Gandemer**, 1976).

I.5 Formes urbaines génériques et leur impact sur le confort

La ville est un espace composé par l'assemblage de plusieurs formes urbaines reflétant chacune une vision ou une théorie de la ville à une époque donnée. Chaque grande idéologie politique ou urbaine a produit des formes urbaines originales, mais différentes typologiquement. En effet, la typologie des formes urbaines varie d'un quartier et d'un emplacement à l'autre. Ces variations sont observées d'une part dans l'organisation du bâti et la forme des parcellaires et d'autre part dans les formes urbaines et leur mode d'aménagement. En effet, la majorité des villes, européennes notamment, présentent des centres-villes historiques à partir desquels, des artères sous la forme de rues ou de boulevards desservent les nouveaux quartiers. Ces noyaux historiques se caractérisent par leurs densités urbaines élevées et par leurs régularités verticales et horizontales. Les formes modernes, en revanche, se caractérisent par leurs hétérogénéité horizontales et verticales et par leur distribution fragmentée et poreuse. Cette différenciation spatiale et morphologique engendre des modifications sur les paramètres climatiques liées au confort extérieur.
Une description morphologique et historique des formes urbaines les plus représentatives des villes ainsi que les principales modifications climatiques engendrées par chaque forme sont détaillées dans les sections suivantes.

I.5.1 Les formes compactes

Les formes urbaines compactes caractérisent les anciens centres-villes, notamment dans les villes européennes. Ces centres-villes sont souvent très denses et se présentent comme une concentration importante de bâtis sur un rayon urbain dense. Suivant leur morphologie, on distingue : l'îlot traditionnel et l'îlot haussmannien.

I.5.1.1 L'îlot traditionnel

Selon **Panerai** *et al.,* (1997), l'îlot traditionnel se présente généralement sous la forme d'un carré, composé de parcelles de surfaces inégales et souvent petites : "*l'îlot traditionnel se présente sous la forme d'un quadrilatère. Il est lié directement à la rue*" (**Figure I. 26 à droite**). Les bâtiments de l'îlot sont alignés en fonction de la rue et comportent diverses fonctions d'échanges commerciaux. Le cœur d'îlot est caché de la rue par la continuité des façades (**Figure I. 26 à gauche**) et la liaison se fait par l'intermédiaire de petits porches. Ces porches desservent des équipements éducatifs et administratifs aménagés dans la partie intérieure de l'îlot. Dans l'îlot traditionnel, les façades principales sont traitées différemment des façades intérieures. Elles sont plus ornementées et percées de fenêtres côté rue et fermées et moins embellies côté cour intérieure :

"*L'îlot traditionnel est un ensemble de parcelles délimitées par les rues, isolé, et se caractérise par la continuité de son épiderme et l'opposition de ses faces (externe : sur la rue, interne : vers le cœur)".*

Notons aussi que, l'îlot traditionnel constitue un très bon exemple de forme urbaine favorisant la mixité sociale et fonctionnelle, par la variété de la population (riche et pauvre) qui l'habite et aussi par sa multifonctionnalité (commerce, école et fonction administrative) : "*c'est un lieu d'échange régit par la mixité"*.





Figure I. 26 A gauche : Alignement des façades de l'îlot traditionnel sur la rue. **A droite:** Forme en carré d'un îlot traditionnel, rue de Lille à Paris.

I.5.1.2 L'îlot haussmannien

L'îlot haussmannien se réfère au nom du baron Haussmann, ancien préfet de la ville de Paris. Ses travaux ont consisté à faire de grandes percées mécanique appelées "*percées Haussmanniennes*" dans le tissu urbain de la ville de Paris (**Figure I. 27 à gauche**). Le but de cette opération consistait à assainir les habitats insalubres, pour les transformer en habitats pour la bourgeoisie et à réaliser une profonde mutation, qui consistait à transférer la population ouvrière du centre vers la périphérie de la ville[7]. Morphologiquement, ces percées ont donné naissance à de nouvelles mailles urbaines alignées toujours sur la rue et présentant souvent des formes triangulaires compactes appelées : îlot haussmannien (**Figure I. 27 à droite**). Ce dernier est le fruit d'un découpage souvent en diagonale de l'îlot traditionnel existant, donnant ainsi naissance à des îlots, de tailles petites et variables : "*Le passage de ces percées ne se faisait pas toujours dans la même direction de l'îlot traditionnel, qui dans ce cas-là se trouve divisé diagonalement en deux parties ce qui a perturbé le tissu de la ville ancienne et a favorisé la naissance de l'îlot triangulaire appelé îlot Haussmannien*"(**Panerai** *et al.,* 1997).

[7] La ville de Paris était une ville ouvrière; elle comptait 400 000 ouvriers dans une population évaluée à un million d'habitants **Panerai** *et al.,* (1997).

Par ailleurs, le découpage diagonal de l'îlot traditionnel a provoqué un bouleversement spatial de son cœur d'îlot qui a trouvé sa superficie rétrécie, engendrant la migration de ces fonctions intérieures. Cette nouvelle situation a provoqué une répartition des fonctions et a favorisé l'apparition de l'îlot école, l'îlot équipement et l'îlot bâtiment : "*il ne fonctionne plus comme avant, sa forme triangulaire met en évidence la périphérie au détriment du cœur de l'îlot qui dans ce cas-là n'a plus la même importance*" (**Panerai** *et al.,* 1997).

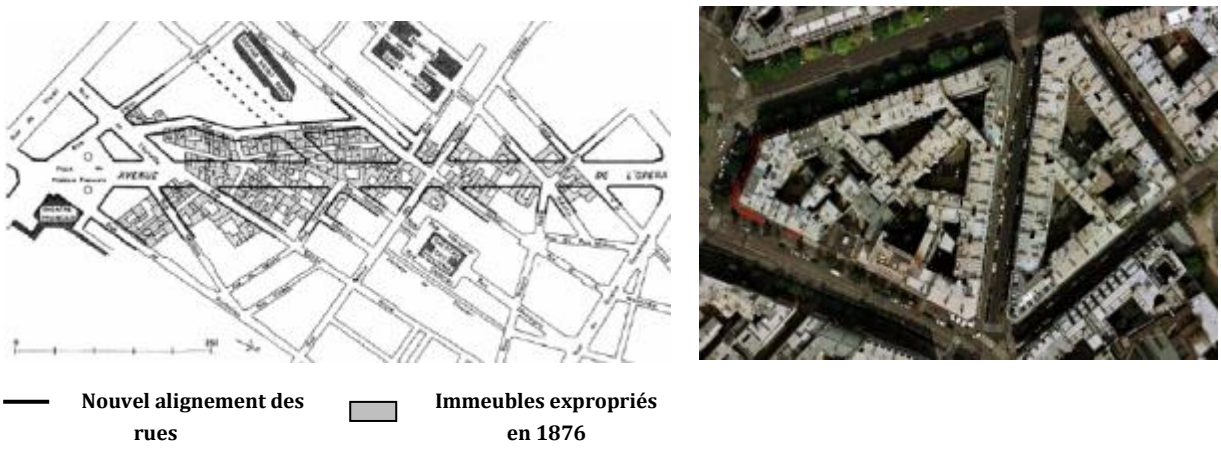


Figure I. 27 A gauche : plan de l'avenue de l'Opéra avec l'indication des nouveaux alignements et des terrains expropriés selon la loi de 1850 (**Benevolo**, 1995). **A droite :** Vue de dessus sur un îlot haussmannien à Paris.

I.5.1.3 L'influence des formes compactes sur le confort extérieur

Un tissu urbain compact est généralement étroit et profond. Il empêche les rayons solaires d'atteindre les espaces publics (rues, places ou cours intérieures) et génère des ombres qui participent à augmenter le confort de ces espaces. Par ailleurs, par temps stable et en période chaude, ces espaces favorisent le phénomène du piégeage radiatif augmentant ainsi les températures de surface et de l'air et le risque d'inconfort. Ce piégeage radiatif est dû aux multi-réflexions des rayons solaires par les surfaces urbaines (**Terjung** *et* **Louie**, 1973 ; **Hunter** *et al.,* 1991), à la réduction de l'albédo et à la diminution du facteur de vue du ciel (**Oke**, 1981). La recherche menée par **Hénon**, (2008) pour mesurer le flux de chaleur sensible sur un fragment urbain en forme d'îlot traditionnel du centre-ville de Marseille a montré que, pendant la journée, l'énergie transférée des toitures vers l'atmosphère représente 49 % de la chaleur sensible totale. Les façades ne contribuent qu'à hauteur de 39 %, les cours intérieures de 5 % et les rues de 7 %. Ces résultats montrent que le piégeage de la chaleur est amplifié dans les rues et les cours intérieures.

Néanmoins, ce piégeage peut être diminué par la ventilation naturelle. En effet, la forme des rues en canyon continu et profond dans les centres-villes historiques favorise l'effet aérodynamique de canalisation et ainsi le renouvellement d'air. Ce renouvellement est optimisé lorsque le vent est parallèle à l'axe des rues et qu'il a une vitesse suffisamment élevée pour créer un effet de

canalisation. Une étude numérique menée par **Kofoed *et* Fleisher,** (2005) a été effectuée pour évaluer la ventilation d'une place intérieure entourée d'immeubles de formes compactes. Dans cette étude, la topographie des lieux environnants a été incluse dans le modèle CFD pour prendre en compte les effets des structures urbaines voisines caractérisées par une hauteur de 18 m (**Figure I. 28**). Les résultats de cette étude ont montré que la vitesse de l'écoulement diminue et devient plus turbulente à l'intérieur de la place lorsque la direction du vent s'écarte de l'orientation principale des rues. Par ailleurs, **Kofoed *et* Fleisher** (2005) ont mentionné aussi le rôle important de la taille de la place et des dimensions des bâtiments avoisinants sur l'écoulement du vent. En effet, plus la taille de la place est grande, plus l'intensité du vent augmente et plus les bâtiments sont hauts, plus le vent est turbulent.

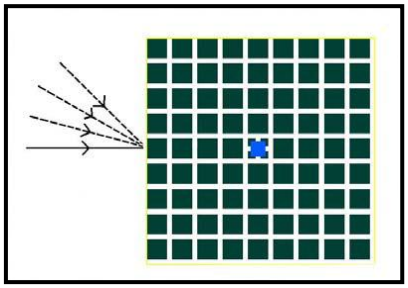


Figure I. 28 Représentation graphique du modèle CFD avec les directions du vent (0°, 15°,30°, 45°). Le square est situé au centre du modèle et entouré par un voisinage suburbain modélisé par des blocs de 18 m de haut (**Kofoed *et* Fleisher**, 2005).

I.5.2 Les formes pavillonnaires

Les quartiers caractérisant les formes pavillonnaires se situent généralement à la périphérie de la ville. Leur mode d'organisation est semblable à celui de la campagne avoisinante. Le tissu pavillonnaire est beaucoup moins dense, avec des propriétés individuelles qui s'implantent sur des grandes parcelles où l'espace libre est consacré aux jardins. Deux modèles caractérisant cette forme sont observés : les cités jardins et les lotissements parcs.

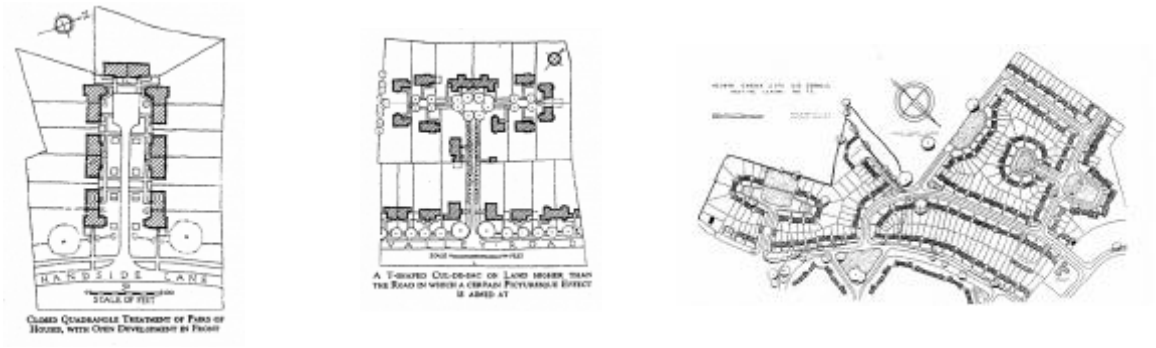
I.5.2.1 Les cités jardins du début du XXème siècle

Le concept de la cité jardin constitue une réponse à un processus d'urbanisation mis en place pour désengorger les villes caractérisées par une très forte croissance de population à la fin du XIXème siècle. C'est une pensée qui a été théorisé par **Ebenezer Howard** en 1898 : "*C'est une manière de penser la ville qui s'oppose à la ville industrielle polluée et dont on ne contrôle plus le développement pendant la révolution industrielle et qui s'oppose également à la campagne*" (source : **wikipédia**)

Les premières expérimentations de ce nouveau concept d'aménagement ont été faites en Angleterre par **Raymond Unwin**. La banlieue de Londres a fait l'objet de plusieurs constructions

de villes satellites à l'exemple de Letchworth, Hampstead et Welwyn (**Figure I. 29 (c)**) (source : **wikipédia**).

Les citées jardin sont composées de plusieurs groupement d'habitations appelé "*les closes*" : "*Dans les cités jardin, l'îlot regroupe plusieurs closes autrement dit, "l'îlot existe au-delà du close*" (**Panerai** *et al.,* 1997). Ces derniers s'organisent autour d'un espace central, réservé seulement aux riverains et qui débouche avec une seule artère sur la rue principale. Ces cœurs d'îlots semi publics se présentent souvent en forme de rectangle en forme de U ou en forme de T (**Figure I. 29 (a)** et **(b)**). Selon **Panerai** *et al.,* (1997), dans ces nouveaux espaces, la rue, élément fédérateur d'organisation dans les formes compactes, est transformée en un espace de desserte qui ne joue plus son rôle d'échange entre les populations et de mixité fonctionnelle (**Figure I. 30**). En effet, les commerces et les fonctions de services ont été regroupés dans des zones loin des habitations.



(a) **(b)** **(c)**

Figure I. 29 Modification de la forme des cours intérieures des closes **(a)** en forme de rectangle en U, **(b)** en forme de T, **(c)** Variation typologique sur le thème du close Raymon Unwin à Welwyn, Grande Bretagne en 1910 (**Panerai** *et al.,* 1997).



Figure I. 30 A gauche : Cité-jardin Le Logis, Watermael-Boitsfort (Bruxelles). **A droite** : La cité-jardin de Stains région Île-de-France (source : **wikipédia**).

I.5.2.2 Les lotissements parc

C'est un concept apparu pendant la seconde moitié du XXème siècle, développé par les Anglais et les Américains. Ces espaces ne disposent d'aucune clôture sur les voies, ce qui favorise la

création d'un paysage plus libre. Les lotissements parc sont structurés en maisons isolées de faible hauteur (souvent en R+1). Dans ce type de quartier, les espaces végétalisés occupent une grande partie du périmètre. L'implantation du bâti se fait en grand partie en fonction de l'alignement à la rue voire en léger retrait (**Figure I. 31 à gauche**). Les parcelles sont très variées et se découpent en petits fragments accueillant des pavillons individuels (**Figure I. 31 à droite**) ou en grandes parcelles pour des bâtiments résidentiels destinés aux implantations semi-collectives. Selon **Mangin** (2004), ce type d'aménagement éloigné des centres-villes, affiche une mono-fonctionnalité assimilée à des cités dortoirs.





Figure I. 31 A gauche : Forme éparpillée des lotissements parc en France. **A droite :** les maisons sont ouvertes sur la voie publique.

I.5.2.3 L'influence des formes pavillonnaires sur le confort extérieur

Par leur situation à la périphérie de la ville, les formes pavillonnaires représentent des éléments de rugosité qui affectent peu les paramètres climatiques. Selon (**Ait-Ameur**, 2002), le climat local observé dans ces espaces est intermédiaire des conditions du climat urbain et du climat rural. Ces aménagements urbains constituent pour la ville une zone tampon de protection contre l'effet des brises de campagne. Leur implantation et leur disposition sont particulièrement favorables pour réduire les effets aérodynamiques dus aux vents dominants et aux piégeages radiatifs. Notons aussi que la densité élevée des espaces végétalisés qui les composent joue un rôle de brise vent contre les fortes rafales de vent et de rafraichissement de l'air par évapotranspiration.

I.5.3 Les formes verticales et répétitives

C'est un nouveau concept qui a fait son entrée dans les villes après la seconde guerre mondiale pour répondre à la crise du logement. Construites entre les années 1951 jusqu'au milieu des années 70, ces formes représentent la concrétisation parfaite des principes de l'architecture moderne. Elles se sont développées dans plusieurs pays et notamment dans les banlieues françaises. On distingue deux types de forme verticale :

I.5.3.1 L'unité d'habitation ou l'îlot bâtiment

Selon **Panerai** *et al.,* (1997), l'îlot bâtiment est une invention de l'architecte **Le Corbusier** qui le théorise dans plusieurs de ses livres et l'expérimente dans la cité radieuse à Marseille et à Nantes à travers l'unité d'habitation (**Figure I. 32 à gauche** (en haut)). Opposé aux cités jardins étalées des banlieues, Le Corbusier voulait une cité jardin verticale en utilisant les nouvelles techniques modernes de construction. Ainsi, la conception et l'organisation des espaces de l'unité d'habitation sont basées sur une unité de mesure appelée le "*modulor*". Ce dernier, se présente sous la forme d'une silhouette humaine avec des dimensions variées suivant la fonction exercée par l'individu. Le bâtiment construit en béton est assis sur une structure en forme de pilotis pour couper la relation à la rue. Il est composé de 15 étages avec des fonctions de commerce et un hôtel aux 7éme et 8éme étages (**Figure I. 32 à droite**). Le toit du bâtiment a été aussi rendu accessible et fonctionnel par l'aménagement de plusieurs équipements (école, gymnase, piscine par exemple) (**Figure I. 32 à gauche** (en bas)). Cependant, avec le temps, ces équipements ont cessé de fonctionner ou fonctionnent mal. Les commerces de la rue intérieure, inaccessibles de l'extérieur parviennent difficilement à maintenir leur activité et les occupants se sont trouvés isolés dans leur unité sans aucun échange avec l'extérieur (**Jenger**, 2004).

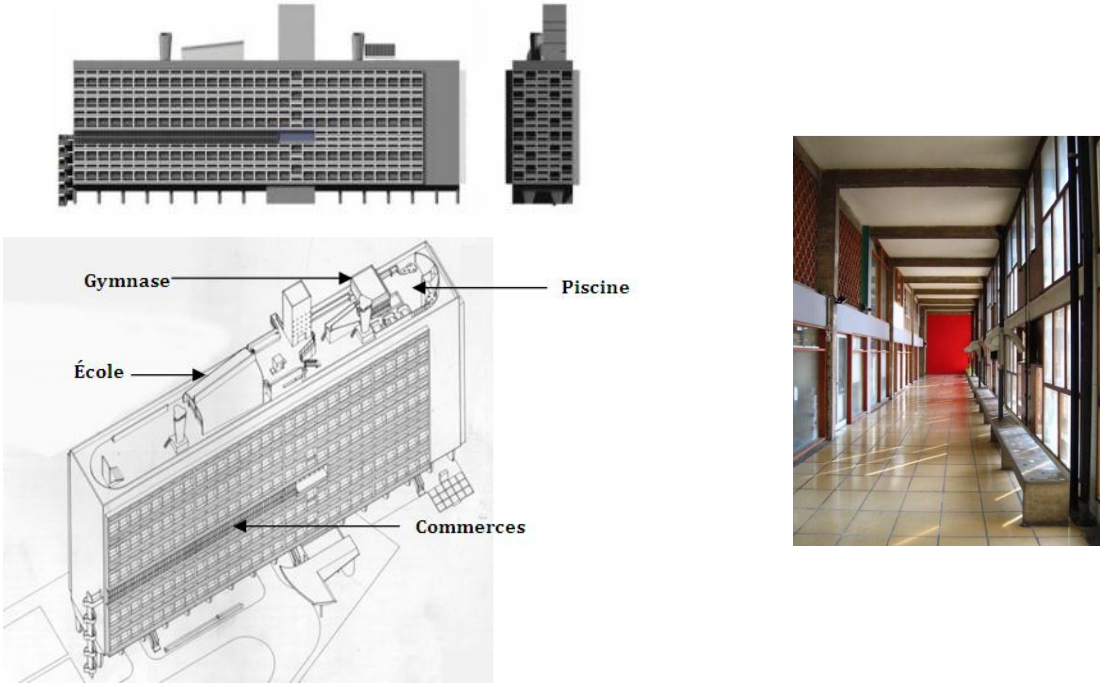


Figure I. 32 A gauche : vue sur l'unité d'habitation de Rezé à Nantes (**en haut**) et la distribution des fonctions au sein de l'unité (**Jenger**, 2004). **A droite:** vue sur la rue intérieure desservant les commerces de l'unité d'habitation.

I.5.3.2 Les grands ensembles

La forme verticale caractérise aussi l'architecture des grands ensembles[8]. Ces derniers présentent une morphologie moins compacte que celles des îlots traditionnels ou haussmanniens et s'étalent verticalement en forme de tours et aussi horizontalement en forme de barres de grandes hauteurs (**Figure I. 33 à droite**).

Dans les grands ensembles, les bâtiments sont implantés en fonction de l'orientation solaire et ne sont pas pensés dans un tissu. Par ailleurs, la relation à la rue a été exclue et la continuité avec la ville a été supprimée. En effet, la rue a été déplacée à l'intérieur des édifices jouant ainsi un rôle technique de desserte pour les logements et d'échange et de communication entre les riverains. Ces rues appelées "les rues-corridors" par Le Corbusier se retrouvent selon deux types (H et I) suivant la disposition des appartements (**Figure I. 33 à gauche**). Le type H, présentant un couloir desservant des appartements d'un seul côté, est employé lorsque l'axe des bâtiments est orienté Est-Ouest, pour éviter une exposition des façades au Nord. Le type I représente la configuration de deux rangées parallèles d'appartements desservis par un couloir central, «une rue intérieure». Les façades des bâtiments sont pourvues de pans de verre afin d'optimiser le captage et l'accès équitable à la lumière et au soleil.

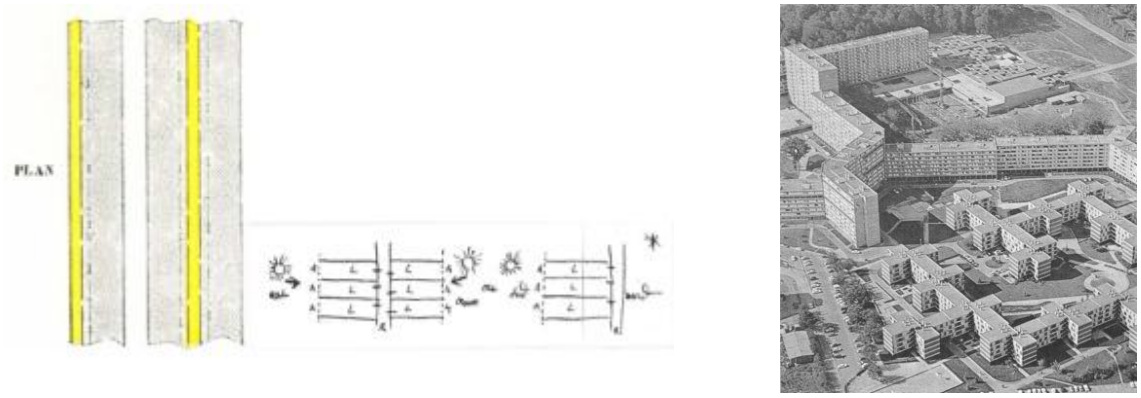


Figure I. 33 A gauche : Aménagement des rues intérieures en forme de I ou de H suivant l'orientation des bâtiments (**Corbusier**, 1945). **A droite :** dans les citée des grands ensembles, la relation à la rue est supprimée et la continuité avec la ville est exclue.

[8] "*Le terme de « grand ensemble » apparaît avant-guerre, en 1935, sous la plume de l'architecte Marcel Rotival. Il prend ensuite une connotation administrative et technico-économique, lorsqu'en 1951 Eugène Claudius-Petit, ministre de la Reconstruction et de l'Urbanisme, fait autoriser un programme de 10 000 logements en « constructions normalisées », dont le cadre de réalisation sera le « grand ensemble du secteur industrialisé »*" (**Luxembourg**, 2008).

I.5.3.3 L'influence des formes verticales sur le confort extérieur

Dans ces tissus urbains, les surfaces de captage du rayonnement solaire sont nombreuses. En effet, les immeubles de grande hauteur constituent des géométries isolées et multiplient les surfaces exposées aux fluctuations climatiques. Les propriétés des matériaux de surface entrainent des bilans thermiques variables selon la nature des matériaux, leur inertie et leur réflexion (**Blanc** *et al.,* 2003). Cependant, la ventilation procurée entre les bâtiments compense continuellement la hausse des températures d'air et de surface et assure le rafraichissement des espaces (**Kun-Zhang**, 2001). En revanche, dès que la vitesse du vent augmente, des effets aérodynamiques indésirables nés des fortes vitesses produites par les formes bâties créent de plus en plus de gêne. En effet, les formes urbaines isolées et dispersées des grands ensembles créent des perturbations, entrainent des accélérations d'air ainsi que de nombreux mouvements tourbillonnaires notamment au pied et à l'angle des immeubles. Ces écoulement sont critiques pour le confort au niveau du piéton et peuvent rendre les espaces impraticables.

I.5.4 Les formes traversantes

Selon **De Portzamparc** (1996), l'îlot traversant constitue une réponse au désordre social et urbain engendré par l'urbanisme classique des formes compactes et modernes des grands ensembles. Il reproche aux îlots haussmannien et traditionnel (qui représentent l'âge I) (**Figure I. 34 à gauche**) leur rues fermées par les immeubles mitoyens qui les longent. Par ailleurs, il juge que les grands ensembles issus du mouvement moderne et qui constituent l'âge II, ont conduit à une dissémination des bâtiments et une utilisation plus large de l'espace, ou encore à l'absence de rues et à l'existence de bâtiments isolés et solitaires. La forme traversante représentant l'âge III, se différencie de l'îlot traditionnel ou haussmannien par sa forme qui permet sa traversée et de l'îlot vertical par le respect de la rue.

Cette forme rassemble des bâtiments autonomes reliés les uns aux autres par des passages publics et des places ouvertes. La hauteur des immeubles est limitée sans être homogène. Dans cette configuration, la mitoyenneté complète et continue est rejetée afin de créer des espaces dotés d'expositions solaire et lumineuse optimales et de créer des vues traversantes. Cette configuration d'îlot est de plus en plus utilisée dans les nouvelles opérations d'aménagement d'éco-quartiers notamment en France (**Figure I. 34 à droite**).



Figure I. 34 A gauche : Croquis de Christian de Portzamparc présentant les trois âges de la forme urbaine: âge I : la continuité, âge II: la discontinuité, âge III : la conciliation des deux âges (**Portzamparc**, 1996). **A droite :** deux éco-quartiers en France présentant des formes traversantes.

I.5.4.1 L'influence des formes traversantes sur le confort extérieur

D'un point de vue climatique, les îlots traversants par leur rejet de la mitoyenneté, offre davantage de façades. La multiplication du nombre de façades engendre probablement une augmentation du piégeage radiatif et donc l'énergie thermique absorbée. Ce piégeage dépend en grande partie de la nature des matériaux de revêtement. Cependant, la porosité de l'îlot peut accroître la ventilation et le renouvellement d'air au sein des espaces intérieurs. Cette ventilation est toujours associée à un rafraichissement thermique dû aux pertes de chaleur par convection. Cependant, selon **Gandemer** (1976) dans les tissus traversants les perturbations sont plus importantes. Il est important de noter qu'aucune caractérisation du confort sur ce type de configuration n'a été recensée dans la littérature.

I.6 Conclusion

Cette analyse bibliographique a permis de souligner le rôle important que joue la morphologie urbaine sur la basse atmosphère, le microclimat et les éléments du confort extérieur. Elle a aussi permis de dresser un panel de certains indicateurs physico-morphologiques en relation avec des paramètres physiques de confort. Ainsi, on a pu distinguer des **indicateurs thermo-radiatifs** (le facteur de vue du ciel, le rapport H/W, la densité surfacique et l'albédo des surfaces) en relation avec le rayonnement solaire et la température des surfaces, puis des **indicateurs aérauliques** (la densité ou la porosité d'un tissu urbain et la nature de l'agencement des tissus urbains) en relation avec la vitesse du vent. Nous allons choisir et analyser morphologiquement

certains de ces indicateurs sur des configurations d'éco quartiers sélectionnés. L'objectif étant de croiser les données de cette analyse avec les résultats physiques du confort.

Par ailleurs, l'analyse typologique des tissus urbains caractérisant les villes européennes a permis de décrypter l'évolution des formes en établissant le lien entre le contexte historique, la forme urbaine et l'architecture. Morphologiquement, quatre principales formes distinctes ont été identifiées dans les tissus urbains actuels avec leurs sous-configurations. Du point de vue du confort extérieur, à l'exception de la forme traversante qui n'a pas fait l'objet d'études approfondies, les trois premières formes produisent des situations de confort thermique et aéraulique particulières et différentes selon l'aménagement de chaque forme. Ces résultats confirment le lien étroit existant entre la morphologie urbaine et le confort extérieur.

Ainsi, rappelons que l'objectif de cette thèse est de vérifier si la morphologie des éco-quartiers a été conçue par rapport à son impact sur les paramètres de confort ou si elle constitue uniquement une image de forme urbaine moderne. Avant d'engager cette étape d'analyse et de validation, il est important de prendre connaissance de ce concept et de cette notion polymorphe ainsi que des formes urbaines qui caractérisent ces nouveaux espaces d'aménagement. Dans la continuité de cette analyse bibliographique, le chapitre II détaille la notion et l'objectif des éco-quartiers, puis présente une analyse morphologique de plusieurs cas d'étude. Cette analyse permet de sélectionner les opérations les plus représentatives morphologiquement, qui feront ensuite l'objet d'une étude de confort.

« Il faut se méfier des nouveaux dogmes. Le développement durable est évidement incontournable aujourd'hui mais ces exigences peuvent être dangereuses pour l'urbanisme et appauvrir la qualité architecturale. A suivre les diktats de la qualité environnementale, il faudrait que tous les logements soient orientés au Sud, avec de larges baies vitrées et disposent de façades aveugles au Nord, pour des logements "thermos" super isolés. Si l'on avait toujours appliqué cette règle absolue, on n'aurait jamais construit la place des Vosges ! [9]»

Chapitre II

Eco-quartiers : définitions, objectifs et analyse typo-morphologique de plusieurs configurations représentatives

Sommaire

II.1 Introduction_____ 62
II.2 Qu'est-ce qu'un éco-quartier et quels sont ces critères ?_____ 62
II.3 Analyse urbaine d'éco-quartiers exemplaires en Europe_____ 67
II.4 Choix et présentation des cas d'études_____ 101
II.5 Conclusion_____ 110

[9] **Roland Castro, architecte,** Le Monde, 3 avril 2008.

II.1 Introduction

La notion d'éco-quartiers représente un concept intéressant qui cherche à dépasser la vision moderniste et fonctionnelle de la ville. Le terme "éco-quartier" s'est progressivement imposé dans le cadre des réflexions sur "l'urbanisme durable", avec pour objectif de modifier l'aménagement et l'habitat des villes en raison de l'urgence écologique. Depuis quelques années, ces expériences se sont multipliées de manière progressive dans les pays européens et notamment en France. Ce développement est à l'origine de nombreux débats autour de la définition et des critères d'un éco-quartier. Sur la base de la littérature existante, nous allons en présenter différentes définitions scientifiques et institutionnelles et discuter les critères censés caractériser un éco-quartier.

Ensuite, une analyse urbaine sera effectuée à partir de plusieurs opérations exemplaires d'éco-quartiers en Europe, afin de distinguer une ou plusieurs configurations représentatives. Cette analyse sera divisée en deux parties. Dans la première partie, ces opérations seront triées suivant les formes génériques caractérisant les villes européennes, mentionnées dans le chapitre I. A partir de ce tri sélectif, la seconde partie consistera en une analyse typo-morphologique plus approfondie destinée à mettre en évidence les relations entre les différents éléments composant l'espace urbain (contexte urbain, voiries, rapport espaces public/espaces privé et morphologie des îlots) définis par **Panerai** *et al.,* (1999) et **Merlin**, (1998).

Enfin, nous présentons à la fin de ce chapitre les quartiers qui, par la suite, feront l'objet d'une tentative de caractérisation par des indicateurs morphologique et des paramètres physiques de confort.

II.2 Qu'est-ce qu'un éco-quartier et quels sont ces critères ?

Au jour d'aujourd'hui, il n'existe pas une définition claire est établie des éco-quartiers et de leurs critères. Plusieurs acteurs du monde académique (théoriciens de la forme urbaine, spécialistes de la ville durable) ainsi que les acteurs de l'aménagement urbain (architectes, urbanistes et institutions) se sont essayés à trouver une définition et fixer des critères à ces nouveaux espaces urbains.

II.2.1 Définition d'un éco-quartier

II.2.1.1 Définition scientifique

Selon **Boutaud** (2009), un éco-quartier est une forme d'expérimentation urbanistique initiée dès la fin du XX^{ème} siècle essentiellement dans les pays du nord et du centre de l'Europe. La

vocation de ces ensembles était de concrétiser, par des nouvelles formes, certains principes environnementaux puis sociaux et économiques regroupés dans les années 1990-2000 dans la notion de développement durable. Par ailleurs, **Emelianoff** (2010), spécialiste du thème de la ville durable, pense que l'éco-quartier ne doit pas se contenter juste de l'aspect morphologique et architectural lié à la forme et aux questions d'habitacles, mais doit parallèlement servir de levier pour un changement de mode de vie basé sur une vision commune du respect de l'environnement et de la solidarité sociale.

D'un point de vue chronologique, **Boutaud** (2009) distingue trois générations d'éco-quartiers, à savoir :

- **les proto-quartiers** apparus dans les années 60 à l'initiative de militants écologistes, ils diffèrent des projets actuels par leurs petites tailles, souvent à caractère résidentiel et par leur dissémination loin des villes. Ces opérations ont été observées principalement dans les pays germaniques.

- **les quartiers prototypes** : ce sont des opérations portées par des initiatives publiques, réalisées à la fin des années 80 et au début des années 90. Ils sont peu nombreux et circonscrits aux pays du nord de l'Europe et aux pays germaniques (Fribourg, Malmö, Helsinki, Stockholm par exemple) ;

- **les quartiers types** : ce sont des opérations développées depuis la fin des années 1990 jusqu'à aujourd'hui. Ces quartiers ne dérogent pas au cadre réglementaire de l'urbanisme classique et moderne. Ils sont très nombreux, principalement localisés dans les pays du nord de l'Europe, mais ils apparaissent aussi désormais dans les pays du sud.

II.2.1.2 Définition institutionnelle

Le **MEEDDAT**[10] a hésité entre plusieurs termes, en commençant par utiliser le terme proto-quartier pour désigner l'expérience de ce que pourrait être nos modes de vie futurs. Aujourd'hui, il utilise le terme éco-quartier. Selon le ministère, un éco-quartier est une opération d'aménagement durable exemplaire. Son rôle est de contribuer à améliorer la qualité de vie en proposant des logements pour tous, tout en préservant les ressources et les paysages naturels. Pour ce faire, un éco-quartier doit respecter les principes du développement durable, à savoir :

- promouvoir une gestion responsable des ressources ;
- s'intégrer dans la ville existante et le territoire avoisinant ;
- participer au dynamisme économique ;

[10] Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire

- proposer des logements pour tous et de tous types, participant au « vivre ensemble » et à la mixité sociale ;
- offrir les outils de concertation nécessaires pour une vision partagée dès la conception du quartier avec les acteurs de l'aménagement et les habitants.

En octobre 2008, Jean Louis Borloo présentait un plan d'action en faveur de la ville durable. Trois initiatives ont été décidées à propos des éco-quartiers, des éco-cités et des transports collectifs. A l'échelle du quartier, le ministère a lancé les concours éco-quartiers afin de regrouper les projets de qualité au sein d'un "club opérationnel", de les valoriser et de permettre la diffusion des bonnes pratiques pour éviter d'avoir des opérations isolées comme en Allemagne (quartier Fribourg) ou en Angleterre (quartier Bedzed). La liste des éco-quartiers exemplaires réunis au sein du club opérationnel a été choisie en juin 2009, sur la base de critères de sélection : un projet d'éco-quartier proposé par la collectivité devra justifier d'une qualité significative sur les trois piliers du développement durable : pilier environnemental, pilier économique et pilier social. Sept critères sont données à titre indicatif : eau, déchets, biodiversité, mobilité, économie énergétique et énergie renouvelable, densité et formes urbaines, éco-construction. En 2011, cette liste est étendue à différentes échelles spatiales (milieu rural, ville moyenne et petite ville)

II.2.2 Critères d'un éco-quartier

En dépit de leur appellation commune, les critères et les formes des éco-quartiers varient considérablement d'un pays à l'autre. Cependant, certains critères restent communs et s'affichent dans la majorité des opérations d'aménagement d'éco-quartiers.

II.2.2.1 Densité et compacité des formes urbaines

L'une des principales caractéristiques des éco-quartiers est la forte densité et la grande compacité de l'aménagement des quartiers. Le quartier Vauban à Fribourg ou le quartier de Vesterbro à Copenhague (**Figure II. 1 (a) et (b)**) présentent des exemples de bonnes compacité et densité urbaines (**Bovet**, 2009). L'objectif est de surmonter les problèmes posés par l'étalement urbain (**Figure II. 1 (c))** où la densité du bâti est d'autant plus faible que l'on s'éloigne du cœur des villes. La faible densité est due au caractère pavillonnaire du bâti où les surface occupée par un foyer (maison + jardin privatif) est plus importante que celle d'un appartement en immeuble. Les urbanistes et les maîtres d'ouvrage devraient dans les futures opérations d'aménagement d'éco-quartiers réorienter la croissance urbaine et le zonage en proposant des nouveaux plans de concentration des fonctions (habitat, loisir, commerce et emploi). Concrètement, cela signifie que la division classique des villes en zones univoques (les centres d'affaires sont localisés dans les centres-villes alors que les quartiers résidentiels, les zones industrielles et commerciales sont éparpillés à la périphérie de la ville) est une source

d'étalement urbain qui devrait laisser la place à une mixité spatiale et fonctionnelle où les différentes fonctions de service sont diffusées dans tous les quartiers (**Lynch**, 1981).



(a) **(b)** **(c)**

Figure II. 1 (a) et **(b)** Exemples de densité et de compacité des quartiers : **(a)** vue sur le quartier de Vesterbro à Copenhague (www. energy-cities.eu), **(b)** vue sur le quartier de Vauban à Fribourg (www.vauban.de), **(c)** exemple d'un étalement urbain : quartier de Levittown à NewYork, 1985 (www.spacingtoronto.ca).

II.2.2.2 Connectivité physique et lumineuse

La connectivité physique en un point correspond à la mesure du nombre de connexions avec ce point. A l'échelle des éco-quartiers, elle correspond aux nombres de connexions qui existent entre le quartier et les transports en commun (**Boutté**, 2007). Cette connectivité constitue un point très important dans la spécification d'un éco-quartier. Cela passe par l'implantation d'éco-quartiers près des réseaux de transport public ou par la création de supports de transport alternatifs (bus, trains, tramways, métro, vélo, marche par exemple), en créant des centres multi-nodaux articulés par le transport public (**Newman** *et* **Kenworthy**., 1999). En revanche, la connectivité lumineuse est obtenue par une porosité de la forme urbaine dense. En effet, plusieurs urbanistes (**De Portzamparc** (2006); **Boutté**, (2007)) ont proposé de nouvelles formes denses basées sur le principe de la porosité **Figure II. 2**. Selon eux, la porosité constitue le contrepoids de la forte densité, c'est une analogie de la connectivité, non pas la connectivité physique mais relationnelle avec le soleil, la lumière et avec les paysages proches et lointains.

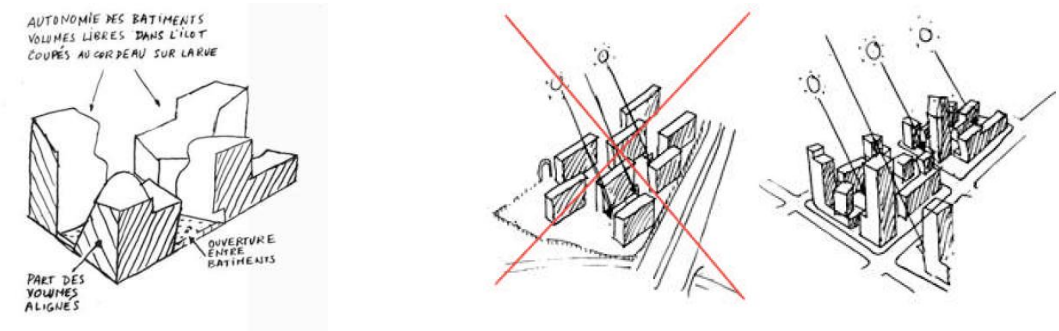


Figure II. 2 Croquis de Portzamparc expliquant les principes de la porosité des formes urbaines (**De Portzamparc**, 2006).

II.2.2.3 L'utilisation des ressources naturelles et la réduction de la consommation d'énergie

L'utilisation des ressources naturelles et la réduction de la consommation d'énergie est probablement l'aspect le plus important caractérisant un éco-quartier. **Girardet** (1999) propose le concept de «métabolisme» pour expliquer comment utiliser les ressources naturelles d'une ville ou d'un quartier. En effet, le principal problème des grandes villes est lié à leur métabolisme linéaire, contrairement au métabolisme circulaire d'une forêt (les sorties sont recyclées et deviennent de nouvelles entrées). La solution consiste à économiser les ressources et à recycler autant que possible (récupération des eaux par exemple). Les déchets solides, avant d'être enfouis dans des décharges, doivent être recyclés, réutilisés, compostés ou brûlés pour produire de l'énergie. C'est la politique suivie par un nombre croissant de quartier en Europe, notamment dans le quartier de Kronsberg à Hanovre où de nombreuses innovations ont été combinées (**Tillman**, 1994), ou encore dans le quartier du plateau du Haye à Nancy où le réseau de chaleur du quartier est alimenté par une chaudière à déchets de bois.

La consommation d'énergie suit le même principe de réduction, grâce à l'utilisation de nouvelles technologies de production d'énergie propre couplée à une meilleure utilisation des apports solaires. La transformation de l'énergie solaire via les panneaux photovoltaïque ou l'énergie du vent par des éoliennes urbaines sont des exemples de ces nouvelles technologies propres. Le quartier Bedzed (Londres) dont le projet est de créer des « maisons zéro-émission», constitue un très bon exemple (**Figure II.3 à gauche**). En effet, les aménageurs ont construit des maisons innovantes en utilisant l'axe héliothermique[11] comme élément fédérateur de l'organisation des bâtis avec des panneaux photovoltaïques aménagés sur les toitures comme le montre la **Figure II.3 à gauche**.

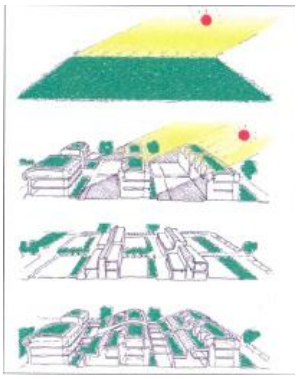




Figure II. 3 A gauche : Axe héliothermique comme élément fédérateur de l'organisation du quartier de Bedzed. **A droite** : utilisation des panneaux photovoltaïques pour la production d'énergie sur les toits des bâtiments du quartier Bedzed (source : **internet**)

[11] Selon **Harzallah et Siret**, (2006), l'axe héliothermique est défini par la direction permettant de répartir les valeurs d'énergie solaire incidente de manière égales entre les deux façades opposées d'un bâtiment.

II.2.2.4 La mixité sociale

Le bien-être social des habitants est évidemment plus difficile à mesurer, mais ce concept inclut des idées différentes aux sentiments de communautarisme ethnique ou religieux observés dans les cités et les grands ensembles. Bien que le lien entre l'urbanisme et le bien-être social ne soit pas clair (le bien-être d'une communauté crée-t-il un espace réussi ou inversement ?), des évidences montrent qu'un environnement urbain sain est source de bien-être pour les résidents (**Putnam**, 1995).

II.2.3 Conclusion

On peut donc dire que la terminologie *éco-quartier* apparaît finalement avant tout comme une porte d'entrée sur un urbanisme nouveau pour le grand public. Hier, un éco-quartier était plutôt une association *écologie* et *quartier*. C'est-à-dire clairement un quartier écologiquement performant. Depuis quelques années, l'éco-quartier a néanmoins tendance à ne former qu'une seule unité comportant non seulement des considérations environnementales mais élargie aux aspects sociaux (mixité sociale) et économiques (pôles de commerce de proximité). Ainsi, on peut conclure qu'un éco-quartier est un espace bâti nouveau ou reconverti, ayant pour vocation d'appliquer, de préserver et de développer sur le long terme, l'ensemble des principes de développement durable.

II.3 Analyse urbaine d'éco-quartiers exemplaires en Europe

Les formes des éco-quartiers varient considérablement d'un pays à l'autre suivant des critères essentiellement culturels et climatiques. Compte tenu de cette hétérogénéité des formes urbaines, il est difficile de définir des configurations de référence représentatives de l'ensemble des éco-quartiers pour pouvoir caractériser le confort de leurs espaces extérieurs. La stratégie utilisée a donc consisté à sélectionner plusieurs éco-quartiers en Europe et à les trier suivant les formes urbaines génériques relevées dans la littérature. Une analyse typo-morphologique basée sur des critères bien définis peut alors être proposée sur certaines configurations du corpus d'étude. Les différentes étapes de cette stratégie sont développées dans ce qui suit.

II.3.1 Corpus d'études

Le choix du corpus d'étude concerne des projets récents souvent cités comme des références de quartiers durables, des quartiers récompensés par le palmarès national des éco-quartiers

organisé en 2009 et des quartiers financés par le programme européen Concerto[12]. Nous avons sélectionné une base de données de 14 éco-quartiers. Le **Tableau. II.1** les présente avec leur état de réalisation.

Pays	Eco-quartiers	Localisation	Etat de réalisation
France	Ilot 2 Bottière Chénaie	Nantes	Réalisé en 2010
	Projet Paris Rive Gauche	Paris	Réalisé en 2010
	Quartier Seguin - Rives de Seine	Paris	En cours de réalisation
	Quartier de la caserne de Bonne	Grenoble	En cours de réalisation
	Ilot A Tripode	Nantes	En cours de réalisation
	Lyon Confluence (phase 2)	Lyon	En cours de conception
	Projet Danube	Strasbourg	En cours de conception
	Théâtre de Narbonne	Montpellier	En cours de conception
Suède	Quartier B 01	Malmö	Réalisé en 2004
	Quartier de Hammarby	Stockholm	Réalisé en 2006
Angleterre	Projet Bedzed	Londres	Réalisé en 2002
Hollande	Quartier GWL	Amsterdam	Réalisé en 1998
Espagne	Quartier Valdespartera	Saragosse	En cours de réalisation
Autriche	Cité Solaire	Pichling-Linz	Réalisé en 2004

Tableau. II. 1 Présentation des éco-quartiers du corpus d'étude.

Avant d'aborder l'analyse urbaine, il faut souligner la difficulté de traiter ce type d'opération d'aménagement. En effet, l'état de construction des différents éco-quartiers montre que 57% d'entre eux sont en cours de construction ou de conception. Ces opérations peuvent donc connaîtrent des modifications et des évolutions durant les différentes phases de construction et il est très difficile de collecter toutes les informations nécessaires pour conduire des simulations (maquette 3D, dimensions et albédo des surfaces par exemple).

II.3.2 Classification des éco-quartiers par rapport aux formes urbaines génériques

La première étape d'analyse consiste à classer les configurations urbaines des éco-quartiers suivant les registres de tissus urbains génériques identifiés dans la section **I.5** du **chapitre I**. Celles-ci, illustrées sur la **Figure II. 4**, peuvent être compactes, verticales, pavillonnaires ou traversantes.

[12] Concerto est un programme de la Commission Européenne initié en 2003. Il soutient le développement de la maîtrise de l'énergie et des énergies renouvelables dans les collectivités à travers l'Europe (www.concertoplus.eu).

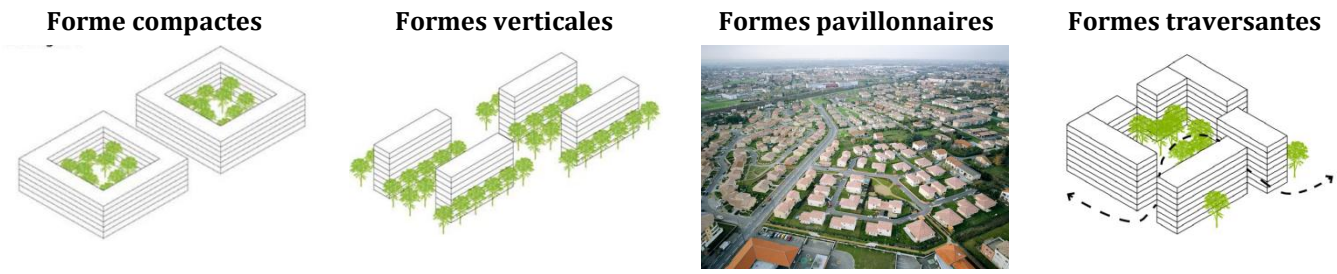


Figure II. 4 Les différentes formes génériques de quartiers pour les villes européennes.

Les résultats de cette classification sont présentés dans les **Tableau. II. 2**, **Tableau. II. 3 et Tableau. II. 4** ci-dessous. La majorité des éco-quartiers présente des formes urbaines traversantes (9 éco-quartiers sur 14). Cependant, malgré leur échec social, les formes verticales et répétitives ont été réutilisées à grand échelle notamment dans le nouveau quartier Valdespartera en Espagne. Celles-ci représentent 3 cas du corpus d'études. Concernant les formes compactes, seulement deux opérations situées en Suède sont considérées dans ce corpus d'étude

Formes traversantes

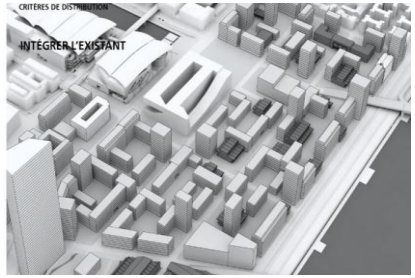
Dénomination de l'opération	Dénomination de l'opération	Dénomination de l'opération	Dénomination de l'opération
Ilot A, quartier Tripode, Nantes, France	Quartier Masséna, rive gauche. Paris	Projet de la caserne de Bonne, Grenoble, France	Ilot 2, ZAC de Bottière Chénaie, Nantes, France
			
Dénomination de l'opération	**Dénomination de l'opération**	**Dénomination de l'opération**	**Dénomination de l'opération**
La phase 2, Projet Lyon Confluence, France	Quartier Seguin-Rives de Seine, Paris, France	Quartier Danube, Strasbourg, France	Quartier Bedzed, Londres, Angleterre
			

Tableau. II. 2 les éco-quartiers présentant des formes traversantes.

Formes traversantes

Dénomination de l'opération

Cité solaire Pichling-Linz, Autriche



Dénomination de l'opération

Quartier Valdespartera, Saragosse, Espagne



Formes verticales

Dénomination de l'opération

Quartier du théâtre de Narbonne, Montpellier, France



Dénomination de l'opération

Quartier GWL. Amsterdam, Holland



Tableau. II. 3 les éco-quartiers présentant des formes verticales.

Formes Compactes

Dénomination de l'opération

Quartier Hammarby. Stockholm, Suède



Dénomination de l'opération

Quartier Bo01. Malmö, Suède



Tableau. II. 4 les éco-quartiers présentant des formes compactes.

II.3.3 Analyse Typo-morphologique des éco-quartiers

L'étape suivante consiste à choisir dans chaque catégorie de forme urbaine quelques exemples d'éco-quartiers pour une analyse typo-morphologique plus détaillée. En effet, saisir les caractéristiques des formes urbaines caractérisant les éco-quartiers n'est pas chose aisée. Leur analyse passe par l'approche typo-morphologique qui consiste à mettre en exergue les agencements spatiaux propres à chaque quartier.

II.3.3.1 Définition de l'analyse typo-morphologique

La typo-morphologie est la combinaison de la morphologie urbaine et de la typologie architecturale. Selon **Panerai** *et al.,* (1999), elle consiste à analyser les formes urbaines et à comprendre leur composition en pointant leurs relations, leurs limites et leur contenus. **Panerai** *et al.,* (1999) décomposent une étude typo-morphologique en cinq points : l'analyse du réseau viaire, du réseau parcellaire, du contexte urbain du quartier, du rapport entre les espaces construits et non construits et enfin du bâti, lui-même qualifié par trois paramètres : la dimension, la forme et le style des bâtiments.

II.3.3.2 Les critères retenus pour l'analyse typo-morphologique

Dans cette étude, quatre critères ont été retenus pour l'analyse : le contexte urbain, le tracé des voiries, le profil d'îlot ou le bâti, l'espace libre et ses rapports avec l'espace bâti.

a) **Le contexte urbain :** Le contexte urbain rappelle le contexte historique et géographique de la forme urbaine et permet de la situer dans la ville et notamment par rapport au centre-ville.

b) **Voies et tracés** : La voirie est le système de liaison de l'espace, constitué par l'ensemble des circulations. Le tracé sert de support structurel du tissu urbain.

c) **Profil de l'îlot** : Un îlot urbain est un ensemble de bâtiments constituant une unité dans une ville. C'est un élément déterminant de tissu urbain. Il est aussi défini comme un ensemble de parcelles délimité par des voies. De taille variable, un îlot peut être la base de la constitution du quartier ou bien le résultat du tracé des voies (**Panerai** *et al.,* 1999).

d) **Rapport entre espace public et privé** (**Merlin**, 1998).

Le choix des éco-quartiers pour l'analyse typo-morphologique a été fortement influencé par la quantité et la qualité des informations collectées dans la littérature et dans les médias. Les éco-quartiers sélectionnés sont les suivants :

Pour les formes traversantes :

- le quartier Tripode à Nantes
- le quartier Masséna à Paris
- le quartier Lyon Confluence
- le quartier de la caserne de Bonne à Grenoble
- le quartier Bottière Chénaie à Nantes

Pour les formes verticales:

- le quartier du théâtre de Narbonne à Montpellier
- le quartier Valdespartera à Saragosse en Espagne

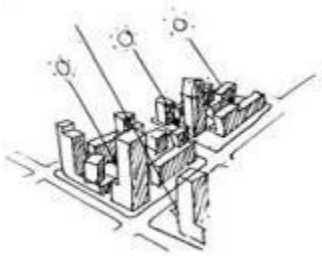
Pour les formes compactes :

- le quartier B01 à Malmö en Suède

Dans ce qui suit, seule l'analyse typo-morphologique des quartiers Tripode, caserne de Bonne, Bottière Chénaie, Valdespartera et B01 à Malmö est présentée. L'analyse des autres quartiers est présentée dans l'Annexe. II. Le présentation de cette analyse a été inspirée par celle effectuée par le CERTU (Centre d'Etude sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques) dans le cadre d'une étude sur les formes urbaines représentatives du XX^{ème} siècle (**CERTU**, 2007).







Ilot A, Quartier Tripode, Nantes, France

Dénomination de l'opération

Ilot A, quartier Tripode Nantes

Quartier référence

Architecte et urbaniste :

Christian de Portzamparc



Chef de projet : **SAMOA**

Fonction : **Bureaux (20,000 m²), résidences hôtelières (9,000 m²), 141 logements (11,000 m²), commerces (9,000 m²) et un parking souterrain de 650 places.**






Figure II. 5 Plusieurs vue sur le quartier Tripode, **En haut** : plan de masse. **En bas à gauche**: perspective générale, **En bas à droite**: vue depuis l'intérieur de l'îlot.

	Analyse
Contexte urbain	• Le quartier est aménagé sur une ancienne friche administrative (ancienne tour de 18 étages qui a accueilli les services du ministère des affaires étrangères). Il se situe à 1,5 Km du centre-ville, sur les abords de l'île de Nantes (**Figure II. 6 à droite**).
Voies et tracé	• Le tracé des voies est régulier et les principales voies sont orientées Nord-Est-Sud-Ouest. Une nouvelle allée secondaire a été créée entre le boulevard du général de Gaulle et la rue André Tardieu, desservant le quartier et évitant ainsi la circulation mécanique le long du canal à travers le Boulevard Doumergue (**Figure II. 6 à droite**). • Plusieurs voiries secondaires encadrent le projet tripode avec la rue René Viviani et la rue André Tardieu comme principale voie d'irrigation du quartier. En revanche, les voiries tertiaires ont été supprimées en faveur d'un système de rues piétonnes en cœur d'îlot. Les voies bordant le canal seront eux aussi réservées aux circulations douces permettant l'accueil d'activités commerciales et de loisir. Au Nord-Est du quartier, près des plans d'eau, l'itinéraire se poursuit avec un jardin de plantes (**Figure II. 6 à gauche**). • Notons enfin que, la structure urbaine du quartier Tripode respecte l'alignement au Boulevard du G. de Gaulle, en organisant les bureaux côté boulevard pour faire face aux bruits de la circulation et des vents d'ouest. Les logements sont situés sur le côté Est au bord du canal (**SAMOA**. 2007).



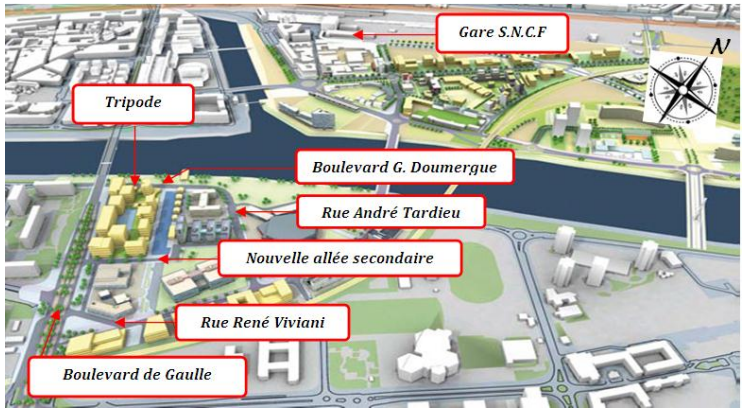
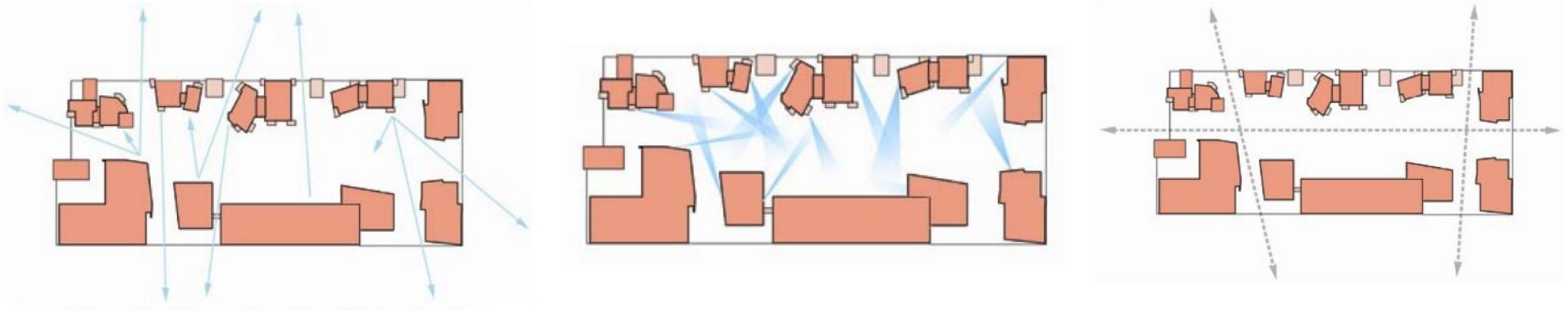


Figure II. 6
A gauche: Situation du quartier par rapport au centre-ville et son organisation par rapport aux principales voies de dessertes.
A Droite: Vue sur la partie Sud du quartier montrant des jardins d'eau et des itinéraires piétons.

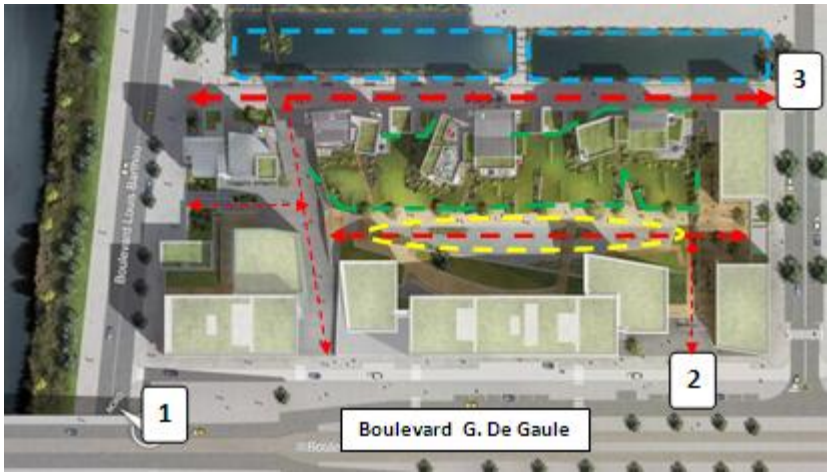
Profil de l'îlot	• Les bâtiments du quartier Tripode sont autonomes, reliés les uns aux autres par des passages publics et des places ouvertes (**Figure II. 5 en haut**) et leur hauteur est variée (**Figure II. 6 à gauche**). Les façades des bâtiments respectent l'alignement des différents axes qui entourent le quartier mais sans continuité. • Selon **De Portzamparc** (2004), la disposition des bâtiments se présente sous la forme d'un ***« îlot ouvert »*** ou *d'un* ***«Archipel»*** de manière à assurer : - des alternances de vues proches et de vues lointaines depuis les immeubles (**Figure II. 7 (a)**) ; - une lisibilité claire des ''volumes'' en creux de la rue ou du canal, par l'alignement d'une proportion significative des façades (**Figure II. 7 (b, c)**) ; - un maximum de luminosité dans les rues et le cœur d'îlot par les intervalles de jardins et de jeux de volume.



(a) **(b)** **(c)**

Figure II. 7 (a) Alternance de vue proche et vue lointaine, **(b)** Vues depuis les rues piétonnes et les bâtiments vers les jardins intérieurs, **(c)** Lisibilité claire des volumes (**Héloise** *et al.*, 2009).

espace public / espace privé	• Le projet Tripode est traversé par des percées piétonnes dans sa longueur, perméable depuis le boulevard du Général De Gaulle et le boulevard Louis Barthou (**Figure II. 8**). Selon **De Portzamparc** (2004), la perméabilité permet d'une part de conserver l'alignement et d'autre part de garantir l'accès aux piétions. • Le cœur d'îlot est aménagé en places avec des aires de jeux, bancs, esplanades de circulation et jardin aquatique ouvert au public. Cet aménagement en espace végétal/plan d'eau a pour objectif d'atténuer l'ambiance minérale du quartier. Par ailleurs, les jardins privatifs aux abords des bâtiments sont séparés de l'espace par des haies végétales basses sur une hauteur de 1 à 3 m.





1 Vue à partir du boulevard de Gaulle.



2 Vue sur une rue traversante.



3 Vue sur les jardins aquatiques.

Figure II. 8 Perméabilité des îlots sur les deux boulevards (De Gaulle et Louis Barthou) et distinction des différents espaces de circulation.






Quartier de la caserne de Bonne. Grenoble, France

Dénomination de l'opération

ZAC de la Caserne de Bonne, Grenoble, France

Grand prix national des éco-quartiers 2009

Architecte et urbaniste :

Christian Devillers et Aktis Architecture



Chef de projet : **SEM SAGES, Grenoble**

Fonction : **850 logements (85 000m²), résidences hôtelières (2 550 m²), bureaux (6 400 m²), commerces (16 600 m²) et un parking souterrain de 480 places.**



	Analyse
Contexte urbain	• Le quartier de la caserne de Bonne est aménagé sur une ancienne caserne militaire (La ville de Grenoble ayant racheté à l'armée les terrains de l'ancienne caserne, elle a décidé de créer un éco-quartier). Il se situe à seulement 1,5 km du centre de la ville de Grenoble (**Figure II. 9 à droite**).
Voies et tracé	• Le tracé des voies est orthogonal et légèrement sinueux. Les voies principales sont orientées Nord–Est et Sud-Ouest. Une voie nouvelle Est-Ouest a été créée entre le boulevard Gambetta et la rue Marceau, divisant le projet en deux parties (une partie services et une partie résidentielle) et permettant la liaison avec les quartiers périphériques. • Le projet de la caserne de Bonne est encadré par des voies mécaniques de différentes échelles : des boulevards (Gambetta et Maréchal Foch) d'un côté et des voies secondaires (rue Marceau et la rue Berthe de Boissieux) de l'autre. Ces voies mécaniques constituent les principales voies de circulation du quartier (**Figure II. 9 à gauche**). Par ailleurs, des nouvelles voies tertiaires de desserte interne ont été aménagées pour séparer les îlots résidentiels et faciliter leur l'accessibilité. • Le réseau des voies est bien hiérarchisé, les flux automobiles et piétons sont séparés et les parkings de stationnement sont aménagés dans les sous-sols des bâtiments.

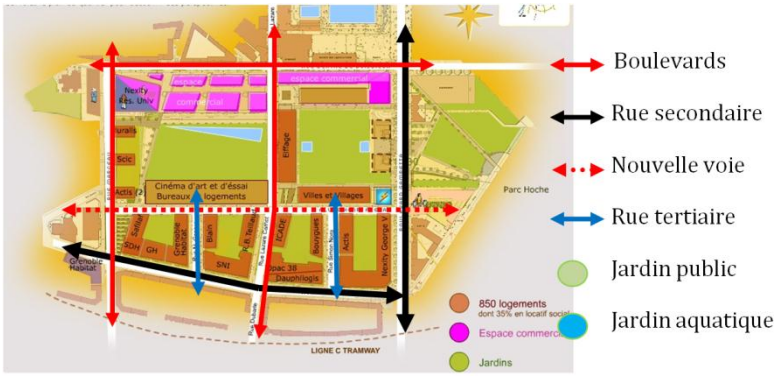




Figure II. 9

A gauche : Accessibilité du quartier et les différentes voies de desserte qui le caractérisent.

A droite : plan de situation du quartier de la caserne de Bonne par rapport au centre-ville de Grenoble.

Profil de l'îlot	• L'aménagement des structures bâties vise à organiser dans l'espace une relation entre la fonction résidentielle et les fonctions de services en rapport avec le centre-ville et le voisinage immédiat (**Devillers**, 2006). De ce fait, trois axes Est-Ouest ont été dégagés (**Figure II. 10 à droite**) : - au sud, " l'axe calme des logements " : les îlots des logements sont ouverts sur la vue des montagnes et sur le parc ; - au centre, " l'axe calme des jardins " : c'est un espace de transition entre les deux pôles (logement et commerce), son rôle est de filtrer les flux piétons et constitue un écran phonique contre les nuisances commerciales ; - au nord, le " pôle commerces, activités, loisirs ". • Les formes urbaines caractérisant le quartier de la caserne sont hétérogènes et varient suivant leurs fonctions (**Figure II. 10 à gauche**). En effet**,** un îlot barre est aménagé pour la fonction "services" (commerce, école, piscine) et des îlots semi-ouverts pour la fonction "résidentiel". Cette dernière reprend la continuité de la trame urbaine et se caractérise par sa forme en U qui s'ouvre sur l'environnement immédiat par des petites percés sur les côtés Est-Ouest. Selon **Devillers** (2006), cette disposition en ***« îlot semi-ouvert »*** ou ***« îlots en forme de U »*** (**Figure II. 11 (a) et (b)**), vise à assurer: - une continuité des volumes avec des petites percées et le respect de l'alignement des voies ; - une luminosité dans le cœur des îlots résidentiels et dans le vaste espace du parc ; - le passage des formes fermées qui caractérisent le centre-ville de Grenoble vers des formes plus ouvertes.



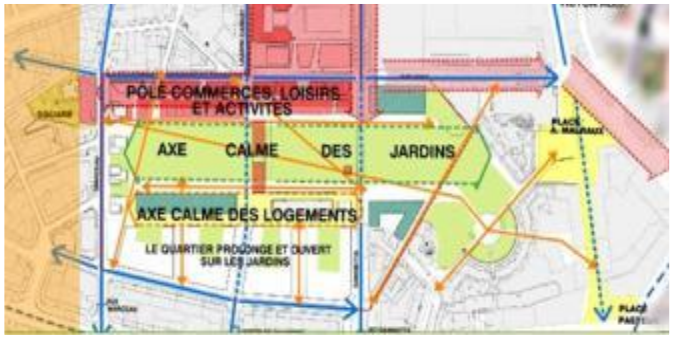
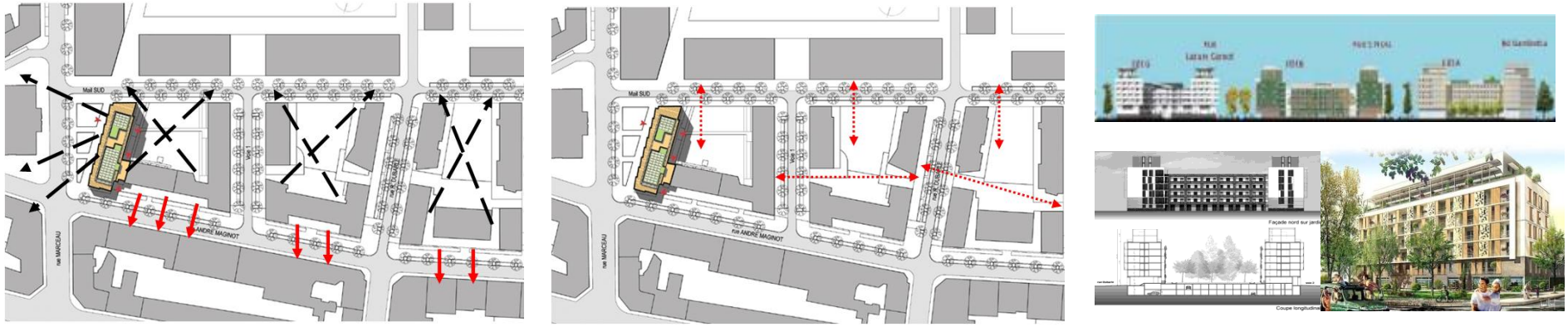


Figure II. 10

A gauche : Variation des formes urbaines suivant la fonction (**Source:** www.debonne-grenoble.fr).

A droite : Hiérarchisation des espaces suivant les axes de fonction et le bruit généré (principe de filtration).

espace public / espace privé	• L'espace résidentiel du quartier est constitué de trois jardins semi-publics de tailles réduites pour chaque îlot. Ceux-ci constituent un espace d'articulation et permettent la rencontre au sein du quartier (**Figure II. 11 (c)**). La limite entre les espaces privés et publics est assurée par des aménagements verts constitués d'arbres.et des haies en lierre synthétique • Pour faire face au problème de vis-à-vis, les baies vitrées des logements ont été munies de deux dispositifs complémentaires : une protection solaire extérieure type "écran" et des dispositifs d'occultations de type store opaque à l'intérieur des logements (**Figure II. 11 (c)**). En parallèle, l'aménagement de plantations jardinières aux cœurs des îlots apporte un effet supplémentaire à ces dispositifs.



(a) **(b)** **(c)**

Figure II. 11 (a) Vues depuis les rues et les logements vers les jardins intérieurs et les plantations, **(b)** Ouverture des îlots en forme de U, semi-ouverte. **(c)** Coupe longitudinale montrant le cœur d'îlot préfigurant l'ambiance du parc et les dispositifs d'occultations de type store opaque (**Source:** www.amplitude-architectes.com).






Ilot 2, Quartier de Bottière Chénaie. Nantes. France

Dénomination de l'opération

Ilot 2, ZAC de Bottière Chénaie, Nantes, France

Palmarès dans la catégorie Densité et Formes Urbaines en 2009

Architecte et urbaniste :

Urbaniste: Jean-Pierre PRANLAS DESCOURS

Architecte: L'agence lilloise Boskop



Chef de projet : **SEM Nantes Aménagement**

Fonction : **Programme : 55 logements collectifs sociaux et parking sous immeuble, Surface : 4 807m².**



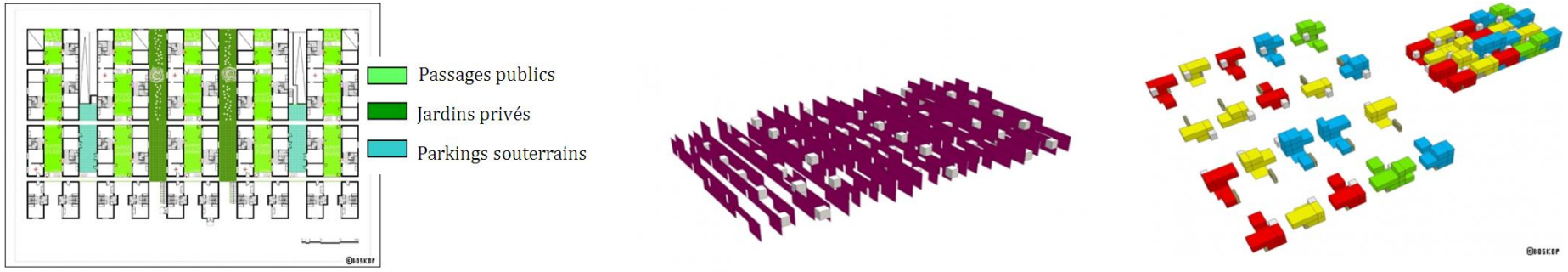
Figure II. 12 Vue depuis la rue de la Sécherie sur le quartier Bottière Chénaie.

	Analyse
Contexte urbain	• Le nouveau quartier de la Bottière est aménagé à l'emplacement d'une friche maraîchère au sein d'un tissu urbain existant dans le cadre d'une ZAC (Zone d'Aménagement Concerté). Le quartier se situe à la limite Est de la ville de Nantes à 5 km de centre-ville, dans le quartier de Doulon (**Figure II. 13 à droite**).
Voies et tracé	• Le tracé des voies de circulation est courbé, plutôt sinueux et les voies secondaire sont orientées Nord-Est et Sud-Ouest (**Figure II. 13 à gauche**). La trame viaire du quartier est composée au Nord par la rue de la Sécherie et au Nord-Ouest par une nouvelle voie reliant les quartiers anciens au Nord-Est et les quartiers Sud-Ouest (**Figure II. 13 droite)**. • Les concepteurs ont aménagé plusieurs traversées piétonnières pour créer un lien indépendant de la circulation automobile entre les différents îlots du quartier (**Figure II. 14 (a)**).



Figure II. 13. A gauche: Principales voies encadrant l'îlot 2 du quartier Bottière Chénaie. **A droite :** Plan de situation du quartier Bottière Chénaie par rapport au centre-ville de Nantes. Source: Nantes aménagement.

Profil de l'îlot	• La morphologie du quartier se développe horizontalement sous la forme d'un rectangle compact et dense, composé de 19 bandes étroites avec une longueur de 55 m et une largeur de 4,60 m. Cette morphologie se traduit sous la forme d'une succession de canyons alternés de végétation émergeant des jardins et des terrasses sur parking (**Figure II. 14 (a)**). • Le quartier s'ordonne sous la forme d'un ***«îlot intermédiaire»*** (**Delhay**, 2009) avec une organisation spatiale flexible entre les différents volumes urbains constituant le quartier (**Figure II. 14 (b)** et **(c)**). Les formes construites correspondent à deux niveaux, surélevés de façon irrégulière par des volumes de taille modérée (**Figure II. 12**). Le terrain en pente sur lequel le quartier est aménagé a modulé la forme urbaine en dents de scie avec plus de hauteur vers la rue de la Sécherie **(Figure II. 12)** et une graduation en terrasse vers le parc urbain (**Figure II. 15 (c)**). • Le caractère très linéaire et répétitif des bandes construites a été limité par une différenciation de couleurs de revêtement dans chaque ruelle **(Figure II. 15 (d))**, ainsi que, par des petits volumes sortants de salles de bains et des balcons en porte à faux sur les façades (**Figure II. 15 (a), (d))**. Ces ponctuations multiplient les ambiances visuelles (**Delhay**, 2009).
espace public / espace privé	• Le quartier est aménagé en ruelles piétonnes traversant l'ensemble du quartier et relient la rue de la Sécherie et le parc urbain. Depuis ces ruelles, des passages sous les logements permettent d'accéder à des jardins privés au cœur de chaque logement (**Figure II. 15 (a)**). Les logements sont soit accessibles individuellement du rez-de-chaussée par le biais de jardins-patio, soit depuis des cours suspendues reliée à l'espace public par le biais d'escaliers. (**Figure II. 15 (b)**).



(a) **(b)** **(c)**

Figure II. 14 (a) Passerelles transversales reliant toutes les bandes. **(b)** Organisation spatiale flexible entre les différents volumes urbains. **(c)** Alternance des bandes bâties et des bandes consacrées aux jardins privés ou aux passages publics.



(a) **(b)** **(c)** **(d)**

Figure II. 15 (a) Ruelles piétonnes au-dessus des parkings reliant la rue de la Sécherie et le parc urbain, **(b)** Cours ouverte sur la rue de la sécherie, reliée à l'espace public par le biais d'escaliers **(c)** L'alternance des bandes bâties et des bandes jardins privés. **(d)** Différenciation de couleurs de revêtement dans chaque ruelle.






Quartier de Valderspartera. Saragosse, Espagne

Dénomination de l'opération

Quartier de Valdespartera, Saragosse, Espagne

Programme CONCERTO RENAISSANCE

Architecte et urbaniste :

Ville de Saragosse

Chef de projet :

(Urban Best Practices Area-UBPA)

Fonction : Programme : **616 logements pour chaque lot (6 lots),** ***SHON:*** **52,360 m² pour chaque lot,** ***Surface du terrain*****: 243 hectares.**



	Analyse
Contexte urbain	• Le nouveau quartier de Valdespartera est situé à la périphérie sud de la ville de Saragosse. Il est implanté sur des anciennes terres agricoles situé à 5,5 km du centre-ville (**Figure II. 16 à droite**). Les aménageurs ont bâti une nouvelle ville écologique et multifonctionnelle qui comprend un large éventail d'équipements résidentiels, sportifs et culturels (www.valdespartera.es) (**Figure II. 16 à gauche**). • Le quartier Valdespartera offre un urbanisme moderne qui ressemble à celui des années 40 avec les grands ensembles et qui se caractérise par une distinction des fonctions via le principe de zonage et la fabrication en série d'éléments répétitifs et identiques. (**Figure II. 16 à gauche**).
Voies et tracé	• Le tracé des voies de circulation est orthogonal et légèrement sinueux avec une hiérarchisation importante des voies à 3 niveaux: deux colonnes vertébrales constituées par deux grandes avenues raccordées perpendiculairement à des rues de second ordre. Parallèlement, de nombreuses voies tertiaires et voies piétonnes ont été aménagées pour jouer un rôle de dessertes et de liaison entre les îlots (**Figure II. 18 à gauche**).



Deux grandes Avenues
Voies Secondaires
Voies tertiaires

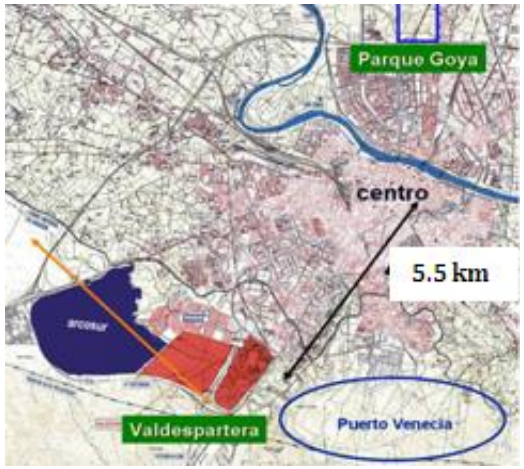


Figure II. 16

A gauche : plan d'accessibilité du quartier source: www.valdespartera.es.

A droite : plan de situation du quartier Valdespartera par rapport au centre-ville.

Profil de l'îlot	• Les formes urbaines sont caractérisées par leur uniformité et leur monotonie sous forme de barres en I ou L et avec des hauteurs homogènes (R+5) **(Figure II. 17 à gauche)**. Le quartier est divisé en six lots, chaque lot est composé de plusieurs îlots identiques qui présentent tous la même forme urbaine avec des grandes barres orientées par rapport au soleil et des bâtiments écrans qui font offices de protection contre le vent **(Figure II. 17à gauche)**. Cette disposition a engendré un traitement différencié des façades des bâtiments. En effet, les façades face au soleil sont tous en panne vitrée afin de favoriser le captage solaire. En revanche, les façades sur l'arrière ou à l'ombre sont opaques et fermées **(Figure II. 17à droite).** • Cette disposition en ***« îlot vertical »*** vise à assurer : - la création de logements plus compacts, plus indépendants et favoriser la mixité sociale ; - l'accès équitable au soleil et à la lumière pour tous les habitants. • Notons que l'alignement à la rue ne constitue pas l'élément fédérateur de la composition urbaine du quartier. En effet, les bâtiments sont implantés dos à dos à distance égale et perpendiculaires à la rue. Les rangées de bâtiments sont desservies par des allées piétonnes et de corridors verts perpendiculaires aux voies de circulation. (**www.valdespartera.es**).



Espace privé (résidences) Espace public (équipements)

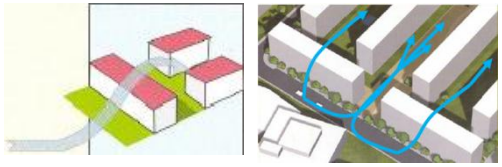




Figure II. 17

A gauche: Vue aérienne sur les îlots du quartier Valdespartera,

A droite: deux images présentant la différence entre les façades arrières et les façades d'accès,

Source: **www.valdespartera.es**.

espace public / espace privé	• Les jardins privatifs disparaissent complètement au profit du collectif et seuls les balcons et les appartements sont alors des espaces privatifs (**Figure II. 18 à droite**). • Des grandes esplanades avec des airs de jeux et des lacs artificiels sont situées à la périphérie Sud-Ouest des quartiers résidentiels. Ces espaces publics permettent d'accueillir des fonctions de loisirs et des activités diverses (**Figure II. 18 à gauche**).



Zone de loisirs (espace vert, air de jeux) zones résidentielles, les équipements.



Figure II. 18

A gauche: Plan de masse montrant le zonage du quartier Valdespartera et son orientation.

A droite: Image montrant le cœur d'un îlot destiné aux circulations douces et aux aires de jeux, Source: **www.valdespartera.es**.







Quartier Bo01. Malmö, Suède

Dénomination de l'opération

Quartier de Bo01, Malmö, Suède

Quartier référence

Architecte et urbaniste :

Eva Dalman



Chef de projet :

Ville de Malmö

Fonction : Programme :

Le quartier compte 3,000 logements, des appartements et des maisons individuelles.



	Analyse	Commentaire
Contexte urbain	• Le quartier est aménagé sur une ancienne friche portuaire "le Västra Hamnen" (c.à.d. port de l'Ouest) qui s'ouvre sur la mer. Il est situé à 2 km du centre-ville, pas loin de la gare centrale et du grand parc Malmöhus (**Figure II. 19 à droite**) • Les aménageurs ont bâti sur cette ancienne friche un nouveau quartier durable, baptisé "La ville de demain", où une multitude de fonctions ont été fusionnées : logements, commerces et des bureaux de travail.	
Voies et tracé	• Le nouveau quartier de Malmö présente un tracé régulier du côté du parc central et irrégulier dans le cœur du quartier. En effet, dans le cœur du projet, les rues ne sont pas droites et s'adaptent au relief du site et à la forme des îlots où elles se croisent avec les voies piétonnes. Cette organisation discontinue des rues en forme de labyrinthe a favorisé la circulation piétonne au détriment de la circulation mécanique à l'intérieur du quartier **(Charlot-Valdieu *et* Outreequin, 2009)** (**Figure II. 19 à droite**).	



Rue principale

Rue secondaire

Port de plaisance

Esplanade

Lacs artificiels

Jardin public

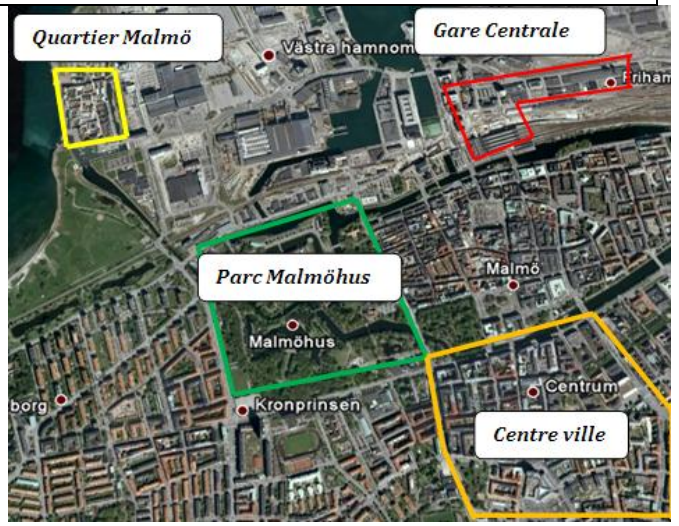


Figure II. 19

A gauche : Accessibilité au quartier de Malmö.

A droite : plan de situation du quartier par rapport à la ville de Malmö.

Profil des îlots	• L'organisation des bâtiments du quartier a été fortement influencée par les vents dominants arrivant de la mer. De grands immeubles font face à la mer (**Figure II. 21 (a) et (b)**) de façon à limiter les effets de canalisation dans les rues et de recirculation au sein des cœurs d'îlots. Ces derniers sont aménagé en formes compactes fermées et variables (rectangle, hexagone, polygone) qui s'adaptent au relief du site (**Figure II. 21**). Selon **Bovet**, (2009), cette disposition en ***«îlot fermé»*** vise à: - assurer une protection contre les vents de la mer; - offrir des jardins et des espaces privatifs protégés. Ces espaces sont utilisés collectivement et la liaison avec la rue se fait par l'intermédiaire de porches ; - optimiser la luminosité à l'intérieur des îlots et offrir des vues depuis les logements sur les jardins intérieurs et sur la rue.

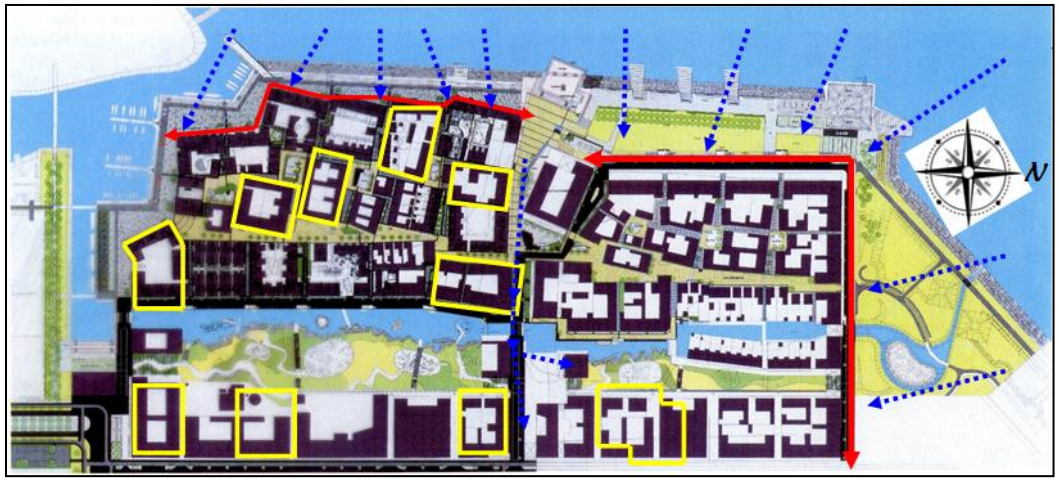


Figure II. 20 Plan de masse du quartier de Malmö (**Charlot-Valdieu** *et* **Outreequin,** 2009).

espace public / espace privé	• Les espaces publics du quartier de Malmö sont constitués des voiries et du parc central (**Figure II. 21 (c)** et **(d)**). Ce dernier apparaît comme un espace de respiration plutôt qu'un vide urbain, l'eau et la végétation participent à cette impression. Cependant, le quartier perd de sa qualité en matière d'espaces publics vers la partie Ouest, où les parcelles sont les plus minérales. Un autre espace public piétonnier est aménagé sur le côté Ouest du quartier. Il s'agit d'une esplanade surélevée offrant des vue sur la mer. Un port de plaisance pour les habitants du quartier est aménagé dans la partie Sud-Ouest (**Figure II. 19 à gauche**). • Les espaces privés sont limités aux terrasses surplombant les toitures et aux jardins privés séparés de l'espace public par des haies végétales de hauteurs variées.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure II. 21 (a) (b) Vues sur les bâtiments écrans qui encadrent le quartier Malmö. **(c)** Vue sur les voiries. **(d)** Vue sur le parc central du quartier (**Charlot-Valdieu** *et* **Outreequin**, 2009).

II.3.4 Synthèse de l'analyse typo-morphologique

II.3.4.1 Contexte urbain

Les opérations d'aménagements analysées sont situées soit au centre des villes soit à leur périphérie (**Figure II. 22**):

Les opérations situées dans le centre des villes sont généralement localisées sur d'anciennes friches industrielles (Masséna, Lyon Confluence), administratives (Tripode), militaires (Caserne de Bonne) où portuaires (Bo 01, Malmö). Elles se situent à proximité des centres-villes urbains. Dans la majorité des cas, l'aménagement est gouverné par le respect de l'alignement de la trame viaire déjà existante, par l'environnement immédiat, par les contraintes liées aux règles d'urbanisme et pour le quartier (Bo 01, Malmö) par les paramètres climatiques.

Les opérations situées à la périphérie de la ville sont construites sur des vastes terrains libres (Valdespartera), des friches industrielles (Théâtre de Narbonne) ou des friches maraîchères (Bottière Chénaie). Ces nouveaux quartiers se déconnectent de la ville par des frontières naturelles (forêts, fleuves) ou artificielles (boulevard périphérique par exemple). Dans ces opérations, moins de contraintes d'organisation et d'aménagement sont imposées. En effet, l'agencement des quartiers est influencé soit par des paramètres climatiques (orientation par rapport au soleil, protection par rapport au vent dominant (Valdespartera et le quartier B01 de Malmö)), soit par le paysage naturel (parcs naturels, lacs ou fleuves (Théâtre de Narbonne)).

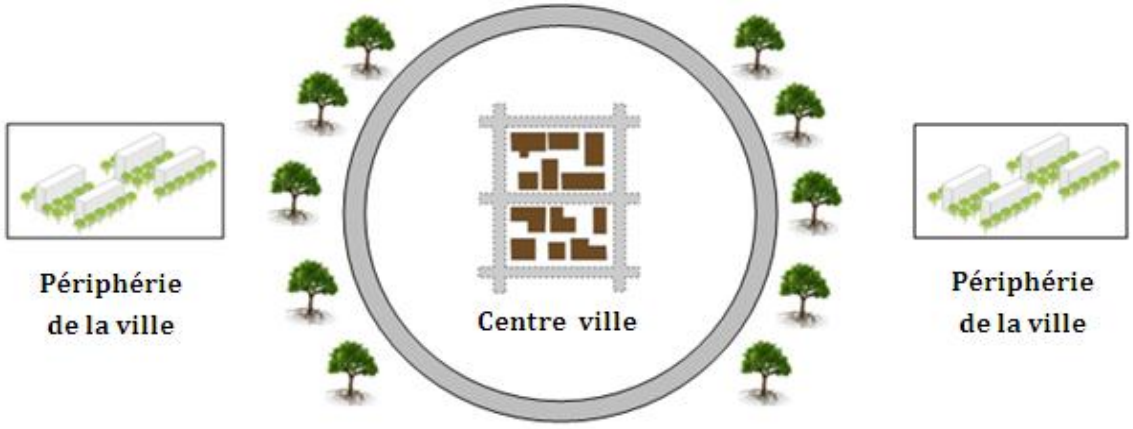


Figure II. 22 Schéma présentant les contraintes d'aménagement des quartiers en fonction de leur emplacement par rapport au centre-ville.

II.3.4.2 Voies et tracées

Dans la majorité des opérations d'aménagements analysées, le quadrillage des voies est qualifié de régulier (Tripode, Masséna, Théâtre de Narbonne, Lyon Confluence et Valdespartera) ou légèrement sinueux (Caserne de Bonne, Bottière-Chénaie).

Le tracé régulier ou orthogonal des voiries est généralement observé dans les quartiers aménagés dans les centres-villes. Il se présente fréquemment sous la forme d'un damier de carrés ou de rectangles réguliers. Le plan orthogonal est simple à dessiner et présente des avantages pour l'organisation de la circulation ou pour la visibilité par exemple.

Le tracé sinueux des voies est approprié, lorsqu'il s'agit de s'adapter aux éléments naturels ou pour compléter la composition d'une opération d'aménagement.

Par ailleurs, toutes les opérations montrent une hiérarchisation des voies afin de favoriser l'accessibilité de l'espace. Cette hiérarchisation est lisible par ses dimensions (Boulevard, Avenue, rue, allée) et par son aménagement (traitement paysager, recours à des matériaux différents). Dans toutes les opérations d'aménagements dans les centres ville, le stationnement extérieur a été remplacé par des parkings souterrains. L'espace extérieur a été laissé à la circulation mécanique de desserte. La circulation douce est de plus de plus favorisée dans toutes ces opérations d'aménagement, notamment dans les cœurs d'îlots.

II.3.4.3 Profil morphologique des îlots

L'analyse typologique des éco-quartiers fait apparaître plusieurs formes. Tout d'abord, les **formes traversantes** qui se déclinent en trois configurations :

L'îlot ouvert : défini par un aménagement pour lequel les bâtiments s'organisent autour d'une place publique, ouvrant ainsi la rue sur les intérieurs d'îlots munis de jardins verts et de terrains de jeu. La hauteur des immeubles est limitée sans être identique d'un bâtiment à l'autre (**Figure II. 23**).



Figure II. 23 Deux exemples de configurations d'îlot ouvert : **à gauche** îlot 05 du projet Danube à Strasbourg, **à droite** Ilot A du projet Tripode à Nantes.

L'îlot semi ouvert : il se présente généralement sous une forme en U, sa morphologie est dense et peu accidentée (**Figure II. 24 (a) et (b)**) et les volumes urbains sont découpés mais néanmoins compacts. En effet, les façades d'immeubles sont plus grandes que celles de l'îlot ouvert et les percées sont moins nombreuses (**Figure II. 24 (c)**).



(a) **(b)** **(c)**

Figure II. 24 Trois exemples de configurations d'îlot semi-ouvert : **(a)** l'îlot 2 de projet Seguin à Paris, **(b)** le projet de la caserne de Bonne à Grenoble **(c)** les îlots 7, 11 et 12 du projet Lyon Confluence.

L'îlot intermédiaire horizontal : ce dernier se développe à l'horizontale, généralement sous la forme d'un carré ou d'un rectangle compact. La compacité et la profondeur de ce tissu urbain correspondent à une succession de canyons avec des hauteurs plus au moins homogènes (max : R+3) (**Figure II. 25**).



(a) **(b)** **(c)**

Figure II. 25 Trois exemples de configurations d'îlot intermédiaires : **(a)** le projet Bedzed à Londres, **(b)** l'îlot 2 du projet Bottière Chénaie **(c)** la coté Solaire de Pichling-Linz en Autriche.

L'analyse a montré aussi l'existence de **formes verticales** où les bâtiments se présentent sous la forme de I ou de L, rangés de manière répétitive et symétrique. Par ailleurs, des **formes compactes et fermées** ont été observées. Ces derniers, se présentent généralement sous la forme d'un carré ou d'un rectangle. Le cœur d'îlot dans cette morphologie n'est pas visible depuis la rue, mais il cache des jardins intérieurs et des espaces de loisirs collectifs. La liaison avec la rue se fait par l'intermédiaire de porches.

Enfin, le croisement des résultats de l'analyse typologique des profils d'îlots et du contexte urbain a montré aussi que les formes traversantes de type îlot ouvert et semi-ouvert sont les plus utilisées lorsque l'opération d'aménagement est une reconquête d'une friche urbaine.

Cependant, lorsque l'opération est menée sur un terrain libre, les formes intermédiaires et verticales sont les plus utilisées.

II.3.4.4 Rapports : espace public/espace privé

Pour les quartiers présentant des formes ouvertes, semi-ouvertes et compactes, les bâtiments s'organisent autour d'un espace central aménagé en place verte, mini parc, ou en jardin paysagé. Ces places constituent le point d'articulation de l'îlot d'un côté et un vide qui contraste avec le plein qui l'entoure de l'autre. Cependant, pour les quartiers présentant des formes intermédiaires et verticales, les bâtiments sont implantés dos à dos à distances égales et perpendiculaires à la rue, libérant des espaces publics ouverts qui présentent des formes similaires aux formes des bâtiments.

II.3.5 Etude des indicateurs morphologiques

Les formes compactes et verticales ont fait l'objet de plusieurs études morphologiques et de caractérisation des ambiances (**Ratti** (2001) ; **Ratti** *et al.,* (2003) ; **Shashua-Bar** *et al.,* (2006) ; **Gandemer** (1976 et 1981) ; **Panâo** *et al.,* (2008) ; **Bensalma** (2012) ; **Harzallah** (2007)). En revanche, les formes traversantes sont nouvelles et n'ont pas encore été étudiées en détail. Des recherches académiques en amont sont nécessaires pour analyser ce type de formes urbaines. Dans cette recherche, la forme traversante va être étudiée et analysée.
Notre analyse typo-morphologique a distingué trois sous-configurations de formes traversantes. Néanmoins, cette distinction typologique reste relative et basée sur des critères visuels. Afin de la quantifier et de la qualifier, des indicateurs morphologiques correspondant à des descripteurs physiques ont été analysés. Nous avons appliqué ces indicateurs à six éco-quartiers caractérisant chacun une des sous-configurations sélectionnées précédemment, à savoir :

- les quartiers Bedzed et Bottière Chénaie **pour les îlots intermédiaires** ;
- les quartiers Lyon Confluence et Caserne de Bonne **pour les îlots semi-ouverts** ;
- les quartiers Tripode et Masséna **pour les îlots ouverts**.

II.3.5.1 Présentation des indicateurs morphologiques et analyse des résultats

II.3.5.1.1 La densité surfacique *Ds*

La densité surfacique ***Ds*** (-), ou densité bâtie, est le rapport entre l'emprise au sol des constructions et la surface du terrain du projet. Elle est bornée entre 0 et 1 et définie par la relation :

$$Ds = \frac{Surface\ cumulée\ de\ l'emprise\ au\ sol\ des\ bâtiments\ (m^2)}{Surface\ du\ territoire\ urbain\ (m^2)} \quad \textbf{(II.1)}$$

La **Figure II. 26** montre que les îlots intermédiaires remplissent bien l'espace urbain avec leur organisation étalée horizontalement. Les valeurs de la densité sont comprises entre 0,49 et 0,53. Pour les îlots semi-ouverts et ouverts, la densité d'occupation de l'espace est moins élevée. Ces configurations se développent verticalement, avec une emprise au sol moins importante et davantage de surface pour les espaces publics et les jardins. Les îlots semi-ouverts restent cependant plus denses que les îlots ouverts avec des valeurs comprises entre 0,42 et 0,45. Cette différence résulte de la forme plus allongée et moins découpée des bâtiments que celle des îlots ouverts ($0{,}37 < D_s < 0{,}38$).

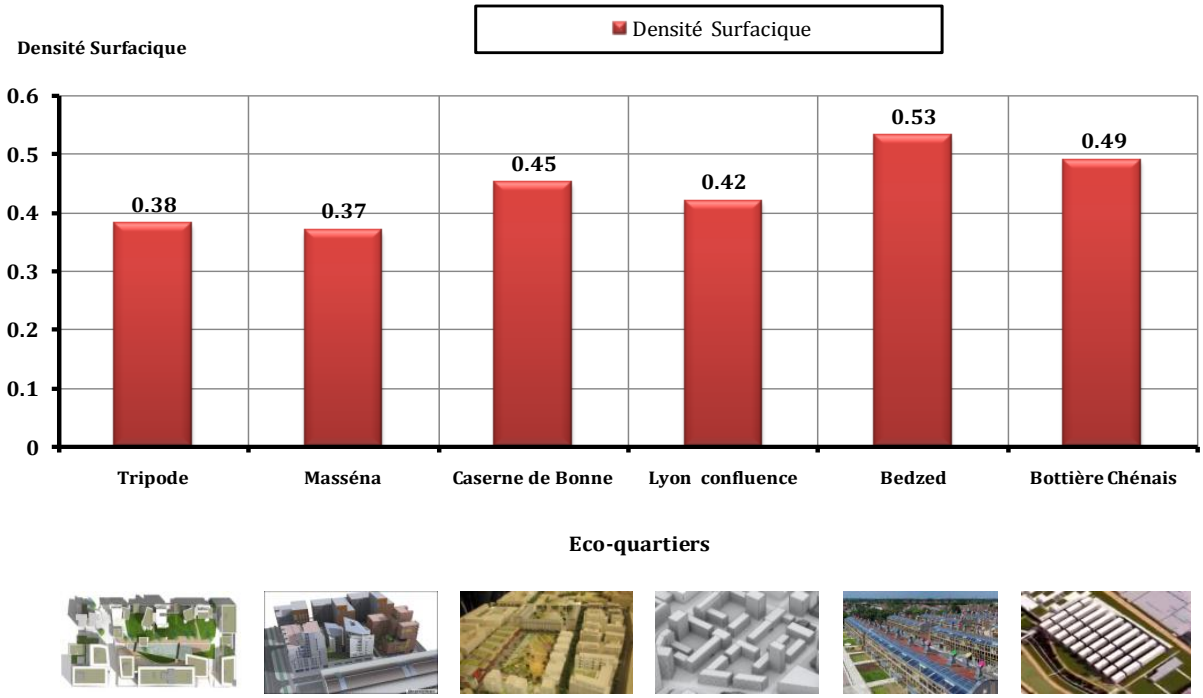


Figure II. 26 Densité surfacique calculée pour chaque configuration.

II.3.5.1.2 La densité volumique Dv

La densité volumique Dv (m) représente le volume construit rapporté au territoire : Elle est équivalente à une hauteur correspondant à la hauteur moyenne des constructions occupant tout le territoire.

$$Dv = \frac{Volume\ cumulé\ des\ bâtiments\ (m^3)}{Surface\ du\ territoire\ urbain\ (m^2)} \quad \textbf{II.2}$$

La **Figure II. 27** montre l'importance de la dimension verticale des bâtiments sur la densité volumique des quartiers. En effet, les îlots ouverts ont les plus grandes densités, comprises entre 9,7 et 10,2 en raison de l'extension verticale de leurs bâtiments. Les formes semi-ouvertes affichent des valeurs importantes, mais inférieures à celles des formes ouvertes. La densité est de l'ordre de 8,0 pour le quartier de la caserne en raison de la faible hauteur des structures bâties et de l'ordre de 9,0 pour le quartier Confluence. Celui-ci présente des formes accidentées et des immeubles de grandes hauteurs (R+12). Les formes intermédiaires correspondent aux plus faibles valeurs ($4.3 < D_V < 4.7$) à cause de la faible hauteur qui caractérise leurs bâtiments.

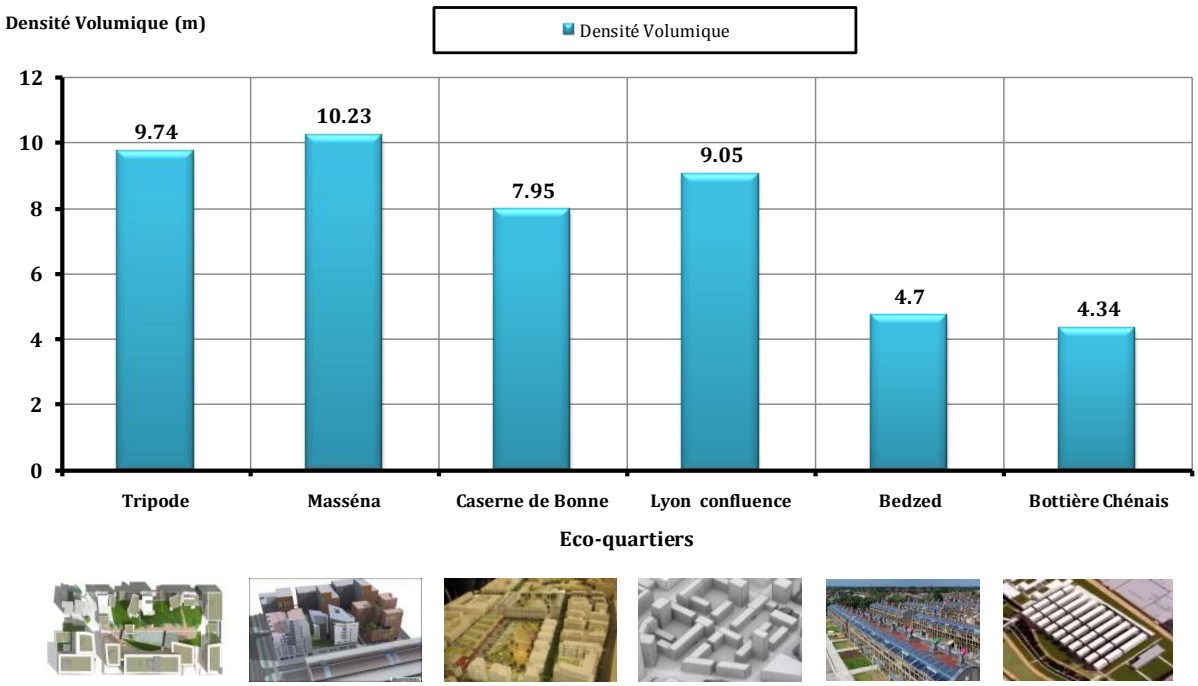


Figure II. 27 Densité volumique calculée pour chaque configuration.

II.3.5.1.3 L'indice de compacité C

L'indice de compacité $\boldsymbol{C}$ (-), exprime la valeur de la surface d'échange de l'enveloppe des bâtiments rapportée au m² de plancher.

$$\boldsymbol{C = \frac{Surface\ cumulée\ de\ l'enveloppe\ des\ bâtiments\ (m^2)}{Surface\ cumulée\ des\ planchers\ (m^2)}} \qquad \textbf{II.3}$$

Elle est supérieure à 0,2 et généralement inférieure à 1,2 pour des configurations standards. La surface d'enveloppe est constituée des façades verticales exposées aux conditions extérieures, de l'emprise au sol et des toitures. Plus ***C*** est faible, plus les constructions sont compactes et donc moins elles subissent les effets externes (**Cherqui**, 2005). La **Figure II. 28** donne la compacité de différentes formes géométriques.

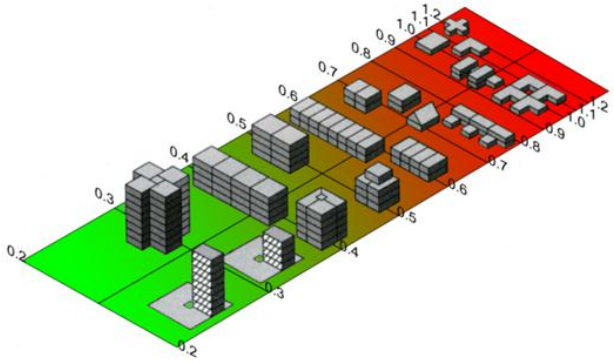


Figure II. 28 Compacité de différentes formes géométriques **Cherqui** (2005).

Les valeurs de l'indice de compacité présentées sur la **Figure II. 29** montrent que les îlots intermédiaires sont les plus compacts avec des valeurs comprises entre 1,30 et 1,40. Les îlots ouverts et semi-ouverts présentent des indices de compacité faibles et proches, comprises entre 0,84 et 0,86 pour les quartiers Tripode, Masséna et Lyon Confluence alors que le quartier de la caserne de Bonne a l'indice le plus élevé pour ce type d'îlot, il est égal à 1,01. Cette différence est due à l'organisation verticale des bâtiments. En effet, les bâtiments sont de faibles hauteurs et homogènes (R+5) pour le quartier de la caserne de Bonne et hétérogènes et de hauteurs élevées pour les quartiers Tripode, Masséna et Lyon Confluence avec une hauteur moyenne correspondant à R +8.

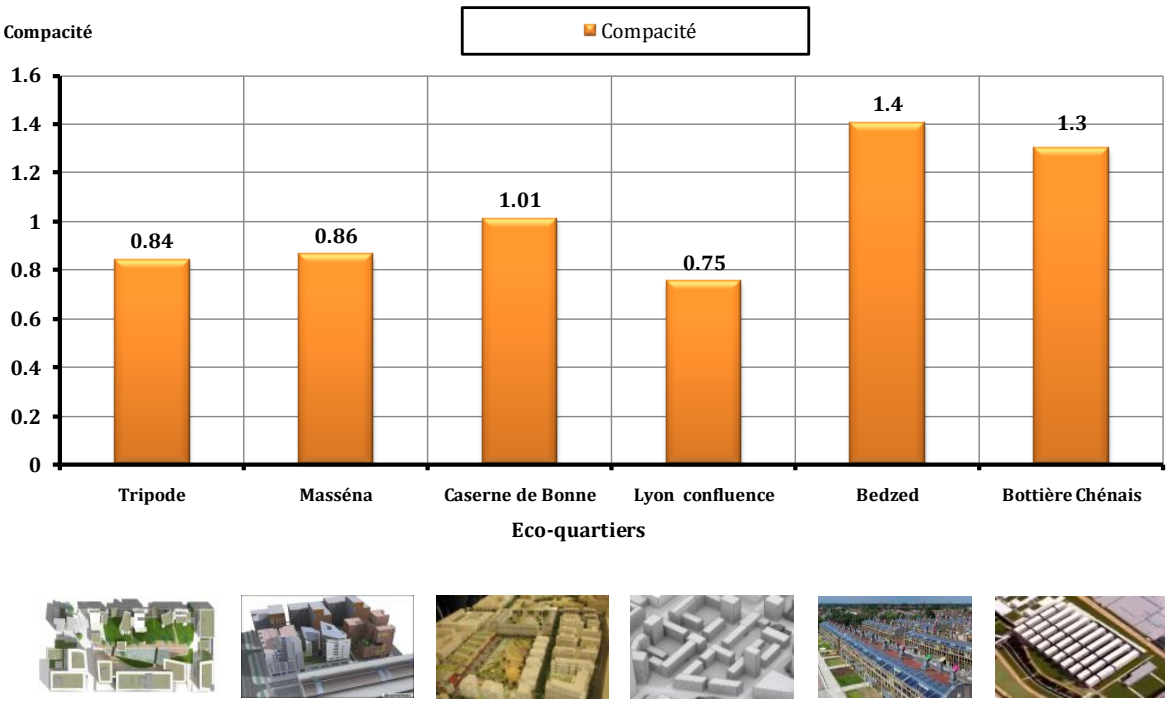


Figure II. 29 L'indice de compacité calculée pour chaque configuration.

II.3.5.2 Synthèse de l'étude morphologique

L'étude des indicateurs morphologiques a permis de quantifier la différence typologique observée entre les sous-configurations déclinées de la forme traversante. En effet, l'analyse a montré que l'indice de compacité des îlots ouvert ou semi ouvert affichent des valeurs comprises entre 0,84 et 1,01 caractérisant un agencement compact et une organisation en hauteur des bâtiments. Pour les îlots intermédiaires les indices des compacités sont compris entre 1,30 et 1,40 traduisant des tissus étalés avec des hauteurs moins élevées des volumes. Par ailleurs, même si l'indice de compacité des îlots ouverts et semi-ouverts reste similaire, les deux descripteurs (densité surfacique et volumique) les ont clairement distingués.

II.4 Choix et présentation des cas d'études

À partir des résultats de l'analyse urbaine et des indicateurs morphologiques, les trois quartiers: Lyon Confluence, Tripode et Bottière Chénaie, caractérisant chacun des sous-configurations de la forme urbaine traversante, ont été choisis pour faire l'objet des simulations numériques et de l'étude des paramètres de confort et des indicateurs morpho-climatiques. Le choix a été fait pour des raisons pratiques liées à la localisation des projets et à la quantité d'informations disponibles. En effet, la situation des quartiers de la Bottière et Tripode à Nantes nous a permis d'effectuer plusieurs visites de terrains pour collecter des données techniques (natures et

couleurs des matériaux par exemple) et réaliser des relevés architecturaux[13] sur site. En outre, l'évaluation environnementale du projet Lyon Confluence qui a été faite dans le cadre d'une étude menée par le laboratoire CERMA a permis de disposer de la maquette numérique du projet ainsi que des informations techniques complémentaires.
Dans les sections suivantes, chaque quartier sélectionné est présenté avec une évaluation des coefficients de réflexion des matériaux de revêtement. Ces valeurs d'albédo constituent un paramètre important pour les simulations numériques.

II.4.1 Le quartier Lyon Confluence

II.4.1.1 Présentation du projet

Le projet Lyon Confluence est un des plus grands projets d'aménagement urbain de la ville de Lyon. Il s'étend sur 150 hectares au sud de la presqu'île délimitée par la Confluence de la Saône et du Rhône. Sa réalisation est décomposée en deux phases. La première phase composée de 3 îlots A, B et C (**SCI-Lyon-Confluence**, 2006) est achevée (**Figure II. 30**). La planification de la seconde phase du projet est confiée au groupe d'architecture Herzog & De Meuron. La caractéristique la plus importante de cette phase est sa forte composante végétale. Afin de laisser une large place aux espaces verts, l'habitat et les bureaux seront densifiés verticalement sur le concept de la ville variée. Les immeubles seront de tailles variées afin de favoriser l'accessibilité à la lumière et au soleil. Le quartier est composé de 12 îlots présentant des typologies urbaines différentes : îlots traversants plutôt semi ouverts pour les îlots (7, 11, 12) et des îlots plus ouverts (8 et 9) des bâtiments allongées pour former un écran protecteur (îlots 1, 2 et 3). Les trois îlots 7, 11 et 12 ont été choisis pour l'étude de confort (**Figure II. 31**). Ces configurations ont été choisies comme représentatives des morphologies d'îlots semi-ouverts.

[13] Le relevé d'architecture constitue un ensemble de notes et de dessins complétés par des photographies et des données techniques. Ce relevé s'articule autour de trois modes de représentation de l'édifice, à savoir : la volumétrie, le plan et les coupes.



Figure II. 30 Présentation des îlots A, B et C de la première phase du projet Lyon Confluence (**SCI-Lyon-Confluence**, 2006).



Figure II. 31 Distribution des fonctions dans le quartier Lyon Confluence et distinction des trois îlots semi-ouverts 7, 11 et 12 sélectionnés pour notre étude.

II.4.1.2 Evaluation de l'albédo des façades

Le choix concernant les matériaux de revêtements extérieurs et la couleur n'est pas encore décidé par les architectes. Cette information (coefficient de réflexion des matériaux) est cependant indispensable pour simuler les transferts thermo-radiatifs et estimer le confort thermique extérieur. La solution retenue a consisté à différencier le comportement saisonnier des façades comme proposé par **Bernabé** (2010). Du fait de l'évolution de la hauteur zénithale du soleil au cours de l'année, le soleil plus haut en été frappera principalement les toits et moins les façades orientées au sud. A l'inverse, en hiver le soleil frappera à midi les façades orientées au sud avec un angle proche de la normale des parois. De plus, les façades Est et Ouest recevront peu d'énergie l'hiver, alors que l'été, elles seront très exposées le matin et le soir.

Ainsi, afin d'augmenter l'apport solaire des façades en hiver, des matériaux absorbant ont été appliqués sur les parois Sud (ex : béton revêtu de peinture foncée). En été, pour évacuer d'avantage d'énergie solaire, des matériaux réfléchissants (ex : aluminium) ont été envisagés sur les façades Est et Ouest. Les façades Nord, recevant peu d'énergie, contribuent peu à l'absorption, un matériau absorbant identique à celui de des façades Sud a donc été appliqué.

Par ailleurs, le sol et les toitures recevront une part plus importante d'énergie l'été que l'hiver, il est donc préférable d'envisager des matériaux réfléchissant. Un sol végétal et des toitures jardins permettraient d'obtenir des bons résultats de réflexion solaire. D'un autre côté, le plan d'urbanisme du quartier prévoit l'aménagement de petits parcs verts à l'intérieur de chaque îlot (**Figure II. 32** à gauche). En revanche, pour les rues et les trottoirs, des pavés de béton et des enduits gravillonnés en sable à fort pouvoir de réflexion ont été choisis. L'affectation des matériaux est présentée pour chaque surface sur la **Figure II. 32** à droite. Enfin, un pourcentage de vitrage de l'ordre de 30% est supposé pour les façades des bâtiments.

Les coefficients de réflexion ont été estimés pour chaque élément de la scène urbaine à partir des bases de données trouvées dans la littérature et récapitulées par (**Athamena**, 2008). Cependant, pour les façades composées de deux matériaux avec des valeurs d'albédo différentes (vitrage + aluminium ou béton), une moyenne pondérée entre l'albédo des deux matériaux a été utilisée pour déterminer une valeur intermédiaire. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\boldsymbol{a = A_1 \times P1 + A_2 \times P2} \qquad \textbf{II.4}$$

où $\boldsymbol{A_1}$ $\boldsymbol{A_2}$ sont les albédos des deux matériaux, $\boldsymbol{P1}$ et $\boldsymbol{P2}$ représentent la fraction d'occupation de chaque matériau dans la façade. Les valeurs obtenues sont présentées dans **Tableau. II. 5**.

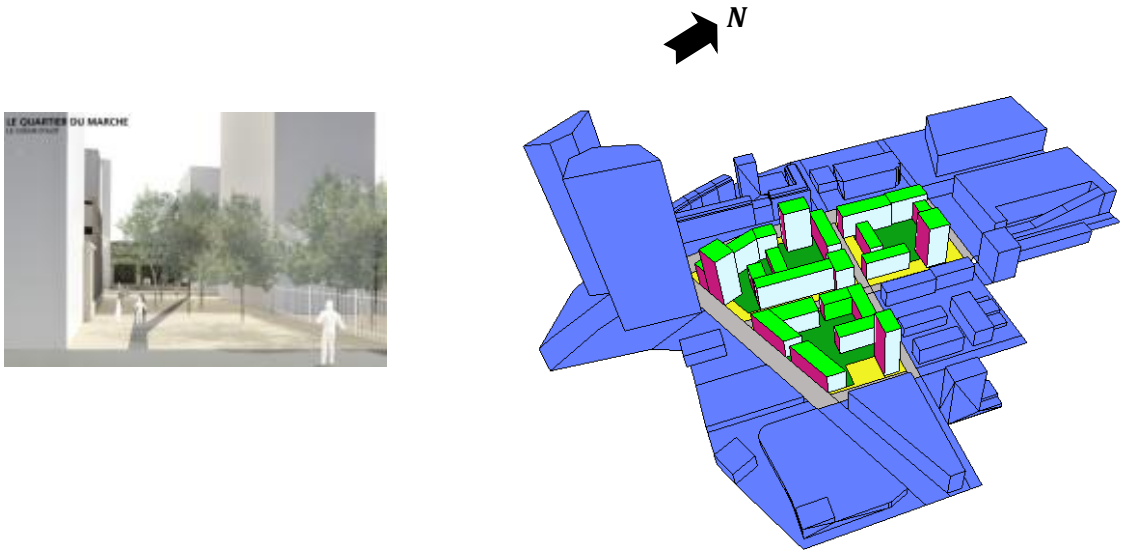


Figure II. 32 A droite: présentation des différents matériaux de surfaces dans le quartier Lyon Confluence. **A gauche:** l'aménagement prévu de petits parcs verts à l'intérieur de chaque îlot.

Couleurs	Description des matériaux	Albédo des surfaces
	Espaces verts	0,33
	Pavé en pierre	0,35
	Trottoirs en enduits gravillonnés de sable	0,55
	Toitures végétalisées	0,33
	Façades absorbantes (béton)	0,22
	Façades réfléchissantes (aluminium)	0,70
	Environnement immédiat	-

Tableau. II. 5 Description des matériaux de surface du projet Lyon Confluence et les valeurs d'albédo correspondantes.

II.4.2 Le quartier Tripode à Nantes

II.4.2.1 Présentation du projet

Le projet Tripode est composée de deux îlots A et B de formes distinctes. L'îlot A avec sa forme ouverte a été sélectionné pour l'étude. Il est réparti sur dix bâtiments non mitoyens présentant chacun une façade plane alignée sur la rue (**Figure II. 33** et **Figure II. 34**). Sa forme urbaine fragmentée offre une variété de vues accentuées par les parties pleines et vides caractérisant les façades et le mouvement des volumes bâtis.

II.4.2.2 Evaluation de l'albédo des façades

Les surfaces du projet Tripode présentent des matériaux de revêtement très variés allant du béton matricé à l'aluminium. A l'exception de quelques bâtiments présentant une variation de peaux métalliques (aluminium et bardage métallique) pour s'inscrire dans une démarche contemporaine, l'ensemble du projet présente des bâtiments en béton peints de couleurs variées afin d'accentuer les ambiances visuelles du quartier (**Figure II. 33**). Notons aussi l'utilisation de grands panneaux vitrés côté Nord-Ouest du quartier pour profiter d'une vue panoramique sur la Loire et favoriser le captage solaire en été. Remarquons enfin la contribution des plans d'eau dans l'évaluation du confort au sein du quartier Tripode, avec des petits ponts en bois traversant, accessibles par les piétons, qui transforment ces espaces en un vrai lieu de rencontre pour le public. Une description plus détaillée de la nature des matériaux de surface par bâtiment est présentée dans l'annexe II. Le **Tableau. II. 6** présente les valeurs d'albédo des façades et des toitures du projet.



Figure II. 33 Plusieurs vues sur l'îlot A du quartier Tripode montrant l'hétérogénéité des matériaux de construction.

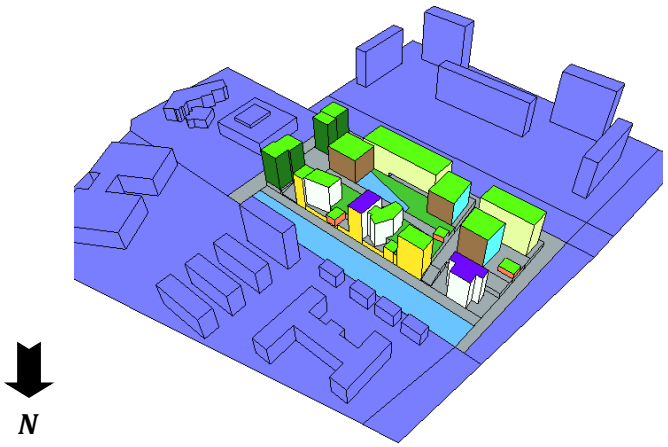


Figure II. 34 Présentation des différents matériaux des surfaces du quartier Tripode.

Couleurs	Description des matériaux	Valeurs d'albédo
	parois vert foncé	0,17
	Sol en béton	0,35
	Eau	0,50
	Parois jaune clair	0,53
	Toiture jardin	0,33
	Parois blanches	0,85
	Béton matricé	0,416
	Bardage métallique	0,38
	Panneaux photovoltaïques	0,5
	Aluminium	0,7
	Environnement immédiat	-

Tableau. II. 6 Description des matériaux de surface du projet Tripode et valeurs d'albédo correspondantes.

II.4.3 Le quartier Bottière Chénaie

II.4.3.1 Présentation du projet

Le ZAC Bottière Chénaie est composé de 24 îlots présentant différents types de formes urbaines : forme intermédiaire (îlot 1, 2 et 3), forme semi-ouverte en U (îlots 16 jusqu'au 22) pour les logements et formes ouvertes pour les fonctions de commerce et de service. Dans cette étude, nous avons retenu l'îlot 2 avec sa morphologie d'îlot intermédiaire (**Figure II. 35**).

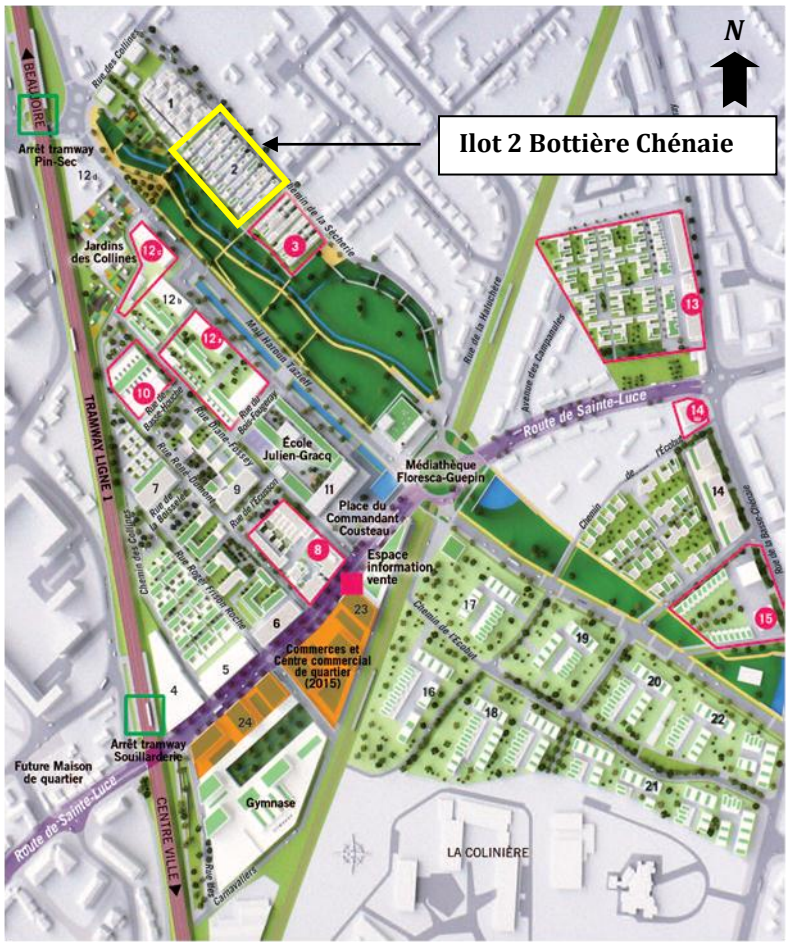


Figure II. 35 Plan d'aménagement du ZAC Bottière Chénaie et plan de situation de l'îlot 2.

II.4.3.2 Evaluation de l'albédo des façades

Les bâtiments du quartier sont composés de trois matériaux distincts. Les façades sont constituées de murs de béton et de fenêtres. Des toitures végétalisées ont été aménagées sur les terrasses de quelques volumes du projet. En outre, pour atténuer la forme monotone et répétitive du quartier, plusieurs revêtements colorés ont été utilisées afin de créer des ambiances visuelles et des zones de repères entre les différents canyons (**Figure II. 36** et **Figure II. 37**). Le pourcentage des vitrages est faible et varie suivant l'orientation, il représente 20 % de la surface totale du projet. Les valeurs sont présentées dans le **Tableau. II. 7** ci-dessous.





Figure II. 36 Deux images de l'îlot 2 du quartier de la Bottière montrant les couleurs des façades.

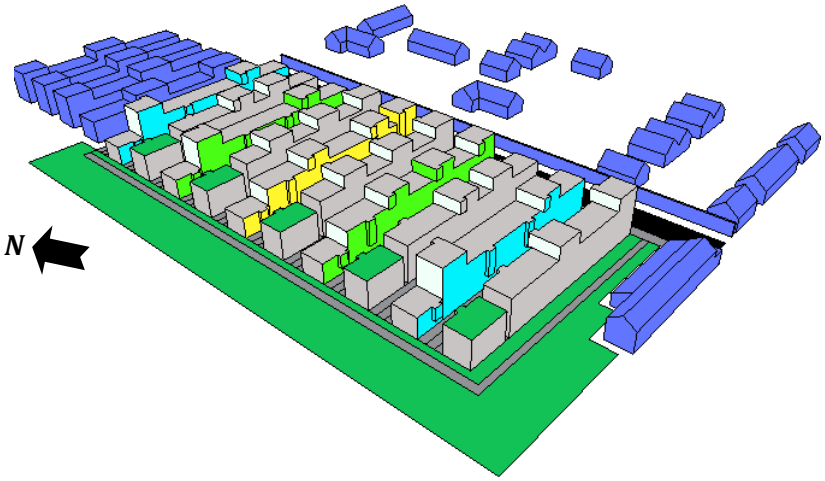


Figure II. 37 Présentation des différents matériaux de surfaces du quartier Bottière Chénaie.

Couleurs	Description des matériaux	Albédo des surfaces
	Toitures végétalisées	0,33
	Parois gris clair	0,40
	Parois bleu clair	0,50
	Parois jaune clair	0,77
	Parois vert clair	0,40
	Parois blanches	0,85
	pavage en béton	0,10
	asphalte	0,35
	Environnement immédiat	-

Tableau. II. 7 Description des matériaux de surface du projet Bottière Chénaie et valeurs d'albédo correspondantes.

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, à partir de la littérature, nous avons présenté les différentes définitions et les principaux critères caractérisant les éco-quartiers.
La grande variété des configurations nous a conduits à sélectionner plusieurs de ces configurations en Europe et caractériser les plus représentatives. Nous avons pu distinguer trois sous-configurations de la forme urbaine traversante. Notons que, nous n'avons pas trouvé dans la littérature d'étude de caractérisation du confort extérieur pour cette forme. Ce constat nous a amené à focaliser notre étude sur les quartiers Tripode, Lyon Confluence et Bottière Chénaie représentatifs des sous-configurations ouvertes, semi-ouvertes et intermédiaires.
L'évaluation du confort thermique extérieur de ces quartiers sera faite par le biais de la simulation numérique. Les outils numériques de simulation sont aujourd'hui suffisamment matures et la souplesse de leur utilisation est bien adaptée pour permettre l'étude des performances thermo-aérauliques de différentes configurations urbaines. Parmi les modèles utilisés, on distingue:

- Les modèles de dynamique des fluides (CFD) qui déterminent la température et la vitesse de l'écoulement autour des bâtiments à partir des conditions météorologiques fournies en données d'entrée,
- Les modèles thermo-radiatifs qui fournissent les températures des surfaces à partir des flux radiatifs, des caractéristiques des bâtiments, leurs conditions intérieures, la température de l'air et de la vitesse supposée connue de l'écoulement.

En règle générale, dans les simulations CFD, on impose souvent par défaut une valeur uniforme estimée de température de surface. Dans le cas des modèles thermo-radiatifs, la température des surfaces est le plus souvent calculée à partir d'une unique valeur de référence du vent et de la température de l'air (**Hénon**, 2008) et (**Idczak**, 2009). Le couplage des deux modèles doit permettre de s'affranchir de ces hypothèses fortes et d'améliorer ainsi la qualité des résultats de simulation. Les deux modèles numériques destinés à faire l'objet du couplage et le principe de couplage sont présentés dans le chapitre III.

« Ces simulations informatiques sont devenues incontournables pour la modélisation des systèmes naturels en physique, chimie et biologie, mais également des systèmes humains en économie et en science sociale pour lesquels les expériences sont difficiles, coûteuses voire impossibles[14]»

Chapitre III

Présentation des modèles de simulation et méthodologie du couplage itératif

Sommaire

III.1 Introduction ____ **112**

III.2 Modélisation et simulation avec le modèle thermo-radiatif *Solene* ____ **112**

III.3 Modélisation et simulation avec le modèle CFD *Code_Saturne* ____ **121**

III.4 Les différentes procédures de couplage entre la simulation thermo-radiative et la simulation thermo-aéraulique et principe de couplage itératif développé ____ **125**

III.5 Conclusion ____ **131**

[14] **Jean-Jacques Gaillard**, *La simulation numérique : un outil puissant au service de la recherche. La revue numérique, 2004, p65*

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les deux outils (le Code *Solene* développé par le laboratoire CERMA[15] et le *Code_Saturne* développé par EDF[16]) que nous allons coupler. Nous décrirons le principe de fonctionnement de chaque modèle et les adaptations apportées au *Code_Saturne*. Nous présenterons ensuite le principe du couplage itératif développé en nous appuyant sur les potentialités et les méthodes de couplage numérique répertoriées dans la littérature.

III.2 Modélisation et simulation avec le modèle thermo-radiatif *Solene*

III.2.1 Présentation

Les recherches sur les paramètres solaires de contrôle d'ensoleillement des projets, menées par le laboratoire CERMA de l'Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes, ont conduit à l'élaboration d'un logiciel de simulation solaire appelé *Solene* (**Péneau**, 1989). Le modèle permet de traiter conjointement les contraintes solaires et lumineuses en s'appuyant sur une modélisation réaliste des phénomènes, notamment par l'intégration d'un modèle de ciel. Par la suite, la modélisation des inter-réflexions et des flux infrarouges a été implémentée (**Miguet**, 2000). Enfin, un modèle de conduction thermique dans les parois a été intégré pour faire de *Solene* un outil de simulation thermo-radiative (**Vinet**, 2000).

Le modèle *Solene* permet de mener des simulations à l'échelle d'un unique bâtiment, d'une rue canyon ou encore d'un fragment urbain, voire d'un quartier dans son ensemble. Il propose divers modes de visualisation en 3D qui permettent d'observer dans l'espace et dans le temps, les comportements de la géométrie simulée.

L'échelle de temps correspond à des cycles journaliers, avec un pas de temps allant de 5 minutes à 1 heure. Le choix de la durée du pas temps dépend essentiellement de la finalité des résultats souhaités. Un pas de temps de 15 minutes constitue un choix bien adapté à la prise en compte de la trajectoire solaire, l'alternance des périodes ensoleillées et ombragées et des réponses thermiques des matériaux.

Le modèle permet de simuler les grandeurs et les phénomènes suivants :

- la potentialité solaire des enveloppes des bâtiments et leur intensité lumineuse ;
- les facteurs de vue du ciel;
- l'ensoleillement en termes de tracé d'ombre, mais aussi de durée;

[15] Centre de Recherche Méthodologique d'Architecture (Ecole National Supérieure d'Architecture de Nantes)
[16] Electricité De France

- les différentes composantes du rayonnement solaire (flux direct et diffus incidents), flux infrarouge, inter réflexions;
- les facteurs de forme ;
- les températures de surface.

III.2.2 Modélisation de la géométrie

La géométrie de la scène simulée peut être modélisée soit directement avec l'interface graphique du logiciel, soit par l'importation des géométries issues de logiciels de dessin D.A.O (*Autocad, Gambit, SketchUp…)*.
La géométrie apparaît sous la forme d'un ensemble de faces planes adjacentes les unes aux autres. Chaque face est définie par ses contours et possède un certain nombre de descripteurs pour la caractériser. Par ailleurs, chaque face est associée à un matériau qui détermine son comportement radiatif et thermique.
Les fonctions applicables aux géométries sont de divers ordres :

- les transformations géométriques (translation, rotation, triangulation,…) ;
- la visualisation des géométries (contexte d'affichage, descripteurs,…) ;
- la simulation des phénomènes physiques : ensoleillement, rayonnement et température de surface.

La **Figure III. 1** présente un exemple d'une géométrie d'un fragment urbain utilisée par le modèle *Solene*, ainsi que sa discrétisation en facettes triangulaires.

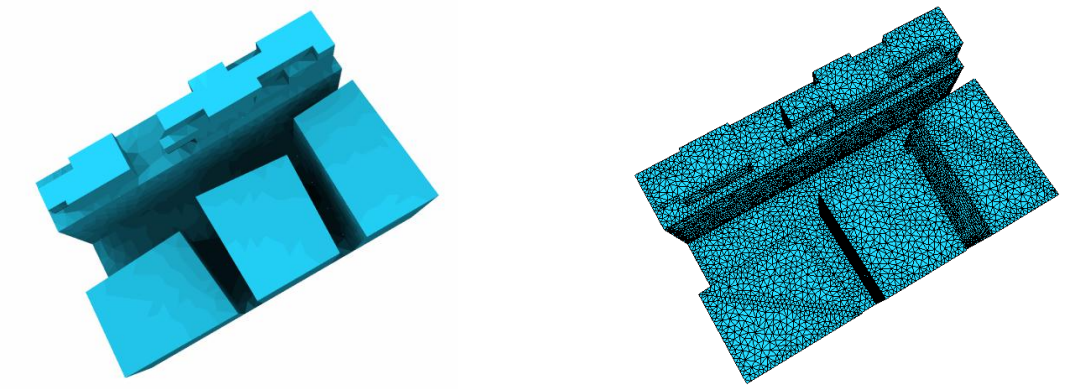


Figure III. 1 Modèle géométrique d'un fragment urbain **(à gauche)** et discrétisation de la géométrie en facettes triangulaires **(à droite)**.

III.2.3 Simulation des flux solaires direct et diffus incidents

En principe, les flux solaires direct et diffus incidents sont renseignés par deux fichiers météorologiques séparés, comprenant les mesures de chaque flux acquises par un récepteur horizontal. Cependant, en absence de ces données, pour le flux solaire direct, *Solene* calcule la position du soleil en fonction du jour, de l'heure solaire et de la latitude, permettant ainsi de connaitre l'angle d'incidence des rayons solaires par rapport aux différentes facettes de la géométrie ainsi que les masques de l'environnement immédiat. L'évaluation du flux solaire direct incident est alors immédiate et les facettes ensoleillées reçoivent un flux solaire pondéré par l'angle d'incidence.

Pour les flux solaires diffus, la méthode d'évaluation repose sur une représentation de la voûte céleste. *Solene* intègre un modèle de radiance qui permet de déterminer le flux solaire diffus afin de prendre en compte les effets directionnels (**Hénon**, 2008). Ce modèle de radiance est déterminé grâce à un modèle de ciel implémenté dans le code *Solene* qui comprend plusieurs types de ciel (ciel clair, ciel couvert, totalement ou partiellement couvert par exemple) et qui prend aussi en compte la nébulosité et l'opacité nuageuse. Dans le modèle *Solene*, le ciel est considéré comme un émetteur isotrope d'énergie et de lumière (**Groleau** *et* **Miguet**, 1998).

L'incidence de l'énergie solaire directe et diffuse sur les facettes d'un fragment urbain dépend de la position du soleil, des conditions du ciel et des propriétés géométriques des facettes (orientation et inclinaison). L'addition des flux solaires directs et diffus donne le flux solaire global incident pour chaque facette et pour chaque pas de temps.

III.2.4 Simulation des inter-réflexions solaires

Une partie de l'énergie solaire reçue par les surfaces de la scène urbaine est réfléchie vers le ciel et vers les autres surfaces. Le calcul des flux échangés entre eux dépend de leurs relations géométriques (distance et orientation) appréhendées par leur facteur de forme. Le calcul des inter-réflexions dans le modèle *Solene* est basé sur le principe de radiosité, s'appliquant uniquement sur des surfaces parfaitement diffuses. La radiosité $\boldsymbol{B_i}$ d'un élément de surface *i* est égale à la somme des énergies émises et réfléchies comme le montre la **Figure III. 2** (à gauche)**.** Elle est donnée selon l'expression ci-dessous (**Groleau** *et* **Miguet**, 1998):

$$\boldsymbol{B_i = E_i + \rho_i \sum_{j=1}^{n} B_j . F_{ij}} \qquad (\mathbf{III.1})$$

où $\boldsymbol{B_i}$ est la radiosité de l'élément *i* (W m^{-2}), $\boldsymbol{E_i}$ est le flux d'énergie réfléchi par l'élément i (W m^{-2}), $\boldsymbol{\rho_i}$ est sa réflectivité (fraction d'énergie incidente réfléchie dans l'environnement), $\boldsymbol{F_{ij}}$

est le facteur de forme (fraction d'énergie quittant l'élément *i* et atteignant l'élément *j*) et $\boldsymbol{n}$ est le nombre de surfaces élémentaires de l'environnement.
Dans le domaine solaire, l'énergie incidente globale calculée en chaque point de la scène constitue la valeur initiale $\boldsymbol{E_i}$. A l'issue du calcul des multi-réflexions solaires, la valeur du flux solaire absorbé est alors connue en chaque point de la scène.

Notons que, le logiciel *Solene* n'est pas encore en mesure de représenter la réflexion directionnelle ou spéculaire qui caractérise les surfaces lisses, introduisant ainsi une sous-estimation dans les calculs des flux solaires et infrarouges réfléchis. Dans le modèle, la réflexion est supposée parfaitement diffuse, la quantité d'énergie émise ou reçue par élément de surface est considérée constante dans le temps pour tout l'élément et l'énergie renvoyée vers le ciel est considérée perdue.

III.2.5 Calcul des facteurs de forme

Le calcul de la radiosité fait intervenir le facteur de forme $\boldsymbol{F_{ij}}$ donné par la relation **III. 2**, entre les éléments $\boldsymbol{i}$ et $\boldsymbol{j}$.

$$\boldsymbol{F_{ij}} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{A_i}} \iint_{\boldsymbol{A_i A_j}} \frac{\boldsymbol{cos\varphi_i cos\varphi_j}}{\boldsymbol{\pi . r^2}} \boldsymbol{dA_i dA_j} \qquad (\mathbf{III.2})$$

où $\boldsymbol{A_i}$ et $\boldsymbol{A_j}$ sont les aires des facettes $\boldsymbol{i}$ et $\boldsymbol{j}$, $\boldsymbol{r^2}$ est leur distance de séparation. $\boldsymbol{\varphi_i}$ et $\boldsymbol{\varphi_j}$ sont les angles respectifs entre la normale à l'élément et la droite reliant les deux facettes, tels que représentés sur la **Figure III. 2** (à droite).
Les facteurs de forme sont des nombres sans dimension compris entre 0 et 1. Ils permettent notamment de traduire le rapport entre la quantité d'énergie quittant une surface source pour atteindre une surface réceptrice et la quantité totale ayant quitté la surface source.

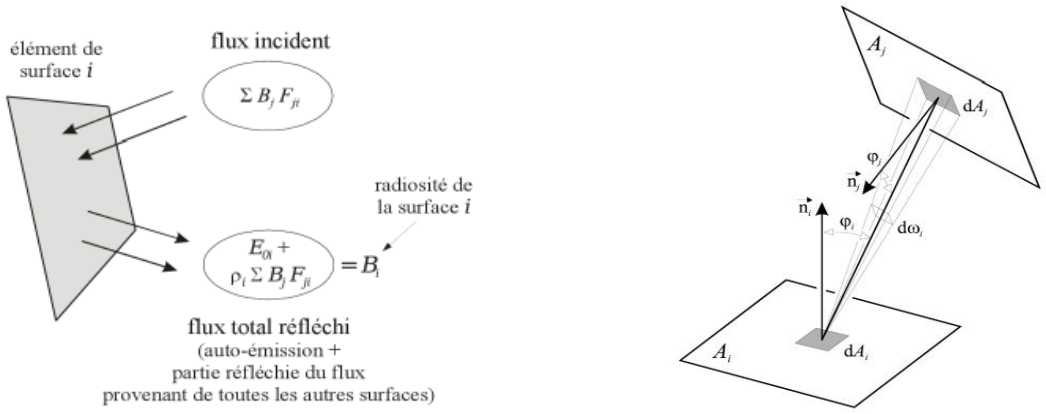


Figure III. 2 Bilan radiatif sur un élément de surface *i* **(à gauche)** et facteur de forme entre deux facettes **(à droite)**, d'après (**Bouyer**, 2009).

III.2.6 Simulation thermo-radiative dans le code *Solene*

III.2.6.1 Modélisation des échanges thermiques par le modèle de paroi

Le modèle de paroi permet de déterminer la température de surface en appliquant un bilan énergétique en régime transitoire. Ce modèle est basé sur la définition des résistances et des capacités thermiques définies par analogie électrique. Notons que les échanges d'énergies sont supposés monodirectionnels (**Figure III. 3**). La capacité thermique est liée à l'épaisseur de mur, elle est répartie pour 9/10éme dans l'intérieur de la paroi et pour 1/10éme sur la surface extérieure (**Vinet**, 2000). Pour chaque élément $\boldsymbol{j}$ de la scène, la capacité thermique (J m^{-2} K^{-1}) est évaluée selon l'équation suivante :

$$\boldsymbol{C_j = \rho_j C_{mj} e_j} \qquad \textbf{(III. 3)}$$

où, $\boldsymbol{\rho_j}$ est la masse volumique (kg m^{-3}) et $\boldsymbol{C_{mj}}$ est la capacité thermique massique (J K^{-1} kg^{-1}) et $\boldsymbol{e_j}$ est l'épaisseur du mur (m).

La paroi est modélisée par deux couches superposées, une couche extérieure d'une épaisseur $\boldsymbol{e_1}$ en contact avec l'atmosphère et une couche intérieure d'épaisseur $\boldsymbol{e_2}$. Chaque couche est représentée par 3 nœuds, ayant chacun leur propre température (un nœud à chaque extrémité de la couche et un nœud au milieu de la couche). Pour une paroi à double couche, 5 nœuds sont donc définis, associés chacun à une température (**Figure III. 3**). Le modèle prend en compte aussi deux autres températures : les températures de l'air extérieur $\boldsymbol{T_{ext}}$ et intérieur $\boldsymbol{T_{int}}$.

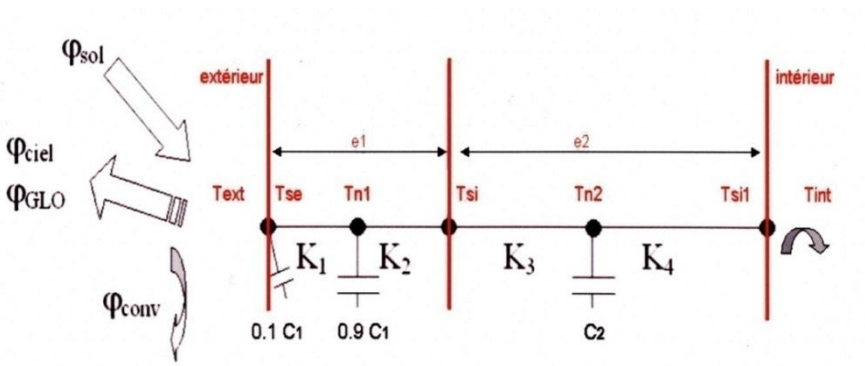


Figure III. 3 Modélisation des échanges thermiques dans une paroi à double couche dans le code *Solene* (**Hénon**, 2008)

Ainsi le bilan thermique en chacun des nœuds est décrit par les équations **III. 4** à **III. 8** données ci-dessous.

Pour le nœud de surface intérieure $\boldsymbol{T_{si1}}$, le bilan thermique s'écrit :

$$K_4(T_{si1} - T_{n2}) + \varphi_{int} = 0 \quad \textbf{(III. 4)}$$

Pour le nœud 2 à la température T_{n2} :

$$\frac{9}{10} C_2 \frac{\Delta T_{n2}}{\Delta t} + K_3(T_{n2} - T_{si}) + K_4(T_{n2} - T_{si1}) = 0 \quad \textbf{(III. 5)}$$

Pour le nœud 3 à la température T_{si} :

$$K_2(T_{si} - T_{n2}) + K_3(T_{si} - T_{n1}) = 0 \quad \textbf{(III. 6)}$$

Pour le nœud 4 à la température T_{n1} :

$$\frac{9}{10} C_1 \frac{\Delta T_{n1}}{\Delta t} + K_1(T_{n1} - T_{se}) + K_2(T_{n1} - T_{si}) = 0 \quad \textbf{(III. 7)}$$

Enfin, pour le nœud de surface extérieure T_{se}, le bilan thermique s'écrit :

$$\frac{1}{10} C_1 \frac{\Delta T_{se}}{\Delta t} + K_1(T_{se} - T_{n1}) + \varphi_{conv} + L_{net} = \varphi_{abs} \quad \textbf{(III. 8)}$$

où Δt est le pas de temps de calcul, K est la conductance thermique égale à $K_j = 2\,\lambda_j / e_j$, où λ_j est la conductivité thermique (W m^{-2} K^{-1}), e_j est l'épaisseur du matériau en (m), C est la capacité thermique du matériau (J m^{-2} K^{-1}).
Les transferts convectifs entre la paroi et l'air φ_{conv} sont donnés par l'équation ci-dessous:

$$\varphi_{conv} = h_c(T_{se} - T_{ext}) \quad \textbf{(III. 9)}$$

où h_c est le coefficient de transfert convectif (W m^{-2} K^{-1}) dépendant de la rugosité des surfaces et des caractéristiques de l'écoulement.

Entre la paroi et l'intérieur du bâtiment, les transferts convectifs φ_{int} (voir **équation III. 4**) sont modélisés par un coefficient d'échange global h_{int} semblable à un coefficient d'échange convectif (**Hénon**, 2008). La loi s'écrit **:**

$$\varphi_{int} = h_{int}(T_{si1} - T_{int}) \quad \textbf{(III. 10)}$$

Le flux infrarouge net L_{net} est défini par l'équation **III.11**:

$$L_{net} = L_{emis} - L_{abs} \quad \textbf{(III. 11)}$$

où L_{emis} est le flux infrarouge émis et L_{abs} le flux infrarouge absorbé par la facette. Le flux infrarouge émis L_{emis} est déterminé à partir de la loi de Stephan-Boltzmann appliquée à un corps gris et diffusant. Ainsi, pour un élément de paroi, la loi s'écrit :

$$L_{emis} = \varepsilon \sigma T_{se}^4 \quad \textbf{(III. 12)}$$

où ε est l'émissivité de la surface et σ est la constante de Stephan-Boltzmann (σ = 5.67.10^{-8} W m^{-2} K^{-4})
Le flux infrarouge absorbé dépend du flux infrarouge atmosphérique, du flux infrarouge émis par les surfaces voisines et de leurs multi-réflexions. Pour la facette i, il est donné par l'équation suivante :

$$L_{abs} = L\downarrow_{ref} + L_{ref,i} \quad \textbf{(III. 13)}$$

où $L\downarrow_{ref}$ est le flux infrarouge atmosphérique reçu après multi-réflexions et $L_{ref,i}$ est le flux infrarouge émis par la scène et reçu par la facette i après multi-réflexions.

Enfin, φ_{abs} représente le flux solaire absorbé par la facette. Ce dernier dépend des conditions suivantes :

- les conditions d'ensoleillement, à savoir la position du soleil et la nébulosité du ciel ;
- la géométrie de la structure urbaine, l'inclinaison des surfaces et la présence ou non de masques ;
- l'albédo des surfaces.

Le flux solaire absorbé est égal à :

$$\varphi_{abs} = (1 - \alpha)\varphi_{incident\ AR} \quad \textbf{(III. 14)}$$

où α est l'albédo effectif de la facette, $\varphi_{incident\ AR}$ est le flux global incident après multi-réflexions.
En réalité, en fonction de l'albédo, une partie du flux solaire global incident est absorbée par les surfaces, alors qu'une partie est réfléchie vers les parois voisines ou vers le ciel. Pour tenir compte de ces inter-réflexions qui viennent s'ajouter aux flux incidents, le modèle *Solene* utilise un algorithme de radiosité présenté dans la section **III.2.4**.

III.2.6.2 Les entrées de la simulation

Après la description du modèle thermo-radiatif, les conditions d'entrée sont présentées dans cette section. Trois types de conditions sont nécessaires : les paramètres physiques de la géométrie modélisée, les paramètres géographiques et temporels et enfin les conditions météorologiques.

Les **paramètres physiques** utilisés en entrée sont :

- le modèle 3D maillé de la géométrie simulée ;
- les caractéristiques solaires (réflexion, émissivité) et physiques des matériaux (capacité thermique, conductance et masse volumique).

Les **paramètres géographiques et temporels** à renseigner en entrée sont :

- la localisation du lieu, déterminée en précisant la latitude, la longitude et l'orientation du site par rapport au Nord ;
- le jour, le mois, l'heure TU du début et de la fin des simulations et le pas de temps.

Enfin, pour calculer la température de surface en régime transitoire, les **conditions météorologiques** sont nécessaires. Ces paramètres sont soit des valeurs constantes soit des fichiers transitoires. Ainsi, les éléments suivants doivent être connus :

- les températures imposées ou mesurées à l'intérieur des bâtiments et du sol à une certaine profondeur de référence ;
- les coefficients d'échanges convectifs à l'intérieur des bâtiments
- les coefficients d'échanges convectifs l'extérieur de la scène obtenu à partir de la vitesse de vent mesurée par une station météorologique, ou par des corrélations empiriques;
- la température de l'air mesurée juste au-dessus des toits où à l'intérieur du fragment urbain ;
- les flux solaires directs et diffus mesurés sur site par un récepteur horizontal ou déterminés à partir des données astronomiques;
- la température de surface extérieure initiale.

III.2.6.3 Simulation des températures de surface

La première étape du calcul consiste à initialiser le flux infrarouge net, en déterminant les températures de surfaces équivalentes. Cette opération de calcul se base sur les flux solaires incidents, les caractéristiques solaires et physiques des matériaux de la géométrie, le coefficient d'échange convectif externe et les températures de l'air extérieur et intérieur des bâtiments et du sol. Les températures de surface obtenues à ce stade sont comparées avec celles proposées par l'utilisateur $\boldsymbol{T_{ref}}$. Si l'écart est trop important ($\Delta \boldsymbol{T_{max}}$), le calcul des flux en grandes longueurs d'ondes est réaffecté en prenant en compte les dernières températures de surfaces obtenues. A l'issue de cette opération, de nouvelles températures de surfaces sont calculées. Le modèle procède de cette manière à chaque itération jusqu'à ce que le critère de convergence soit atteint, c'est-à-dire jusqu'à ce que la différence des températures de surfaces entre deux itérations soit inférieur à 0,1°C.

III.2.6.4 Les sorties de la simulation

Une fois que le test de convergence de température est terminé, on distingue deux types de sortie :

- les sorties primaires correspondant aux températures de surface extérieures et aux températures à chaque nœud de la paroi, pour chaque maille et chaque pas de temps.
- les sorties secondaires déterminées à partir des températures de surfaces extérieures. Ainsi, pour chaque surface, les grandeurs suivantes peuvent être déterminées :
    - le bilan radiatif en grandes longueurs d'ondes ;
    - le flux infrarouge émis vers le reste de la scène ou vers le ciel ;
    - le flux infrarouge réfléchi vers le reste de la scène ou vers le ciel ;
    - le flux de chaleur sensible ;
    - le flux solaire de courte longueur d'onde absorbé par chaque facette.

Les principales étapes de l'algorithme de calcul utilisé dans le modèle *Solene* pour déterminer la température de surface sont synthétisées sur le schéma de la **Figure III. 4**.

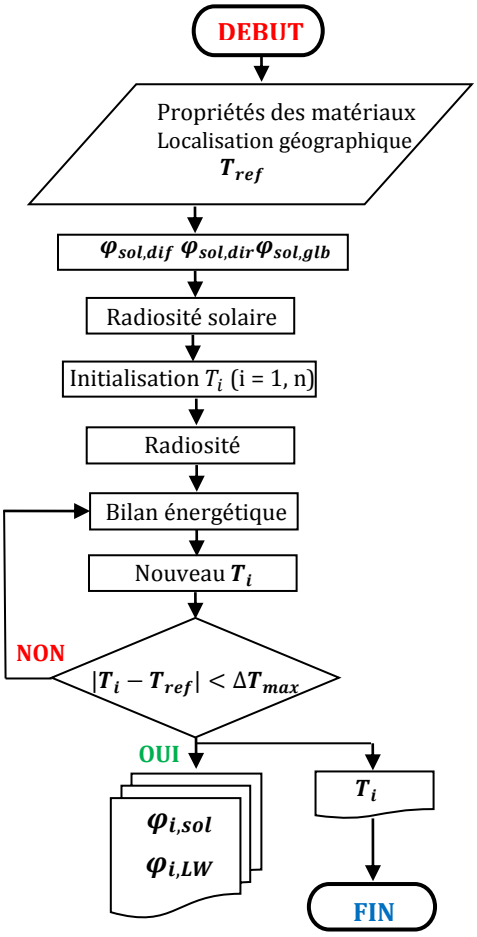


Figure III. 4 Algorithme de calcul itératif de la température de surface dans le modèle *Solene.*

III.3 Modélisation et simulation avec le code CFD *Code_Saturne*

III.3.1 Présentation

Le *Code_ Saturne* est un code de CFD développé par EDF. C'est un code général de mécanique des fluides pour les écoulements laminaires ou turbulents, incompressibles ou compressibles, en géométrie complexe 2D ou 3D. Ce code est utilisé pour diverses applications, telles que la combustion de gaz et de charbon, le chauffage, la dispersion des polluants sur les sites industriels, la ventilation ou dans le domaine des ambiances par exemple.

Il a été conçu comme un système modulaire, de manière à séparer différentes fonctionnalités du code. Initialement, un premier module, appelé Noyau, regroupait les aspects physico-numériques du *Code_Saturne*, tandis que le second gérait les communications et les échanges de données entre le Noyau et l'extérieur du système. Ce second module jouait ainsi le rôle d'enveloppe vis-à-vis du Noyau.

III.3.2 Modélisation de l'écoulement d'air

Le noyau est composé de trois équations fondamentales de la mécanique des fluides : l'équation de conservation de la masse, l'équation de bilan de la quantité de mouvement et enfin l'équation de bilan de l'énergie. La discrétisation temporelle est basée sur une étape de prédiction des vitesses suivie d'une étape de correction par la pression. Les équations de la turbulence et des scalaires sont résolues dans une troisième étape. La discrétisation spatiale est de type volumes finis sur un maillage non structuré et toutes les variables sont localisées au centre des cellules.

III.3.2.1 L'équation de conservation de la masse

L'équation de conservation de la masse est la seule loi qui ne fasse intervenir que des grandeurs fondamentales. L'équation anélastique s'écrit :

$$\boldsymbol{div}\left(\boldsymbol{\rho}\underline{\boldsymbol{u}}\right) = \boldsymbol{\Gamma} \qquad \textbf{(III. 15)}$$

où $\boldsymbol{\rho}$ est la masse volumique du fluide (kg m^{-3}), $\underline{\boldsymbol{u}}$ est le vecteur vitesse du fluide et $\boldsymbol{\Gamma}$ est un terme source ou puits de masse (kg m^{-3} s^{-1}). Ce dernier est généralement nul.

III.3.2.2 L'équation de bilan de quantité de mouvement

L'équation de bilan de quantité de mouvement est donnée par :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \underline{u}) + \underline{div}(\rho \underline{u} \otimes \underline{u}) = \underline{div}(\overline{\overline{\sigma}}) + \underline{S_u} \qquad \textbf{(III. 16)}$$

où $\underline{S_u}$ représente le terme source de flottabilité, $\overline{\overline{\sigma}}$ est le tenseur des contraintes appliquées au fluide (kg m^{-1} s^{-2}).

III.3.2.3 Les équations de la thermique

a) L'équation de l'énergie interne:

L'équation de l'énergie interne est donnée par :

$$\rho\left(\frac{\partial e}{\partial t} + \underline{u}.\underline{\nabla} e\right) = -\mathbf{div}\underline{q''} + q''' - P\mathbf{div}\,\underline{u} + \mu\emptyset \qquad \textbf{(III. 17)}$$

où e est l'énergie interne spécifique, $\underline{q''}$est le flux de chaleur exprimé par la loi de Fourier ($\underline{q''} = -\lambda\underline{\nabla T}$), q''' est le terme source volumique radiatif, $\emptyset$ est la dissipation visqueuse donnée par l'équation :

$$\emptyset = 2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 \left(\frac{\partial uw}{\partial z}\right)^2\right] + \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}\right)^2\right] + \frac{2}{3}(\mathbf{div}\underline{u}) \qquad \textbf{(III. 18)}$$

b) L'équation de la température

L'équation de la température s'écrit :

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \underline{u}.\underline{\nabla T}\right) = \mathbf{div}\left(\lambda\underline{\nabla T}\right) + \beta T\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} + q''' + \mu\emptyset \qquad \textbf{(III. 19)}$$

où β est le coefficient d'expansion thermique à pression constante donné par la relation:

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\left(\frac{\partial \rho}{\partial T}\right)_P \qquad \textbf{(III. 20)}$$

L'équation (**III. 19**) peut être simplifiée sous certaines hypothèses, par exemple :

- Si le fluide est un gaz parfait, $\boldsymbol{\beta = \frac{1}{T}}$, alors l'équation de la température s'écrit :

$$\boldsymbol{\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \underline{u} \,.\, \underline{\nabla} T\right) = \mathbf{div}\left(\lambda \underline{\nabla} T\right) + \frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t} + q''' + \mu \emptyset} \qquad \textbf{(III. 21)}$$

- Le fluide est incompressible, $\boldsymbol{\beta = 0}$:

$$\boldsymbol{\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \underline{u} \,.\, \underline{\nabla} T\right) = \mathbf{div}\left(\lambda \underline{\nabla} T\right) + q''' + \mu \emptyset} \qquad \textbf{(III. 22)}$$

- Si le fluide est adiabatique ($\boldsymbol{q''' = 0}$) et isentropique ($\boldsymbol{\mu\emptyset = 0}$) :

$$\boldsymbol{\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \underline{u} \,.\, \underline{\nabla} T\right) = \mathbf{div}\left(\lambda \underline{\nabla} T\right)} \qquad \textbf{(III. 23)}$$

III.3.3 Modélisation de la turbulence

Pour modéliser la turbulence, une solution consiste à introduire dans les équations de Navier-Stokes la décomposition dite "de Reynolds". Cette décomposition fait apparaitre des termes supplémentaires, appelés les "tensions de Reynolds", rendant le système d'équations ouvert avec un excès d'inconnues et posant ainsi le problème de fermeture du système. Il est possible de fermer le système d'équations grâce à différents modèles de fermeture plus au moins complexes. Plusieurs modèles sont disponibles dans le *Code_Saturne :* un modèle de longueur de mélange; le modèle ($k-\varepsilon$), le modèle de tenseur de Reynolds et différents modèles de LES. Le modèle de turbulence ($k-\varepsilon$) est généralement retenu pour des simulations en convection forcée. En effet, ce modèle à deux équations est simple, robuste et constitue le niveau minimum de modélisation physiquement acceptable pour nos applications. Dans cette étude, le modèle ($k-\varepsilon$) standard a été choisi pour modéliser la turbulence, il est présenté dans la section ci-dessous.

III.3.3.1 Modèle de turbulence (k − ε)

Ce modèle est basé sur l'hypothèse de «viscosité turbulente» introduite par Boussinesq, où les contraintes turbulentes sont exprimées en fonction du tenseur des taux de déformation à l'aide de la viscosité turbulente. Pour déterminer la viscosité turbulente, on ajoute deux équations complémentaires aux équations de bilans. Une pour l'énergie cinétique turbulente $\boldsymbol{k}$ et une pour son taux de dissipation. Elles sont données par les expressions **III. 18** et **III. 19**, respectivement:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + div\left[\rho \underline{u}\, k - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\, \underline{grad\, k}\right)\right] = \mathcal{P} + \mathcal{G} - \rho\varepsilon \qquad \textbf{(III. 24)}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + div\left[\rho \underline{u}\, \varepsilon - \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\, \underline{grad\, \varepsilon}\right)\right] = C_{\varepsilon 1}\frac{\varepsilon}{k}[\mathcal{P} + (1 - C_{\varepsilon 3})\mathcal{G}] - \rho C_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad \textbf{(III. 25)}$$

Les différentes variables intervenant dans ces équations sont explicitées ci-dessous:
$\mathcal{P}$ représente la production dynamique d'énergie cinétique turbulente:

$$\mathcal{P} = -\rho\, R_{ij}\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \qquad \textbf{(III. 26)}$$

$\mathcal{G}$ est le terme de production d'énergie cinétique turbulente générée par la gravité. Il est donné par:

$$\mathcal{G} = -\frac{1}{\rho}\frac{\mu_t}{Pr_t}\frac{\partial \rho}{\partial x_i} g_i \qquad \textbf{(III. 27)}$$

où Pr_t est le nombre de Prandtl turbulent et μ_t la viscosité turbulente en (kg m^{-1} s^{-1}) exprimée par la relation:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad \textbf{(III. 28)}$$

L'inconvénient de ce type de modèle de turbulence est l'introduction de coefficients empiriques. Les constantes couramment utilisées sont celles de **Launder** *et* **Spalding**, (1972) données dans le **Tableau.III. 1** ci-dessous :

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	σ_k	σ_ε
0,09	1,44	1,92	1 ou 0	1	1,3

Tableau.III. 1 Constantes utilisées dans le modèle de turbulence ($k-\varepsilon$).

La valeur de $C_{\varepsilon 3}$ dépend de la stratification : $C_{\varepsilon 3}$ = 0 si $G \geq 0$ (stratification instable), **et** $C_{\varepsilon 3}$ = 1 si $G \leq 0$ (stratification stable), (**Viollet**, 1988).

III.3.4 Modélisation de la végétation

La végétation modifie le microclimat urbain et les conditions de confort. En outre, elle constitue une partie intégrante des opérations d'aménagement des éco-quartiers. Ne pas la prendre en considération constitue une hypothèse assez grossière. Cependant, les opérations d'aménagement d'éco-quartiers choisi pour l'étude du confort sont soit en phase de conception (cas de Lyon Confluence) soit en cours de réalisation (Tripode) où la végétation n'a pas été bien définie. Dans le cas du quartier Bottière Chénais, les arbres aménagés sont naissants et leur impact sur les paramètres physiques du confort reste pratiquement négligeable. Néanmoins, des adaptations anticipées ont été faites au niveau de la simulation thermo-aéraulique du *Code_Saturne*, en intégrant un terme puits dans l'équation de bilan de quantité de mouvement dans la routine "*ustsns*" et des termes sources dans les deux équations de la turbulence par l'intermédiaire de la routine "*ustske*" (voir la section **III. 1** de l'annexe III). Précisons que, les effets d'évapotranspiration n'ont pas été pris en compte dans ces adaptations.

III.4 Les différentes procédures de couplage entre le modèle thermo-radiative et le modèle thermo-aéraulique et principe de couplage itératif développé

Les modèles thermo-radiatif (ES) et les codes de calcul de la dynamique des fluides (CFD) fournissent des informations complémentaires l'une à l'autre. En raison de la nature complémentaire des résultats fournis par ces deux modèles, les tentatives visant à les coupler reçoivent de plus en plus d'attention. Effectivement, plusieurs chercheurs ont exploré les stratégies, les méthodes et les performances de ce type de couplage (**Negraô** *et al.,* 1995, **Zhai** *et al.,* 2002). Leurs études ont montré que les différentes méthodes de couplage peuvent conduire à des performances différentes en termes de précision, de stabilité et de vitesse de calcul. Ces différentes méthodes sont présentées dans les sections ci-dessous.

III.4.1 Les différentes méthodes de couplage

Dans un couplage itératif, les simulations CFD consomment des temps de calcul importants, en particulier pour des simulations sur des grands fragments urbains. Deux stratégies de couplage visant à réduire le temps de calcul ont été proposées dans littérature (**Zhai** *et al.,* 2002) : le couplage statique et le couplage dynamique.

La **Figure III. 5** ci-dessous présente les différentes méthodes de couplage proposées par (**Zhai** *et al.,* 2002).

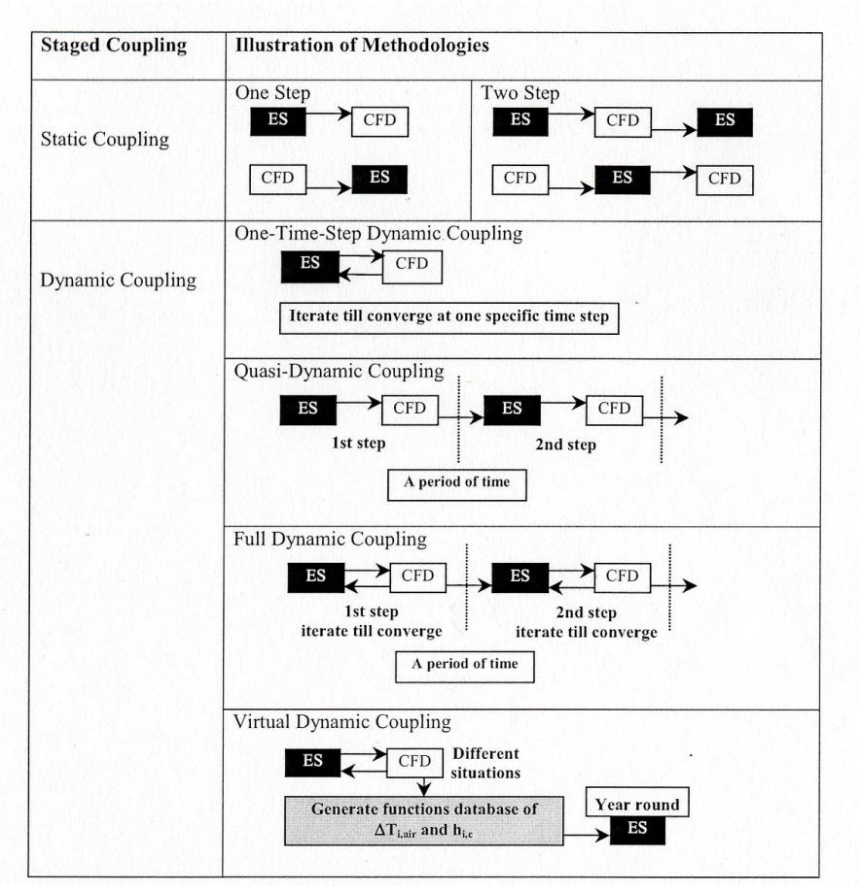


Figure III. 5 Les différentes méthodes de couplage proposées par **Zhai** *et al.,* (2002).

III.4.1.1 Couplage statique

Le processus du couplage statique comprend une ou deux étapes d'échange de données (voir **Figure III. 5** "static coupling") entre les programmes ES et CFD avec seulement quelques itérations et sans critère de convergence. Le couplage statique peut être effectué manuellement, ce qui ne nécessite pas une plate-forme d'échange entre les deux programmes. Selon **Zhai** *et al.,* (2002), une seule étape de couplage statique est satisfaisante dans le cas où le modèle ES ou le modèle CFD ou les deux ne sont pas très sensibles à l'échange des variables. Par exemple, dans

un environnement stable avec des vitesses de vent assez faible, ES est insensible à la variation de $\boldsymbol{T_{ext}}$ et $\boldsymbol{h_c}$. Pour fournir les températures de surface nécessaires pour le modèle CFD un couplage statique avec un seul pas de temps est recommandé. Cependant, si les sorties du modèle CFD ($\boldsymbol{T_{ext}}$ et $\boldsymbol{h_c}$) sont différentes de celles utilisées dans le calcul d'initialisation de ES, ES peut utiliser ces nouvelles variables de sorties comme données d'entrées pour son prochain calcul. Ce couplage ES-CFD-ES est appelé un couplage statique avec deux pas de temps. Il est recommandé dans le cas où les résultats du modèle CFD ou ES ne dépendent pas fortement de l'échange des données.

III.4.1.2 Couplage dynamique

La méthode dynamique implique un processus itératif pour obtenir une solution convergée à chaque pas de temps. Cette méthode augmente la précision des résultats. Toutefois, elle consomme un temps de calcul élevé. Suivant les besoins et la finalité des simulations et afin d'alléger les temps de calcul, **Zhai** *et al.,* (2002) ont proposé plusieurs types de couplage dynamique synthétisés sur la **Figure III. 5** (voir "dynamic coupling").

III.4.1.2.1 Couplage dynamique avec un seul pas de temps

C'est un couplage pour lequel un processus itératif est réalisé entre les deux codes avec un critère de convergence fixé. Ce couplage est adapté dans les cas où on s'intéresse seulement à un pas de temps spécifique de la journée. Généralement, il est recommandé pour des simulations qui présentent des variations thermiques faibles ou lentes. Par ailleurs, il est beaucoup utilisé dans les phases d'esquisses des projets afin d'optimiser leur conception **Zhai** *et al.,* (2002).

III.4.1.2.2 Couplage dynamique complet

Dans ce couplage, les deux modèles réitèrent plusieurs fois à chaque pas de temps pour parvenir à une solution de convergence avant de passer au prochain pas de temps. Le couplage dynamique complet est le plus précis en matière de résultats. Cependant, il consomme des temps de calcul assez importants.

III.4.1.2.3 Couplage quasi dynamique

Le couplage quasi-dynamique est un processus de couplage dans lequel les modèles ES et CFD sont couplés l'un à l'autre à chaque pas de temps, mais sans processus itératif. Ce couplage sans itération est proposé afin de réduire les temps de calcul. D'après (**Zhai** *et al.,* 2002), lorsque le pas de temps est faible (par exemple 2 à 5 minutes), le processus itératif devient inutile.

III.4.1.2.4 Couplage dynamique virtuel

Une autre façon de réduire le temps de calcul consiste à utiliser le couplage dynamique virtuel proposé par **Chen** *et* **Van der Kooi** (1988), À chaque pas de temps, le modèle CFD détermine $\boldsymbol{T_{air}}$ et $\boldsymbol{h_c}$ par interpolation des résultats du modèle ES. Le couplage dynamique virtuel est idéal pour les cas où les variations des températures de surface sont faibles. D'après **Zhai** *et al.,* (2002), si un bâtiment ne présente pas de grands changements dans son comportement thermique, le couplage virtuel dynamique peut fournir des résultats très similaires à ceux du couplage dynamique complet et permet de réduire les temps de calcul.

III.4.2 Différentes méthodes d'échange de données entre les deux modèles

Selon **Zhai** *et al.,* (2003), il existe trois méthodes d'échange de données possibles pour coupler les deux modèles. Ces méthodes, décrites ci-après, ont des effets différents la précision et la stabilité du calcul pour une simulation couplée.

Méthodes d'échanges	Données ES vers CFD	Données CFD vers ES
la méthode 1	$\boldsymbol{T_{se}}$	$\boldsymbol{h}$ et $\boldsymbol{T_{air}}$
la méthode 2	$\boldsymbol{T_{se}}$	$\boldsymbol{Q_{conv}}$
la méthode 3	$\boldsymbol{Q_{conv}}$	$\boldsymbol{h}$ et $\boldsymbol{T_{air}}$

Les résultats de cette étude ont montré que la méthode d'échange de données (1) qui transfère les températures de surface de la simulation ES vers la simulation CFD et retourne les coefficients de transfert convectif et les températures de l'air de la simulation CFD vers la simulation ES est la plus stable par rapport aux autres méthodes. **Zhai** *et al.,* (2003) ont conclu que cette méthode aboutit dans la plupart des cas à une solution de convergence. Ils ont constaté aussi que les méthodes 2 et 3 produisent beaucoup de solutions de divergence.

III.4.3 Principe du couplage itératif développé

Notre simulation couplée consiste à introduire un processus itératif d'échange de données à chaque pas de temps de calcul entre les deux outils numériques (**Couplage dynamique complet**).

Les entrées du modèle thermo-radiatif sont les propriétés thermiques et radiatives des matériaux (l'albédo, l'émissivité, la capacité thermique, la masse volumique et la conductivité), l'emplacement géographique du site, le jour de la simulation, les températures à l'intérieur des bâtiments et dans le sol et enfin, les flux solaires directs et diffus incidents mesurés sur site. Les entrées du modèle CFD sont la vitesse du frottement déterminée empiriquement, la longueur de rugosité, la direction du vent et la température de l'air météorologique. A partir de ces entrées, *Solene* calcule les flux solaires directs et diffus incidents sur les surfaces à partir des données mesurées sur site. A ce stade, le couplage peut être mis en œuvre.

Au pas de temps (**n**), à l'issue du calcul dans *Solene*, les températures de surface ($\boldsymbol{T_{se}}$), résultant du bilan thermo-radiatif résolu sont introduites comme conditions aux limites dans la simulation thermo-aéraulique réalisée par le *Code_Saturne*. Celle-ci permet d'obtenir, à proximité des parois, les températures d'air ($\boldsymbol{T_{air}}$) et les vitesses du vent ($\boldsymbol{U}$). Ces derniers sont utliseés comme condition limite pour caluler les coefficients d'échange convectif ($\boldsymbol{h_c}$) à partir de la relation empirique de **Rowley** *et al.,*[17] qui sont réintroduits avec les températures de l'air ($\boldsymbol{T_{air}}$) dans le bilan thermo-radiatif en régime transitoire du code *Solene* (**la méthode d'échange de donnée 1)**. Le couplage entre les deux modèles se poursuit de cette manière jusqu'à ce que le critère de convergence soit atteint. Dans notre cas, il correspond à un écart maximal inférieur à 0,1°C entre les températures de surfaces calculées entre deux itérations successives. La **Figure III. 6** présente l'algorithme de couplage pour un pas de temps (**n**) de la simulation.

---

[17] Dans ce travail, nous avons imposé une cohérence de traitement des conditions thermiques pariétales entre le code CFD et le code ES. En effet, à l'échelle du bâtiment, la couche limite thermique près des façades est très fine, de l'ordre de 3-5 cm et pour modéliser cette couche, le maillage devrait être extrêmement raffiné au voisinage des parois. Cependant, cette solution serait très coûteuse en temps de calcul et en nombre de mailles. Pour contourner cette difficulté, la relation empirique de **Rowley** *et al.,* (1930) a été introduite dans le *Code_Saturne* à travers la routine utilisateur du post-traitement "*usvpht*". Elle exprime le coefficient de transfert convectif local $\boldsymbol{h}$ en fonction de la vitesse de l'écoulement $\boldsymbol{U}$ au voisinage de la paroi :

$$\boldsymbol{h = 11.8 + 4.2\,U} \qquad \textbf{(III. 29)}$$

Idczak (2009) a utilisé cette relation pour déduire les valeurs des coefficients de transfert convectif à partir des vitesses de vent mesurées à l'intérieur d'une rue canyon. Ensuite, ces coefficients ont été utilisés comme données d'entrée pour *Solene* pour déterminer les températures de surface des bâtiments. La méthode a été validée sur les résultats de la campagne expérimentale JAPEX (Joint-Atreus PICADA Experiment) en comparant les résultats expérimentaux et numériques des températures pariétales.

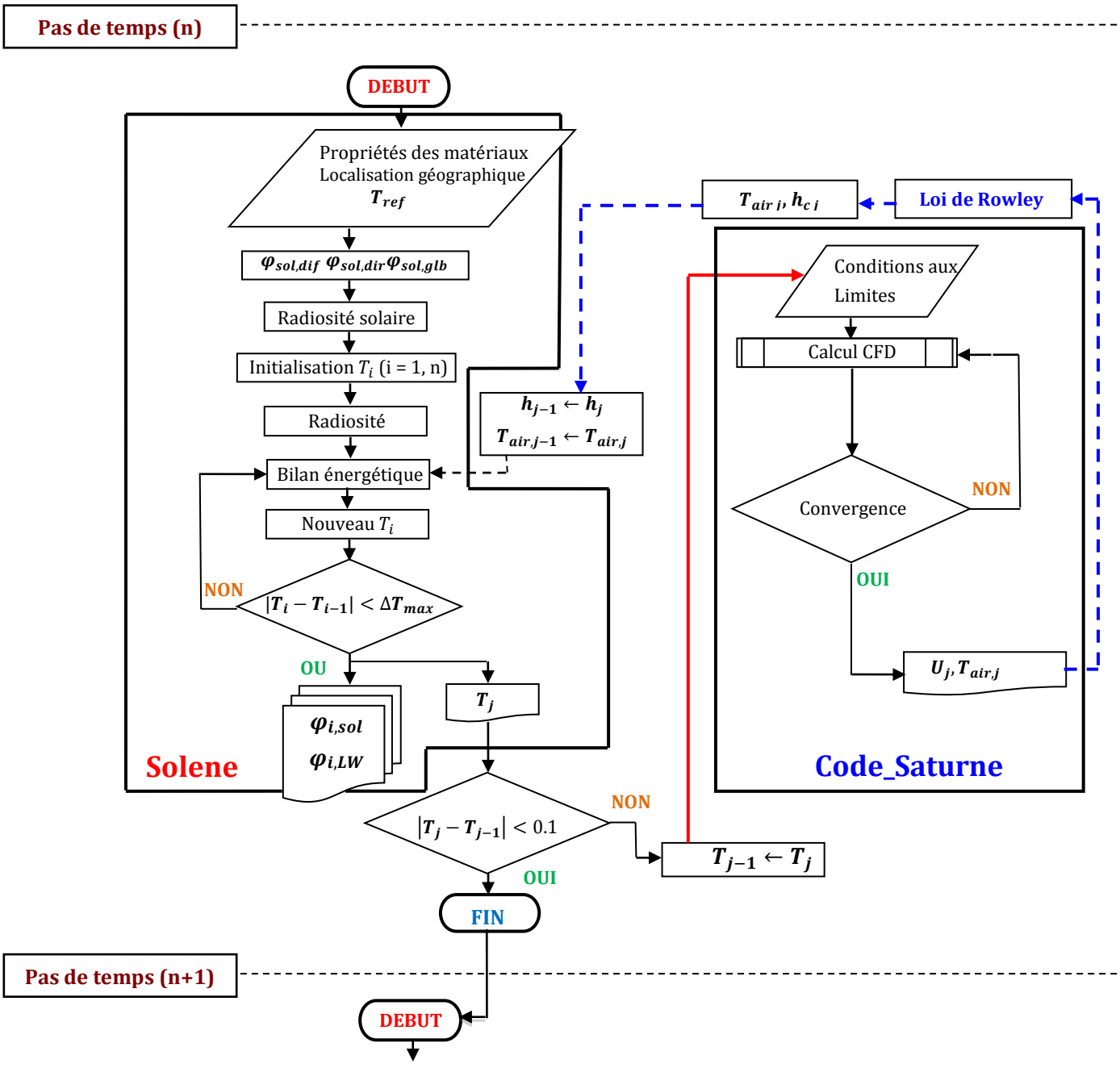


Figure III. 6 Présentation de la méthodologie itérative entre *Solene* et *Code_Saturne* pour un pas de temps(n).

III.4.3.1 Modélisation de la scène urbaine pour la simulation couplée

La modélisation de la scène urbaine se fait par l'intermédiaire du logiciel de modélisation Gambit. A partir du maillage volumique de la scène, une fonction extérieure d'import du modèle *Solene* ("fluent_to_solene") permet de récupérer le maillage surfacique de la géométrie urbaine. Cette fonction transforme le maillage surfacique modélisé dans Gambit en une géométrie triangulée avec le même nombre de mailles et une géométrie masque dans un format compatible avec *Solene* (format .cir). L'utilisation du même maillage pour les deux modèles, permet d'éviter les problèmes d'interpolations.

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté sommairement les outils de simulation numérique que nous allons utiliser par la suite pour la caractérisation du confort thermique sur plusieurs configurations d'éco quartiers. On pourra trouver une description beaucoup plus détaillée dans les publications de leurs concepteurs (**Archambeau** *et al.,* (2003) pour Code_Saturne et **Groleau** (2000) pour Solene).

Notre apport s'est limité à une adaptation de *Code_Saturne* pour le traitement des transferts thermiques pariétaux. Elles concernent aussi les conditions limites d'entrées représentatives d'un environnement urbain (présentées dans le chapitre IV), la prise en compte de la végétation comme terme source/ puits (utilisées pour des recherches futures) et enfin des ajustements au niveau du post-traitement des résultats de sortie.

Nous avons participé à la mise au point d'un couplage dynamique complet entre *Code_Saturne* et *Solene*. Son développement s'est appuyé sur les différentes préconisations suggérées dans la littérature.

Les tentatives pour combiner ou coupler différents modèles (solaire, vent, humidité, végétation, thermique du bâtiment) sont de plus en plus nombreuses (**Vinet**, 2000), (**Papadopoulos**, 2001), (**Robitu**, 2005), (**Zhai** *et al.,* 2006), (**Bouyer**, 2009). Néanmoins, la majorité de ces modèles couplés restent sans validation expérimentale ce qui ne permet pas d'évaluer la sensibilité de leurs résultats et d'apprécier leur qualité.

Dans le chapitre IV, les paramètres permettant de définir des indicateurs de confort (température de surface des bâtiments et de la rue, température de l'air, vitesse du vent et l'énergie cinétique turbulente) issus des simulations couplées sont comparés aux mesures expérimentales obtenues durant la campagne de mesure nantaise EM2PAU (Etude Micro-Météorologique sur la Propagation Acoustique en milieu Urbain) de façon à tenter une validation du modèle numérique couplé.

« Le théoricien invente le phénomène et réciproquement l'expérimentation peut entraîner une modification de la théorie.[18]»

Chapitre IV

Validation par la campagne expérimentale EM2PAU

Sommaire

IV.1 Introduction_____ 134

IV.2 Présentation de la campagne EM2PAU_____ 134

IV.3 La campagne de mesures et l'instrumentation_____ 136

IV.4 Modélisation numérique du domaine de calcul et conditions initiales et aux limites_____ 140

IV.5 Validation du modèle de couplage_____ 152

IV.6 Effet de l'orientation des parois sur leur comportement thermo-radiatif 184

IV.7 Conclusion_____ 191

[18] **Koyré,** études d'histoire de la pensée scientifique, 1966.

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une description de la campagne de mesure EM2PAU et des instruments de mesure utilisés. Cette campagne était destinée à l'étude des interactions entre les conditions micro-météorologiques et la propagation acoustique dans une rue et à l'intégration de ces effets dans des codes de calculs spécifiques de propagation acoustique dédiés aux études en milieu urbain. Certains de ses résultats ont servi de conditions initiales et aux limites et d'éléments de validation pour nos simulations numériques couplées.

IV.2 Présentation de la campagne EM2PAU

La campagne EM2PAU s'est déroulée sur une période de 27 mois entre mars 2010 et juin 2012. Elle a comporté plusieurs volets d'études qui ont réuni quatre équipes de recherche :

- l'IFSTTAR (*Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux*) ;
- le LHEEA (*Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Energétique et Environnement Atmosphérique - UMR CNRS 6588*) ;
- le CSTB (*Centre Scientifique et Technique du Bâtiment*);
- l'Université du Maine (*Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine - UMR CNRS 6613)*.

IV.2.1 Le site de mesure

La campagne a été réalisée sur le site de l'IFSTTAR (**Figure IV. 1**) situé à la périphérie Sud-Ouest de la ville de Nantes. Le terrain du site est plat et entouré de végétation. Des bâtiments à vocation de recherche sont éparpillés sur une superficie de 150 hectares.
Un bocage arboré dense borde le terrain d'étude, sur les côtés Nord, Ouest et Sud-Ouest (**Figure IV. 2**). Deux bâtiments (station d'étude du malaxage et des bureaux de recherche) d'une hauteur d'environ 20 mètres sont construits à environ 100 mètres à l'Est et au Sud-Est. Au Sud et au Nord-Est, le site est entouré d'un terrain plat de faible rugosité. Le sol de la parcelle est recouvert d'une couche d'asphalte de 5 cm.

IV.2.2 Architecture de la maquette

Sur cette parcelle ont été disposée deux rangées de containers en acier formant une configuration de rue canyon. Chaque ligne de bâtiments, construite par assemblage de quatre containers (**Figure IV. 3**) présente les dimensions suivantes : longueur L = 24 m, largeur

B=2,45 m et hauteur H = 5,20 m. La largeur de la rue est W = 3,60 m (**Figure IV. 4**) et son rapport d'aspect W/H (largeur/hauteur) est égal à 0,7. Ce rapport morphologique correspond à une géométrie de rue canyon relativement étroite.



Figure IV. 1 Vue sur le site de l'IFSTTAR à Bouguenais, Nantes, France.



Figure IV. 2 Vue aérienne de la maquette et du site d'étude.



Figure IV. 3 Assemblage de la maquette EM2PAU.

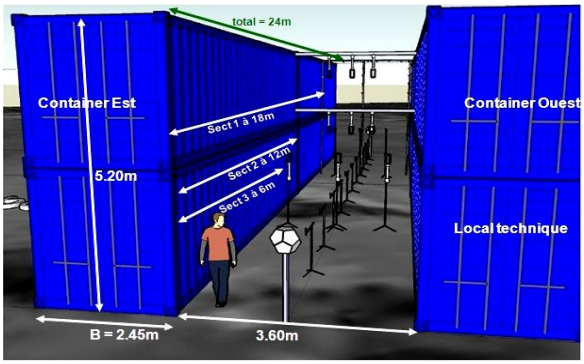


Figure IV. 4 Les dimensions de la maquette.

L'axe de la rue forme un angle de 43° avec la direction du Nord. Les façades et les toits des containers sont formés d'une tôle en acier galvanisé de 2,5 mm d'épaisseur. Un local technique de 14 m^2 est aménagé pour l'installation des systèmes d'acquisition (**Figure IV. 5**) dans la moitié du container au sol à l'extrémité Nord-Ouest de la rue. Cette partie est isolée par une couche de 45 cm de polystyrène extrudé et une lame d'air de 15 cm (**Figure IV. 6**).

Un climatiseur mobile est installé à l'intérieur du local technique pour maintenir une température ambiante pour les machines d'acquisitions (**Figure IV. 7**).

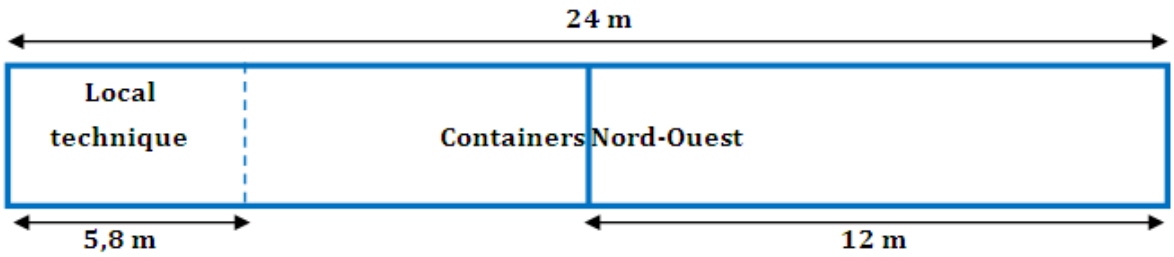


Figure IV. 5 Schéma en plan des containers Nord-Ouest.

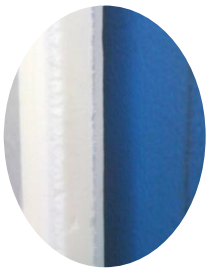


Figure IV. 6 Détail des trois matériaux composant la paroi du local technique (métal, lame d'air, polystyrène).

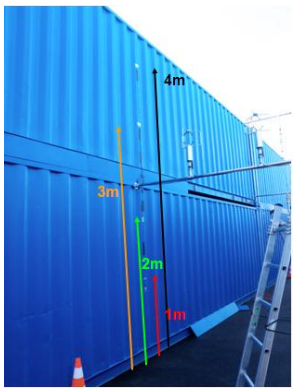


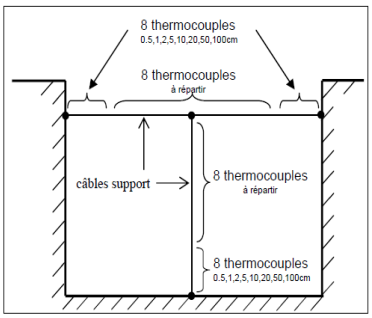
Figure IV. 7 Vue intérieure du local technique.

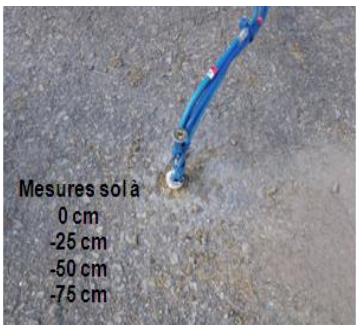
IV.3 La campagne de mesures et l'instrumentation

IV.3.1 Mesure des températures

76 thermocouples ont été utilisés lors de cette campagne : 32 thermocouples collés sur les deux façades intérieures de la rue (**Figure IV. 8 (a)**), 8 positionnés à l'intérieur des containers, 32 installés dans le plan vertical médian de la rue pour mesurer la température de l'air (**Figure IV. 8 (b)**) et 4 thermocouples sont placés dans le sol à différentes profondeurs (0cm, -25cm, -50 cm, -75cm) (**Figure IV. 8 (c)**). L'acquisition des températures se fait toutes les 6 secondes avec un moyennage sur 2 minutes.







(a) **(b)** **(c)**

Figure IV. 8 (a) 32 thermocouples collés sur les parois des containers. **(b)** 32 thermocouples installés dans le plan vertical médian de la rue, **(c)** 4 thermocouples installés à différentes profondeurs dans le sol.

L'emplacement des thermocouples choisis pour les comparaisons entre les températures de surface simulées et mesurées est précisé sur la **Figure IV. 9 à gauche**. Par ailleurs, les coordonnées de chaque thermocouple surfacique et celles des températures de l'air par rapport au point de référence sont données dans les **Tableau .IV. 1** et **Tableau .IV. 2**. L'origine du référentiel utilisé est située au sol, au milieu de la rue, à son extrémité Sud (**Figure IV. 9 à droite**).

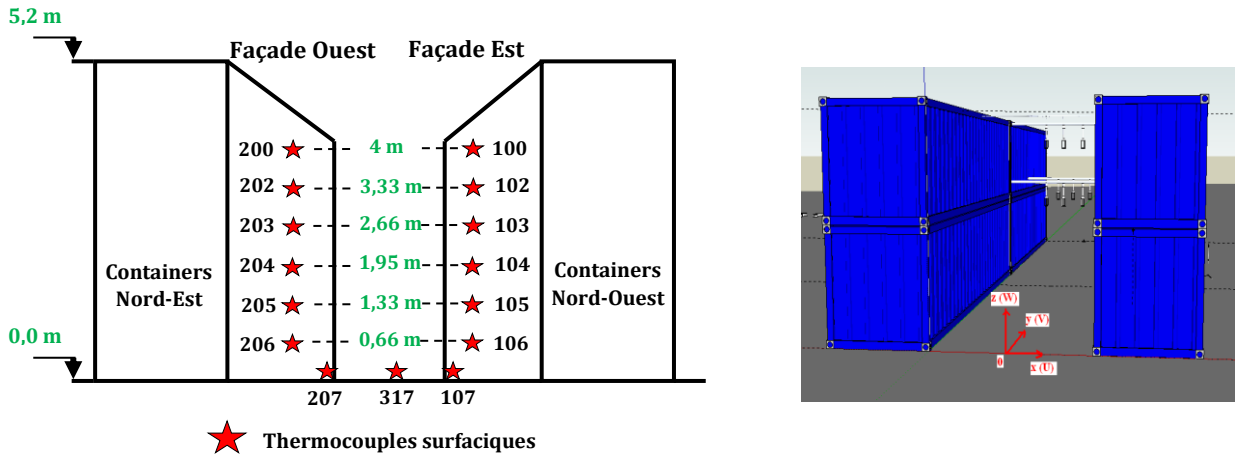


Figure IV. 9 Schéma présentant le positionnement des capteurs sur la paroi **(à gauche)** et la position du point de référence **(à droite).**

	Nombre de capteurs	Numéro du capteur	X (m)	Y (m)	Z (m)
Container Ouest	**6 température des parois**	**200**	-1,8	11,77	4,00
		202	-1,8	11,77	3,33
		203	-1,8	11,77	2,66
		204	-1,8	11,77	1,995
		205	-1,8	11,77	1,33
		206	-1,8	11,77	0,66
Container Est	**6 température des parois**	**100**	1,8	11,77	4,00
		102	1,8	11,77	3,33
		105	1,8	11,77	2,66
		104	1,8	11,77	1,995
		105	1,8	11,77	1,33
		106	1,8	11,77	0,66
Sol de la rue	**3 température du sol**	**107**	1,72	11,77	0,0
		207	-1,72	11,77	0,0
		317	0,0	11,69	0,0

Tableau .IV. 1 Position des capteurs de température de surface par rapport au point de référence (0, 0, 0) indiqué sur la **Figure IV. 9 à droite**.

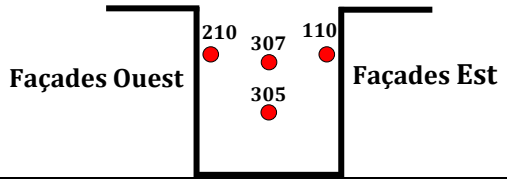
	Nombre de capteurs	Numéro du capteur	X (m)	Y (m)	Z (m)
Dans la rue	4 température de l'air	110	1,795	11,77	4,00
		210	-1,795	11,77	4,00
		305	0,0	11,77	2,2
		307	0,0	11,77	3,42
					

Tableau .IV. 2 Position des capteurs de température de l'air par rapport au point de référence (0, 0, 0) indiqué sur la **Figure IV. 9 à droite**.

IV.3.2 Mesures du vent

Le vent de référence a été mesuré par un anémomètre sonique 3D monté en tête d'un mât météorologique à 10 mètres de hauteur (**Figure IV. 10 à droite**). L'emplacement du mât (M10) par rapport à la maquette EM2PAU est visible sur la **Figure IV. 2**. Les mesures du vent ont été faites à l'aide de 6 anémomètres soniques disposés dans le plan transversal médian de la rue : 3 (S1, S2 et S3) suspendus par un câble à 4 m de hauteur et 3 (S4, S5 et S6) à 1,95 m (**Figure IV. 10 à gauche**). Les acquisitions ont été faites à 20 Hz et les vitesses ont été moyennées sur 15 minutes.

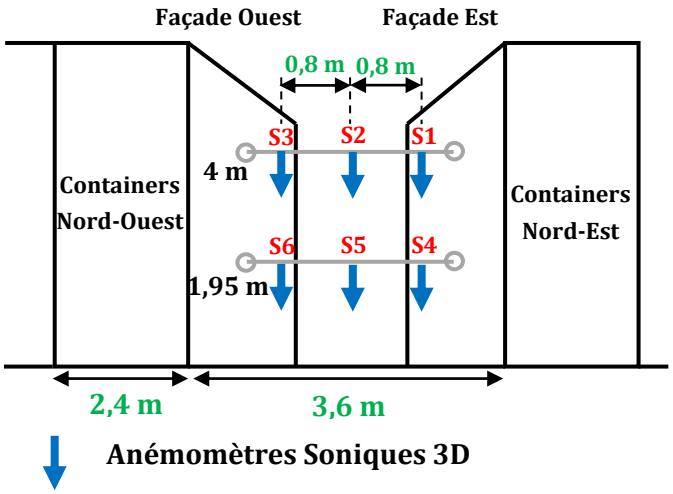




Figure IV. 10 A gauche : Position des anémomètres soniques dans la rue. **A droite :** Vue sur le mât (M10) de mesures météorologiques.

Les coordonnées exactes des six anémomètres soniques 3D par rapport au point de référence sont présentées dans le **Tableau .IV. 3**.

	Nombre de capteurs	Nom du capteur	X (m)	Y (m)	Z (m)
Milieu de la rue	**7 Anémomètres Soniques 3D**	**S1**	0,8	12,6	4,00
		S2	0,0	12,6	4,00
		S3	-0,8	12,6	4,00
		S4	0,8	12,6	1,95
		S5	0,0	12,6	1,95
		S6	-0,8	12,6	1,95
		Mât	-8,64	-13,25	10,00

Tableau .IV. 3 Position des 7 anémomètres soniques 3D par rapport au point de référence (0, 0,0) indiqué sur la **Figure IV. 9 à droite**.

IV.3.3 Mesures du rayonnement

Les mesures du rayonnement solaire incident et du rayonnement infrarouge reçus par la maquette ont été effectuées à l'aide de trois radiomètres installés sur le toit des containers. Le flux global incident est mesuré par un pyranomètre. Le rayonnement infrarouge en provenance du ciel a été mesuré par un pyrgéomètre. Ces deux radiomètres ont été montés sur la toiture des containers Ouest pour être dégagés de tout effet d'ombre (**Figure IV. 11, à gauche**). Un pyranomètre destiné à mesurer le rayonnement solaire diffus a été installé sur le sol à l'écart de la maquette (**Figure IV. 11**, **à droite**).



Figure IV. 11 A gauche : Deux radiomètres installés sur le toit des containers pour mesurer le flux global incident et le flux infrarouge en provenance du ciel. **A droite :** Un pyranomètre dédié à la mesure du rayonnement solaire diffus installé sur le sol au voisinage de la maquette.

IV.4 Modélisation numérique du domaine de calcul et conditions initiales et aux limites

IV.4.1 Période d'étude

Afin de valider notre modèle de couplage, c'est-à-dire de vérifier sa capacité à déterminer correctement les processus de transferts radiatifs et l'écoulement d'air, des simulations numériques ont été réalisées sur la configuration expérimentale EM2PAU.
Nous avons sélectionné la semaine du 5 au 12 avril 2011, représentative d'une période relativement chaude à conditions météorologiques variées :

- 6 jours ensoleillés avec ciel dégagé et 2 jours avec ciel couvert ;
- vitesses de vent variables entre 0 et 3,10 m/s mesurées à 10 m d'altitude (**Figure IV. 12**).
- vent variable qui présente toutes les occurrences de directions entre 0° et 360°. Les conditions du vent de la semaine considérée sont présentées sur la **Figure IV. 13** et **14** et pour chacun des jours de la semaine dans la **Figure IV. 15**;

Les calculs ont été effectués sur cette période de 8 jours avec un pas de temps de calcul de 1 heure, soit 192 pas de temps.

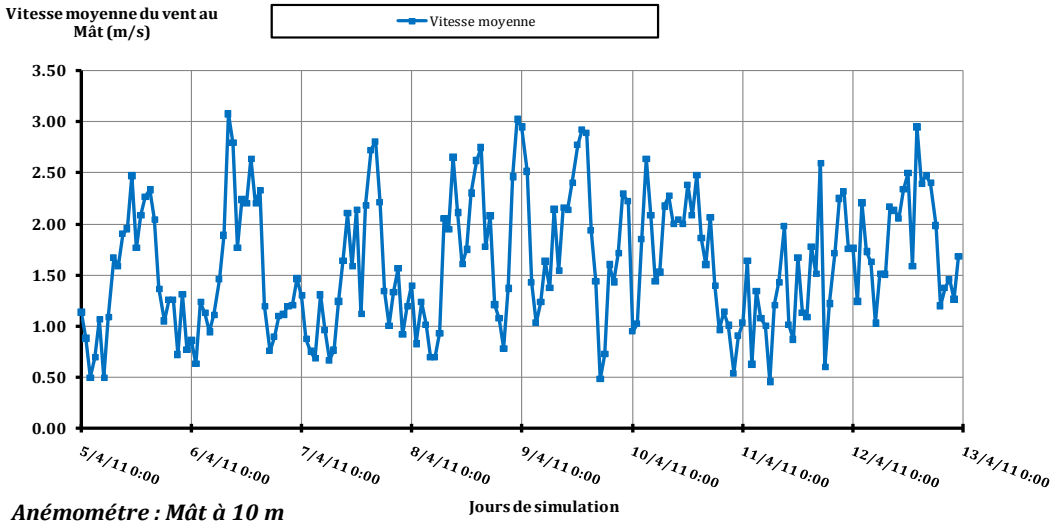


Figure IV. 12 Evolution de la vitesse moyenne de vent mesurée au niveau du mât météorologique pour la semaine du 05/04 au 12/04/2011.

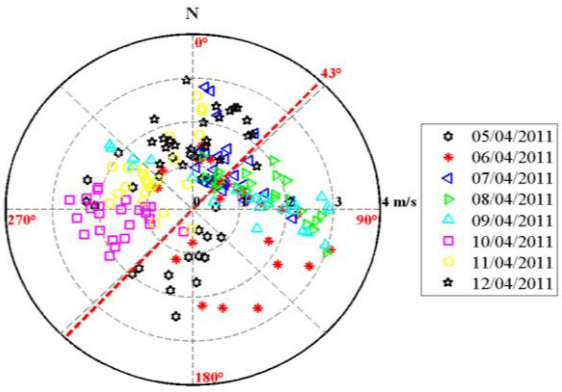


Figure IV. 13 Rose des vents pour la semaine sélectionnée.

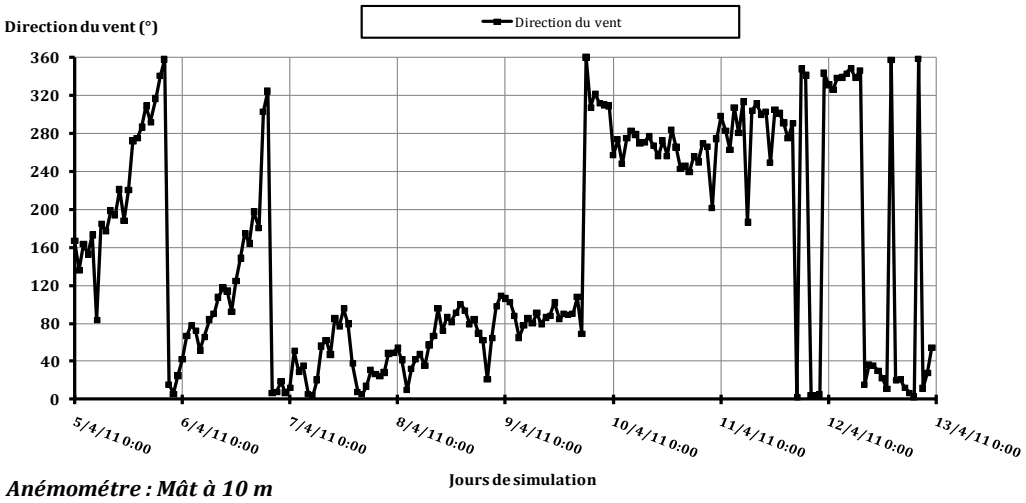


Figure IV. 14 Evolution de la direction du vent pour la semaine du 05/04 au 12/04/2011.

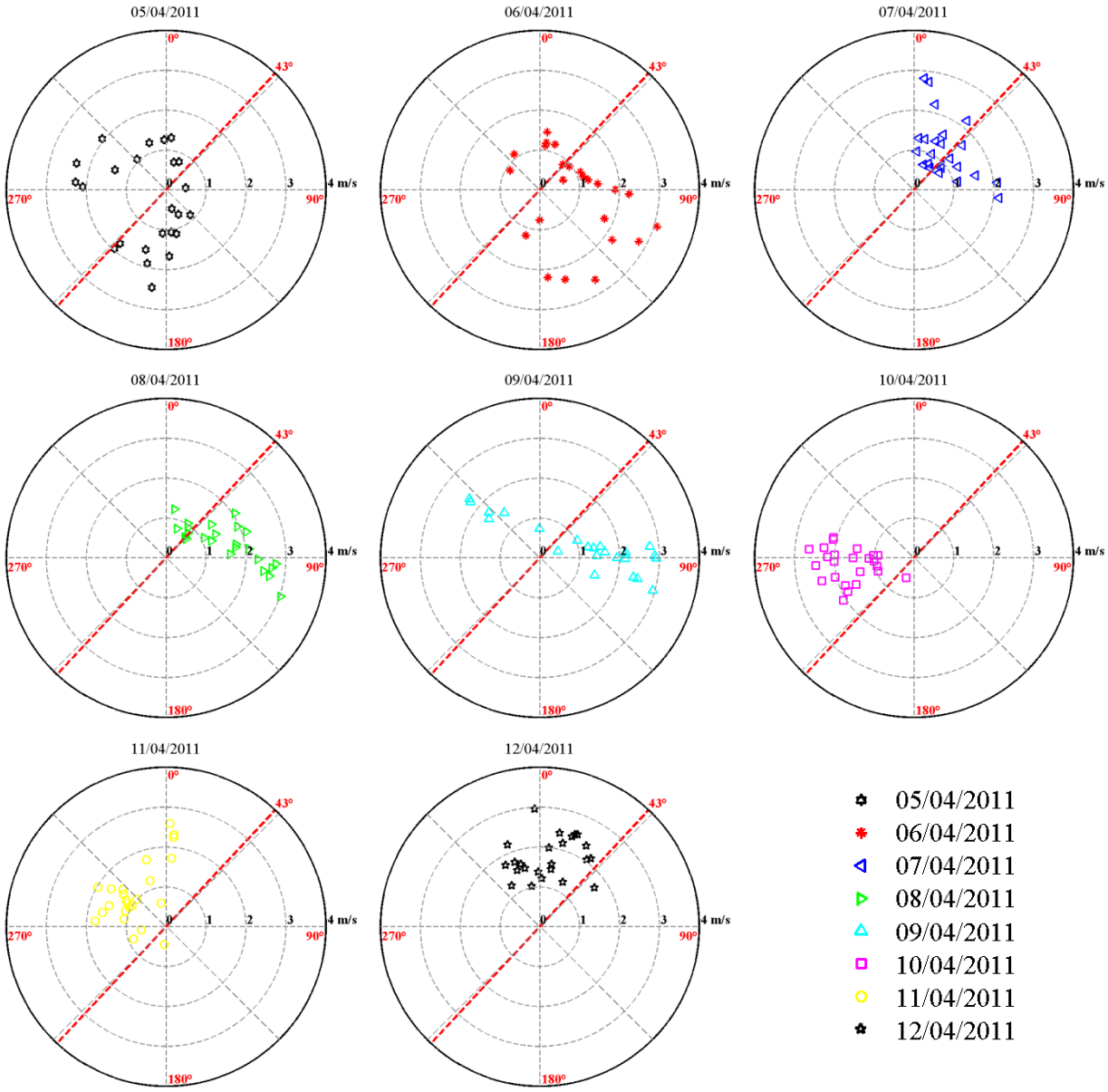


Figure IV. 15 Rose des vents pour les différentes journées de la semaine d'étude.

IV.4.2 Description du domaine de calcul

IV.4.2.1 Modélisation de la maquette EM2PAU et du ciel géodésique

La maquette est modélisée par huit blocs rectangulaires représentant les containers dont les faces sont maillées par triangulation, avec un total de 42412 facettes. Les parois des containers et de la rue intérieure ont été maillées avec des mailles régulières de 0,02 m^2. Pour le sol, une fonction d'étirement du maillage a été utilisée, comme on peut le voir sur la **Figure IV. 16**. Un

ciel clair de type CIE[19] a été choisi pour les simulations thermo-radiatives. L'hémisphère représentant le ciel a été maillé avec 1024 facettes triangulées (**Figure IV. 17**).

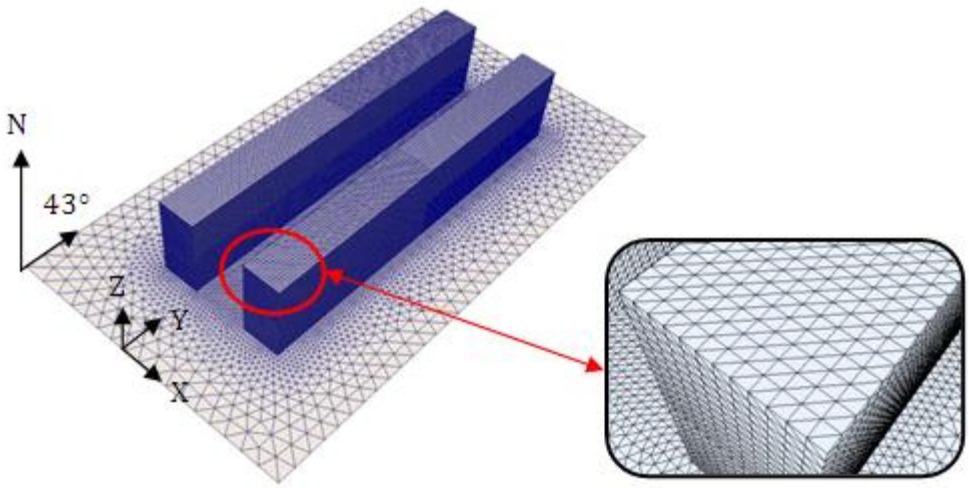


Figure IV. 16 Maillage surfacique de la maquette EM2PAU.

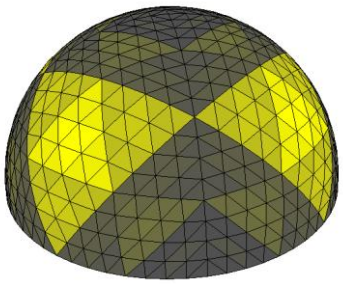


Figure IV. 17 L'hémisphère représentant le ciel géodésique maillé avec 1024 facettes triangulaires.

IV.4.2.2 Modélisation de la veine numérique

Les dimensions du domaine de calcul dépendent de la taille de la zone modélisée et des conditions aux limites utilisées. Pour un bâtiment isolé ou un fragment urbain, la frontière supérieure du domaine doit être placée entre 8 et 10 L_z où L_z est la hauteur du bâtiment le plus haut (**COST action 732, 2007**). La prise en compte des différentes occurrences de directions de vent nous a conduit à modéliser les frontières latérales et les frontière d'entrée et de sortie domaine à une distance 15 L_z . Ces règles de dimensionnement de la veine numérique ont pour objectif d'éviter les effets de blocage en plaçant la zone d'étude suffisamment loin des limites du domaine. La **Figure IV. 18** présente le schéma d'une veine numérique avec ses dimensions.

[19] C'est un ciel établi par le Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) pour lequel la luminance en un point varie en fonction de sa position sur la voute céleste (www.energie.arch.ucl.ac.be).

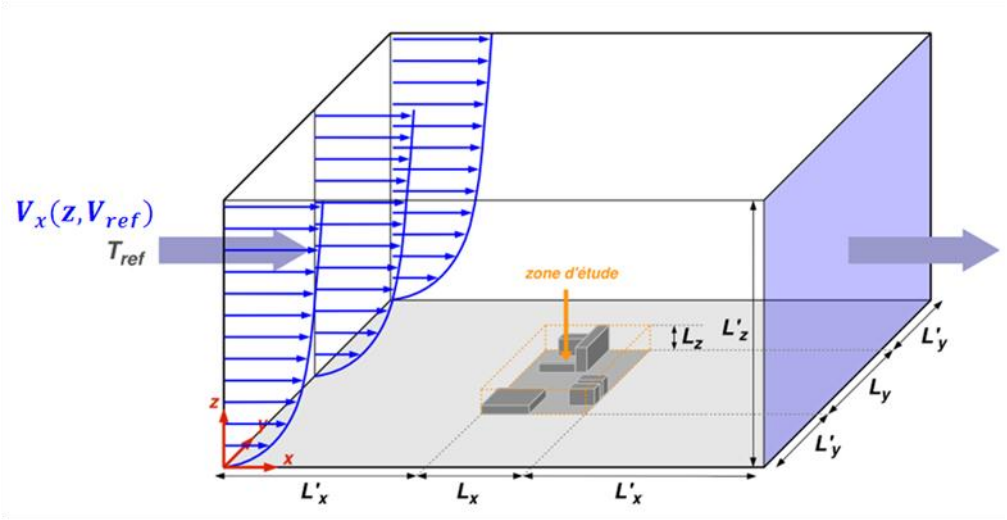


Figure IV. 18 Dimensions d'une veine numérique où $L'_x = L'_y$ =**15** L_z **et** L'_z = **10** L_z (**Bouyer**, 2009).

IV.4.3 Les conditions aux limites du modèle thermo-radiatif

Plusieurs données de mesures ont été utilisées comme conditions aux limites d'entrée pour les simulations thermo-radiatives. Toutes les données expérimentales présentées ci-dessous sont données pour chaque heure pleine (***h***) de la période d'étude et correspondent à la moyenne quart-horaire prise entre (***h*** – **15 min**) et (***h***).

IV.4.3.1 Le rayonnement solaire incident

Le rayonnement solaire global incident mesuré dépend de la hauteur zénithale et de la nébulosité du ciel. La **Figure IV. 19** montre l'évolution du rayonnement solaire (global, direct et diffus) incident, donnée à chaque heure pleine (***h***) sur la maquette pour la semaine du 05 au 12/04. Les 5 premiers jours présentent un flux solaire incident régulier, correspondant à des jours bien ensoleillés avec un ciel clair. La valeur maximale du flux global enregistrée est de 797 W/m^2. Au contraire, le rayonnement des 6^{éme} et 7^{éme} jours est irrégulier, avec un flux global incident assez faible (valeur maximale de 452 W/m^2) et essentiellement diffus. Ces deux journées sont caractérisées par un ciel couvert où l'énergie solaire diffuse est plus importante que l'énergie solaire directe. Le dernier jour de la semaine correspond à une journée ensoleillée avec un ciel clair partiellement nuageux marqué par un flux diffus légèrement supérieur à celui des 5 premiers jours. La valeur maximale du flux global mesuré est de 836 W/m^2.
Les deux séries météorologiques correspondant à l'évolution des flux solaires direct et diffus ont été utilisées comme condition de forçage dans le code *Solene* afin d'interpoler l'énergie solaire directe et diffuse incidente à chaque pas de temps de calcul.

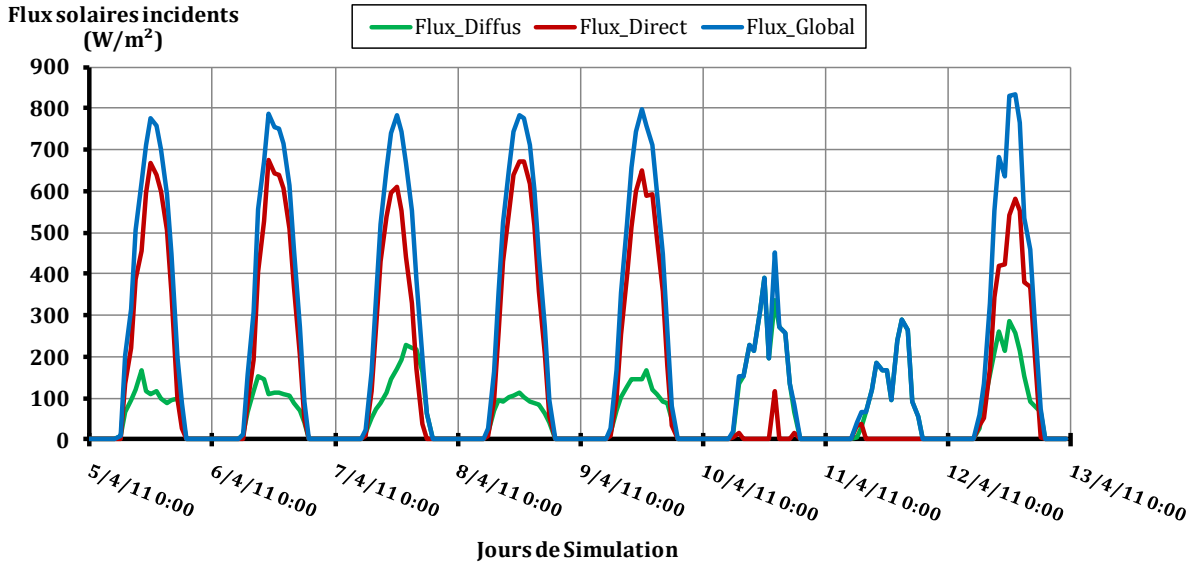


Figure IV. 19 Evolution des flux solaires incidents mesurés pour la semaine du 05/04 au 12/04/2011.

IV.4.3.2 Flux infrarouge atmosphérique

La **Figure IV. 20** présente les variations de l'intensité du flux infrarouge atmosphérique mesuré sur le toit pour la semaine du 05 au 12/04. Elle montre une évolution régulière les cinq premiers jours avec quelques fluctuations enregistrées dans la journée du 05/04, probablement dues à des passages nuageux. La valeur maximale enregistrée sur les 5 premiers jours est de 322 W/m² le 07/04 à 12h00. Le rayonnement s'amplifie les 6éme et 7éme jours pour atteindre 356 W/m² enregistré le 10/07 à 12h00. Cette amplification est due aux gouttelettes d'eau liquide de la couverture nuageuse. En effet, ces molécules absorbent les flux solaires incidents de courte longueur d'onde, puis les réémettent dans le domaine infrarouge, entrainant ainsi une augmentation du flux infrarouge atmosphérique. Le dernier jour de mesure présente les plus faibles valeurs avec une maximale de 288 W/m². Cette diminution du flux IR est due en partie à l'absence de la couverture nuageuse dans le ciel.

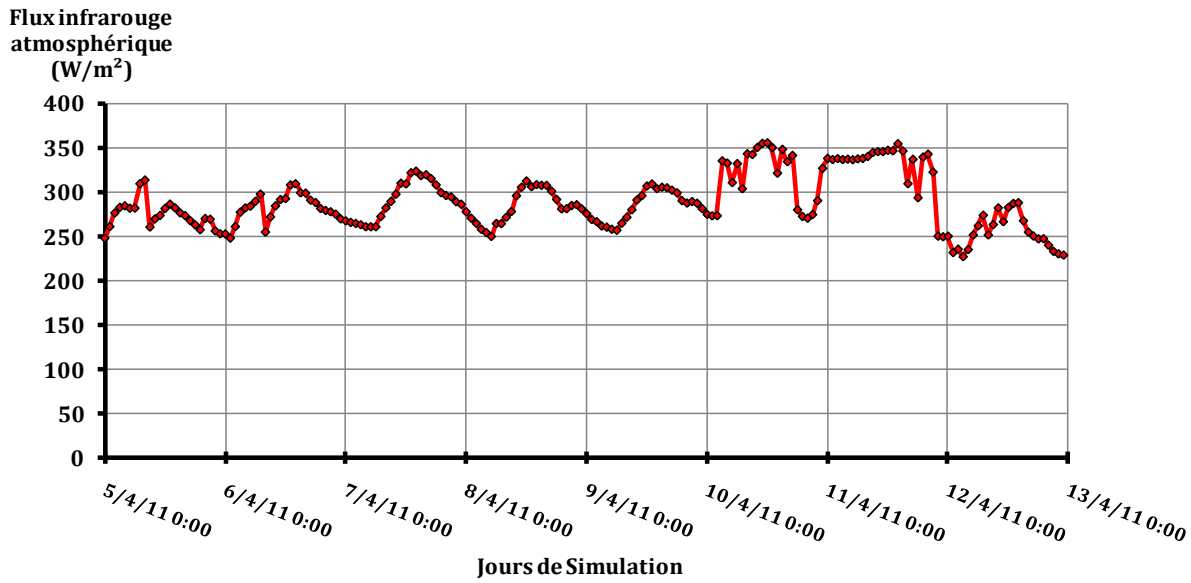


Figure IV. 20 Evolution du rayonnement infrarouge atmosphérique mesuré pour la semaine du 05/04 au 12/04/2011.

IV.4.3.3 La température de l'air à l'intérieur des containers et dans le sol

Les valeurs de la température de l'air mesurées à l'intérieur des containers et dans le sol sont utilisées comme conditions de forçage pour résoudre les équations de conduction dans le modèle de parois du code *Solene*. La **Figure IV. 21** montre que la température de l'air dans les quatre containers du haut évolue de manière périodique sur l'ensemble de la semaine considérée. Les évolutions de la température des containers du bas sont irrégulières. Ces irrégularités s'expliquent au moins partiellement par la présence d'un climatiseur d'air installé dans le local technique, dont la température d'air est plus faible par rapport aux autres containers. Une autre raison provient très probablement de l'ombre générée au cours de la journée par les containers du haut sur ceux du bas, créant alors un déphasage entre les températures des containers bas, situés à l'Est et à l'Ouest.

Pour les températures mesurées dans le sol au milieu de la rue et à différentes profondeurs, les résultats montrent qu'à partir de 50 cm de profondeur, la température est quasi-stationnaire (entre 21 C° et 22 C°). Ainsi, pour le conditionnement aux limites des simulations, une température constante de 22 C° a été considérée pour toute la période. Enfin, le coefficient de transfert convectif à l'intérieur des containers est supposé constant et égal à 10 W m^{-2} K^{-1}, valeur utilisée habituellement pour les locaux fermés (**Idczak** *et al.*, 2010)

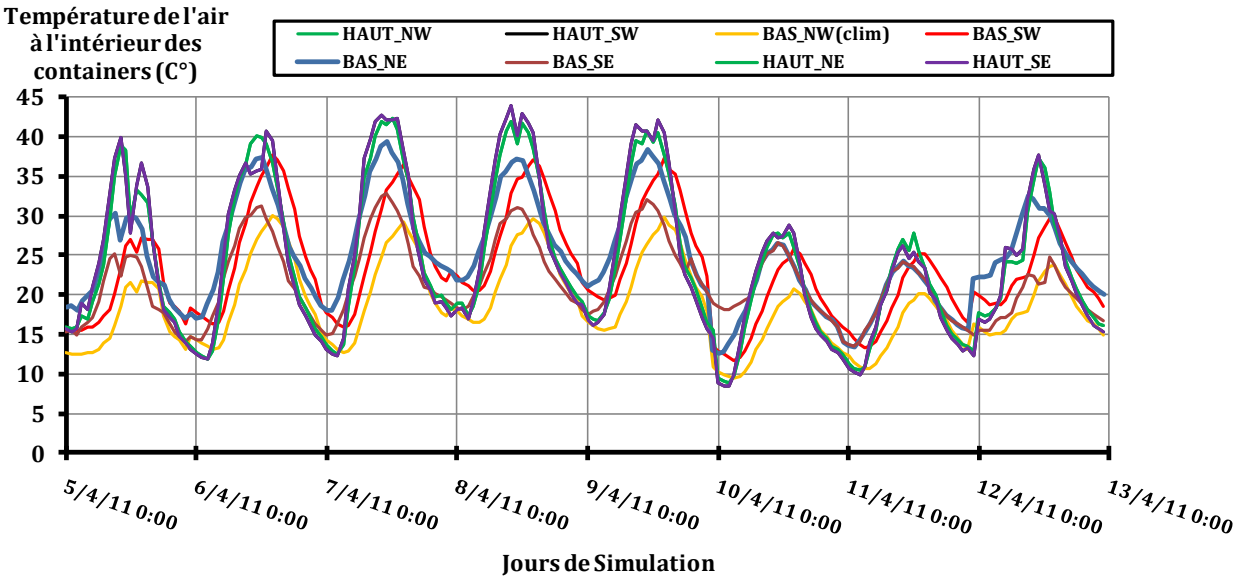


Figure IV. 21 Evolution de la température de l'air à l'intérieur des containers du haut et du bas mesurée pour la semaine du 05/04 au 12/04/2011.

IV.4.3.4 Modélisation des couches de paroi et caractéristiques physiques des matériaux

Le modèle de paroi dans *Solene* ne considère que 2 couches pour déterminer les transferts conductifs dans les murs et le sol alors que la paroi du local technique est composée de trois couches de matériaux (tôle en acier, air, polystyrène extrudé). En conséquence, la couche extérieure, à savoir la tôle en acier, n'a pas été représentée. Un tel choix est justifié dans la mesure où cette tôle est très mince, de l'ordre de 2,5 mm, et très conductrice. Les autres parois de la maquette ont été représentées par une seule couche en tôle d'acier.

Matériaux	Epaisseur φ (m)	Albédo α	Emissivité ε	Conductivité λ (W m^{-1} K^{-1})	Masse volumique ρ (kg m^{-3})	Capacité thermique C_p (J kg^{-1} K^{-1})
Murs du canyon – parois des containers						
Tôle en acier	0,0025	0,2	0,95	52	7830	500
Murs du canyon – parois du local technique						
Tôle en acier	0,0025	0,2	0,95	52	7830	500
Lame d'air	0,15	-	-	0,04	1,25	1000
Polystyrène	0,45	-	-	0,032	35	1450
Sol de la maquette						
Asphalte	0,05	0,17	0,91	2,4	1600	950
Terre	0,70	-	-	1,3	1600	1100

Tableau .IV. 4 Valeurs des paramètres thermo-physiques et solaires des matériaux utilisées pour les calculs.

Les propriétés thermiques des matériaux constituant la maquette ont été choisies à partir de la norme **ASHRAE** (**ASHRAE Fundamentals**, 2005). Les propriétés solaires (albédo) ont été estimées à partir des valeurs données par **Mazeria** (**1979**). Le **Tableau .IV. 4** donne les valeurs des paramètres thermo-physiques et solaires des matériaux utilisées pour les calculs.

IV.4.4 Les conditions aux limites physiques du modèle thermo-aéraulique

IV.4.4.1 Les conditions aux limites à l'entrée de la veine

IV.4.4.1.1 Le profil du vent

Dans le *Code_Saturne,* les caractéristiques des différentes conditions aux limites sont fixées par l'utilisateur par l'intermédiaire de la routine *(usclim)* dédiée à cet effet. A l'entrée du domaine "Inlet", des conditions de Dirichlet sont utilisées pour toutes les grandeurs transportées (vitesse, scalaires et turbulence). Le conditionnement de l'écoulement dépend du type de modèle de vent utilisé et des données météorologiques associées. A partir de ces paramètres physiques, il est possible de représenter le profil de vent à l'entrée de la veine. Plusieurs approches existent pour modéliser le profil de vitesse de l'écoulement en amont. Une première approche consiste à utiliser une loi exponentielle (**Gandemer**, 1976) de la forme :

$$\frac{u(z)}{u_{ref}} = \left(\frac{z}{z_{ref}}\right)^{\alpha} \qquad (\mathbf{IV.\ 1})$$

où u_{ref} (m /s) est la vitesse à une hauteur de référence z_{ref}. L'exposant α est souvent pris égal à 0,3.

Une autre approche consiste à modéliser le profil de vent par une loi logarithmique. Nous avons choisi ce type de profil qui a l'avantage de permettre d'y associer des profils d'énergie cinétique turbulente et de taux de dissipation, théoriquement cohérents (**Richards** *et* **Hoxey**, 1993). Dans nos simulations, le profil vertical d'entrée de vitesse de vent est modélisé par la loi logarithmique suivant (**Launder** *et* **Spalding**, 1972):

$$u(z) = \frac{U^*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \qquad (\mathbf{IV.\ 2})$$

où U^* (m/s) est la vitesse de frottement, z (m) est la longueur de rugosité aérodynamique et κ est la constante de Von Kármán égale à 0,41. Ce profil d'entrée est supposé uniforme dans la direction horizontale.
Dans cette étude, des valeurs empiriques de longueur de rugosité ont été imposées suivant la nature du site en amont de la maquette. Nous avons choisi cette approche plutôt que d'utiliser

les vitesses de frottement déterminées expérimentalement. Comme souvent sur un site réel complexe, celles-ci ne sont pas cohérentes avec le profil **IV. 2** et conduisent à des valeurs de rugosité irréalistes. A partir des longueurs de rugosité empiriques données dans la littérature (**Wieringa**, 1993) et des vitesses moyennes du vent mesurées par le mât météorologique à 10 m, les vitesses de frottement ont été déduites pour chaque pas de temps de calcul à partir de la relation **IV. 2**. Le site de la maquette a été divisé en quatre quadrants pour lesquels la rugosité a été fixée en fonction de la nature du terrain et des obstacles qui l'entourent (**Figure IV. 22**).

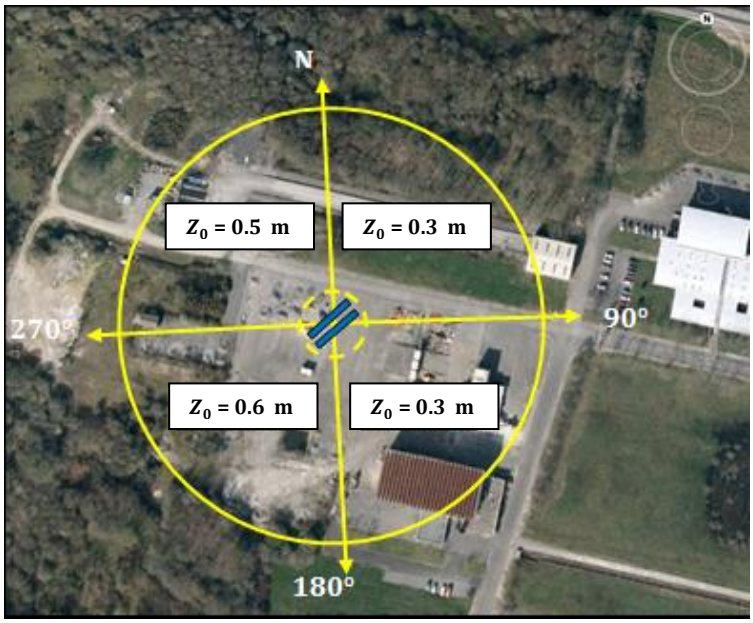


Figure IV. 22 Valeurs des longueurs de rugosité empiriques imposées selon la nature du terrain.

Il faut souligner que ces valeurs de longueur de rugosité expérimentales ont été déterminées sur des sites homogènes de grande extension horizontale (**Wieringa**, 1993). Ces valeurs sont données dans le **Tableau .IV. 5**.

Type de surface	Longueur de rugosité (m)
mer, champ de neige, désert sablonneux	**0,0005**
mer par vent très fort	**0,005**
herbe rase	**0,01**
champs ouvert cultivés	**0,05**
culture haute, rase compagne	**0,10**
bocage et habitat dispersé	**0,30**
bocage dense, zone périurbaine	**0,50**
centre des villes moyennes, forêt	**1,00**
centre des mégalopoles, forêt tropicale	**4,00**

Tableau .IV. 5 Valeurs expérimentales de longueurs de rugosité obtenues sur des sites homogènes de grande extension horizontale (**Wieringa**, 1993).

IV.4.4.1.2 Profils de l'énergie cinétique turbulente et de son taux de dissipation

Le profil de l'énergie cinétique turbulente à l'entrée de la veine est supposé uniforme et défini par la relation de **Launder** *et* **Spalding**, (1972) :

$$\boldsymbol{k = \frac{U*^2}{\sqrt{C_\mu}}} \qquad \textbf{(IV. 3)}$$

où $\boldsymbol{C_\mu}$ est la constante de diffusion turbulente utilisée dans le modèle de turbulence ($\boldsymbol{k-\varepsilon}$) égale à 0,09. Le profil du taux de dissipation d'énergie est également donné par **Launder** *et* **Spalding**, (1972) :

$$\boldsymbol{\varepsilon(z) = \frac{U*^3}{\kappa(z+z_0)}} \qquad \textbf{(IV. 4)}$$

Précisons que, les profils (**IV. 2, 3** et **4**) sont théoriquement adaptés pour des sites homogènes avec des conditions neutres. Leur utilisation n'est pas nécessairement bien adaptée au site de la campagne EM2PAU.

IV.4.4.1.3 La température de l'air extérieur

La température de l'air extérieur est supposée égale à celle mesurée par le thermocouple 307 localisée à l'intérieur de la rue. La **Figure IV. 23** présente les variations de la température moyenne de l'air extérieur mesurée au cours de la semaine du 05 au 12/04. Les cinq premiers jours (bien ensoleillés avec ciel clair) ont été les plus chauds de la semaine avec une température maximale de 29°C atteinte le 07/04 à 14h00. Les trois derniers jours ont enregistré des températures plus faibles avec une valeur maximale de 17°C enregistrée le 12/04 en milieu de journée. Nous considérons que l'atmosphère est neutre durant la semaine d'étude (pas de stratification atmosphérique).

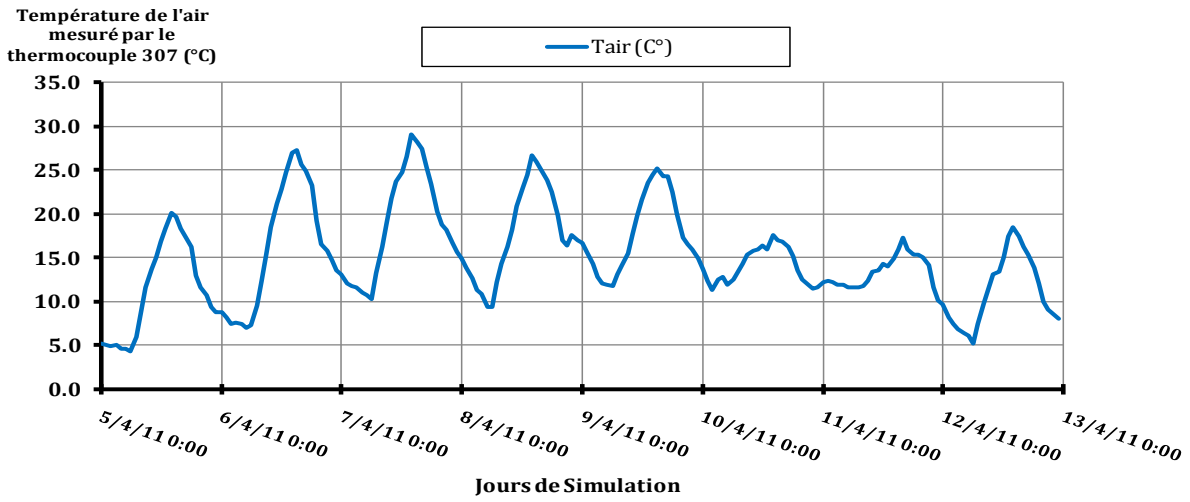


Figure IV. 23 Evolution de la température de l'air extérieur pour la semaine du 05/04 au 12/04/2011.

IV.4.4.2 Les conditions aux limites sur les autres frontières de la veine

Les conditions aux limites sur les autres frontières de la veine :

- **Lorsque le vent est incident du Nord, Sud, Est et Ouest** : des conditions de symétrie sont utilisées sur les frontières latérales et supérieure de la veine, correspondant à des flux nuls imposés à toutes les grandeurs moyennes. Sur la frontière de sortie de la veine, on applique des conditions de Neumann de continuité des flux ;
- **Lorsque le vent est oblique** : nous considérons deux frontière de rentrées et deux de sorties avec une condition de symétrie pour la frontière supérieure de la veine.

IV.4.5 Les paramètres numériques du calcul

IV.4.5.1 Format d'entrée et de sortie

Le format des fichiers de maillage lus par le *Code_Saturne* est le format neutral "*.neu*" produit par le mailleur GAMBIT du code FLUENT. En format de sortie, nous avons choisi le format *EnSight-Gold* lu par le logiciel de visualisation en libre accès "Paraview" utilisé par la suite pour le post traitement des résultats. Ce format peut représenter tous les éléments «classiques» ainsi que des polygones et des polyèdres quelconques. En outre, il offre la possibilité de découper les maillages en plusieurs parties pour une utilisation parallèle en mémoire distribuée.

IV.4.5.2 Le recollement conforme des parties du domaine

Le domaine de calcul été divisé en deux parties distinctes recollées l'une à l'autre en utilisant la fonction de recollement conforme proposée par le préprocesseur de *Code_Saturne*. La première

partie comprend la maquette EM2PAU avec un maillage volumique raffiné et tétraédrique (**Figure IV. 24 à droite**). La seconde partie comprend la veine numérique avec un maillage quadrangulaire plus grossier (**Figure IV. 24 à gauche**). L'objectif de cette technique de division est de permettre la réduction du nombre de mailles volumiques et des temps de calcul.

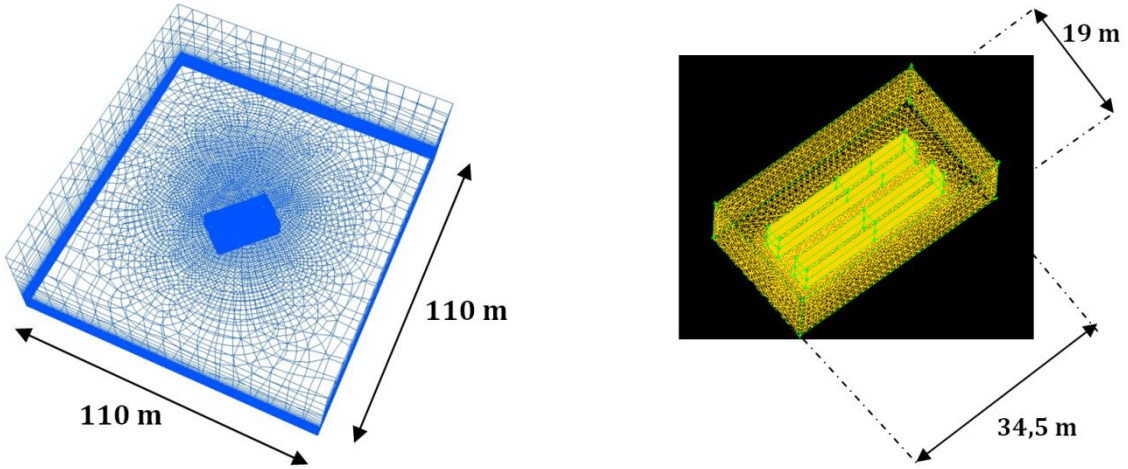


Figure IV. 24 Division du domaine de calcul en deux parties: **A gauche** : la veine numérique avec un maillage hexaédrique. **A droite :** la maquette EM2PAU avec un maillage tétraédrique.

IV.4.5.3 Parallélisation du domaine de calcul

Cette méthode consiste à décomposer le domaine en plusieurs parties virtuelles. Elle permet une accélération importante des calculs en utilisant les potentialités qu'offre une machine de calcul multi-processeurs. Les processeurs peuvent travailler en mémoire partagée avec une bande passante qui va de quelques unités à quelque dizaines d'unités (case "*nombre de processeurs*" de l'onglet "*option avancée*" du préprocesseur).

Les calculs ont été effectués sur une station de calcul de type "Fujitsu Siemens Celsius m470" présentant des "biprocesseurs" Xeon E 5520 2,27 GHZ avec 4 GO de mémoire et 8 processeurs réels. Le temps de calcul effectué sur 8 processeurs pour simuler la semaine d'étude est d'environ 16 jours.

IV.5 Validation du modèle de couplage

La validation du modèle de couplage est divisée en deux volets :

On présente une validation statistique sur la base des paramètres statistiques proposés par **Chang** *et* **Hanna**, (2004) pour tester globalement la performance des modèles numériques de simulation sur la vitesse moyenne du vent, la température de l'air et l'énergie cinétique turbulente simulées par le *Code_Saturne* et les températures de surface calculées par le code *Solene*.

Dans la seconde partie de cette section, on précise la validation par des comparaisons locales aux données expérimentales.

IV.5.1 Validation statistique

On mesure ici les performances du modèle de couplage à l'aide des paramètres statistiques proposés et décrits en détail par **Chang** *et* **Hanna**, (2004). Les principaux paramètres proposés sont le biais fractionnel FB (« Fractionnal Bias »), le biais géométrique moyen GM (« Geometric Mean bias »), l'erreur quadratique moyenne normalisée NMSE (« Normalized Mean Square Error »), la variance géométrique GV (« Geometric Variance») et enfin le facteur 2 (« FAC2 »). Leurs définitions sont les suivantes :

$$FB = \frac{(\overline{C_0} - \overline{C_m})}{0.5(\overline{C_0} + \overline{C_m})} \quad \textbf{(IV.5)}$$

$$GM = exp\left(\overline{lnC_0} - \overline{lnC_m}\right) \quad \textbf{(IV.6)}$$

$$NMSE = \frac{(\overline{C_0 - C_m})^2}{\overline{C_0}\,\overline{C_m}} \quad \textbf{(IV.7)}$$

$$GV = exp\left[\left(\overline{lnC_0 - lnC_m}\right)^2\right] \quad \textbf{(IV.8)}$$

$$FAC2 = 0.5 \leq \frac{C_m}{C_0} \leq 2.0 \quad \textbf{(IV.9)}$$

où C_0 et C_m sont respectivement les valeurs expérimentales et les résultats du modèle et où le surlignage désigne la moyenne sur l'ensemble des données disponibles. Dans le cas présent, la moyenne porte sur l'ensemble des capteurs (thermocouples ou anémomètres présentés dans les sections **IV.3.1** et **IV.3.2**.

Un modèle parfait donnerait des valeurs nulles pour les paramètres FB et NMSE et égales à 1 pour les paramètres GM, VG et FAC2. **Chang** *et* **Hanna**, (2004) ont donné des intervalles indicatifs pour considérer comme "acceptable" la performance d'un modèle (**Tableau .IV. 6**).

FB	GM	NMSE	GV	FAC2
-0,3 < FB < 0,3	0,7 < GM < 1,3	NMSE < 4	GV < 1,6	FAC2 > 0,5

Tableau .IV. 6 Intervalles indicatifs pour considérer que les performances d'un modèle numérique sont satisfaisantes.

Chang *et* Hanna, (2004) ont observé la forte sensibilité des grandeurs GM et VG aux valeurs très faibles des vitesses et proposent l'utilisation d'une valeur seuil de vitesse pour le calcul de ces deux paramètres. Pour les vitesses moyennes, nous avons fixé la valeur seuil à 0,04 m/s. Les résultats de cette étude statistique sont présentés dans le **Tableau IV. 7**.

Variables physiques	FB	GM	NMSE	GV	FAC2
Vmoy	-0,11	0,79	0,29	1,63	0,72
Tair	0,05	1,05	0,09	1,01	0.90
Tke	-1,25	0,30	5,95	12,41	0,32
Ts	-0,02	0,99	0,02	1,01	0.99

Tableau IV. 7 Paramètres statistiques calculés pour la vitesse moyenne, la température de l'air, l'énergie cinétique turbulente et la température des surfaces.

On constate que les résultats obtenus avec *Code_Saturne* sont satisfaisants avec des bonnes performances pour la vitesse moyenne et la température de l'air : FAC2 de 0,72 et 0,90, NMSE de 0,29 et 0,09, GM 0,79 et 1,05 et FB de -0,11 et -0,02 respectivement. Un GV de 1,63 pour la vitesse moyenne témoigne de la sensibilisé du modèle aux faibles valeurs de vitesse du vent. L'analyse montre aussi une mauvaise performance observé pour l'énergie cinétique turbulente (FAC2 = 0,32). Cela est dû probablement à la mauvaise représentation des profils de turbulence dans la section d'entrée (eq. **IV.3** et **IV.4**) à partir de la théorie de la couche limite, mais aussi aux déficiences connues du modèle $(k-\varepsilon)$ dans les configurations impactantes et recirculantes. L'énergie cinétique turbulente est ainsi fortement sous-estimée dans nos simulations.

En revanche, les résultats sur les températures de surface témoignent d'une très bonne performance du modèle avec des valeurs presque parfaites : FAC 2 de 99 %, NMSE et FB pratiquement nuls (0,01 et 0,05) et VG et GM pratiquement égaux à 1.

Pour conclure, le modèle couplé donne des résultats très satisfaisants pour les températures de surface et de l'air et des bons résultats pour les vitesses moyennes du vent. Cependant, pour l'énergie cinétique turbulente, il présente des résultats de mauvaise qualité.

IV.5.2 Validation par comparaisons locales aux données expérimentales

L'évolution temporelle des températures de surfaces simulées et mesurées sont comparées à l'emplacement exact des thermocouples pour l'ensemble de la semaine considérée (du 05/04 au 12/04). Ces comparaisons concernent les façades extérieures des containers (Est et Ouest côté rue) et le sol de la rue.

On présente ensuite une comparaison entre l'évolution de la température de l'air simulée et mesurée pour la semaine d'études. Les comparaisons concernent 4 thermocouples: 2 situés à

deux hauteurs différentes au milieu de la rue et 2 installés près des façades Est et Ouest. L'objectif est d'analyser l'impact de l'altitude sur la température de l'air et de vérifier si le modèle thermo-aéraulique simule finement l'évolution thermique près des parois.

Les composantes longitudinales V et transversales U mesurées par les deux soniques S2 et S5 (**Tableau .IV. 3**) situés au milieu de la rue à deux hauteurs différentes sont comparées aux résultats de simulation. Pour la composante verticale W, les comparaisons concernent les soniques S1 et S3 situés de part et d'autre des façades de la rue à 4 m de hauteur (**Tableau .IV. 3**).

Enfin, l'évolution temporelle de l'énergie cinétique turbulente simulée est comparée aux données expérimentales pour les sonique S2 et S5 (**Tableau .IV. 3**). D'autres comparaisons (calculs/expériences) sont présentées dans **l'annexe IV**.

IV.5.2.1 Températures de surface

Les résultats analysés ci-dessous correspondent aux évolutions au cours d'un cycle diurne de la température des surfaces extérieures et des flux pariétaux à différentes hauteurs des parois de la rue ainsi qu'à différents emplacements au sol.

IV.5.2.1.1 Façades de la rue

Les résultats simulés et mesurés présentés sur les **Figure IV. 25**, **26** et l'**Annexe IV. Figure. 1** (pour la façade Ouest) et les **Figures IV. 29**, **30** et l'**Annexe IV. Figure. 2** (pour la façade Est), montrent un bon accord. L'adéquation des résultats provient en particulier du forçage des températures intérieures des containers mesurées à chaque pas temps, mais aussi de la faible inertie thermique de la paroi des containers en acier peint (2,5 mm d'épaisseur). En effet, le forçage thermique est particulièrement brusque au moment de l'ensoleillement, le comportement thermique des surfaces est fortement dépendant de l'énergie solaire incidente et non pas du modèle de paroi et de l'inertie des couches pariétales.

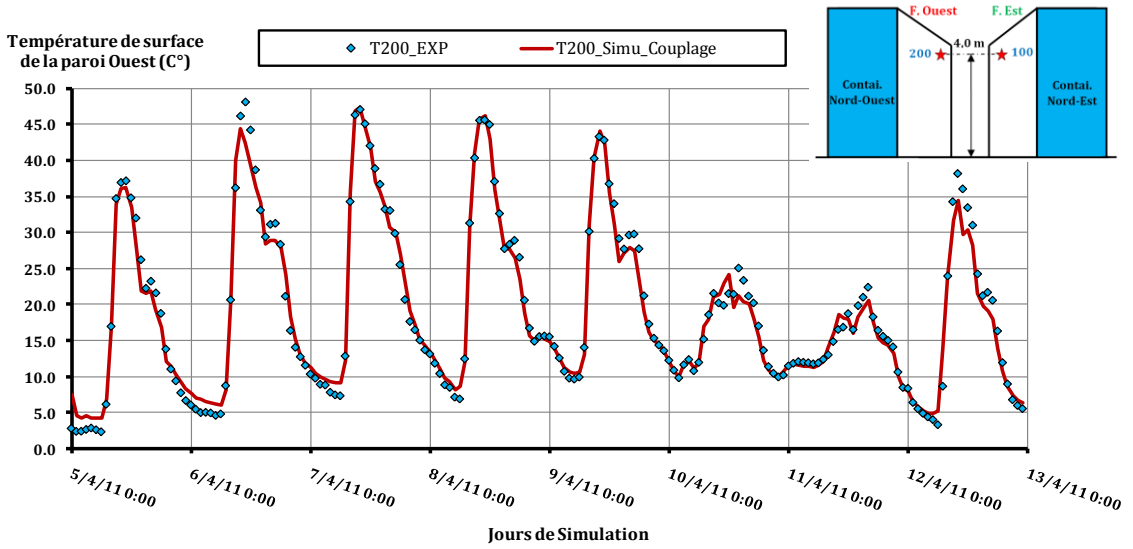
On peut observer une petite sous-estimation des pics en milieu de journée et une surestimation des minimas en début de matinée. Ces écarts sont probablement imputables au pas de temps horaire choisi pour les conditions aux limites d'entrée, créant ainsi un lissage des résultats qui peut expliquer les extrema écrêtés.

a) Analyse des résultats de la façade Ouest

La façade Ouest est la première façade soumise au soleil le matin. Les quatre courbes des **Figure IV. 25** et **26** montrent que l'évolution journalière de la température de cette façade présente un

pic matinal et un palier dans la phase descendante l'après-midi. Le premier se situe aux alentours de 10h00 pour les capteurs 200 et 202 et vers 11h00 pour les capteurs 204 et 206, correspondant au moment où l'élément de surface reçoit directement le soleil. Le palier, observé vers 16h00, est plus faible et correspond au moment où la façade opposée est éclairée directement par le soleil. Ce second maximum relatif est dû aux multi-réflexions des flux solaires générés par la façade opposée et, pour les capteurs positionnés en partie basse, par le sol.

Le capteur (200) présente les températures de surface maximales par rapport aux autres capteurs situés plus bas. En effet, compte tenu de sa position, il est le premier à recevoir l'énergie solaire incidente le matin à partir de 07h00. L'ensoleillement perdure jusqu'à 12h00, avant que l'incidence ne se réduise lorsque l'azimut solaire approche de la direction Sud. Les capteurs (202, 204 et 206) reçoivent l'énergie solaire incidente avec un décalage temporel par rapport au capteur 200 (**Figure IV. 27**). Ce décalage temporel, engendré par l'effet masque de la façade Est (**Figure IV. 28**), varie suivant la hauteur du capteur. Par rapport au capteur (200), il est de l'ordre de 1 heure (08h00) pour le capteur 202, de 3heures (10h00) pour le capteur 204 et de 5 heures pour le capteur 206 (12h00).
Les valeurs maximales des températures de la façade Ouest sont observées à 10h00 pour les journées ensoleillées, atteignant la valeur de 47°C lors de la journée la plus chaude le 07/04 lorsque l'incidence des rayons du soleil est pratiquement perpendiculaire à la paroi. Pour les journées couvertes, cette valeur maximale est de 24°C, le 10/04 à 12h00, alors que le rayonnement solaire direct était très faible toute la journée. Au cours de la semaine, l'écart maximal de température le long de la paroi est de 7°C entre le capteur 200 et 206. Des résultats similaires ont été observés par **Niachou** *et al.,* (2008) pour le cas d'une rue canyon à Athènes en Grèce. Leur étude était centrée sur les caractéristiques thermiques d'une rue canyon typique orientée dans la direction Nord-Est et Sud-Ouest. **Niachou** *et al.,* (2008) ont alors observé que l'écart maximal de température pendant la journée le long des parois atteignait 13°C entre le quatrième étage et le rez-de-chaussée.



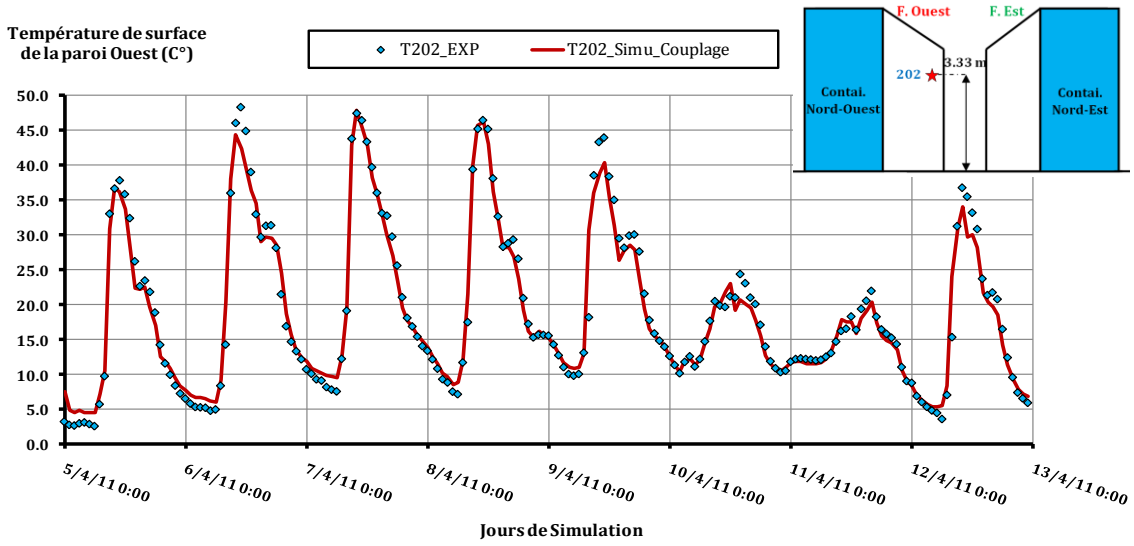
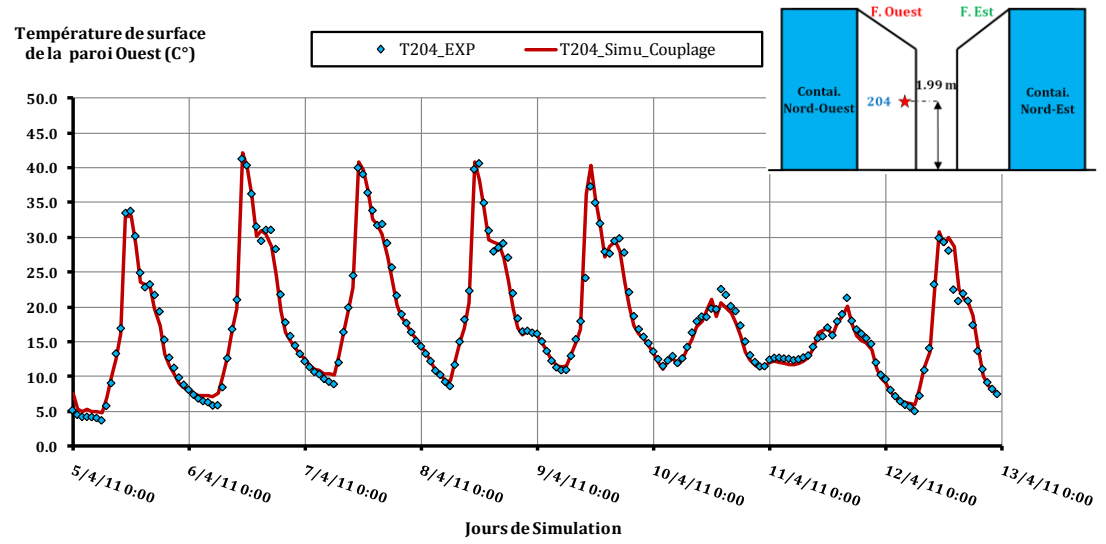


Figure IV. 25 Evolution des températures de surface simulées et mesurées pour les capteurs 200 et 202.



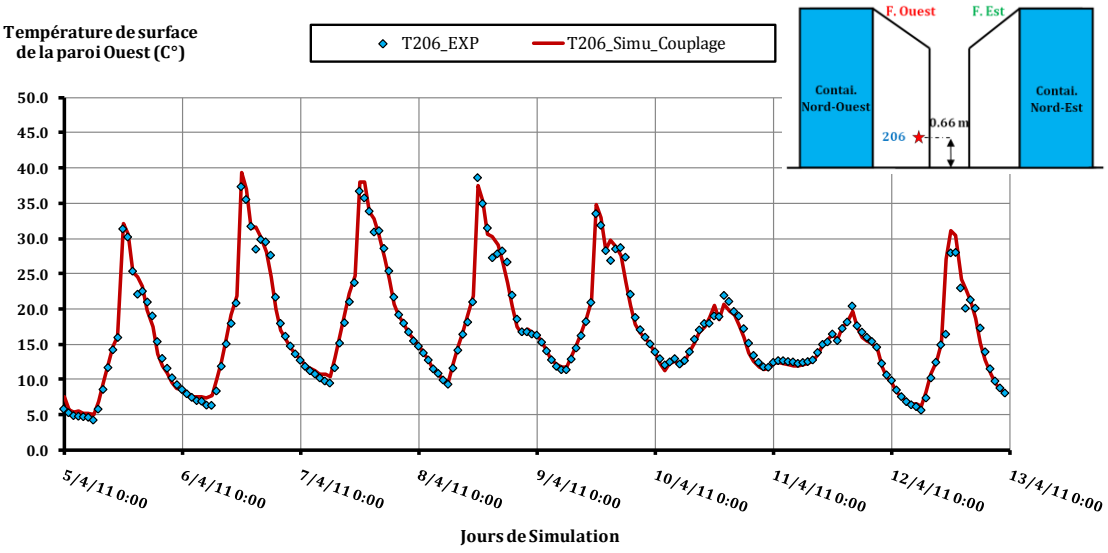


Figure IV. 26 Evolution des températures de surface simulées et mesurées pour les capteurs 204 et 206.

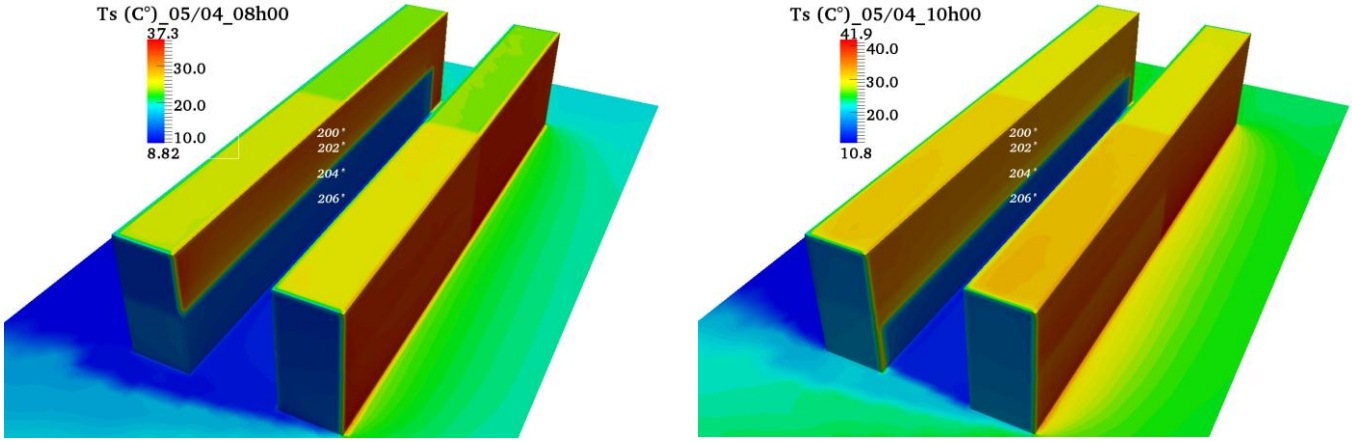


Figure IV. 27 Représentation du déphasage des températures de surface pour la façade Ouest, à 08h00 (**à gauche**) et à 10h00 (**à droite**) le 05/04.

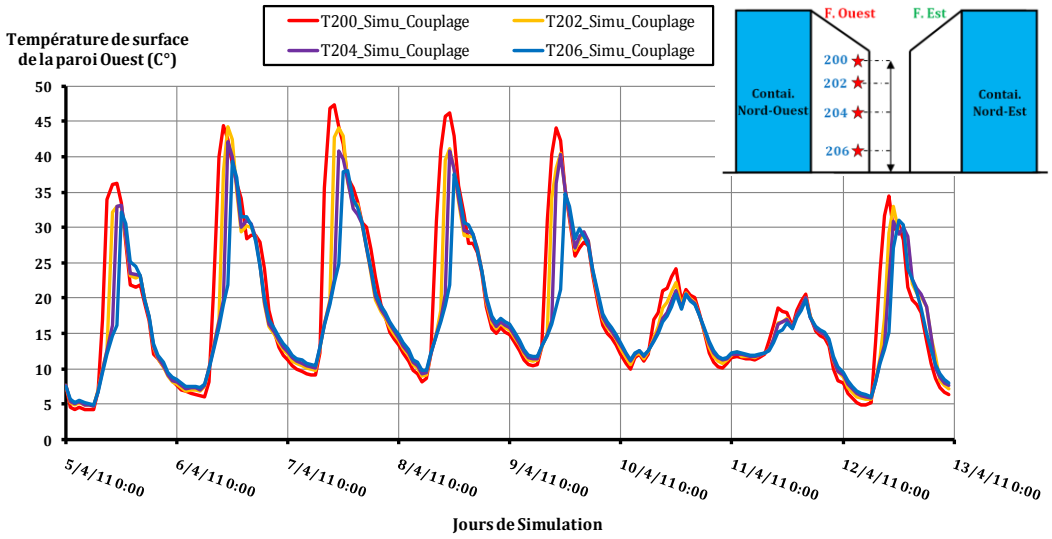
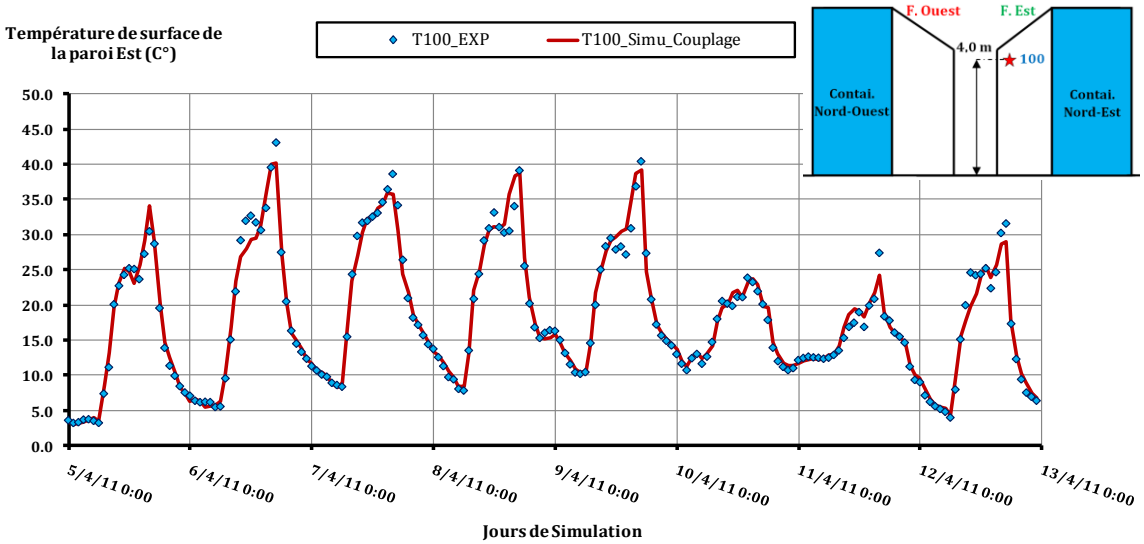


Figure IV. 28 Evolution des températures de surface simulées pour les capteurs 200, 202, 204 et 206 montrant le déphasage temporel entre les différents capteurs.

b) Façade Est

Les **Figure IV. 29** et **30** montrent que, sur cette façade, le palier matinal lié aux inter-réflexions intervient dans la matinée. Ce palier est faiblement marqué et rapidement suivi d'une période d'ensoleillement direct. En revanche, le pic de température dû à l'ensoleillement direct est moins intense que celui de la façade Ouest.

Les **Figure IV. 29** et **30** montrent aussi que la valeur des maxima est de l'ordre de 39,6°C, très voisine pour tous les capteurs. Cette valeur maximale reste stable ± 1,5°C sur une durée de 3 heures environ pour les capteurs 100 et 102. Cependant, pour les capteurs 104 et 106, cette valeur est atteinte à un instant, puis chute immédiatement. En effet, la façade Est reçoit le soleil de 15h00 à 18h00. A 15h00, le soleil est assez haut et irradie tous les capteurs de la paroi (**Figure IV. 31 à gauche**). L'intensité de l'énergie solaire incidente sur la paroi diminue ensuite progressivement avec la hauteur zénithale. En fin de journée, les ombres engendrées par les masques sont projetées en premier lieu sur les parties basses de la paroi Est (**Figure IV. 31 à droite**). L'effet de masque provoque ainsi un décalage temporel dans la durée d'insolation. Les capteurs 100 et 102 reçoivent l'énergie solaire pendant une durée de 3 heures (15h00 à 18h00), de 2 heures pour le capteur 104 (15h00 à 17h00) et seulement d'1 heure pour le capteur 106 (15h00 à 16h00). Au cours de la semaine, l'écart maximal de température sur cette paroi n'est que de 2°C entre les capteurs 100 et 106.



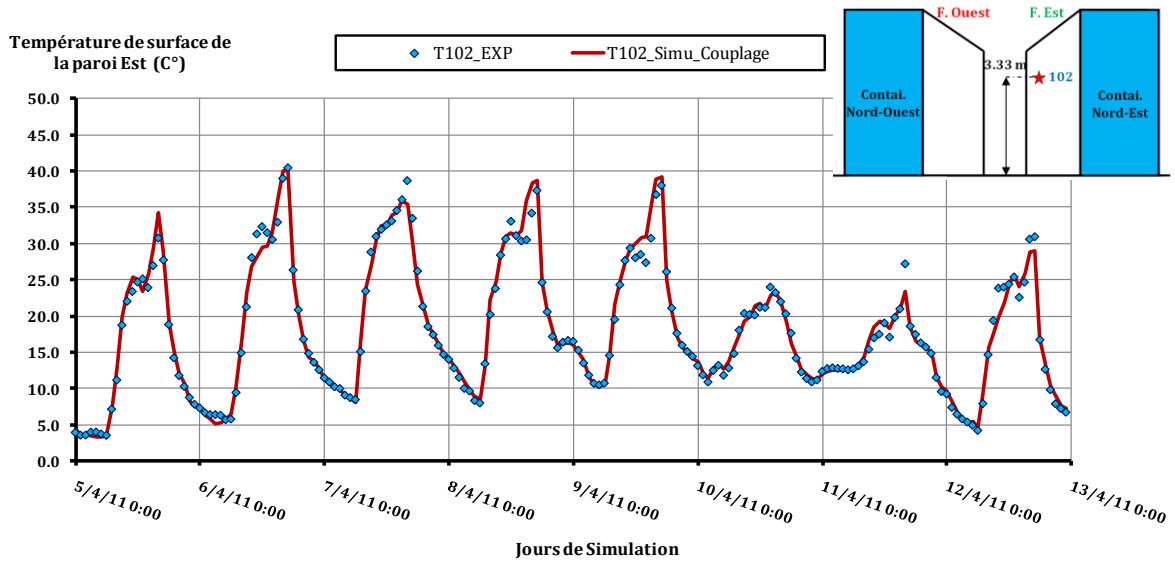
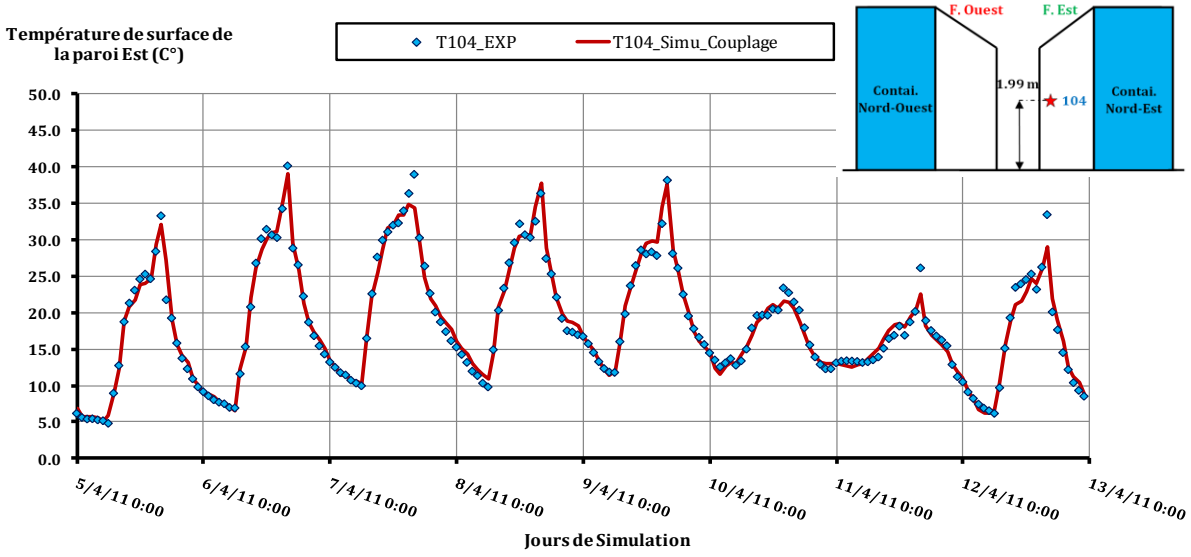


Figure IV. 29 Evolution de la température de surface simulée et mesurée pour les capteurs 100 et102.



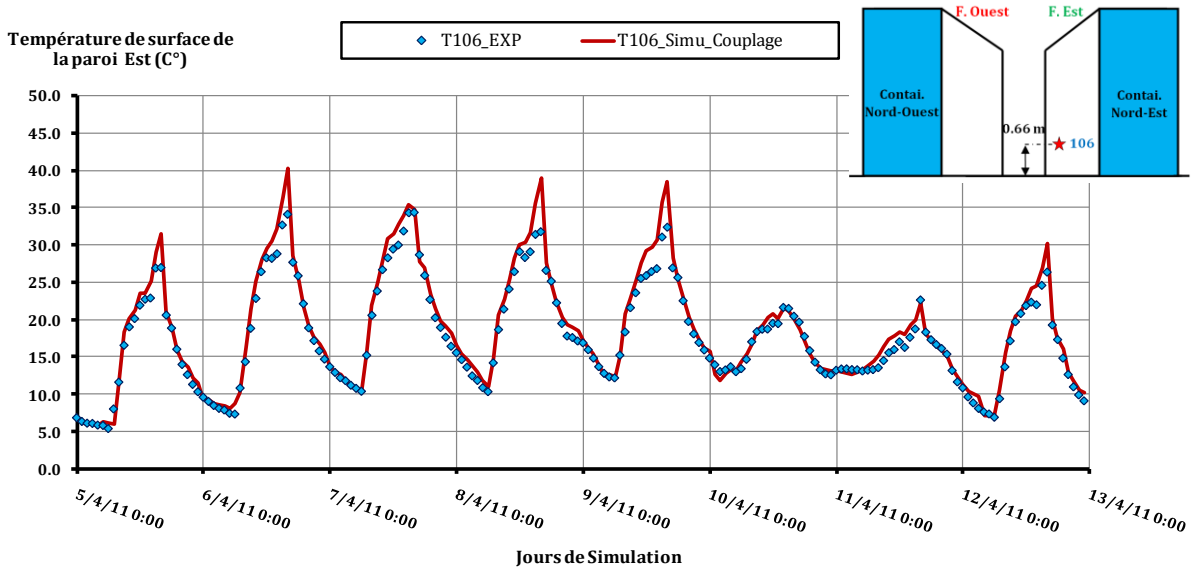


Figure IV. 30 Evolution de la température de surface simulée et mesurée pour les capteurs 104 et 106.

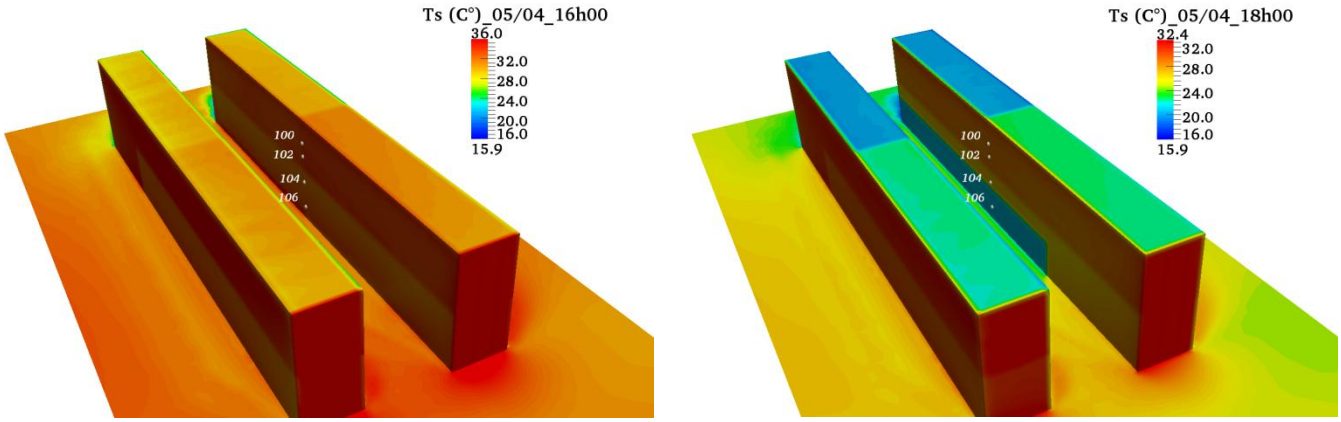


Figure IV. 31 Représentation du déphasage des températures de surface pour la façade Est, à 16h00 (**à gauche**) et à 18h00 (**à droite**) le 05/04.

IV.5.2.1.2 Sol de la rue

a) Durant la journée

La **Figure IV. 32** montre une assez bonne similitude entre les températures journalières mesurées et simulées pour le capteur 317 installé sur le sol au milieu de la rue. Cependant, pour les capteurs 107 et 207 fixés au sol très près des parois, le pic de température simulé est beaucoup trop important. Les mêmes résultats ont été obtenus près des parois avec le modèle *Solene* par **Hénon** (2008) et **Idzak** (2009). **Idzak**, (2009) a remis en cause le modèle du sol dans le code *Solene* sans donner plus d'explication. **Hénon**, (2008) suggère de réduire l'épaisseur de la couche de terre modélisée (0,10 ou 0,20 m au lieu de 1 m) et de diminuer son inertie thermique. Selon ce chercheur, une grande épaisseur additionnée à une forte inertie imposée (**ρ = 1800 kg m^{-3}**) réduit les transferts conductifs de chaleur depuis la surface vers les couches profondes du sol.

En outre, les écarts observés entre calcul et expérience sont aussi probablement imputables à l'absence de modélisation du sol au-dessous des containers. En effet, la chaleur générée par le flux solaire incident sur les deux thermocouples collés à l'extrémité des parois est au moins partiellement transférée latéralement dans le sol. Cette conduction est bidirectionnelle : horizontalement dans la couche d'asphalte au-dessous des containers et verticalement vers la couche de terre. Cependant, dans le modèle thermo-radiatif utilisé, la conduction horizontale de la chaleur n'est pas prise en compte.

Les trois courbes de la **Figure IV. 32** montrent qu'en début de matinée, les effets des multi-réflexions en provenance des façades voisines sont peu observables au niveau de la rue par rapport à leur influence observée sur les façades. Ceci s'explique par le rapport de forme W/H de la rue qui égal à 0,7. La rue est étroite et les éléments de façades éclairés directement réfléchissent l'essentiel de leur énergie vers la paroi opposée et relativement peu vers le sol.
A partir de midi, les températures de surface du sol augmentent brutalement et l'effet des masques provoque un décalage temporel dans la période d'insolation (**Figure IV. 33**). Cette période se situe :

- entre 12h00 et 14h00 pour le capteur 207, pour lequel la température atteint un maximum de 41,9°C le 07/04 à 14h00 (**Figure IV. 32**);
- entre 13h00 et 15h00 pour le capteur 317, pour lequel la température augmente rapidement et atteint sa valeur maximale de 40,1°C le 09/04 à 15h00 ;
- entre 14h00 à 16h00 pour le capteur 107, pour lequel la température maximale est de 39,2°C le 06/04 à 16h00 (**Figure IV. 32**).

Bien que cette période reste relativement courte (2 heures pour chaque capteur), le stockage de chaleur dans l'asphalte est important et rapide. Après 16h00, les températures diminuent

progressivement durant l'après-midi jusqu'au soir. La restitution d'énergie s'effectue progressivement durant tout l'après-midi.

b) Durant la nuit

La **Figure IV. 32** montre une sous-estimation systématique des températures de surface simulées tout au long de la semaine pendant la nuit. Cette sous-estimation est en moyenne de 3°C. Cela est dû vraisemblablement à une mauvaise modélisation des propriétés physiques des matériaux du sol composé d'une première couche fine d'asphalte (0,10 m) et une seconde couche épaisse de terre (0,65 m). En effet, suivant la teneur en eau, la granulométrie et la porosité du matériau, plusieurs valeurs de conductivité et de capacité thermique sont proposées dans la littérature pour l'asphalte et la terre. Par exemple, la conductivité thermique de la terre varie sensiblement suivant sa teneur en eau, comme le montre le **Tableau .IV. 8**.

Type de terre	Conductivité thermique λ (W m^{-1} K^{-1})
Terre sèche	0,17 à 0,58
Terre mouillée à 10 %	0,50 à 2,10
Terre mouillée à 20 %	0,80 à 2,60

Tableau .IV. 8 Valeurs de conductivité thermique de la terre en fonction de sa teneur en eau (fr.ekopedia.org/Conductivité thermique).

C'est pourquoi, une étude de sensibilité portant sur les paramètres physiques des deux couches du sol a été effectuée. Dans cette étude, les valeurs initiales de la capacité C_p et de la conductivité thermique λ de l'asphalte et de la terre (voir section **IV.4.3.4** les valeurs proposées par **ASHRAE Fundamentals**, 2005) ont été modifiées. Huit simulations complémentaires ont été réalisées, Les valeurs modifiées sont présentées dans le **Tableau .IV. 9**.

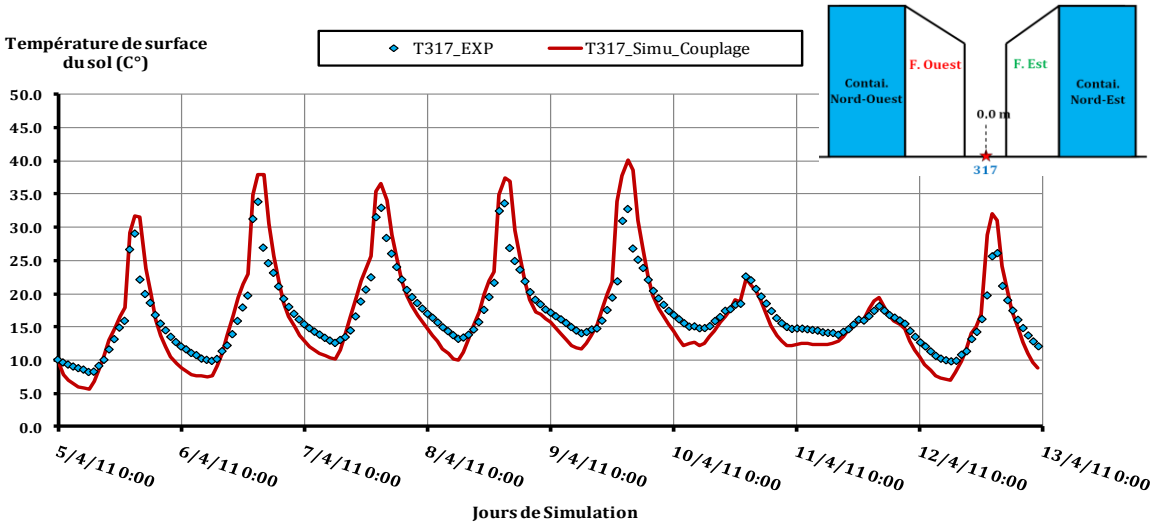
Nature du sol	Propriétés physiques du sol	Valeurs initiales	Valeurs doublées	Valeurs divisées en deux
Asphalte	**Capacité thermique C_p (J kg^{-1} K^{-1})**	950	**1900**	475
	Conductivité thermique λ (W/m^{-1}.K^{-1})	2,4	4 ,8	1,2
Terre	**Capacité thermique C_p (J kg^{-1} K^{-1})**	1100	2100	550
	Conductivité thermique λ (W/m^{-1}.K^{-1})	1,3	**2,6**	0,6

Tableau .IV. 9 Valeurs initiales (**ASHRAE Fundamentals**, 2005), doublées ou réduites de moitié de la capacité et de la conductivité thermique de l'asphalte et de la terre.

Ces simulations tests ont été effectuées uniquement avec *Solene* (pas de couplage pour la convection) et pour la seule journée du 05/04 et les résultats sont présentés dans l'**Annexe IV. Figures. 3, 4, 5** et **6**.

L'analyse des résultats de l'**Annexe IV. Figure. 3** et **4** indique que, pour l'asphalte, la variation de la conductivité a peu d'effet sur la température du sol. Cependant, les changements de capacité thermique affectent sensiblement ces températures. Les résultats en meilleure adéquation avec les mesures ont été obtenus lorsque la capacité thermique l'asphalte est doublée (C_p = 1900 J kg $^{-1}$ K^{-1}). Toutefois, cette valeur est surévaluée par rapport aux valeurs données dans la littérature, qui varient entre 920 et 1100 J kg $^{-1}$ K^{-1}.

Les résultats numériques de l'**Annexe IV. Figure. 5** et **6**, montrent une bonne similitude avec les résultats expérimentaux lorsque la conductivité de la terre est doublée (λ = 2.6 W m^{-1} K^{-1}). Les comparaisons ont permis d'observer aussi que, la modification de la capacité thermique de la terre n'a aucun impact sur la modification de la température du sol. Une surestimation en teneur d'eau de la conductivité de la terre est possible. En effet, le terrain de la maquette est recouvert d'asphalte, matériau poreux et étanche. L'eau contenue dans le sol ne peut donc pas s'évaporer librement ce qui risque d'accentuer le phénomène de remontée capillaire. Nous estimons alors, que, la conductivité thermique de la terre a été mal renseignée et que la valeur adéquate serait λ = 2.6 W m^{-1} K^{-1}. Les résultats des températures de surface du sol simulées et calculées à partir de cette valeur (les autres paramètres étant inchangés) sont comparés aux mesures pour le capteur 317 (**Figure IV. 34**). Pour les capteurs 107 et 207, les résultats de la comparaison sont présentés dans l'**Annexe IV. Figure. 7**.



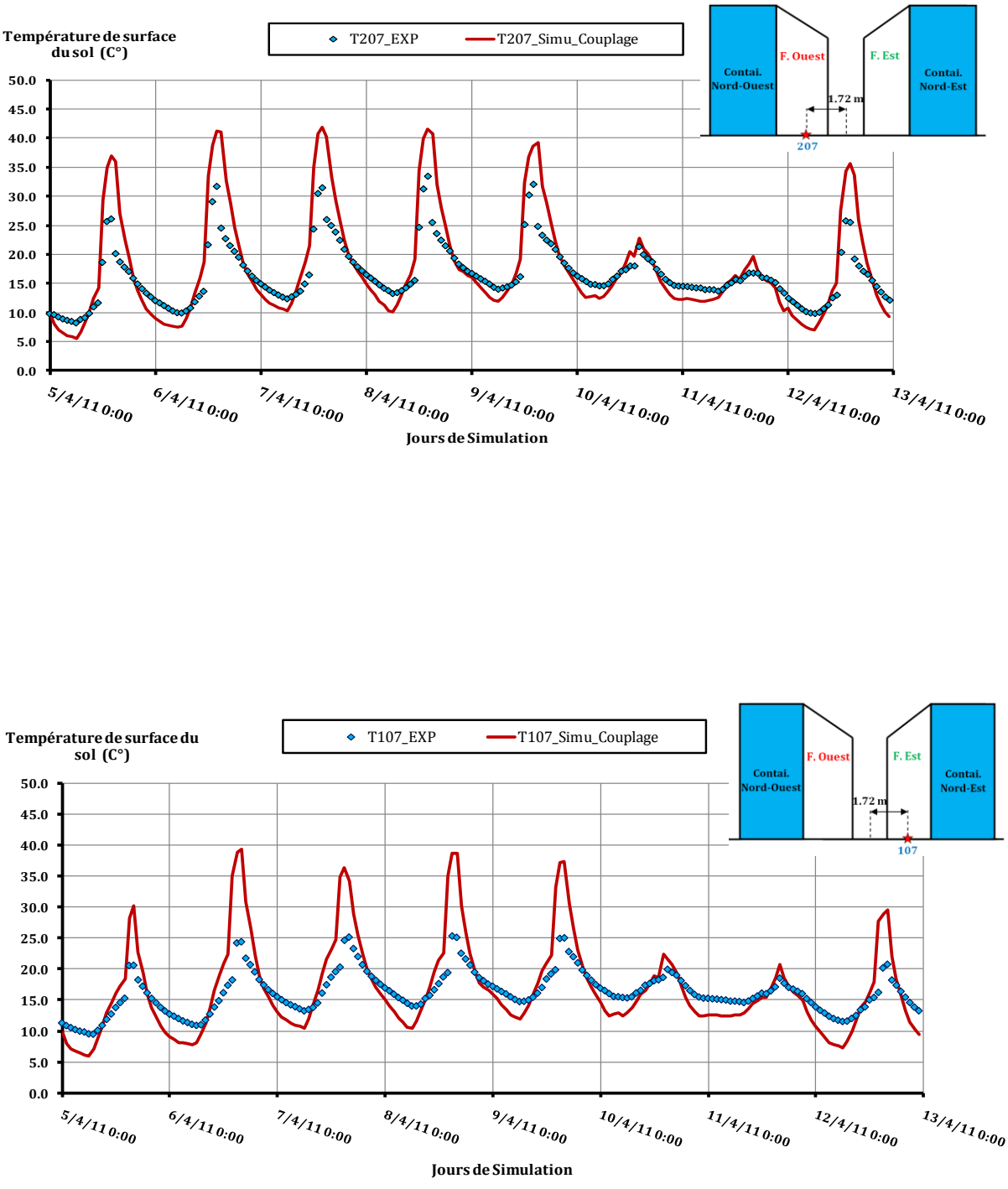


Figure IV. 32 Evolution de la température de surface du sol simulée et mesurée pour les capteurs 317, 207 et 107 (de haut en bas).

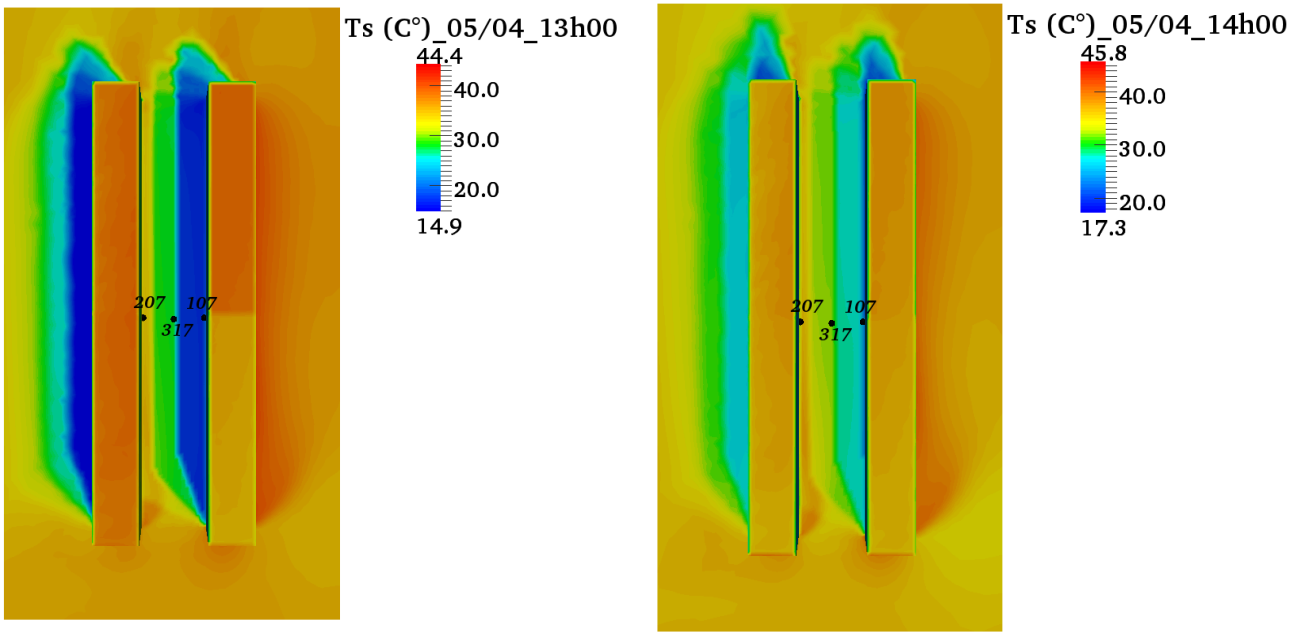


Figure IV. 33 Représentation du déphasage des températures de surface pour le sol, à 13h00 (**à gauche**) et à 14h00 (**à droite**) le 05/04.

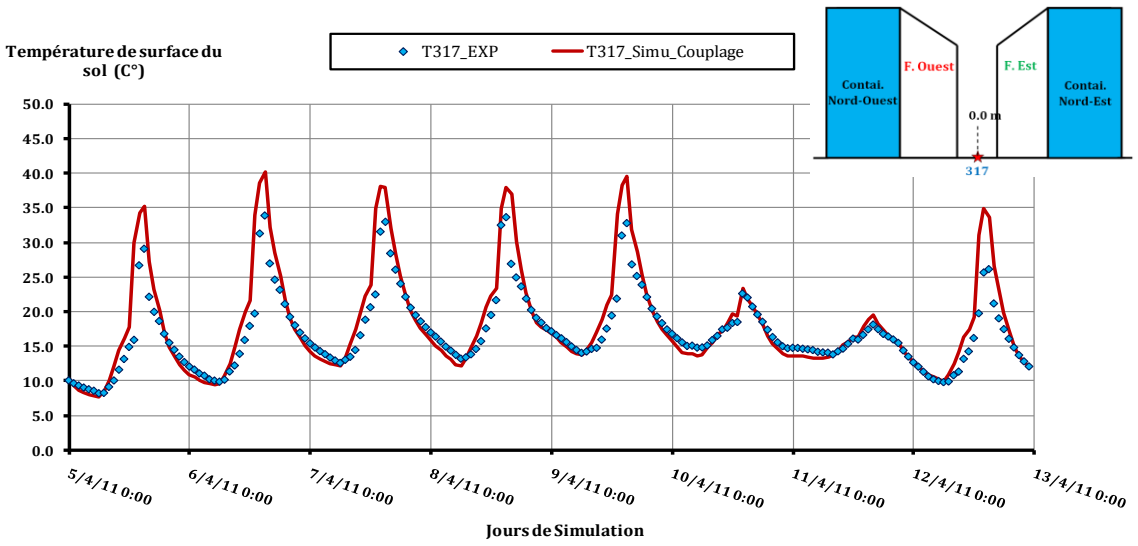


Figure IV. 34 Evolution de la température de surface du sol simulée et mesurée par le capteur 317 (calculée avec une conductivité thermique de la terre égale à λ **= 2.6 W m^{-1}.K^{-1}**).

IV.5.2.2 Températures de l'air

Les comparaisons et l'analyse du cycle diurne de température de l'air portent sur deux thermocouples installés à proximité des parois et deux autres positionnés au centre de la rue canyon à différentes hauteurs (**Tableau .IV. 2**). À proximité des parois, la comparaison des résultats (capteurs 210 et 110,
Figure IV. 35) met en évidence une sous-estimation des pics de l'ordre de – **3°C** par rapport aux mesures pour les jours ensoleillés et ce, durant la matinée et en milieu de journée. Ces écarts sont probablement imputables à la taille des mailles volumiques utilisées au niveau des parois, qui ne permet pas de capturer correctement les forts gradients présents en milieu de journée près des parois. Mise à part cette mauvaise représentation des pics expérimentaux, la comparaison est quasi-parfaite pour le reste de la journée et au cours de la nuit.

Dans la matinée, les températures de l'air les plus élevées sont enregistrées près de la façade Ouest, face au soleil. Les maximas matinaux sont obtenus vers 11h00. Cette augmentation est moins importante près de la façade Est qui capte seulement l'énergie solaire réfléchie et diffuse. Durant l'après-midi, vers 15h00, le soleil est assez haut pour irradier toute la façade Est augmentant ainsi les températures de l'air à proximité de la paroi. Les valeurs maximales sont obtenues vers 16h00. Ce pic correspond à un autre, moins élevé, enregistré à proximité de la paroi Ouest. En effet, à ce moment de la journée, l'énergie thermique accumulée lors de la matinée au niveau des toitures et de la façade Ouest est dissipée dans l'environnement augmentant ainsi la température de l'air par transfert convectif.

La température de l'air au voisinage des façades diffère selon l'orientation des parois. À proximité de la façade Est, elle est légèrement plus élevée que près de la façade Ouest. La moyenne hebdomadaire de cette différence au cours de la journée est de l'ordre de 0,6°C. Les plus fortes différences, de l'ordre de 5°C, sont observées en après-midi entre 15h00 et 17h00 le 08/04 et le 09/04. La température de l'air à proximité des parois est supérieure à celle du milieu de la rue du fait des transferts convectifs avec les parois chauffés par rayonnement thermique. Des conclusions similaires sont rapportées par **Oke** *et* **Nakamura**, (1988), **Roth** *et al.,* (1989) et **Stoll** *et* **Brazel**, (1992). Ces études pointent le fait que près du sol et de ces parois, la température de l'air à l'intérieur d'une rue canyon est sensible aux flux convectifs pariétaux.

Au milieu de la rue (thermocouples : 305 à z = 2,2 m et 307 à z= 3,42 m, **Figure IV. 36**) on constate un excellent accord entre les résultats expérimentaux et numériques. L'écart maximal enregistré entre les températures de l'air des deux capteurs est de 1,1°C. **Niachou** *et al.,* (2008) ont obtenu les mêmes résultats. Ils ont constaté que dans 83 % des cas, l'écart des températures mesurées entre deux thermocouples (l'un au niveau des toits et l'autre au milieu de la rue) ne dépassent pas 1,9°C pendant la journée. Au cours de la nuit, les résultats ont montré que dans 82 % des cas, l'écart des températures ne dépasse pas 1°C.

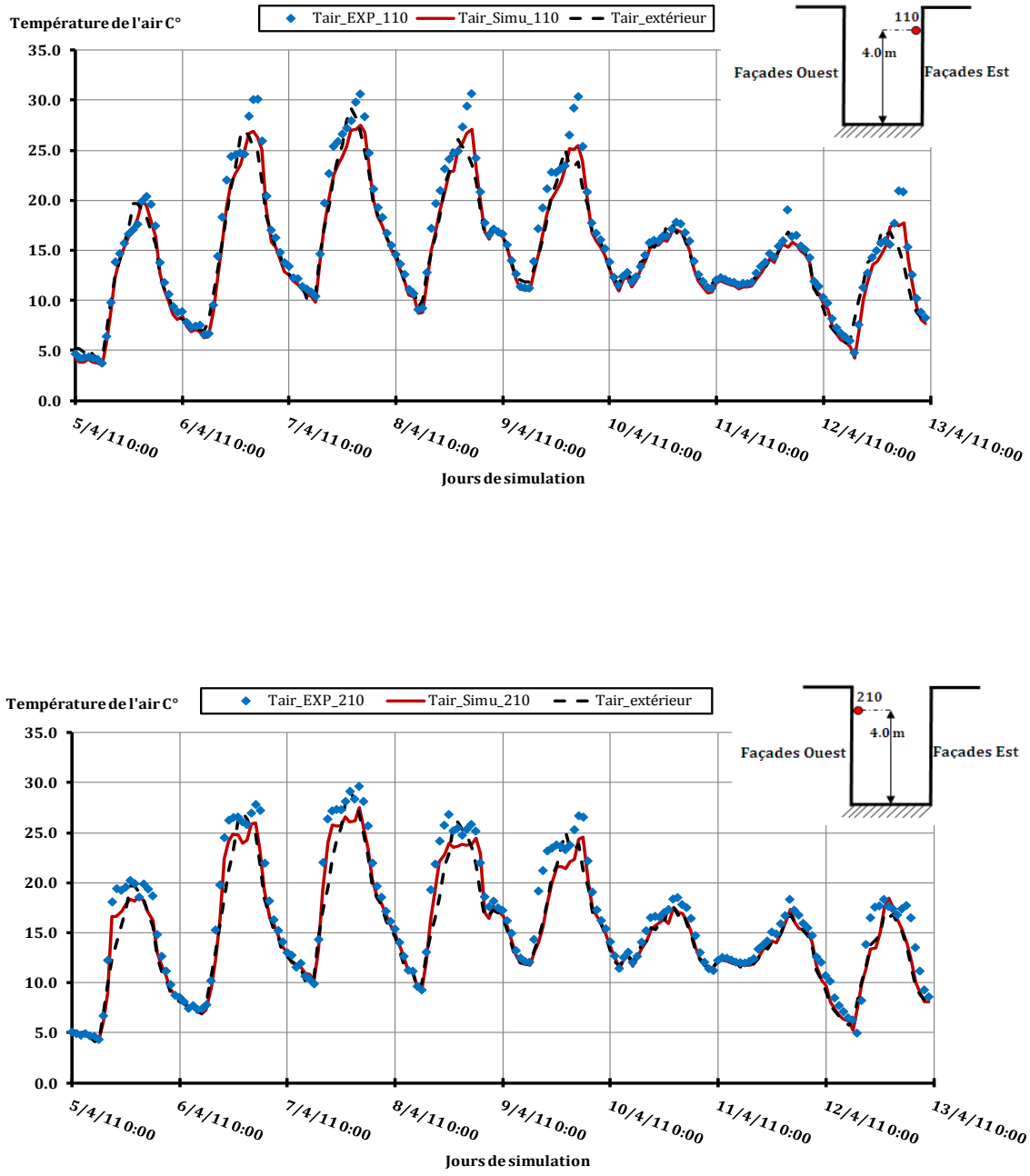
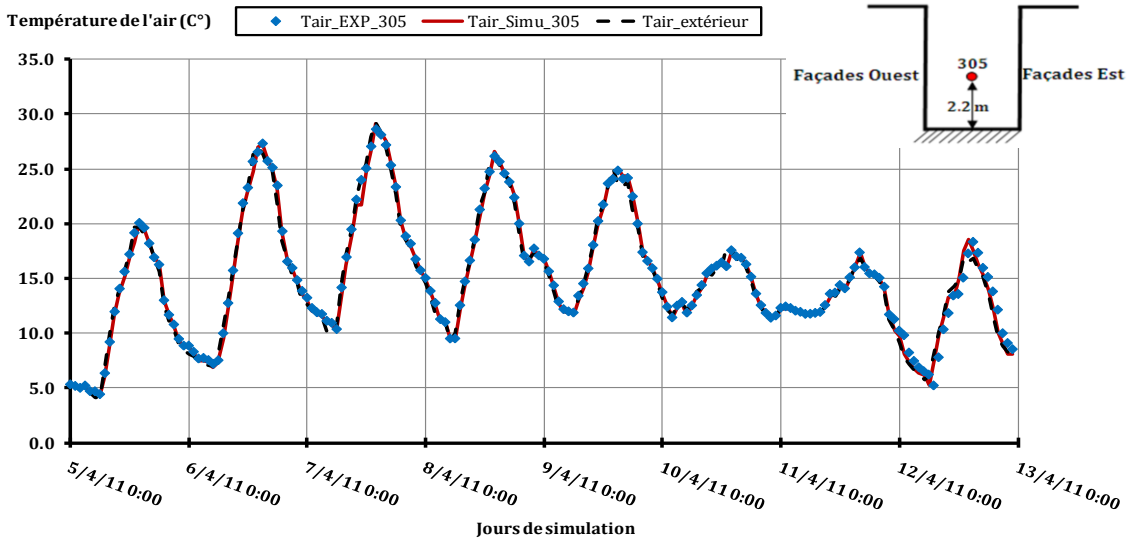


Figure IV. 35 Evolution de la température de l'air simulée et mesurée à proximité des parois pour les capteurs 110, 210.



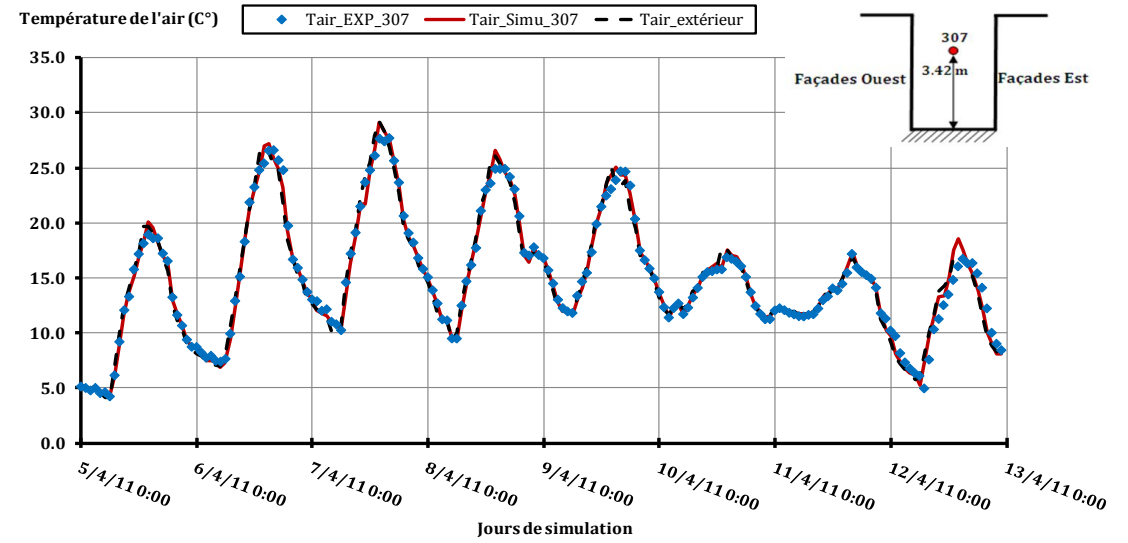


Figure IV. 36 Evolution de la température de l'air simulée et mesurée au milieu de la rue pour les capteurs 305 et 307.

IV.5.2.3 Ecoulement à l'intérieur de la rue

La comparaison des résultats des simulations avec les mesures anémométriques dans la rue canyon porte sur les trois composantes (U, V, W) du vecteur vitesse. Rappelons que les directions pour lesquelles le vent est perpendiculaire ou parallèle à la rue sont respectivement (133° et 313°) et (43°et 223°).

IV.5.2.3.1 Composantes longitudinale V et transversale U

Pour la composante longitudinale V, la comparaison des résultats (**Figure IV. 37** et **Annexe IV. Figures. 8** et **9**) montre un bon accord entre les évolutions temporelles simulées et mesurées. Cependant, des surestimations systématiques ont été enregistrées pour les directions de vent entre 340° et 80° (**Figure IV. 38** et **Annexe IV. Figures. 12** et **13**). Elles résultent probablement d'une mauvaise représentation des conditions aux limites d'entrée des simulations pour ces directions. En effet, des longueurs de rugosité empiriques ont été imposées par quadrant suivant la nature du sol (voir section **IV.4.4.1.1**). Une rugosité théorique égale à 0,3m a été utilisée pour les vents de secteur Nord-Est. Cette valeur théorique proposée est probablement sous-estimée par rapport à la présence de végétation dans ce quadrant (**Figure IV. 39**), une longueur de rugosité supérieure permettrait vraisemblablement d'obtenir des résultats plus conformes aux observations.

Par ailleurs, des sous-estimations, faibles pour des incidences de vent comprises entre 90° et 105° et élevées pour des incidences comprises entre 105° et 110°, ont aussi été mises en évidence. Entre 105° à 110°, deux pics expérimentaux ne sont pas identifiés numériquement :

Pour le sonique (S2)

- 06/04 à 08h00 où $\boldsymbol{V_{Num}}$ = -1,94 m/s et $\boldsymbol{V_{Exp}}$ = -3,01 m/s ;
- 08/04 à 23h00 où $\boldsymbol{V_{Num}}$ = -1,95 m/s et $\boldsymbol{V_{Exp}}$ = -2,89 m/s (**Figure IV. 38**).

Pour le sonique (S5)

- 06/04 à 08h00 où $\boldsymbol{V_{Num}}$= -1,64 m/s et $\boldsymbol{V_{Exp}}$ = -1,83 m/s ;
- 08/04 à 23h00 où $\boldsymbol{V_{Num}}$ = -1,73 m/s et $\boldsymbol{V_{Exp}}$ = -1,81 m/s (**Figure IV. 38**).
-

Les sous-estimations numériques sont probablement liées à la non-représentation du bâtiment masque dans la direction Est dans les simulations couplées. La présence de ce dernier peut engendrer des survitesses générées par les phénomènes de décollement au niveau des coins (**Figure IV. 39**). Notons aussi que, ces pics correspondent à la même direction de vent (107° et 109° respectivement). Cette direction de vent correspond sur le site à une rue revêtue d'asphalte (**Figure IV. 39**). La rugosité de 0.3 m est imposée pour cette direction est probablement surestimée est une valeur de 0,05 ou 0,10 serait certainement mieux adaptée.

Afin de valider cette hypothèse, nous avons fait une étude de sensibilité portant sur l'impact de la longueur de rugosité sur la vitesse de l'air. Cette étude concerne deux pas de temps (01h00 et 08h00) de la journée du 06/04 où la direction du vent été respectivement de 67° et 107°. Dans le premier test, une longueur de rugosité plus grande a été imposée (0,6 au lieu de 0,3) et plus faible pour le second test (0,05 au lieu de 0,3). Notons que, les vitesses de frottement $\boldsymbol{U}^*$ ont été recalculées en conséquence. Les résultats ont montré que la vitesse $\boldsymbol{V_{Num}}$ a diminuée de 0,45 à 0,10 m/s pour le premier test sachant que la vitesse $\boldsymbol{V_{Exp}}$ était de l'ordre de 0,15. Pour le second test, la vitesse $\boldsymbol{V_{Num}}$ a augmenté de -1,94 à -2,85 m/s pour le sonique (S2) et de -1,64 à -1,91 m/s pour le sonique (S5).

Ces tests locaux ne constituent pas une tentative d'optimisation car l'ensemble des calculs n'a pas été refait avec des valeurs de $\boldsymbol{z_0}$ mieux adaptées. En revanche, ils montrent la forte sensibilité des résultats aux paramètres dynamiques ($\boldsymbol{U}^*$ et $\boldsymbol{z_0}$) imposés en entrée du domaine de calcul.

Enfin, pour le reste des directions de vent (de 120° à 340°), les résultats simulés concordent bien avec les mesures, validant ainsi les longueurs de rugosité proposées pour ces plages de direction.

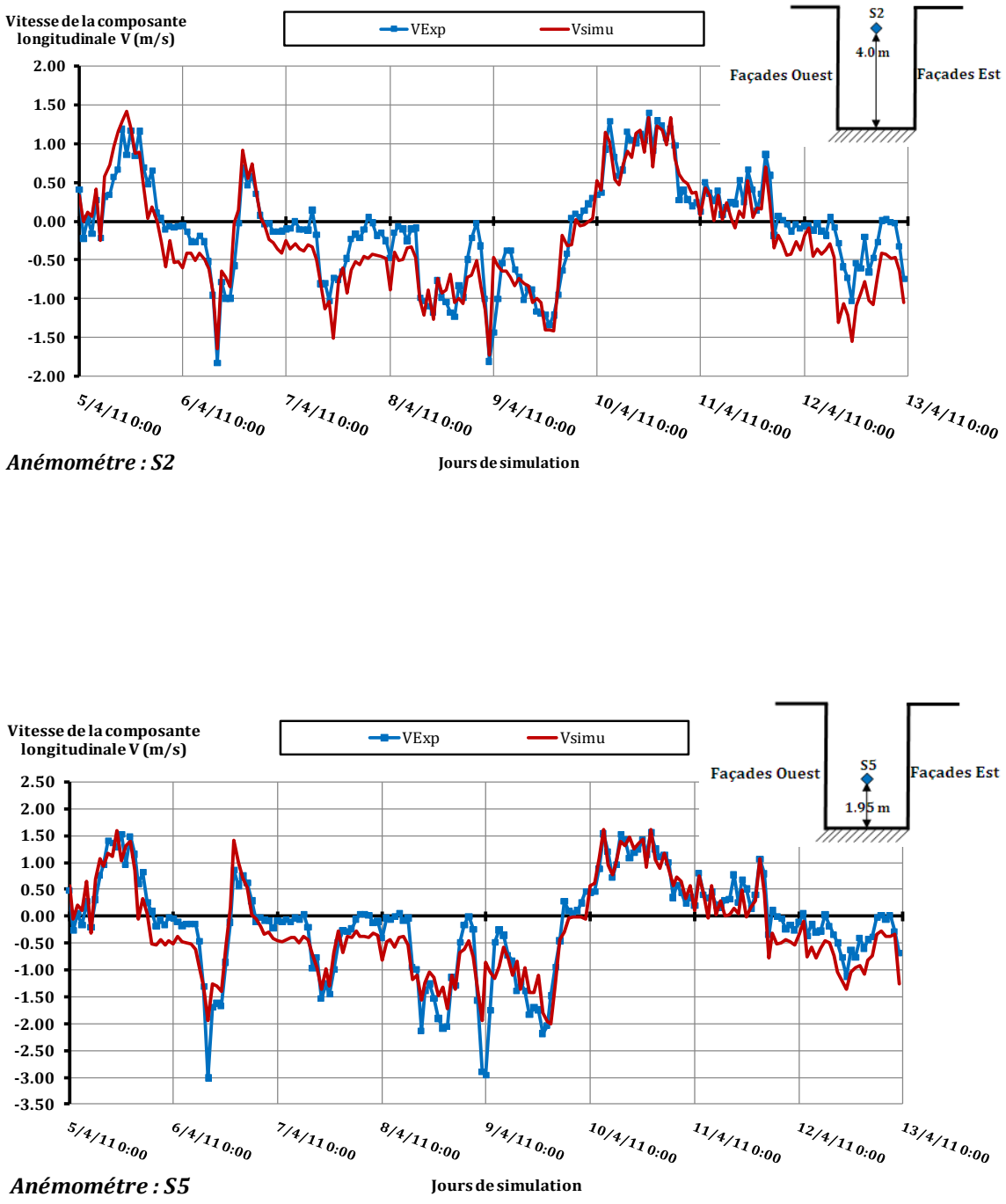
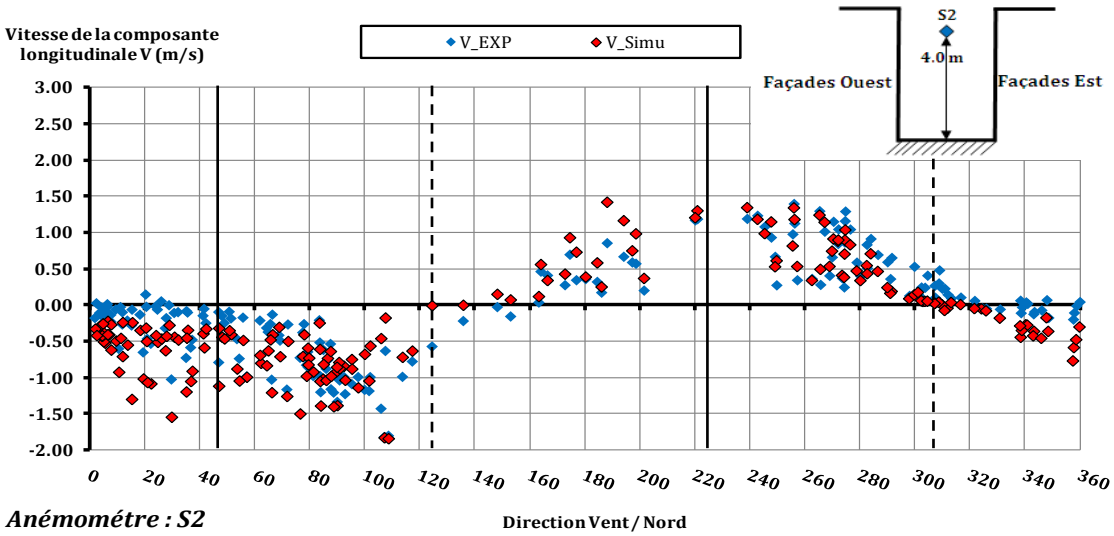


Figure IV. 37 Evolution des composantes longitudinale V simulées et mesurées pour les anémomètres soniques S2 et S5.



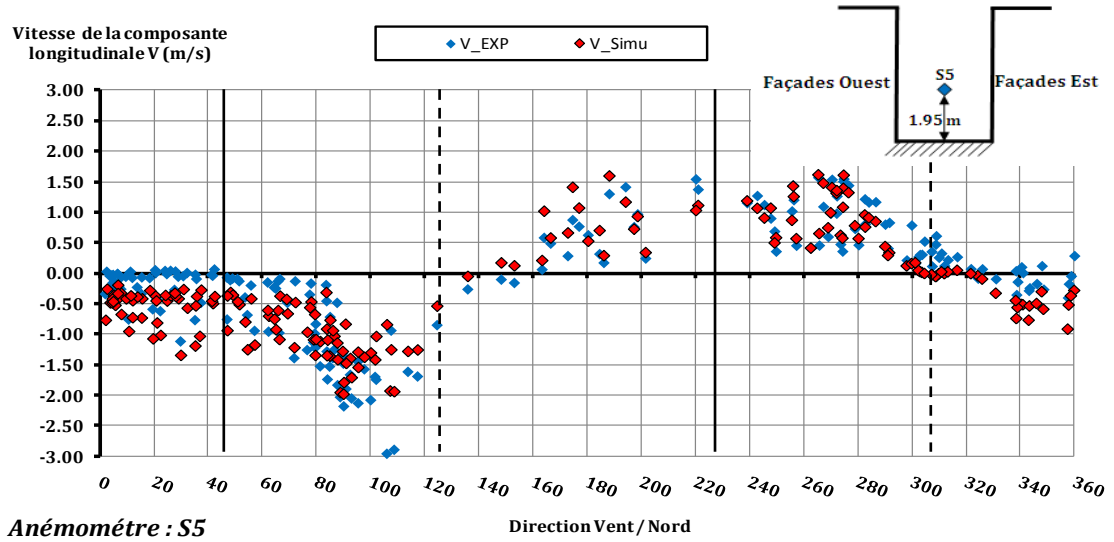


Figure IV. 38 Vitesse longitudinale V mesurée et simulée en fonction de la direction du vent pour les anémomètres soniques S2 et S5 (les lignes continues indiquent l'axe de la rue et les lignes discontinues indiquent la direction perpendiculaire à l'axe de la rue).

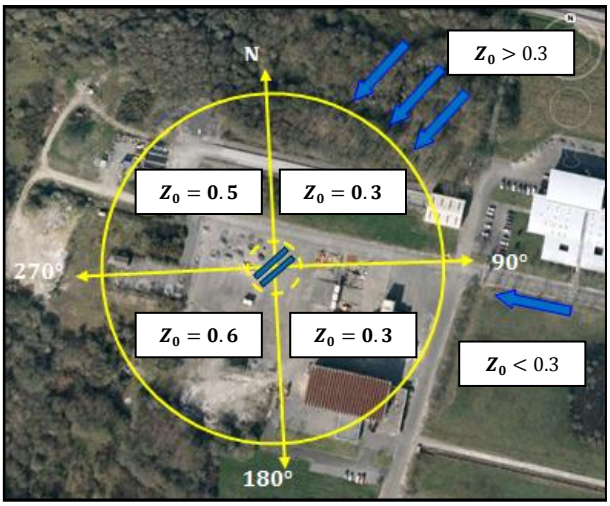
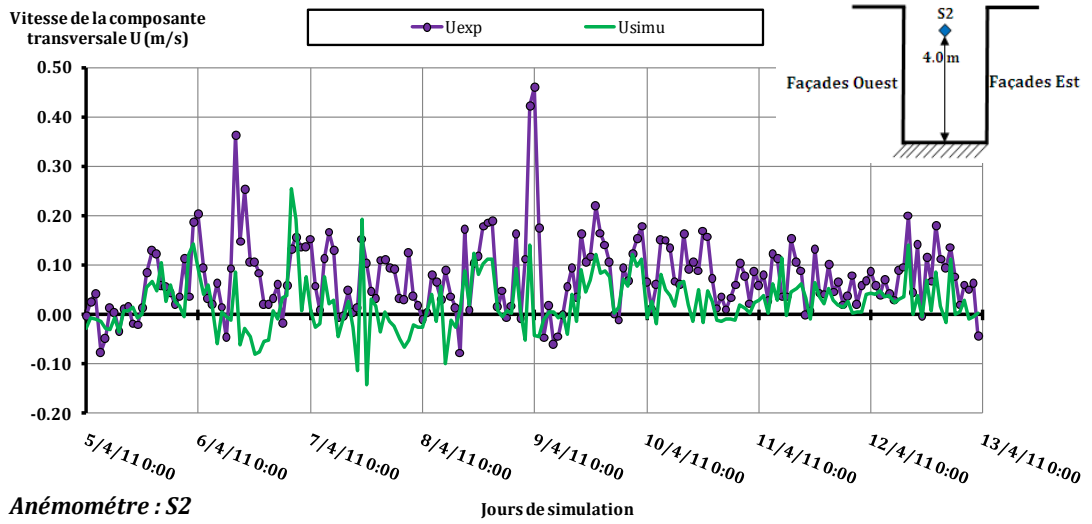


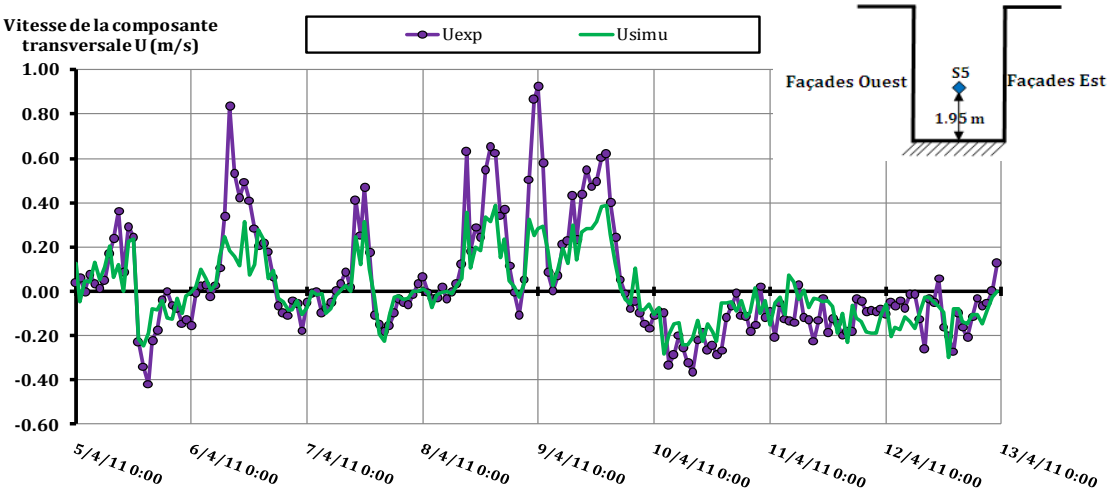
Figure IV. 39 Valeurs des longueurs de rugosité empiriques utilisées suivant la nature du site et présentation les plages de directions de vent où les longueurs de rugosité ont été sous-estimées /surestimées.

Pour la composante transversale U, les résultats présentés sur la **Figure IV. 40** et de l'**Annexe IV. Figures. 10 et 11** indiquent des valeurs absolues relativement faibles en moyenne. On voit étonnamment que le sonique du haut (z = 4 m) a enregistré très fréquemment des valeurs plus faibles que le sonique du bas (z = 1,95 m). La **Figure IV. 41** montre l'évolution la composante U en fonction de la direction du vent pour les soniques S2 et S5 et dans l'**Annexe IV. Figures. 13** et **14** pour S1, S3, S4 et S6. Une sous-estimation des résultats simulés est observée pour des directions comprises entre 100° et 120°, en cohérence avec la faible composante longitudinale calculée à partir de la longueur de rugosité non-représentative pour cette direction. La concordance entre les résultats expérimentaux et numériques reste néanmoins satisfaisante du point de vue de l'évolution temporelle au cours de la semaine. Le meilleur accord est obtenu sur le sonique S4 à proximité de la paroi Est (**Annexe IV. Figure. 11**)

Il faut cependant garder à l'esprit que les déficiences constatées ne sont pas imputables uniquement aux modèles mis en œuvre (et particulièrement au modèle de turbulence). Le manque de représentativité spatiale des données expérimentales qui nécessite de construire des conditions d'entrée à partir d'un seul point de mesure et les incertitudes sur les paramètres physiques caractérisant le comportement thermique des matériaux sont probablement responsables d'une part importante des désaccords constatés. Ces incertitudes sont communes dans la mise en œuvre des modèles, en particulier dans les études de la basse atmosphère urbaine et il faut le plus souvent s'en accommoder.

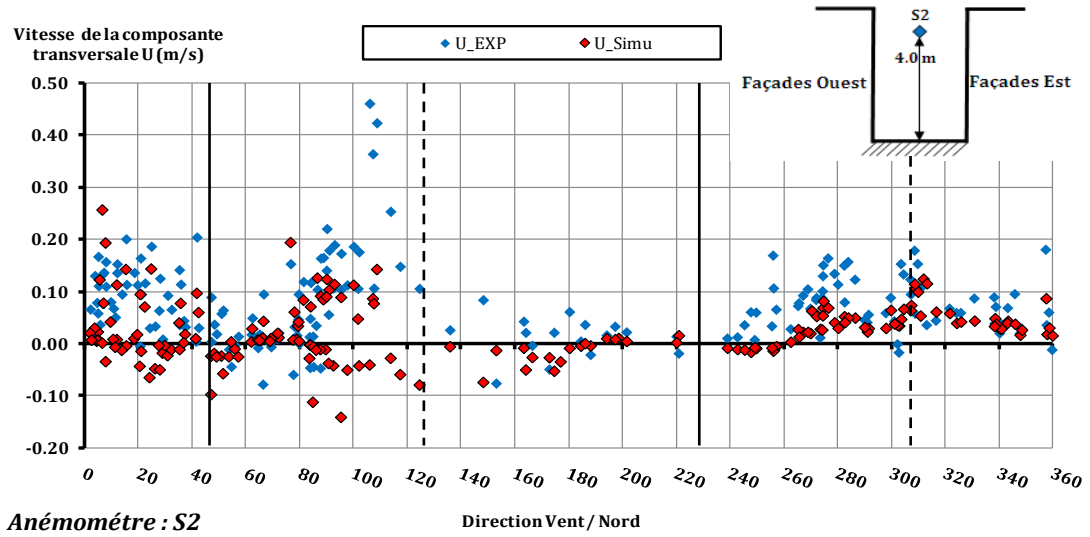


Anémométre : S2



Anémométre : S5

Figure IV. 40 Evolution de la composante transversale U simulée et mesurée pour les anémomètres soniques S2 et S5.



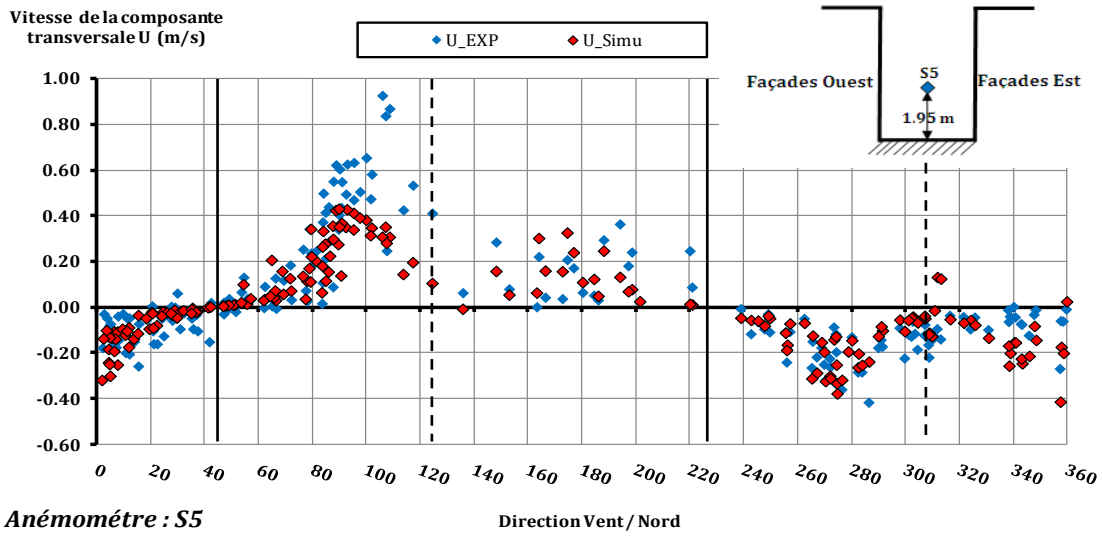
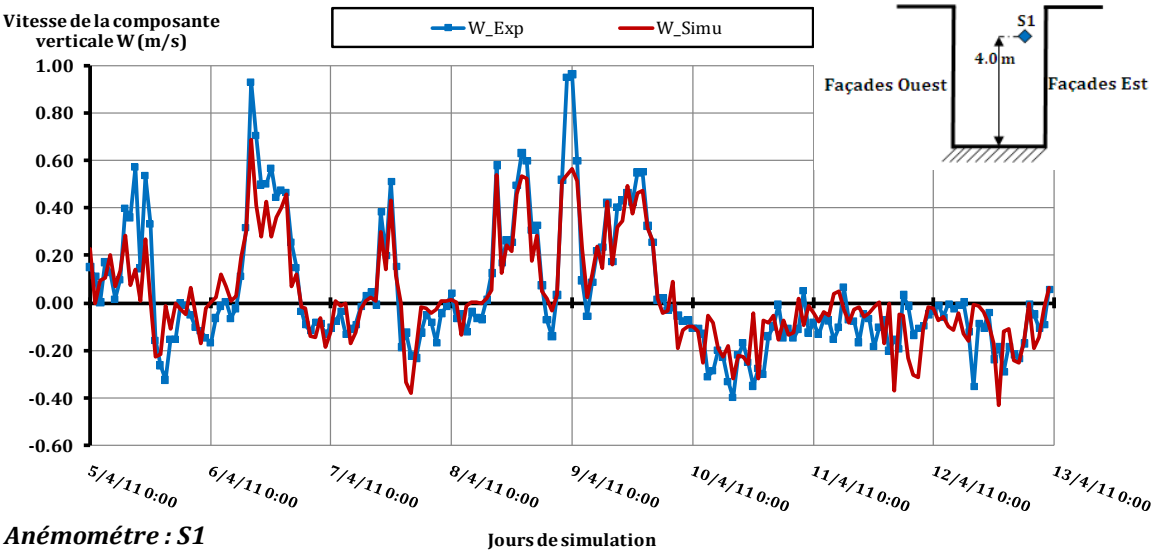


Figure IV. 41 Composante transversale de la vitesse mesurée et simulée en fonction de la direction du vent pour les soniques S2 et S5 (les lignes continues indiquent l'axe de la rue et les lignes discontinues indiquent la direction perpendiculaire à l'axe de la rue).

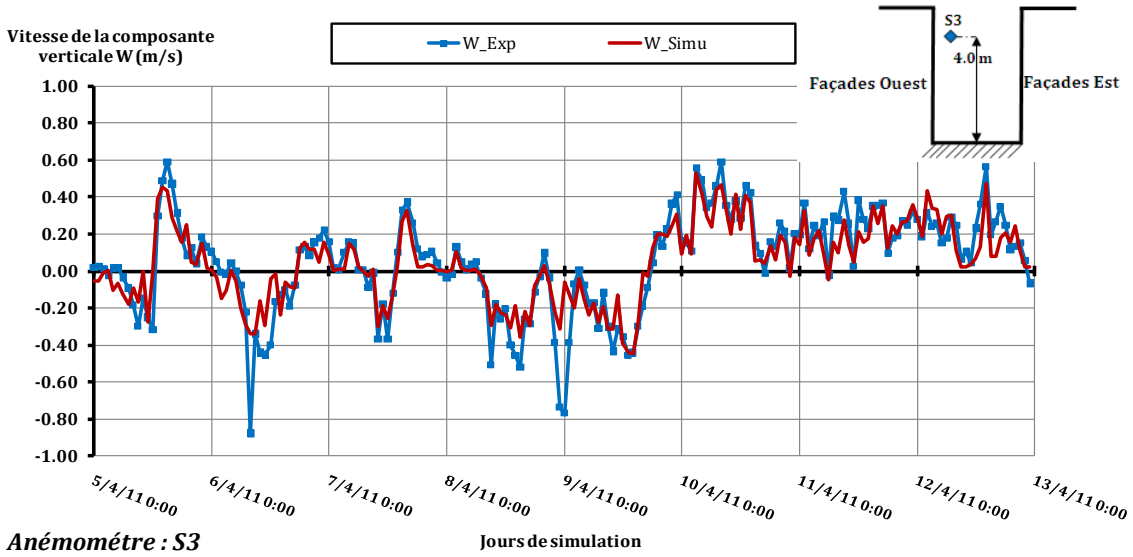
IV.5.2.3.2 Composante verticale W

La **Figure IV. 42** montre un bon accord entre les évolutions temporelles de la composante W simulée et mesurée. Deux pics identifiés expérimentalement ne sont pas reproduit numériquement, pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment pour la composante longitudinale. Un effet de symétrie est discernable entre les sonique S3 et S1 (**Figure IV. 42**) et entre S4 et S6 respectivement (**Annexe IV. Figure. 16**). En effet, lorsque le mouvement de l'air est descendant (composante W négative) sur la paroi Ouest (S3, S6), l'effet de recirculation du vortex induit un mouvement ascendant avec une composante W positive sur la paroi Est (S1 et S4).

Les **Figure IV. 43** et **Annexe IV. Figure. 18** montrent l'évolution de la composante W mesurée et simulée en fonction de la direction du vent pour les soniques S1 et S3 et pour S4 et S6 respectivement. On voit que, pour les plages de directions 20°- 60° et 200°- 240°, c'est à dire lorsque le vent est pratiquement orienté dans la direction de la rue, aucune présence de vortex n'est observée et l'écoulement est caractérisé par un effet de canalisation. En revanche, lorsque l'écoulement est oblique (directions de vent dans les secteurs : 80°- 120° ; 160°- 200° ; 260°- 300° et 340°- 20°) une structure de recirculation est visible. L'intensité du mouvement circulatoire dépend de la vitesse du vent et de sa direction, mais peut être aussi des effets thermiques liés aux parois chauffées par le rayonnement.

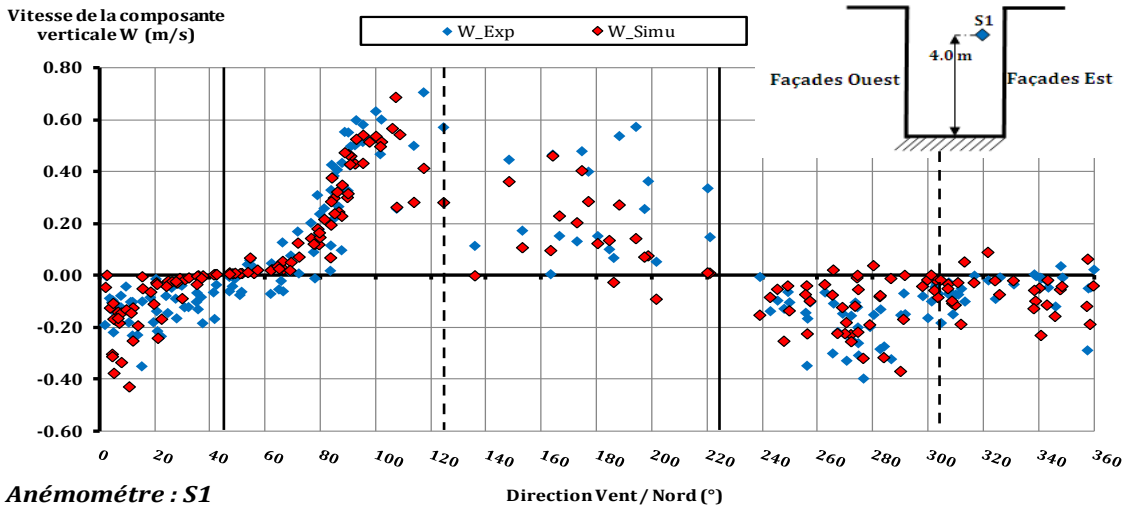


Anémométre : S1



Anémométre : S3

Figure IV. 42 Evolution de la composante verticale W simulée et mesurée pour les anémomètres soniques S3 et S1.



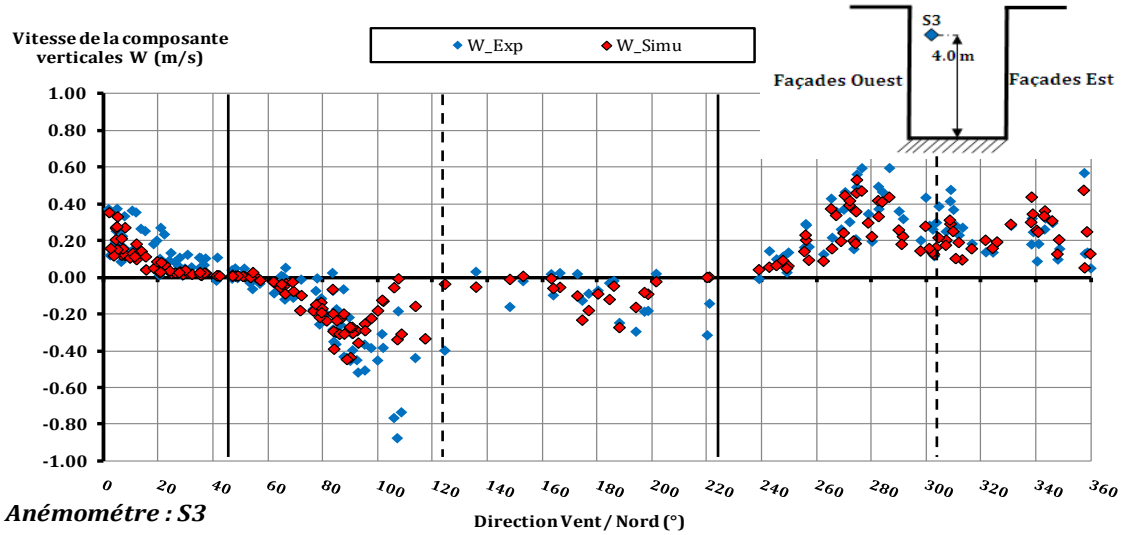


Figure IV. 43 Composante verticale de la vitesse mesurée et simulée en fonction de la direction du vent pour les soniques S1 et S3 (les lignes continues indiquent l'axe de la rue et les lignes discontinues indiquent la direction perpendiculaire à l'axe de la rue).

IV.5.2.3.3 Energie cinétique turbulente TKE

La **Figure IV. 44** et l'**Annexe. Figure IV. 19** et **20** comparent l'énergie cinétique turbulente déduite des simulations avec les résultats des mesures pour les six soniques. Une forte sous-estimation des résultats simulés est systématiquement observée durant toute la semaine. Les écarts les plus importants sont localisés dans la partie basse de la rue. Ces écarts sont probablement liés en partie, à la représentation du profil de l'énergie cinétique turbulente à l'entrée du domaine. (éq. **IV.3** et **IV.4**) à partir de la théorie de la couche limite.

Pour évaluer cette hypothèse, nous avons comparé l'énergie cinétique turbulente mesurée au mât à z=10m ($\boldsymbol{TKE_{mât_EXP}}$) à celle calculée en utilisant les équations **IV.2** et **IV.3** ($\boldsymbol{TKE_{théorie}}$). On obtient en moyenne (**Figure IV. 45**) $\boldsymbol{TKE_{théorie} = 0,38\, TKE_{mât_EXP}}$ ce qui indique que la formulation théorique-empirique ne permet pas d'obtenir des résultats cohérents entre la vitesse du vent et l'énergie cinétique mesurées au mât de référence.

Des simulations tests portant sur la sensibilité de l'énergie cinétique turbulente dans la rue aux conditions limites en entrée du domaine de calcul ont été effectuées pour la journée du 05/04 et pour 2 profils d'entrée. Dans le premier cas, le profil de TKE à l'entrée est le profil uniforme $\boldsymbol{TKE_{théorie}}$ et dans le second cas, ce profil uniforme est pris égal à $\boldsymbol{TKE_{mât_EXP}}$.
Dans les 2 cas, le profil de dissipation est exprimé par l'équation **IV.4** ($\boldsymbol{U^*}$ étant calculée en inversant l'équation **IV.3**).

La **Figure VI. 46** montre que, quelle que soit la méthode de construction du profil d'entrée, les résultats dans la rue sont peu satisfaisants. Pour le second cas, l'énergie cinétique turbulente à 10 m du sol, devrait très peu évoluer entre la section d'entrée et le mât. Les résultats de la **Figure VI. 47,** qui compare les résultats de l'énergie cinétique mesurés et calculés au niveau du mât météorologique, montrent qu'environ 30 % de l'énergie cinétique est dissipée sur les courtes distances (de l'ordre de quelques dizaines de mètres, selon la direction du vent) qui séparent les limites du domaine et le mât de référence. Il est donc clair que le modèle $k-\varepsilon$ ne permet pas de maintenir l'énergie dans le domaine à 10 m au-dessus du sol, contrairement à ce qu'on admet pour une couche limite établie sur une paroi homogène.

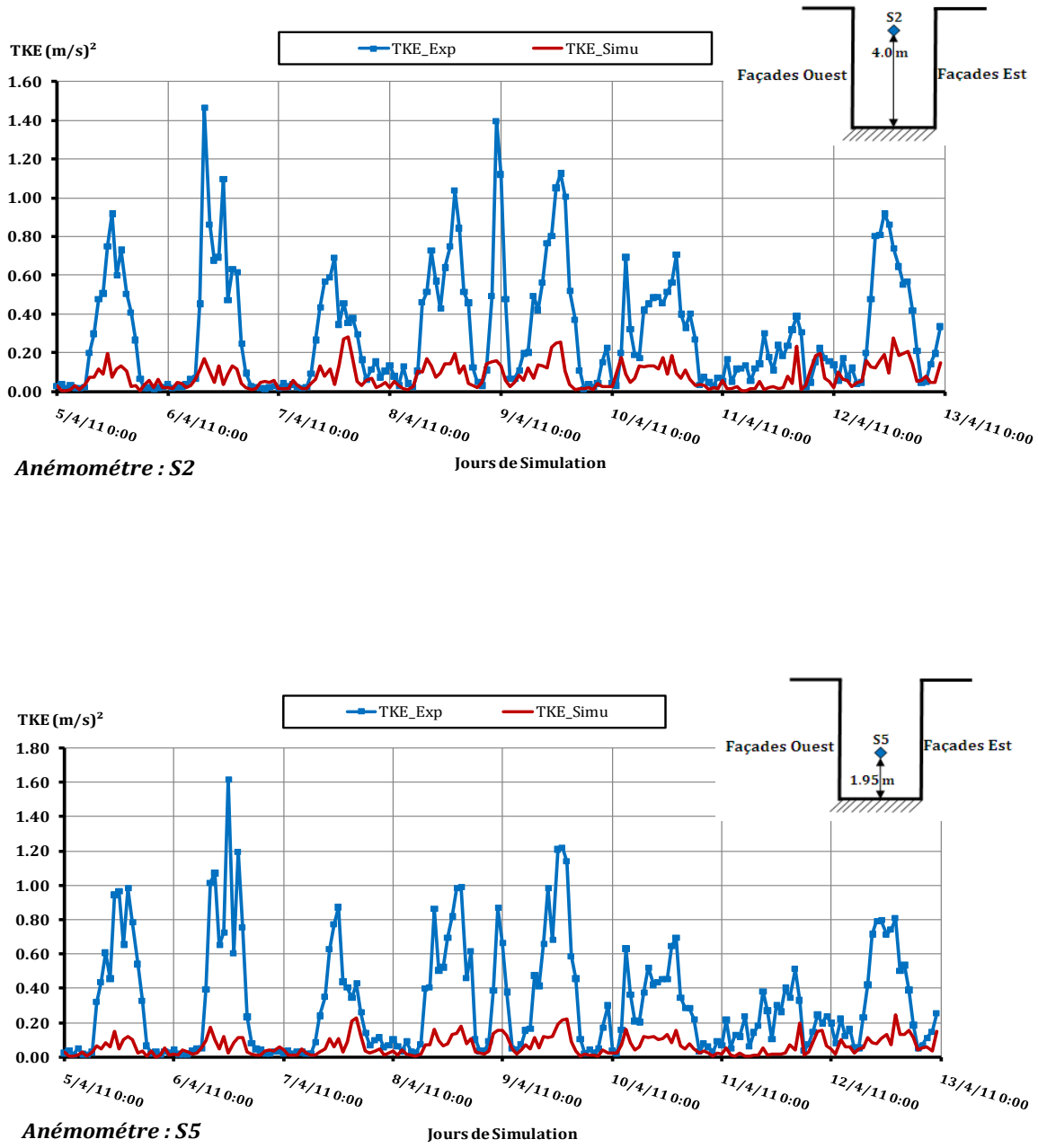


Figure IV. 44 Evolution de l'énergie cinétique turbulente simulée et mesurée pour les anémomètres soniques S2 et S5.

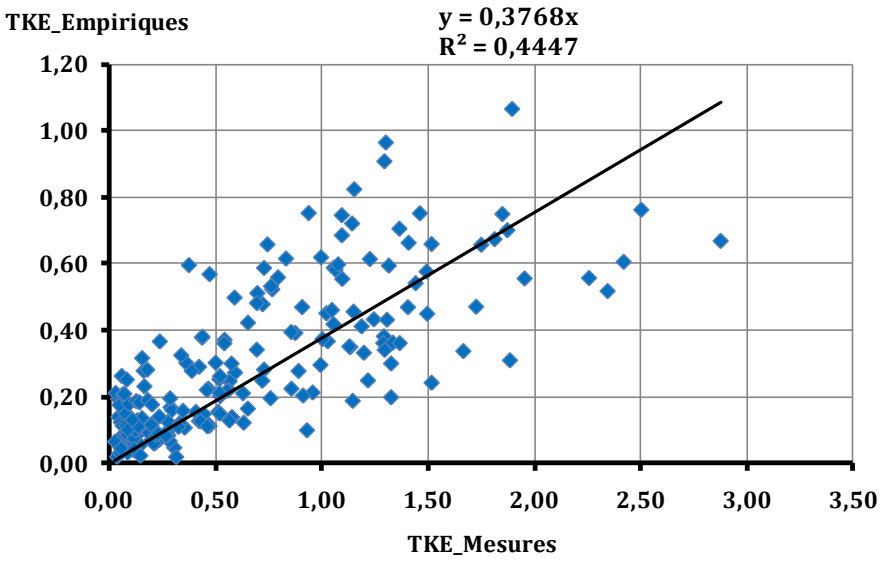


Figure IV. 45 Comparaison, au niveau du sonique du mât à z = 10 m pour la semaine du 05/04 au 12/04/2011, des valeurs de l'énergie cinétique turbulente mesurées et des valeurs calculées en utilisant le profil d'entrée donnée par les équations **IV.2** et **IV.3**.

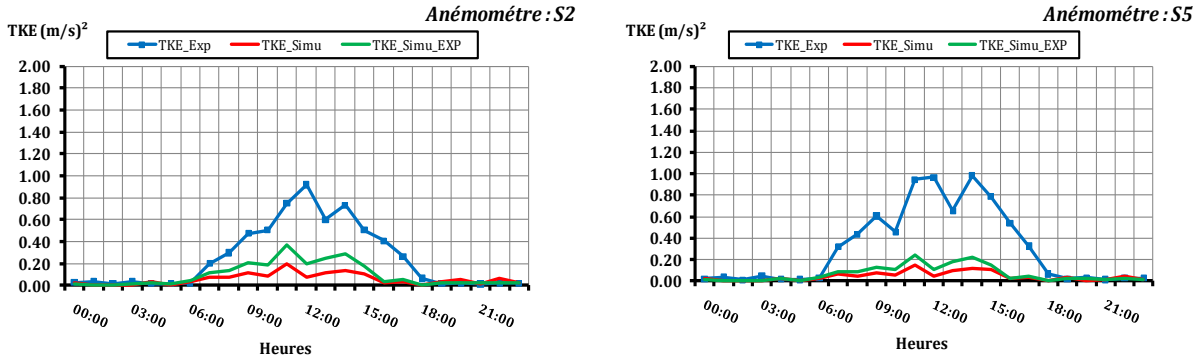


Figure IV. 46 Comparaison de l'énergie cinétique turbulente simulée et mesurée à l'intérieur de la rue pour les soniques S2 et S5 (**Vert** : TKE simulée avec le profil d'entrée donné par l'équation **IV.3**. **Rouge** : TKE simulée avec le profil d'entrée basé sur les mesures. **Bleu** : TKE mesurée)

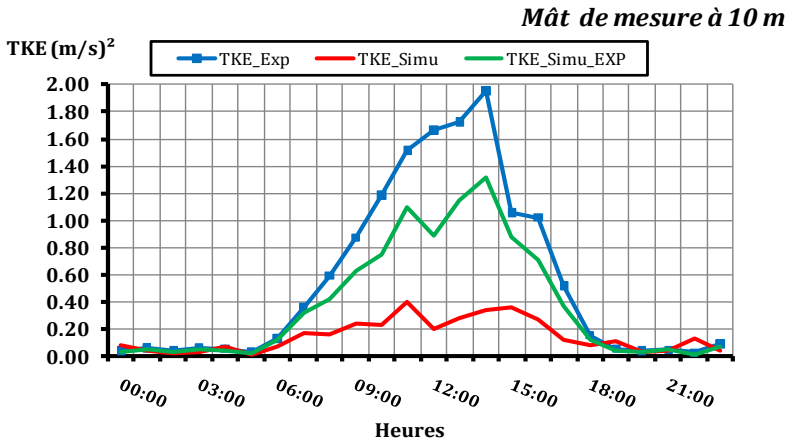


Figure IV. 47 Comparaison de l'énergie cinétique turbulente simulée et mesurée au niveau du mât à 10 (m) (**Vert** : TKE simulée avec le profil d'entrée donné par l'équation **IV.3**. **Rouge** : TKE simulée avec le profil d'entrée basé sur les mesures. **Bleu** : TKE mesurée).

IV.6 Effet de l'orientation des parois sur leur comportement thermo-radiatif

Une analyse de la température moyenne des différentes surfaces du canyon est présentée ici pour discuter l'effet de leur orientation. Ensuite, les flux convectifs et infrarouges émis par les façades de la rue et les toitures sont analysés pour une journée ensoleillée (06/04) et pour une journée couverte (11/04).

IV.6.1 Analyse de la température moyenne des surfaces du canyon

Les séries temporelles simulées de la température moyenne des surfaces présentées sur la **Figure IV. 48** (toiture, façade Ouest, façade Est et sol de la rue) montrent un déphasage temporel entre les différentes faces de la maquette, induisant un décalage des maxima selon leur exposition au soleil. Ainsi, les températures maximales de la façade Ouest sont atteintes vers 11h00, celles des toitures vers 13h00, celles du sol vers 14h00 et enfin celles de la façade Est vers 16h00.

Les températures les plus élevées sont logiquement obtenues pendant les jours ensoleillés. Les éléments horizontaux (toiture et sol) présentent les températures les plus importantes. La température maximale de 48°C est obtenue au niveau des toits le 07/04 à 13h00, correspondant à un moment où le rayonnement solaire est proche de la verticale. Malgré la courte durée d'ensoleillement du sol, celui-ci atteint des températures élevées avec un maximum de 41,6°C le 07/04 à 14h00, confirmant ainsi le stockage important et rapide de la chaleur par l'asphalte.

Compte tenu des effets d'ombrage, les températures sur les façades sont très différentes et évoluent en fonction de l'intensité du flux solaire incident et des conditions météorologiques (passages nuageux, vitesse du vent). La température moyenne hebdomadaire de la façade Ouest reste légèrement supérieure à celle de la façade Est avec une valeur maximale de 40,2 C°. Les températures moyennes des deux façades obtenues durant la semaine d'étude ont été comparées. Cette comparaison permet de constater qu'au cours de la journée la plus grande différence entre les deux parois s'élève à 5°C le 07/04 en faveur de la façade Ouest. Ceci est dû peut-être à la forte absorption de l'énergie solaire incidente par la partie haute de la façade Ouest qui reçoit le soleil plus longtemps. Dans une configuration très voisine, **Idzak** *et al.,* (2010) ont observé que la température moyenne de la façade Sud-Ouest reste légèrement supérieure à celle de la façade Nord-Est.

Cependant, pendant la nuit, les températures des toitures sont plus faibles que celles des autres éléments et celle de l'air probablement en raison du déficit radiatif. En effet, d'une part les toitures possèdent un facteur de vue du ciel élevé et d'autre part elles sont fortement exposées au vent, restituant ainsi plus de chaleur en infrarouge et par convection.

Pendant les jours couverts, la température des surfaces est régie d'avantage par le flux infrarouge atmosphérique et le flux diffus incident. Un déphasage moins important est alors observé entre les différents éléments, du fait de l'absence du rayonnement solaire direct. Les toitures, caractérisées par un facteur de vue ciel élevé, présentent encore les températures les plus élevées dans la journée. Elles jouent ainsi un rôle prépondérant dans l'absorption et la restitution de l'énergie solaire.

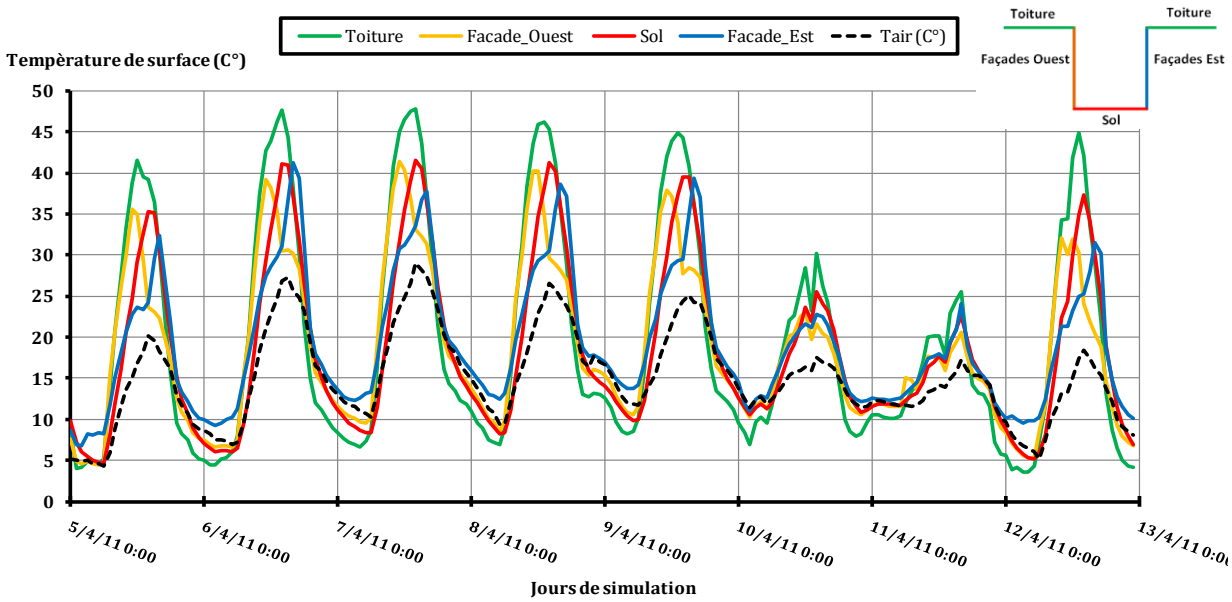


Figure IV. 48 Evolution temporelle des températures moyennes simulées pour les différentes surfaces du canyon.

IV.6.2 Analyse du flux convectif et infrarouge émis pour deux journées (ensoleillée et couverte)

Les **Figure IV. 49** et **50** présentent les flux convectifs et infrarouges émis par les toitures et les façades pour une journée ensoleillée (06/04) et une journée couverte (11/04).

Pour la journée ensoleillée, on constate une augmentation du flux convectif au niveau des surfaces ensoleillées (toiture et façade Ouest) dans la matinée. Cette augmentation est beaucoup plus faible sur la façade Est qui capte uniquement l'énergie radiative réfléchie et diffuse. Cela signifie que pendant la journée, le flux convectif contribue positivement à la transmission de la chaleur à l'intérieur des containers, stockée jusqu'au maximum obtenu vers 11h00 pour les surfaces ensoleillées. Pendant l'après-midi, une forte augmentation du flux convectif est observée sur la façade Est, en raison de son exposition solaire qui est maximale à 16h00. Pendant cette même période, l'énergie thermique accumulée lors de la matinée au niveau des toitures et de la façade Ouest est dissipée dans l'environnement. Ce transfert continue jusqu'à ce que le flux convectif devienne négatif, c'est-à-dire que la température de la paroi soit inférieure à celle de l'air, signifiant ainsi que le transfert d'énergie se fait de l'air vers la paroi. Pour la façade Est, ce transfert d'énergie commence à partir de 16h00 et continue durant la nuit. On note aussi que le flux convectif de la paroi Est est toujours positif (orienté vers l'extérieur) contrairement à la paroi Ouest. Enfin précisons que, l'énergie stockée par conduction dans les murs constitue dans notre cas une composante relativement faible.

Le flux infrarouge émis par les parois est proportionnel à la puissance quatrième de la température de surface. Ainsi, pour la journée ensoleillée, la restitution infrarouge est plus importante pendant la journée, mais elle n'est pas négligeable pendant la nuit (**Figure IV. 51**). Ce sont les toitures qui émettent le plus d'énergie infrarouge vers le ciel en raison de leurs températures élevées. Ces résultats montrent le rôle important joué par les toitures dans la restitution énergétique vers l'atmosphère et donc leur rôle prépondérant sur le phénomène de l'îlot de chaleur urbain.

Un déphasage est mis en évidence pour les façades. En effet, une partie de l'énergie infrarouge émise par la façade Ouest le matin est captée par la façade Est, participant à l'augmentation de sa température et de son émission. Le phénomène inverse est remarqué l'après-midi. Ces observations confirment que les façades ont un comportement différent de celui des surfaces horizontales. On voit bien aussi la nécessité de prendre en compte le phénomène des multi-réflexions des flux solaires sur l'ensemble des éléments d'une scène urbaine.

Pour la journée couverte, l'intensité du flux convectif et la température des surfaces dépendent de la quantité de flux solaire diffus incident, du flux infrarouge atmosphérique et de la couverture nuageuse. Une augmentation du flux convectif est observée pendant la journée qui s'accroit avec l'augmentation de température de l'air ambiant. À partir de 16h00, lorsque la

température de l'air chute, le flux convectif diminue pour toutes les surfaces. Ces résultats montrent qu'en l'absence d'ensoleillement, l'intensité des flux convectif dans les containers sont régis par la température de l'air. Notons aussi que, la restitution des flux infrarouges est limitée pour cette journée, en raison des faibles températures de surface.

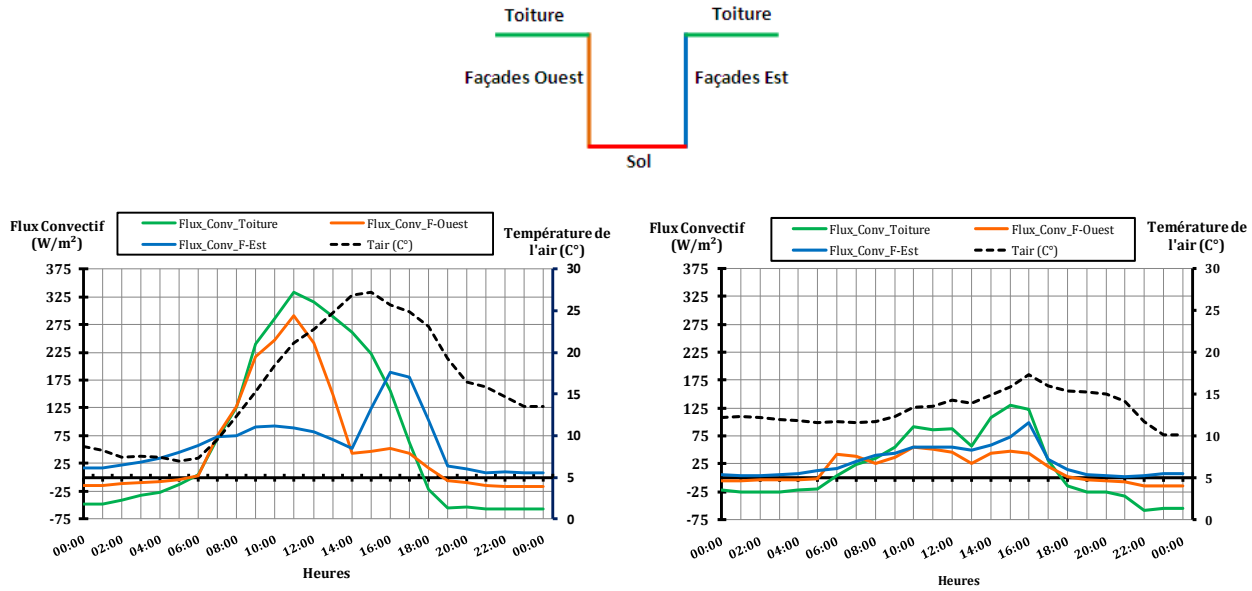


Figure IV. 49 Evolution journalière des flux convectifs simulés sur les surfaces des containers pour la journée du 06/04 (**à gauche**) et pour le 11/04 (**à droite**).

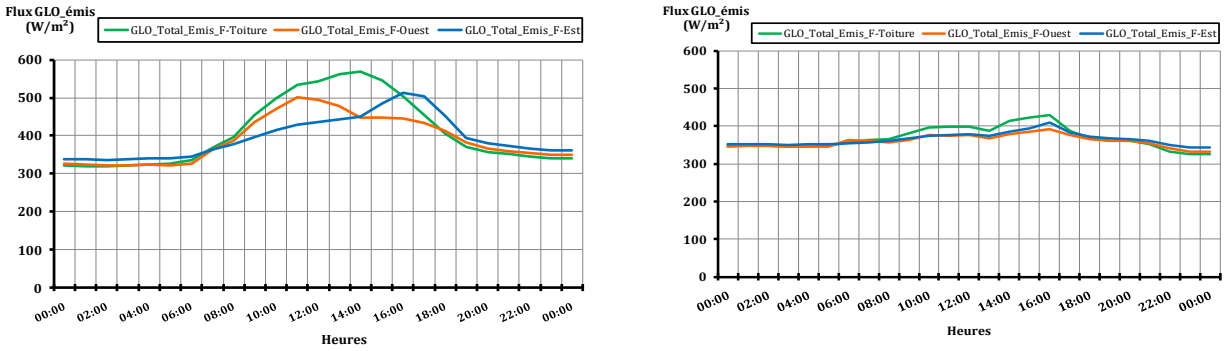


Figure IV. 50 Evolution journalière du flux infrarouge simulé émis par les surfaces des containers pour la journée du 06/04 (**à gauche**) et pour le 11/04 (**à droite**).

IV.6.3 Impact de forçage thermique des surfaces sur l'écoulement du vent à l'intérieur de la rue

Pour tenter de déterminer le rôle que peut avoir la température des surfaces sur la circulation d'air dans la rue, nous avons étudié deux configurations pour lesquelles le vent était perpendiculaire à l'axe de la rue. Pour mémoire, rappelons que les directions perpendiculaires à la rue sont 133° et 313°. Ces deux directions ont été observées une seule fois pendant la semaine considérée. L'intervalle d'étude a donc été élargi à des directions à $\pm$ 8° par rapport aux incidences perpendiculaires.

Les deux cas, présentés dans la **Figure IV. 51**, correspondent à deux instants de la journée du 05/04 lorsque la façade Est est ensoleillée :

- à 16h00, (incidence du vent de 309°, U_{moy} = 2,04 m/s) (**Figure IV. 51** en haut)
- à 18h00, (incidence du vent de 317°, U_{moy} = 1,05 m/s) (**Figure IV. 51** en bas).

Les résultats montrent qu'à 16h00, le mouvement descendant (W(S1) = -0,11m/s) le long de la façade Est (paroi face au vent) chauffée est opposé à l'action de la convection thermique qui tend à générer un mouvement ascendant (W(S3) = 0,29 m/s). Le centre du vortex est décalé vers la paroi chauffée, ce qui n'est pas le cas à 18h00 où le vortex est positionné vers le centre du canyon. En effet, à cette instant, la façade Est reçoit moins d'énergie solaire incidente du fait des masques. La vitesse du flux descendant jusqu'au bas de la rue est donc plus forte. Des résultats numériques similaires ont été publiés par **Sini** *et al.,* (1996) qui ont montré que l'action de la flottabilité réduit le mouvement d'advection descendant le long d'un mur chauffé situé face au vent.

Notons que, l'observation d'un unique vortex au milieu de la rue traduit la faible influence de la convection thermique sur la dynamique. En effet, plusieurs recherches ont montré que lorsque la convection thermique devient significative un double vortex apparait. **Marta** *et al.,* (2009) ont mené une étude numérique sur une rue canyon présentant un rapport d'aspect H/W = 0,7 afin d'étudier l'influence des différences thermiques entre les deux parois du canyon sur le régime d'écoulement. Ils ont identifiés deux régimes d'écoulement à l'intérieur de la rue canyon, lorsque le mur face au vent est ensoleillé. Un seul vortex est observé lorsque le nombre de Froude[20] est de l'ordre de 1 à 2. Ce régime de vent relativement fort correspond à des effets convectifs thermiques négligeables. Lorsque le nombre de Froude est petit (Fr $\cong$ 0,1), deux tourbillons contra-rotatifs apparaissent à l'intérieur du canyon, caractérisés par des intensités différentes. Il faut noter que le tourbillon inférieur est toujours de très faible intensité et donc difficilement observable dans la réalité instationnaire d'un site réel.

[20] Le nombre Froude caractérise dans un fluide l'importance relative des forces d'inertie et des forces de flottabilité.

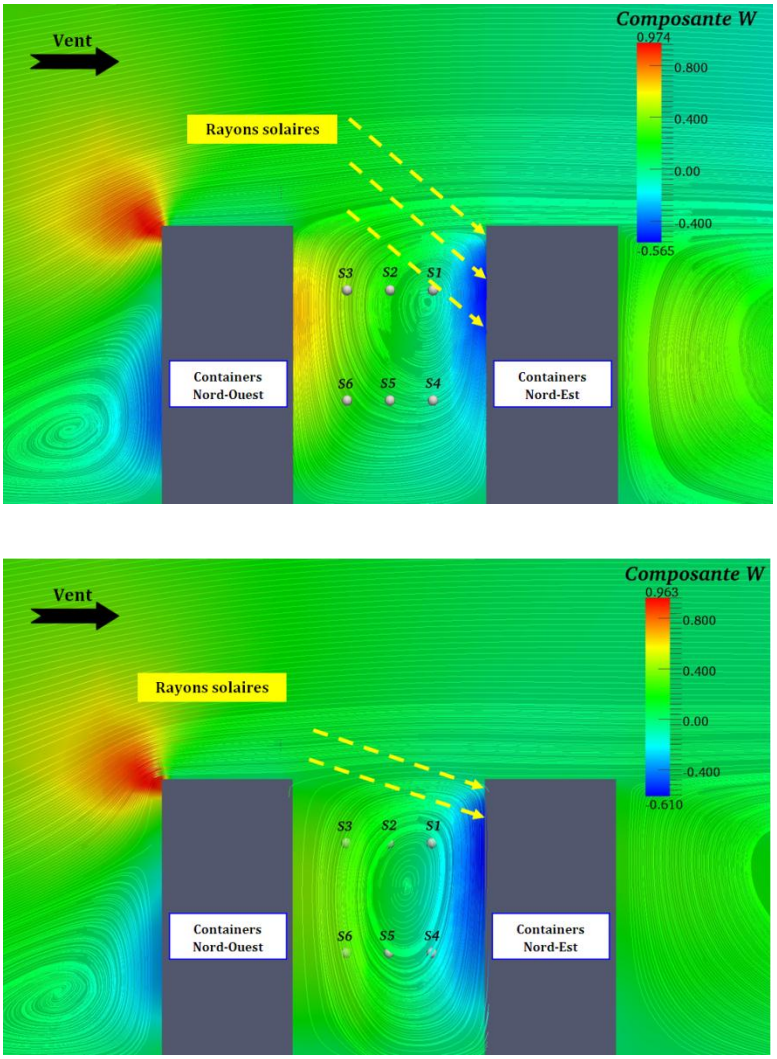
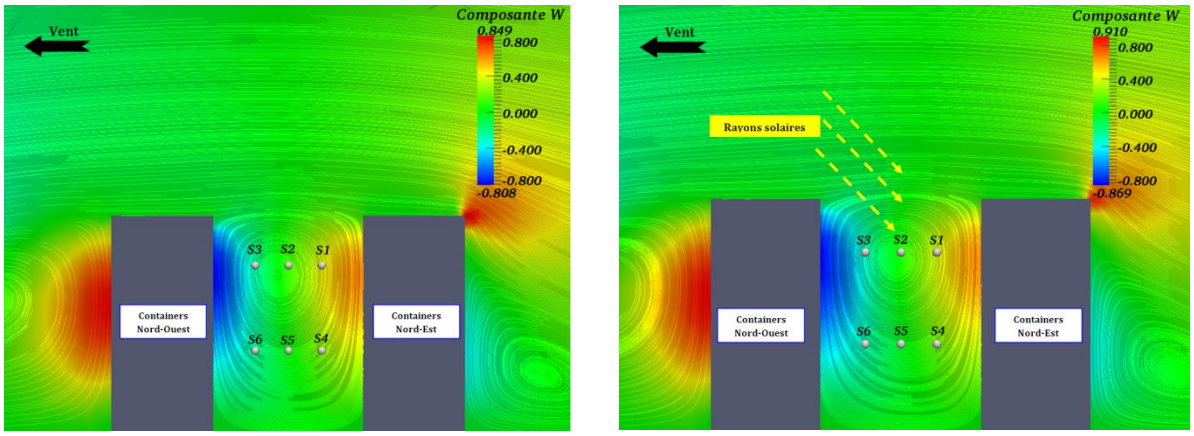


Figure IV. 51 Représentation de l'écoulement dans le plan vertical médian le 05/04 à 16h00 avec un vent de 309° (**en haut**) et le 05/04 à 18h00 avec un vent de 317° (**en bas**).

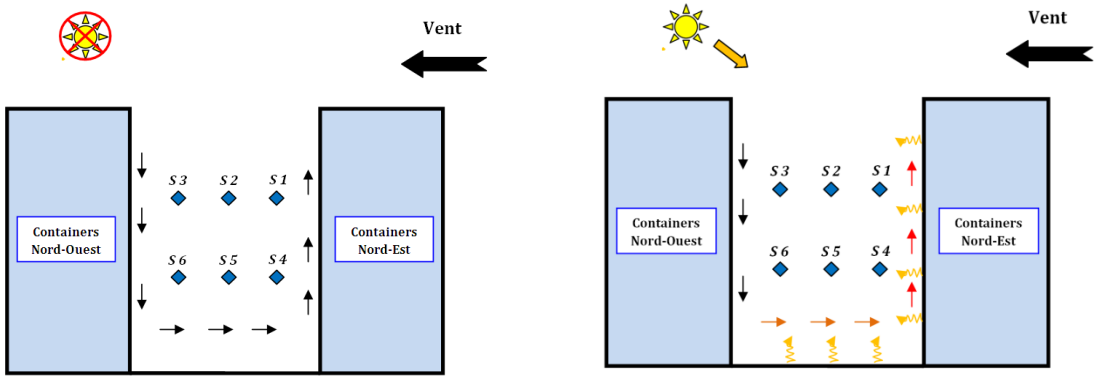
Les vitesses verticales W issues des simulations numériques pour la situation ensoleillée et chaude du 06/04 à 15h00 (vent de 2,33 m/s au 164°) ont été comparées au cas fictif sans effets thermiques où nous avons imposé, toute chose étant égale par ailleurs, des températures de surface égale à celle de l'air (27,2°C) et aucun transfert radiatif.

Pour le cas réel, la composante du vent perpendiculaire à l'axe de la rue traduit un mouvement de type vortex dans le canyon (**Figure IV. 52 à droite)** avec un mouvement d'air descendant près de la façade Ouest face au vent et ascendant réduit par la convection thermique près de la façade Est (**Figure IV. 53 à droite**) intensivement chauffée par le rayonnement solaire. L'annulation de la convection thermique entraine une augmentation de la composante verticale ascendante (**Figure IV. 53 et 53 à gauche**) le long de la paroi Est.



Cas sans soleil **Cas ensoleillé**

Figure IV. 52 Représentation de l'écoulement dans le plan vertical médian le 06/04 à 15h00. **A gauche** : cas sans soleil. **A droite** : Cas ensoleillé.



Cas sans soleil **Cas ensoleillé**

Figure IV. 53 Circulation de l'air à l'intérieur de la rue pour la journée du 06/04 à 15h00. **A gauche** : cas sans soleil. **A droite** : Cas ensoleillé.

Les vitesses verticales avec et sans thermique sont données dans le **Tableau IV. 10** à l'emplacement des six anémomètres. On voit que les effets thermiques sur le mouvement de l'air dans le canyon sont faibles mais perceptibles. La convection thermique agit dans le cas présent comme réducteur de l'intensité de recirculation dans la rue canyon surtout dans la partie thermiquement active (ici à l'Est, S1 et S4). Néanmoins, les différences observées restent faibles et on peut conclure que les effets thermiques sont ici limités, mais il faut noter que la situation est dynamiquement relativement active avec un vent de 2,33 m/s.

	S1	S2	S3	S4	S5	S6
W_{Num} (m/s) **avec thermique**	**0,46**	**0,19**	**-0,06**	**0,25**	**0,05**	**-0,12**
W_{Num} (m/s) **sans thermique**	**0,56**	**0,18**	**-0,10**	**0,40**	**0,04**	**-0,15**
W_{Exp} (m/s)	**0,48**	**0,20**	**-0,10**	**0,25**	**0,09**	**-0,18**

Tableau IV. 10 Comparaison des vitesses verticales W simulées pour les deux cas d'études, pour l'ensemble des soniques de la rue.

IV.7 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, la campagne de mesure EM2PAU et les instruments de mesures utilisées ont été présentés. Cette campagne a été utilisée pour fournir les données d'entrées pour notre modèle couplé ainsi qu'un support de comparaison et de validation de nos résultats. Dans un premier temps, cette validation a été effectuée par le biais d'outils statistiques, montrant une bonne performance générale du modèle pour la simulation des paramètres de confort exception faite de l'énergie cinétique turbulente.

Dans un second temps, des comparaisons locales aux mesures expérimentales issues de la campagne de mesure ont été effectuées. Pour chaque paramètre physique, les principales conclusions sont les suivantes:

Pour la température de surface, les résultats montrent un très bon accord avec les mesures. Cette adéquation des résultats provient en particulier du forçage des températures intérieures des containers mesurées à chaque pas temps, mais aussi de la faible inertie thermique de la paroi des containers en acier peint (2,5 mm d'épaisseur). Certaines surestimations observées sont imputables en partie au pas de temps horaire choisi pour prescrire les conditions limites et au lissage des résultats qui pourrait expliquer les maxima écrêtés que nous avons obtenus. Au niveau du sol, les comparaisons ont montré la sensibilité de la température de surface nocturne aux propriétés physiques des matériaux en particulier la conductivité et la capacité thermique. Le fait que la couche du sol au-dessous des containers ait été ignorée pourrait expliquer les surestimations des températures de surface en milieu de journée. Il serait souhaitable de réaliser des ajustements sur la physique des transferts de chaleur par conduction du modèle de sol dans le code *Solene* afin de prendre en compte les échanges horizontaux.

Pour les températures de l'air, les comparaisons ont montré que le modèle thermique du code CFD simule très bien les températures d'air. Des sous-estimations ont néanmoins été observées près des parois. Ces écarts sont probablement imputables au maillage volumique grossier utilisé au niveau des parois, qui ne permet pas de représenter précisément les forts gradients thermiques pariétaux dans les fines couches limites thermiques.

Pour la vitesse du vent, le modèle numérique simule de manière relativement satisfaisante l'écoulement du vent à l'échelle locale à condition de bien représenté les conditions aux limites d'entrée et l'environnement immédiat. On a montré la sensibilité des résultats aux valeurs de la longueur de rugosité des terrains alentours. Nous avons aussi noté le bon accord obtenu pour la composante verticale W dans la rue canyon.

Pour l'énergie cinétique turbulente, l'analyse des comparaisons calcul/expérience a montré qu'un profil de turbulence en équilibre exprimé à l'aide de l'équation **IV.3** donne des résultats peu satisfaisants. Un profil de turbulence à l'entrée de la veine calculé à partir de la mesure

n'améliore pas significativement la qualité les résultats et ne permet pas de représenter correctement l'énergie cinétique turbulente à l'intérieur de la canopée.

« Mon devoir à moi, ma recherche, c'est d'essayer de mettre cet homme d'aujourd'hui hors du malheur, hors de la catastrophe ; de le mettre dans le bonheur, dans la joie quotidienne, dans l'harmonie. Il s'agira tout particulièrement de rétablir ou d'établir l'harmonie entre l'homme et son milieu.[21]»

Chapitre V

Caractérisation du confort extérieur à l'échelle des éco-quartiers et indicateurs morphologiques de dépendance

Sommaire

V.1 Introduction **194**

V.2 Domaines de calcul et conditions physiques initiales et aux limites **195**

V.3 Choix des indicateurs physico-morphologiques **206**

V.4 Caractérisation des paramètres de confort des trois quartiers pour les deux scénarios d'études **215**

V.5 Caractérisation du confort à l'échelle des trois quartiers étudiés **226**

V.6 Dépendance et indépendance des indicateurs morphologiques avec le confort extérieur : lectures et corrélations **236**

V.7 Conclusion **239**

[21] **Le Corbusier**, *l'architecture pour émouvoir. Jean JENGER. Edition Gallimard Arts, 2004, p 96*

V.1 Introduction

Suite à la validation expérimentale du modèle numérique à partir de la campagne de mesures EM2PAU, ce chapitre présente une application du modèle sur trois configurations réelles et géométriquement complexes. Ces trois configurations correspondent aux éco-quartiers nantais (Bottière Chénaie et Tripode) et lyonnais (Lyon Confluence) qui sont représentatifs des trois sous-configurations de la forme urbaine traversante présentées au chapitre II.

Afin que la comparaison soit cohérente entre les différentes morphologies des éco-quartiers, nous proposons deux scénarios d'études. Le premier scénario consiste à appliquer aux trois configurations les données météorologiques issues du climat caractéristique de la ville de Nantes (climat océanique). Le second scénario consiste à appliquer les données météorologiques issues du climat caractéristique de la ville de Lyon (climat semi-continental). Pour distinguer clairement les deux climats étudiés, deux journées "représentatives" ont été définies à partir d'un traitement statistique des données météorologiques régionales.

Dans une première partie, nous présenterons les données météorologiques nécessaires à nos simulations et indiquées dans le **Tableau V. 1**. Pour caractériser chaque journée d'étude, les paramètres numériques et les hypothèses de calculs seront présentés ensuite.

	Paramètres physiques d'entrée nécessaires				
Modèle thermo-radiatif	Rayonnement solaire incident (K_s)	Flux infrarouge atmosphérique ($L\downarrow$)	Température à l'intérieur des gabarits ($T_{air,int}$)	Caractéristiques radiatives et thermiques des matériaux de sol et des façades	
Modèle CFD	Direction du vent	Température de l'air sous abri (T_{air})	Vitesse de frottement (U^*)	Longueur de rugosité (z_0)	Energie cinétique turbulente (TKE)

Tableau V. 1 Paramètres physiques d'entrée nécessaires aux simulations.

Dans une seconde partie, on discutera des indicateurs physico-morphologiques en relation avec le confort : la porosité aux vents dominants, l'albédo moyen des quartiers, la durée moyenne d'ensoleillement et le facteur de vue moyen du ciel. L'objectif sera alors de croiser les données de cette analyse avec les résultats de confort.

Dans une troisième partie, nous analyserons pour les trois éco-quartiers et pour les deux scénarios d'étude les paramètres physiques de confort issus des simulations. Pour cela, on utilisera l'indice de confort PET (Physiological Equivalent Temperature) le plus utilisé pour l'évaluation du confort dans les espaces extérieurs. Les valeurs de PET seront présentées sous forme de "cartes de confort" traduisant les différentes perceptions thermiques ressenties par un individu. L'évolution journalière des perceptions thermiques servira de critère d'analyse comparée des trois configurations étudiées.

Pour finir, nous croiserons les indicateurs physico-morphologiques avec les résultats de confort issu de l'indice PET et l'examen des relations confort/indicateurs physico-morphologiques permettra de mettre en évidence les indicateurs dépendants et indépendants du confort extérieur.

V.2 Domaines de calcul et conditions physiques initiales et aux limites

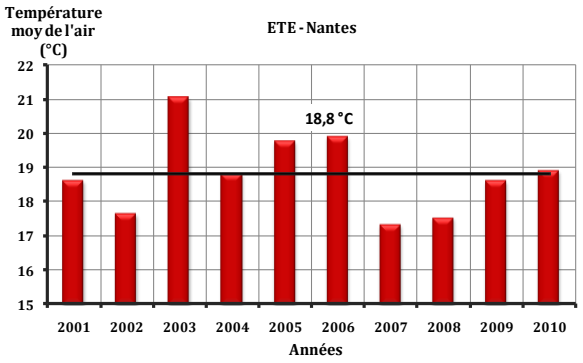
V.2.1 Choix des journées représentatives des deux climats d'étude

Nous avons choisi de caractériser le climat de la ville de Nantes et de la ville de Lyon par une journée dite "représentative" de la météorologie locale, construite par le traitement statistique de trois variables physiques associées au confort thermique extérieur. Il s'agit de la température de l'air, de la vitesse du vent et de l'énergie solaire globale incidente, en moyennes journalières, pour la période estivale du 1er juin au 30 août et sur les 10 années de la période de 2001 à 2010. Elles sont extraites des données météorologiques fournies par les stations Météo-France de Bouguenais à Nantes et de Bron à Lyon.

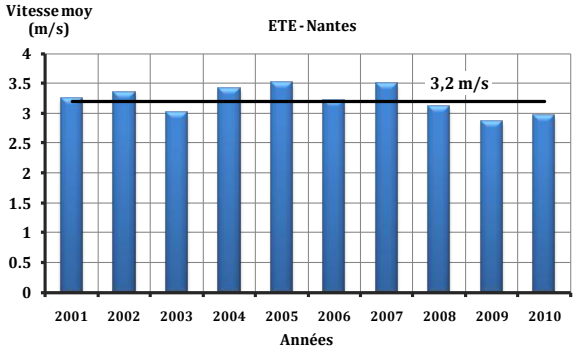
Les valeurs moyennes trimestrielles et la moyenne décennale (Tableaux des **Figure V. 1** et **Figure V. 2**) de la période estivale sont présentées sur les **Figure V. 1** et **Figure V. 2** afin de visualiser la variabilité interannuelle des trois paramètres sélectionnés.

La recherche de "journées représentatives" de chacun des climats a consisté à filtrer l'ensemble des moyennes journalières sur la base d'un écart type inférieur ou égale à 20 % autour de la moyenne décennale. Pour chacun des trois paramètres physiques, seules les dates où les trois paramètres physiques remplissent simultanément ce critère sont sélectionnées. Nous identifions ainsi deux journées qui se sont reproduites respectivement quatre fois (Nantes) et cinq fois (Lyon) durant ces dix dernières années. Il s'agit de la journée du 19 juillet pour Nantes et celle du 30 juillet pour Lyon. On obtient le même résultat avec un test plus strict de filtrage sur l'écart type à ± 15 % et ± 10 %.

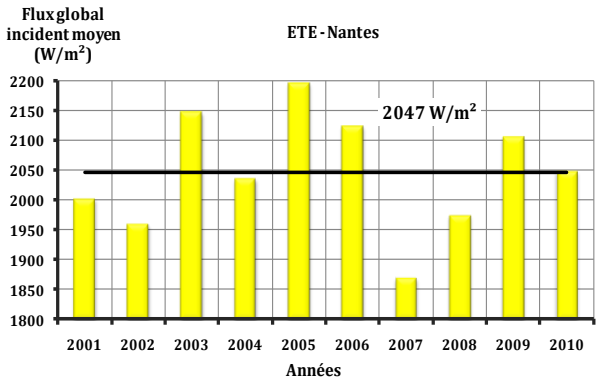
Nous avons donc considéré les moyennes horaires correspondant à quatre 19 juillet pour Nantes et cinq 30 juillet pour Lyon et retenu parmi elles celle qui présente le plus faible écart-type par rapport à leur moyenne (**Figure V. 3**). Ceci a conduit à retenir pour la ville de Nantes, la journée du 19 juillet 2009 (scénario A) et pour la ville de Lyon, la journée du 30 juillet 2005 (scénario B).



(a)



(b)

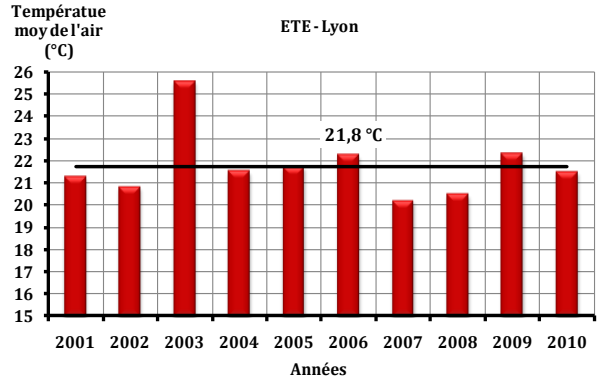


(c)

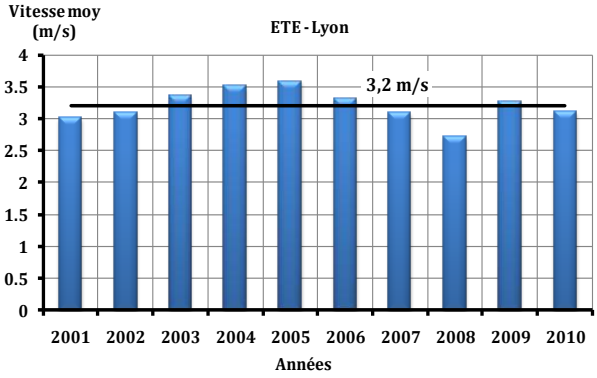
	$T_{moy\ air}$ (C°)	V_{mo} (m/s)	$K\downarrow_{moy}$ (Joules/cm²)
2001	18.6	3.3	2003
2002	17.6	3.3	1959
2003	21.0	3.0	2147
2004	18.8	3.4	2036
2005	19.8	3.5	2197
2006	19.9	3.2	2125
2007	17.3	3.5	1870
2008	17.5	3.1	1975
2009	18.6	2.9	2105
2010	18.9	3.0	2048
2001-2010	**18,8**	**3,2**	**2047**
Ecart-type	**1,2**	**0,2**	**99**

(d)

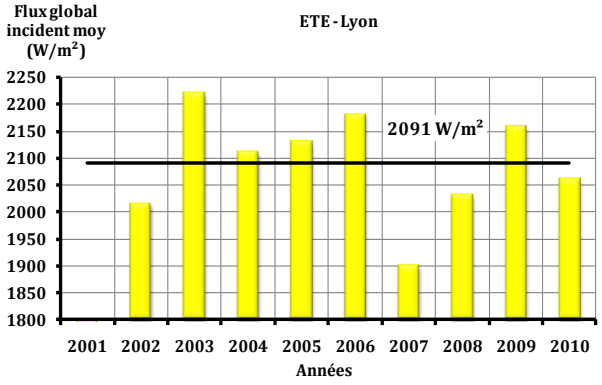
Figure V. 1 Evolution interannuelle de la moyenne de la température de l'air **(a)**, de la vitesse du vent **(b)** et du flux solaire global incident **(c)**, pour la ville de Nantes sur la période estivale (2001-2010). **(d)** Valeurs moyennes trimestrielles pour chaque année, décennales et écarts types pour la période estivale.



(a)



(b)



(c)

	$T_{moy\ air}$ (C°)	V_{moy} (m/s)	$K\downarrow_{moy}$ (Joules/cm²)
2001	21.3	3.0	-
2002	20.8	3.1	2016
2003	25.5	3.4	2222
2004	21.5	3.5	2112
2005	21.7	3.6	2132
2006	22.2	3.3	2182
2007	20.2	3.1	1901
2008	20.5	2.7	2032
2009	22.3	3.3	2160
2010	21.5	3.1	2063
2001-2010	**21.75**	**3.2**	**2091**
Ecart-type	**1,5**	**0,26**	**99**

(d)

Figure V. 2 Evolution interannuelle de la moyenne de la température de l'air **(a)**, de la vitesse du vent **(b)** et du flux solaire global incident **(c)**, pour la ville de Lyon sur la période estivale (2001-2010). **(d)** Valeurs moyennes trimestrielles pour chaque année, décennales et écarts type pour la période estivale.

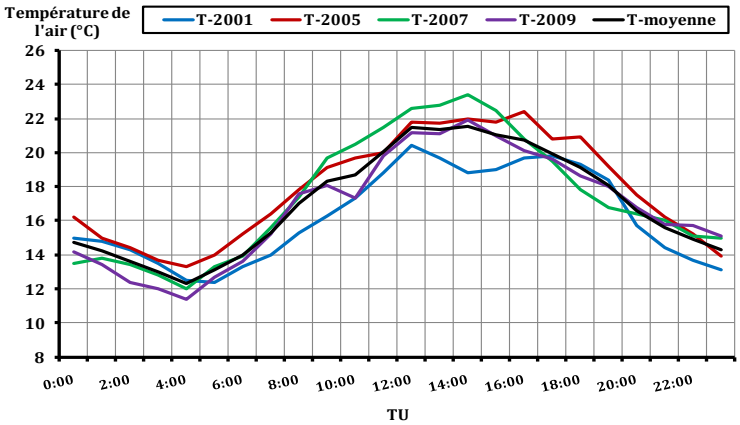
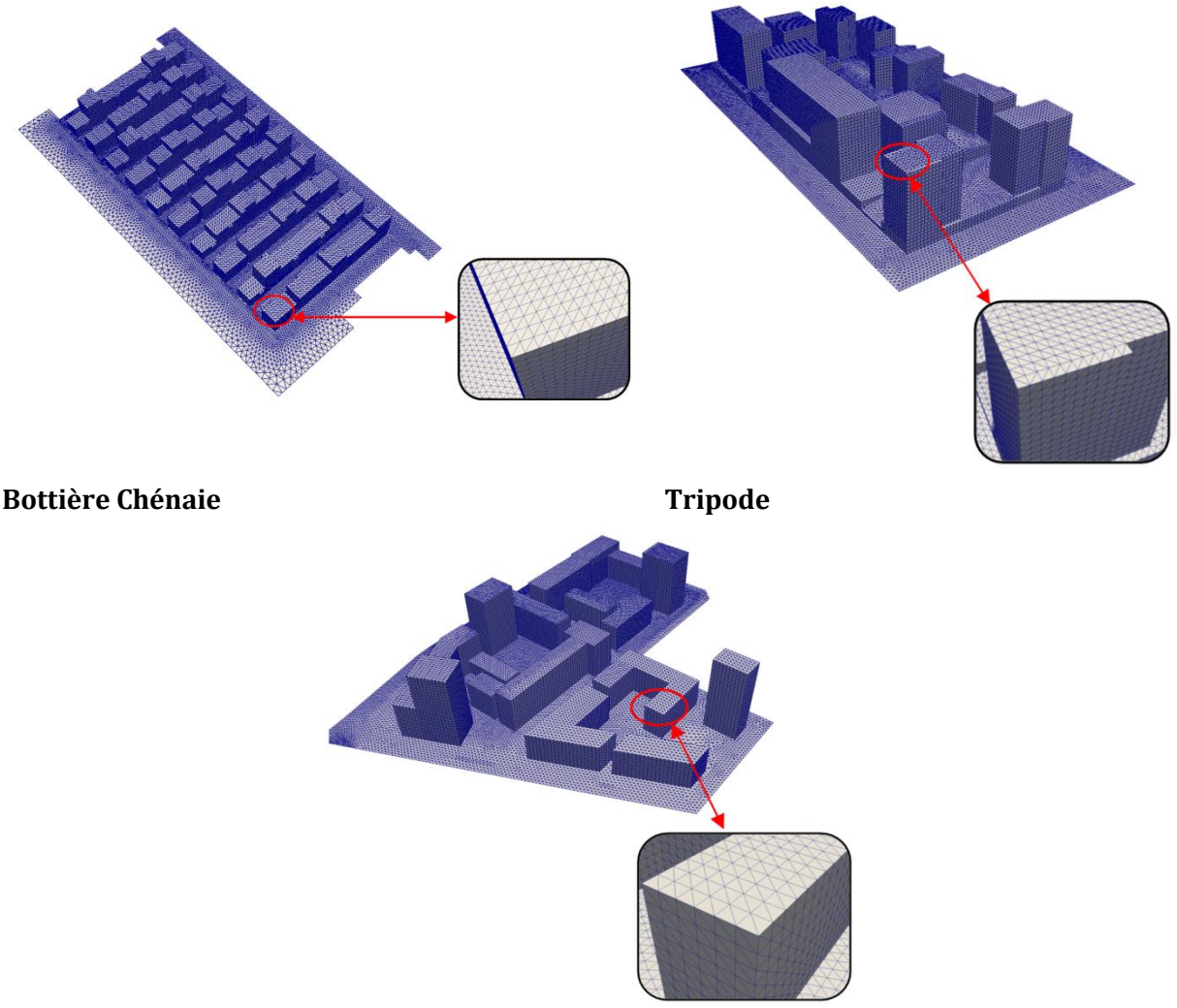


Figure V. 3 Evolution journalière de la moyenne horaire de la température pour la ville de Nantes pour les 4 années filtrées.

V.2.2 Description des domaines de calcul

Les bâtiments et les espaces publics des trois éco-quartiers sélectionnés ont été maillés par triangulation régulière sur les parois et le sol près des bâtiments et à l'aide d'une fonction d'étirement lorsque l'on s'éloigne des bâtiments (**Figure V. 4**). La taille des mailles régulières est de 0.18 m^2 donnant ainsi 58847 éléments surfaciques pour le projet Lyon Confluence, 57008 pour le projet Tripode et 55268 pour le projet Bottière Chénaie. Le choix de la taille a été fortement influencé par le calcul des facteurs de forme dans le modèle *Solene*. En effet, plusieurs tests sur la sensibilité du calcul des facteurs de forme au nombre de mailles surfaciques ont été réalisés. Les résultats ont montré qu'à partir de 65000 mailles le calcul des facteurs de forme conduit à des résultats déficients supérieurs à 1, pour des raisons numériques qui restent inexpliquées. Notons aussi que l'environnement immédiat des trois éco-quartiers a été pris en considération dans les simulations couplées.



Bottière Chénaie **Tripode**

Lyon Confluence

Figure V. 4 Maillage surfacique des trois projets : Bottière Chénaie, Tripode et Lyon Confluence.

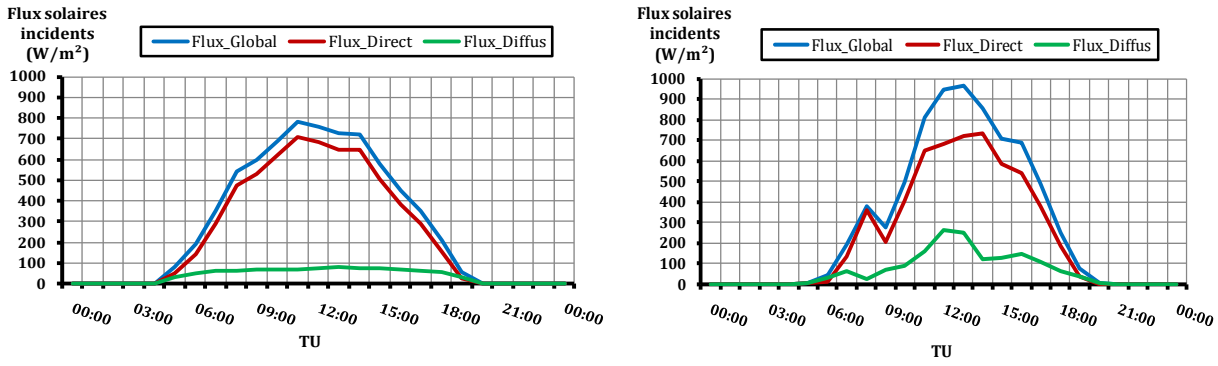
V.2.3 Conditions aux limites physiques du modèle thermo-radiatif

V.2.3.1 Les données géographiques

Les informations géographiques nécessaires aux simulations thermo-radiatives sont la latitude et la longitude : 47,22° Nord, 1,56° Est pour Nantes et 45,75° Nord, 4,84° Est pour Lyon.

V.2.3.2 Le rayonnement solaire incident

Pour la ville de Nantes, la journée retenue est caractérisée par une évolution régulière du flux solaire global incident, la valeur maximale enregistrée est de 780 W/m^2 à 11h00 (**Figure V. 5 à gauche**). La valeur élevée du flux solaire direct relativement au diffus atteste de la clarté du ciel durant cette journée. Pour la ville de Lyon, le flux solaire global incident est nettement plus élevé avec une valeur maximale de l'ordre de 968 W/m^2, enregistrée à 13h00 (**Figure V. 5 à droite**). En revanche, la journée "représentative" lyonnaise est manifestement caractérisée par un ciel clair partiellement nuageux et marquée par un flux diffus supérieur à celui enregistré à Nantes, notamment entre 09h00 et 13h00 (**Figure V. 5 à droite**).
Les flux solaires diffus, direct et infrarouges atmosphériques (données indisponibles à Météo-France) ont été obtenus pour les deux scénarios d'étude par la station météorologique du dispositif permanent du SAP (Secteur Atelier pluridisciplinaire) de L'IRSTV pour la journée de 19 juillet 2009 et par le serveur de la station de mesure de la lumière naturelle et du rayonnement solaire de l'ENTPE (Ecole Nationale Des Travaux Publics de l'Etat) pour la 30 juillet 2005 (http://idmp.entpe.fr/vaulx/).

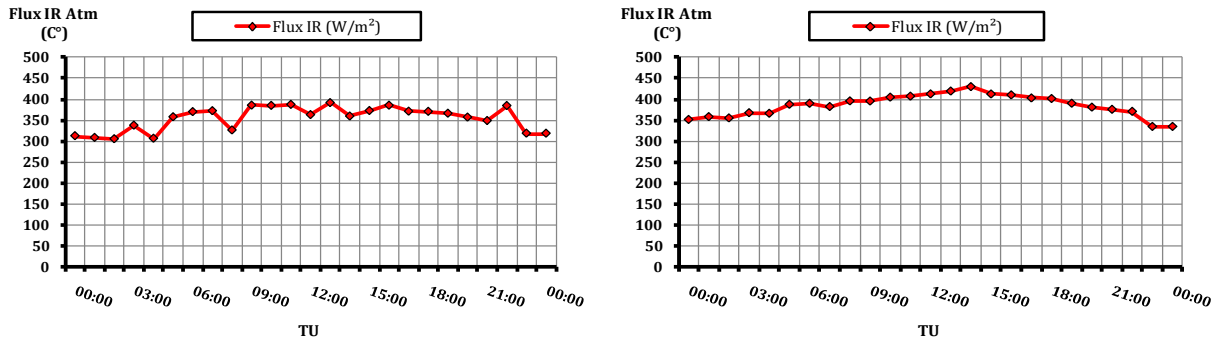


Nantes **Lyon**

Figure V. 5 Evolution des flux solaires incidents pour les journées estivales "représentatives". **A gauche** : journée du 19/07/2009 à Nantes. **A droite** : journée du 30/07/2005 à Lyon.

V.2.3.3 Le flux infrarouge atmosphérique

Pour la ville de Nantes, l'évolution du flux infrarouge atmosphérique présentée sur la **Figure V. 6** comporte des fluctuations qui sont probablement dues à des petits passages nuageux durant la journée et à la présence de vapeur d'eau dans l'atmosphère durant la nuit. La valeur maximale mesurée est de 392 W/m^2 mesurée à 13h00. En revanche, pour la ville de Lyon, l'évolution journalière du flux IR est plus régulière avec une augmentation qui débute à 03h00 et perdure jusqu'à 13h00 où la valeur maximale de 430 W/m^2 a été enregistrée. Après ce pic, les valeurs diminuent progressivement pour atteindre un minimum (334 W/m^2) à 23h00.



Nantes **Lyon**

Figure V. 6 Evolution du flux infrarouge atmosphérique en moyenne horaire pour les journées estivales "représentatives" sélectionnées. **A gauche** : journée du 19/07/2009 à Nantes (source: SAP, IRSTV). **A droite** : journée du 30/07/2005 à Lyon (source : http://idmp.entpe.fr/vaulx/).

V.2.3.4 Les températures à l'intérieur des bâtiments et dans la couche intérieure du sol

Dans le cadre du projet **HUMIRISK** (2010), le CSTB a mesuré pendant 6 mois (07/12/09 – 07/05/10) la température intérieure d'un appartement rénové (dépourvu d'installation de climatisation et chauffage désactivé) avec isolation renforcée dans le quartier des Dervallières, pour évaluer les risques liés à l'humidité et la qualité de l'isolation. Les logements construits dans les éco-quartiers bénéficient en général d'une isolation de bonne qualité. Nous avons donc utilisée les températures intérieures mesurées lors d'une journée relativement chaude (07/05/2010) comme conditions de forçage pour les deux scénarios de simulation. Les résultats sont présentés dans la **Figure V. 7**.

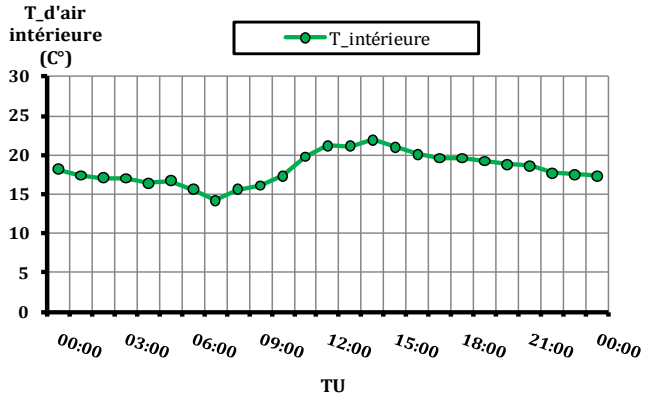


Figure V. 7 Evolution de la température de l'air à l'intérieur d'un appartement (T4) pour la journée du 07/05/2010 à Nantes.

Pour les températures du sol, les résultats de la campagne de mesure EM2PAU ont montré qu'à partir de 50 cm de profondeur, les températures peuvent être considérées comme pratiquement constantes, de l'ordre de 22°C pour la période estivale. Pour le conditionnement de nos simulations, la température profonde du sol a donc été fixée à 22°C à Nantes comme à Lyon.

V.2.3.5 Caractéristiques physiques des matériaux de parois

Les propriétés thermo-physiques des matériaux composant les bâtiments et le sol des quartiers étudiés ont été extraites à partir de plusieurs références bibliographiques (**ASHRAE Fundamentals**, 2005 ; **Mazeria**, 1976). Pour mémoire, les valeurs de l'albédo des surfaces de chaque quartier ont été présentées dans la section **II.4**. Les valeurs des paramètres sont données dans les **Tableau V. 2**, **V.3** et **V.4**.

Matériaux	Epaisseur φ (m)	Emissivité ε (-)	Conductivité λ (W m^{-1} K^{-1})	Masse volumique ρ (kg m^{-3})	Capacité thermique C_p (J kg^{-1} K^{-1})
Façades et toitures					
Béton armé	**0,25**	**0,95**	**1,75**	**2300**	**1000**
Laine de verre	**0,15**	**-**	**0,04**	**30**	**1000**
Sol					
Asphalte	**0,15**	**0,95**	**2,4**	**2100**	**950**
Pavage béton	**0,10**	**0,95**	**1,75**	**2300**	**1000**
Gazon	**0,20**	**0,95**	**2,4**	**2100**	**950**
Terre	**0,70**	**-**	**1,3**	**1600**	**1100**

Tableau V. 2 Valeurs des paramètres physiques des matériaux utilisées pour le quartier Bottière Chénaie.

Matériaux	Epaisseur (φ) (m)	Emissivité (ε) (-)	Conductivité λ (W m^{-1} K^{-1})	Masse volumique ρ (kg m^{-3})	Capacité thermique C_p (J kg^{-1} K^{-1})
Façades et toitures					
Béton armé	**0,25**	**0,95**	**1,75**	**2300**	**1000**
Laine de verre	**0,15**	**-**	**0,04**	**30**	**1000**
Sol					
Sable	**0,20**	**0,95**	**0,032**	**1515**	**800**
Pavage béton	**0,10**	**0,95**	**1,75**	**2300**	**1000**
Gazon	**0,20**	**0,95**	**2,4**	**2100**	**950**
Terre	**0,70**	**-**	**1,3**	**1600**	**1100**

Tableau V. 3 Valeurs des paramètres physiques des matériaux utilisées pour le quartier Lyon Confluence.

Matériaux	Epaisseur φ (m)	Emissivité ε (-)	Conductivité λ (W m^{-1} K^{-1})	Masse volumique ρ (kg m^{-3})	Capacité thermique C_p (J kg^{-1} K^{-1})
Façades et toitures					
Béton armé	**0,25**	**0,95**	**1,75**	**2300**	**1000**
Laine de verre	**0,15**	**-**	**0,04**	**30**	**1000**
Aluminium	**0,025**	**0,95**	**237**	**2700**	**897**
Acier bardage	**0,05**	**0,95**	**52**	**7830**	**500**
Sol					
Asphalte	**0,15**	**0,95**	**2,4**	**2100**	**950**
Pavage béton	**0,10**	**0,95**	**1,75**	**2300**	**1000**
Bassin d'eau	**0,60**	**0.95**	**0,6**	**1000**	**4186**
Gazon	**0,20**	**0,95**	**2,4**	**2100**	**950**
Terre	**0,70**	**-**	**1,3**	**1600**	**1100**

Tableau V. 4 Valeurs des paramètres physiques des matériaux utilisées pour le quartier Tripode.

V.2.4 Conditions aux limites physiques du modèle thermo-aéraulique

V.2.4.1 La direction du vent

Selon les données météorologiques fournies par Météo-France (**Figure V. 8**, **en haut**), la direction du vent fluctue dans le secteur Sud-Ouest entre 190° et 270° pour la journée du 19/07/2009 à Nantes et dans le secteur Nord entre 300° et 40° pour la journée du 30/07/2005 à Lyon, conformément à la rose des vents d'été des deux villes (**Figure V. 8**, **en bas**). Nous avons choisi donc de considérer une direction de vent Ouest pour Nantes et Nord pour Lyon.

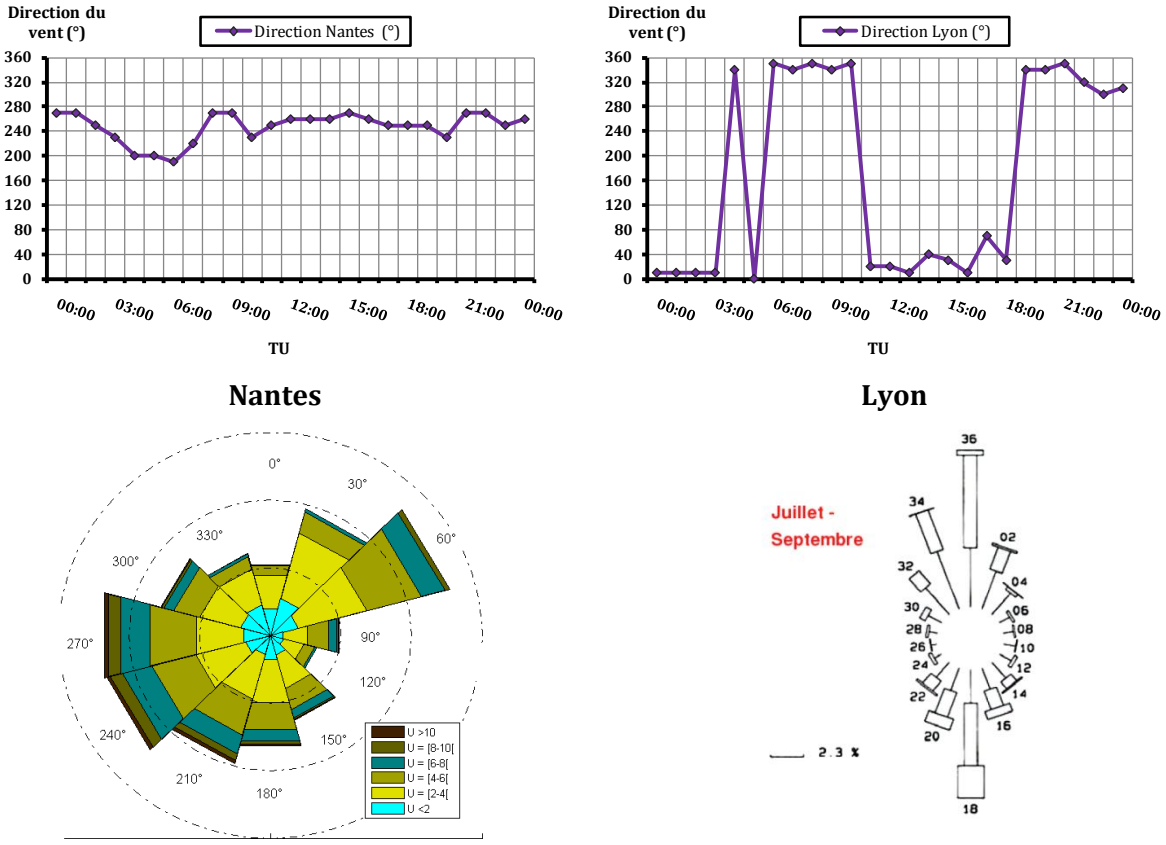


Figure V. 8 En haut : Evolution journalière de direction du vent en moyenne horaire pour la journée du 19/07/2009 à Nantes **(à gauche)** et pour la journée du 30/07/2005 à Lyon **(à droite)** (source : **Météo-France**). **En bas :** roses des vents en été pour Nantes et Lyon (source : **CSTB**).

V.2.4.2 Le profil de vent à l'entrée de la veine

Nous avons réutilisé la formulation logarithmique (**IV.2**) proposée par **Launder** *et* **Spalding**, (1972) pour représenter le profil de vent en entrée de domaine de calcul. Les vitesses de frottement $\boldsymbol{U^*}$ qui interviennent dans cette formulation sont calculées à partir des vitesses moyennes de vent mesurées à 10 m et des longueurs de rugosité $\boldsymbol{z_0}$. Cependant, les stations météorologiques de Nantes et de Lyon étant installées en périphérie de la ville, les vitesses moyennes du vent mesurées $\boldsymbol{U_{moy\ météo}(z)}$ sont certainement d'avantages représentatives d'une rugosité $\boldsymbol{C_r(z)}$ de type rase-campagne. Le recalage pour un site urbain peut être fait à l'aide de la formule (**V.1**) de l'**Eurocode** (2005) :

$$\boldsymbol{u(z) = C_r(z).C_0(z).U_{moy\ météo}} \qquad \textbf{(V.1)}$$

où $C_r(z)$ est un coefficient de rugosité, $C_0(z)$ un coefficient orographique généralement égal à 1 et $U_{moy\ météo}$ le vitesses du vent mesurée par la station météorologique.
Le coefficient de rugosité est donné par l'équation (**V.2**).

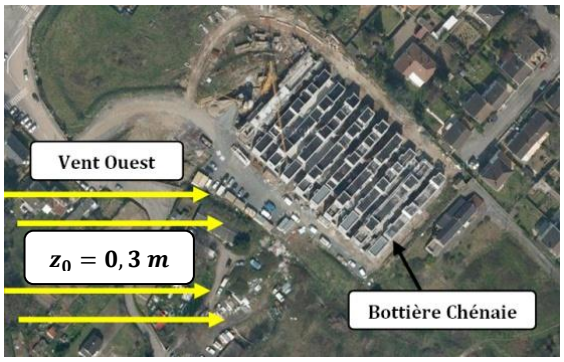
$$C_r(z) = k_r\, ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \qquad \textbf{(V.2)}$$

où z_0 est la longueur de rugosité et k_r le facteur de terrain dépendant de la longueur de rugosité z_0 calculée à l'aide de la formule suivante :

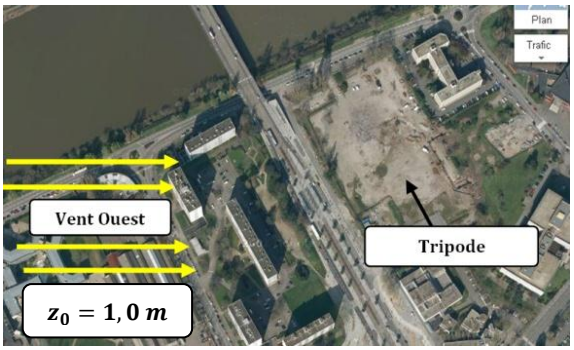
$$k_r = 0,19\left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \qquad \textbf{(V.3)}$$

où $z_{0,II}$ = 0,05 m.

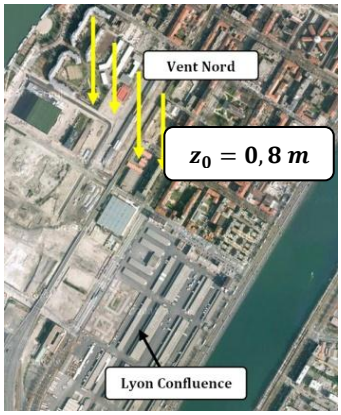
Des valeurs empiriques de longueur de rugosité ont été imposées dans les directions des vents dominants, suivant la nature des terrains et des obstacles qui entourent les quartiers en amont. Pour le scénario A (vent d'Ouest) des longueurs de rugosité de 0,3, 0,4 et 1,0 m ont été imposées respectivement pour les quartiers Bottière Chénaie, Lyon confluence et tripode (**Figure V. 10**) et 0,5, 0,8 et 0,2 pour le scénario B.



Bottière Chénaie



Tripode



Lyon Confluence

Figure V. 9 Valeurs empiriques des longueurs de rugosité suivant la nature du site pour chaque quartier.

A partir des nouvelles vitesses moyennes de vent $\boldsymbol{u(z)}$ recalées à 10 m et des valeurs empiriques des longueurs de rugosité (**Figure V. 10 et**
Figure V. 9), les vitesses de frottement $\boldsymbol{U^*}$ont été calculées pour chaque pas de temps par l'intermédiaire de l'équation (**V.4**) :

$$\boldsymbol{U^* = u(z).0,42/ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \qquad \textbf{(V.4)}$$

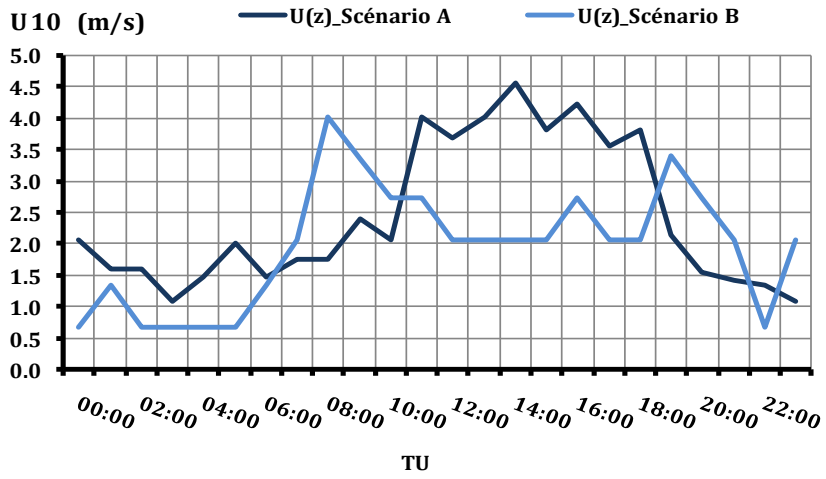
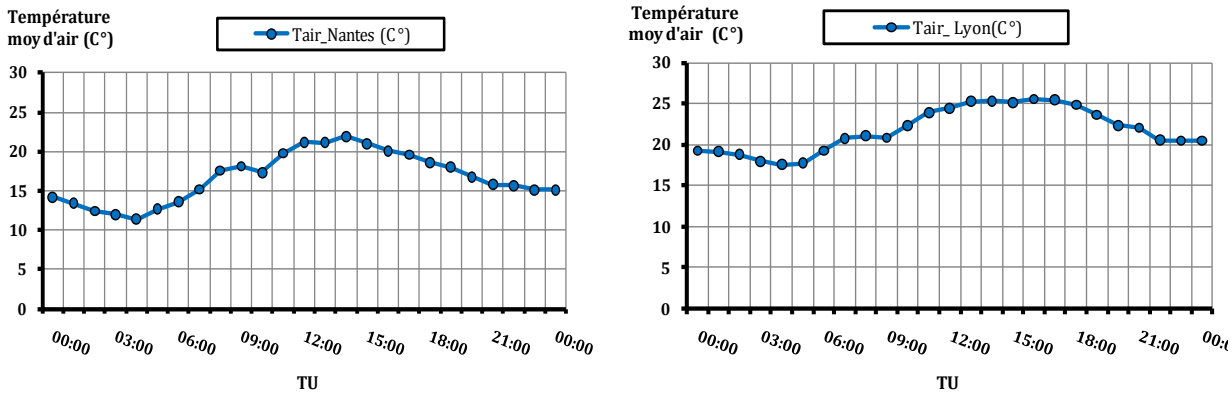


Figure V. 10 Evolution horaire de la vitesse de référence $\boldsymbol{U_{10}}$ pour les deux scénarios d'étude.

V.2.4.3 Les profils d'entrée de l'énergie cinétique turbulente, du taux de dissipation et de la température de l'air

En l'absence de données pour l'énergie cinétique turbulente et son taux de dissipation, nous avons utilisé les deux relations (**IV. 3** et **IV. 4**) données par **Launder** *et* **Spalding**, (1972) pour définir le profil d'entrée de ces variables.
En revanche, la température de l'air mesurée sous abri par les stations météorologiques des aéroports nantais et lyonnais a été directement utilisée avec l'hypothèse de profils verticaux uniformes en entrée du domaine. L'évolution temporelle des moyennes horaires est donnée pour les deux sites sur la **Figure V. 11.**



Nantes **Lyon**

Figure V. 11 Evolution de la température moyenne horaire de l'air pour les journées estivales "représentatives". **A gauche** : journée du 19/07/2009 à Nantes. **A droite** : journée du 30/07/2005 à Lyon (source : **Météo-France**).

Pour la ville de Nantes, la température maximale de 21,9°C a été enregistrée à 14h00 et la valeur minimale de 11,4°C à 04h00 du matin. La température moyenne pour l'ensemble de la journée était de 16,7°C. Pour la ville de Lyon, les températures présentent des valeurs supérieures à celles de Nantes, avec des maximales et minimales enregistrée de 25,6 C° à 16h00 et de 17,6°C à 04h00. L'écart moyen journalier entre les deux villes est de 5,1°C.

V.2.5 Les paramètres numériques et hypothèses de calcul

Les paramètres numériques utilisés au chapitre IV pour les simulations sur la maquette EM2PAU ont été réutilisées dans cette étude. Ainsi, afin de limiter le nombre des mailles volumiques, le domaine de calcul de chaque quartier a été subdivisé en deux parties distinctes recollées l'une à l'autre par une fonction de recollement conforme. De même, chaque quartier a été décomposé en huit parties virtuelles de façon à optimiser le temps de calcul sur un calculateur multiprocesseur à mémoire distribuée.
Dans cette étude, nous avons choisi de négliger les simulations préliminaires d'initialisation. Ce choix a été dicté par des temps des simulations estimés trop longs. En effet, le temps de calcul pour la simulation est d'environ 8 jours, soit 48 jours pour deux scénarios sur trois quartiers. Prendre en considération les simulations d'initialisation aurait augmenté la durée de simulations à 3 mois de calcul, durée incompatible avec le temps imparti à cette thèse.

V.3 Choix des indicateurs physico-morphologiques

Les indicateurs physico-morphologiques choisis pour le croisement avec les résultats de confort sont présentés ici. Le maillage utilisé pour la détermination des indicateurs physico-morphologiques est similaire à celui utilisé pour le calcul des paramètres physiques de confort.

Notons que les toitures des bâtiments n'ont pas été considérées dans cette partie parce qu'à l'échelle du quartier les toitures ne contribuent pas significativement aux échanges entre l'individu et son environnement.

V.3.1 Durée moyenne d'ensoleillement

La durée d'ensoleillement désigne la somme des intervalles de temps durant lesquels un objet fixe (bâtiment, quartier par exemple) est soumis à insolation au cours d'une période donnée. Elle dépend de la latitude du quartier, de son environnement masque et de la nébulosité du ciel. La durée d'ensoleillement d'un quartier peut affecter la température radiante moyenne, composante physique du confort thermique qui intègre les flux de courtes et de grandes longueurs d'ondes. Plus la durée d'ensoleillement augmente, plus la quantité d'énergie solaire incidente est élevée, ce qui peut accroître les risque d'inconfort. La durée d'ombre déduite à partir des simulations de durée d'ensoleillement a été aussi calculée. Le calcul de cet indicateur a été effectué sur une période de 14 heures (de 05h00 jusqu'à 19h00) soit 840 minutes.

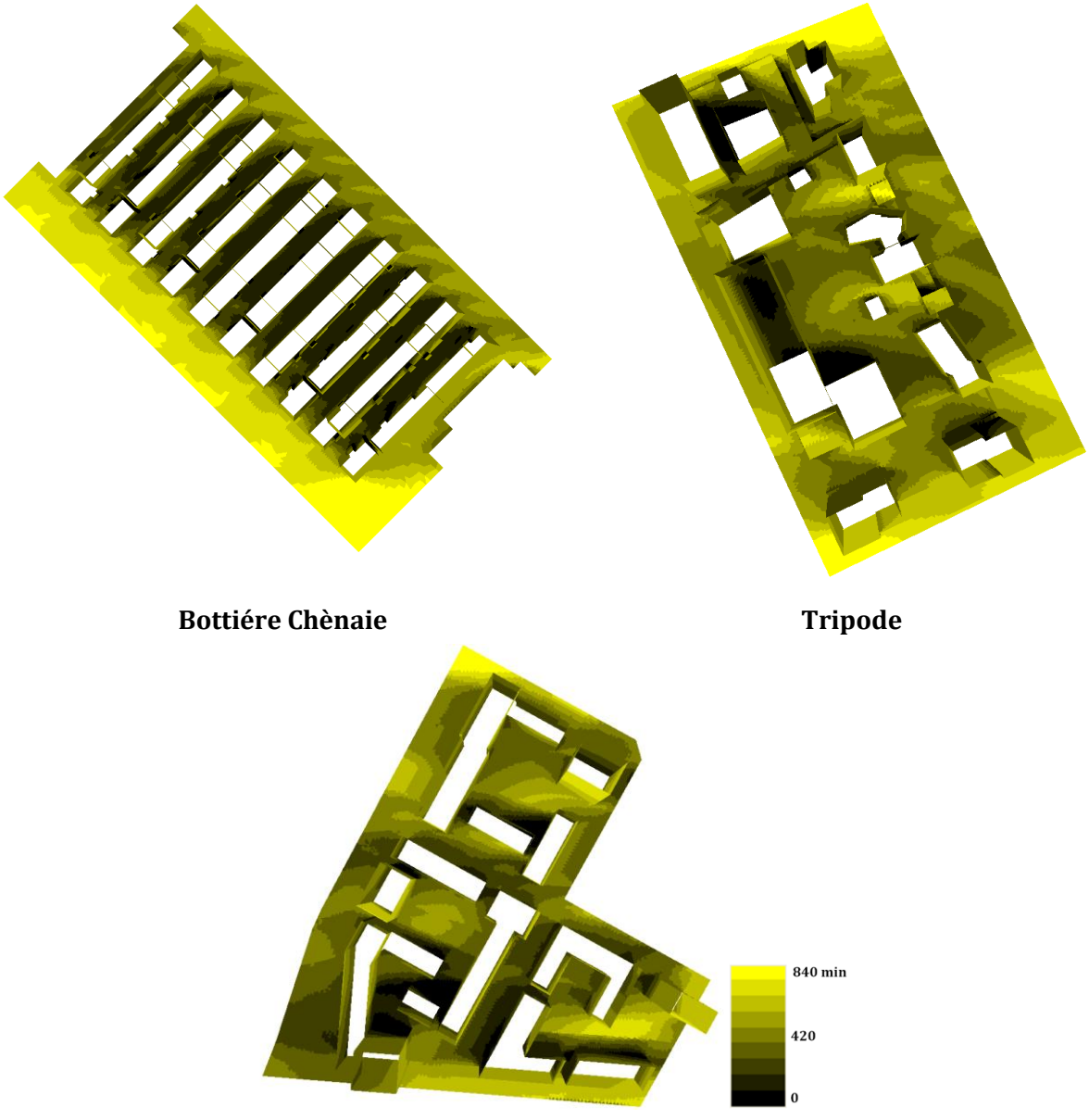
Pour la journée du 19/07, les résultats de simulation de la durée d'ensoleillement des quartiers sont présentés dans le **Tableau V. 5** et sur la **Figure V. 12**. Le quartier Bottière Chénaie est celui qui reçoit le plus de rayonnement solaire avec 47,0 % du temps, soit plus de 6h35 min, suivi par le quartier Tripode avec 45,2 % du temps soit 6h20 min. La plus faible durée d'ensoleillement est obtenue pour le projet Lyon Confluence, avec seulement 05h00 d'ensoleillement. Cette faible durée est principalement due d'une part à la présence de deux grandes tours qui génèrent des ombres de longues portées sur l'ensemble du projet et d'autre part à la densité d'aménagement des bâtiments (voir Chapitre **II.3.5.1**).

Pour la journée du 30/07, la hauteur solaire diminue par rapport à la journée du 19/07 ce qui affecte la durée moyenne d'ensoleillement de presque 2 % pour les trois quartiers (**Tableau V. 5**).

Eco-quartiers	Scénarios	Durée d'ensoleillement	
		Heures ensoleillées	% de période ensoleillée
Tripode	**A**	6h20/14h	**45,2 %**
	B	6h05/14h	**43,7 %**
Lyon Confluence	**A**	5h00/14h	**35,7 %**
	B	4h45/14h	**33,9 %**
Bottière Chénaie	**A**	6h35/14h	**47,0 %**
	B	6h20/14h	**45,9 %**

Tableau V. 5 Valeurs de la durée d'ensoleillement pour les trois quartiers.

L'impact des tours sur la durée moyenne d'ensoleillement du quartier Lyon Confluence a été évaluée en supprimant les tours de la géométrie masque. Les résultats (**Tableau V. 6**) font ressortir le rôle important joué par la hauteur des tours et par leur géométrie sur la durée d'ensoleillement des quartiers voisins. En effet, sans les tours, la durée d'ensoleillement des trois îlots augmente de plus de 80 % le 19/7 soit 4h00 de plus d'ensoleillement. Pour la journée du 30/7, la durée est accrue de 72 % soit 3h20min de plus.



Bottiére Chènaie **Tripode**

Lyon Confluence

Figure V. 12 Représentation de la durée moyenne d'ensoleillement pour les trois quartiers durant la journée du 19/07.

Eco-quartiers	Scénarios	Durée d'ensoleillement	
		Heures ensoleillées	% de période ensoleillée
Lyon Confluence	A	9h00/14h	64,3 %
	B	8h10/14h	58,3 %

Tableau V. 6 Valeurs de la durée moyenne d'ensoleillement pour le quartier Lyon Confluence sans les 2 tours.

V.3.2 Facteur moyen de vue du ciel

Le facteur de vue du ciel affecte la quantité d'énergie solaire incidente et la température de l'air. **Ratti** *et al.,* (2003) a montré que les configurations urbaines confinées sont favorables au piégeage radiatif générant une élévation de température de l'air nocturne plus importante que celles des formes urbaines ouvertes. Cependant, au sein de ces espaces denses, l'élévation de la température est souvent compensée par des effets de fraîcheur procurés par la propagation des zones ombragées.

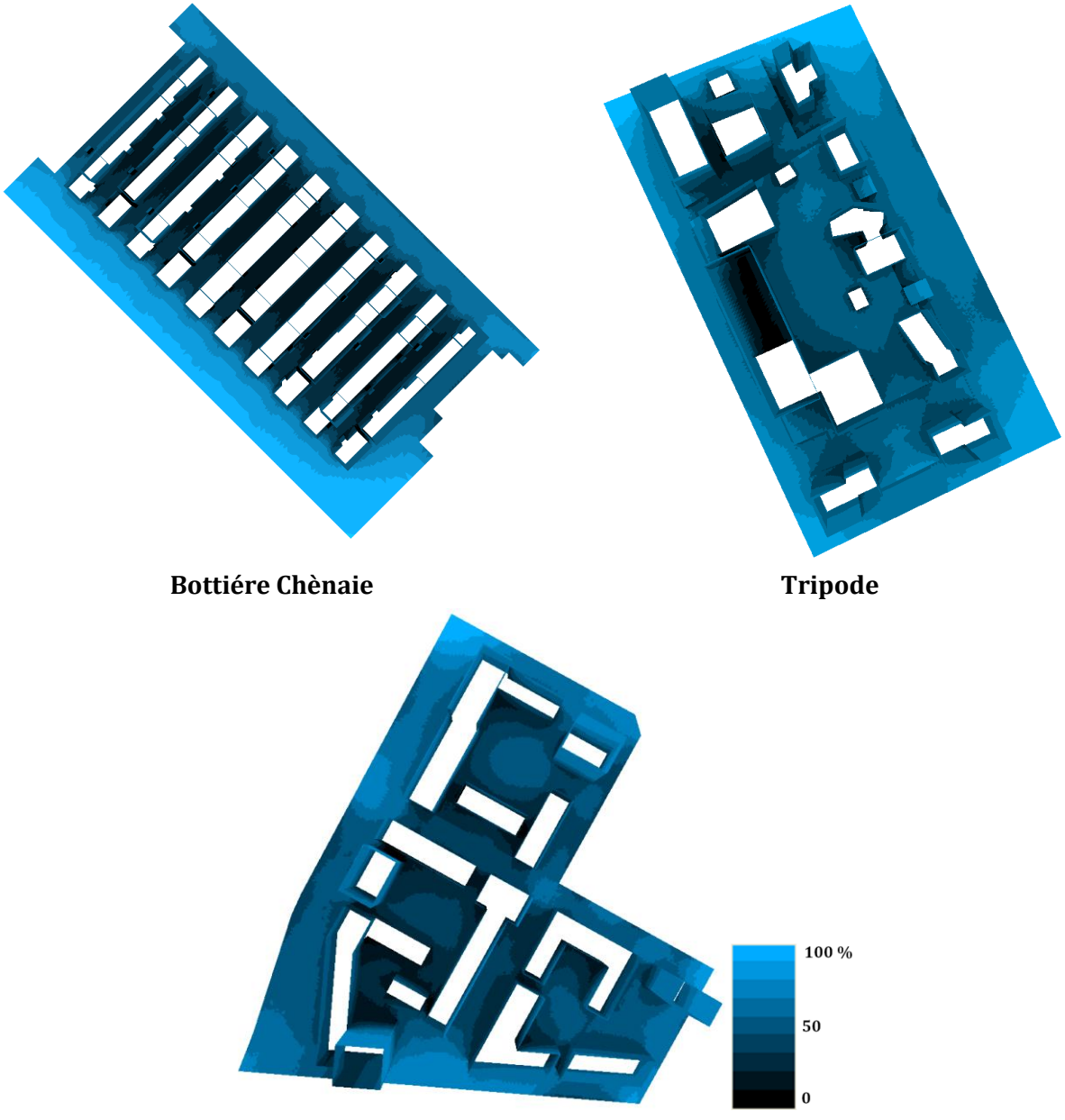
Le calcul du facteur de vue du ciel s'effectue automatiquement sur l'interface graphique du modèle *Solene*. Le calcul prend en compte les caractéristiques spatiales des tissus et de leur environnement immédiat. Ce descripteur est évalué à partir des valeurs moyennes pondérées (valeur moyenne pondérée = somme des (valeur x surface) des contours / la surface total des contours) qui représentent le facteur moyen de vue du ciel pour chaque quartier (**Tableau V. 7**).

Eco-quartiers	Pourcentage de ciel visible (%)
Tripode	41,5 %
Lyon Confluence	33,2 %
Bottière Chénaie	30,5 %

Tableau V. 7 Facteur moyen de vue du ciel en pourcentage pour les trois quartiers.

Le facteur moyen de vue du ciel est relativement différent entre les trois quartiers (**Tableau V. 7**). Le quartier Bottière Chénaie présente la plus faible ouverture avec en moyenne 30,5 % ciel visible. En effet, l'aménagement du quartier en forme de bandes bâties denses et compactes réduit son ouverture au ciel comme on peut le voir sur la **Figure V. 13**. Le facteur moyen de vue du ciel du quartier Lyon Confluence ne diffère pas beaucoup de celui de Bottière Chénaie avec 33,2 % de ciel visible. Ceci cohérent avec la densité de l'aménagement du projet Confluence (voir Chapitre **II.3.5.1**) qui présente des formes relativement allongées avec des espacements étroits

réduisant considérablement l'ouverture du projet au ciel. En revanche, le projet Tripode bénéficie d'une ouverture assez grande avec 41,5 % de ciel vue. L'absence de bâtiment mitoyen et les espacements entre les bâtiments rendent la géométrie plus ouverte au ciel.



Bottiére Chènaie **Tripode**

Lyon Confluence

Figure V. 13 Représentation du facteur de vue du ciel moyen pour les trois quartiers.

V.3.3 Albédo solaire moyen

Cet indicateur est fonction de la couleur et de la nature (lisse ou rugueuse) des matériaux composant les surfaces urbaines. Pour estimer l'albédo moyen des différentes configurations de quartiers, la première étape consiste à distribuer les matériaux de revêtement (voir section **II.4**) sur les surfaces triangulées de façon à leur affecter un coefficient de réflexion. La seconde étape concerne la détermination géométrique de la visibilité réciproque (facteur de forme) des facettes triangulées (surfaces urbaines et ciel) en considérant les masques environnants.

Ensuite, les composantes solaires directes, diffuses et globales incidentes sur chaque élément de la scène urbaine sont simulées par *Solene* en tenant compte des inter-réflexions entre les différents éléments de la scène urbaine. On obtient ainsi le flux global incident reçu $\varphi_{incident,AR\ horaire}$ et absorbé $\varphi_{absorbé,AR\ horaire}$ après multi-réflexions, à chaque pas de temps, par chaque facette des surfaces des trois quartiers.
Les valeurs moyennes pondérées horaires des flux solaires $\varphi_{incident,AR\ horaire}$, et $\varphi_{absorbé,AR\ horaire}$ simulés entre 05h00 à 19h00 sont additionnées pour obtenir une valeur journalière des deux flux $\varphi_{incident,AR\ moy\ journlier}$ et $\varphi_{absorbé,AR\ journalier}$. . A partir de ces valeurs journalières, l'albédo moyen pour chaque quartier peut être calculé à partir de l'équation **V.5** proposée par (**Miguet**, 1996):

$$\alpha_{moy_quartier} = 1 - \frac{\varphi_{absorbé,AR\ journalier}}{\varphi_{incident,AR\ moy\ journlier}} \qquad \textbf{V.5}$$

Les résultats des calculs sont présentés dans **Tableau V. 8**.

Eco-quartiers	Scénarios	Flux solaire incident après multi-réflexion (W/m²)	Flux solaire absorbé après multi-réflexion (W/m²)	Albédo
Tripode	A	3918	2281	0,42
	B	3869	2259	0,42
Bottière Chénaie	A	3805	2377	0,38
	B	3621	2266	0,37
Lyon Confluence	A	3861	2099	0,46
	B	3654	1986	0,46

Tableau V. 8 Energie solaire incidente et absorbée après multi-réflexions et albédo correspondant en moyenne journalière pour les trois quartiers.

Le **Tableau V. 8** montre que, le quartier Bottière Chénaie présente les plus faibles valeurs avec un albédo de 0,38 pour le scénario A et de 0,37 pour le scénario B. En effet, le quartier Bottière Chénaie présente la plus grande valeur d'énergie solaire absorbée après réflexion, en raison de la faible valeur de coefficient de réflexion de ses matériaux (l'asphalte par exemple qui présente des fortes valeurs d'énergie solaire absorbée comme le montre la **Figure V. 14**.

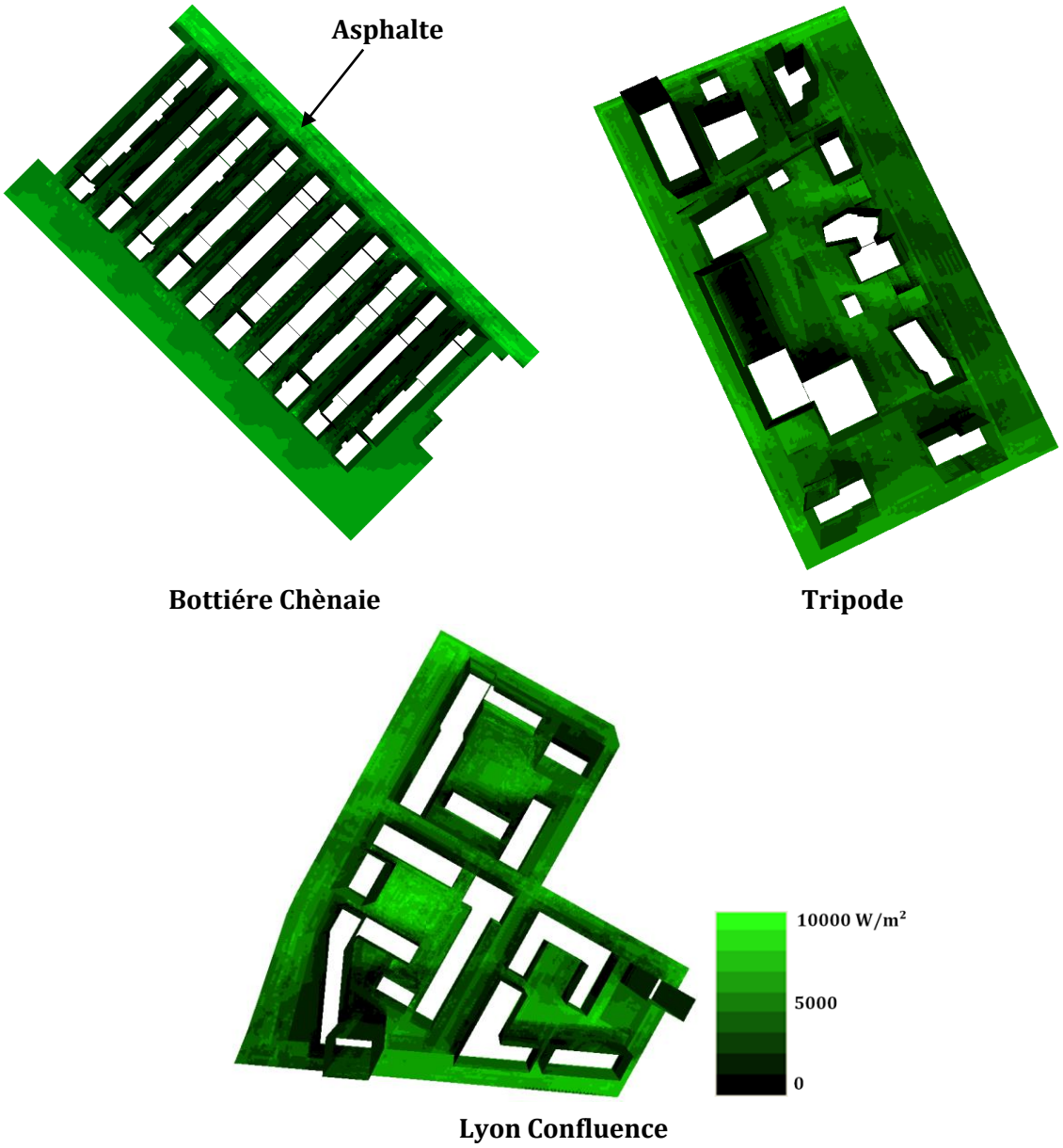


Figure V. 14 Représentation de l'énergie solaire journalière absorbée après multi-réflexions par les trois quartiers pour le scénario A.

Tsangrassoulis *et al.,* (2002) ont montré que l'albédo total d'une forme urbaine ne dépend pas seulement des coefficients de réflexion des matériaux, mais aussi de l'agencement géométrique de celle-ci. La disposition du quartier en bandes de 9 rues canyons présentant un rapport hauteur /largeur ($\boldsymbol{H/W \approx 0,4}$) et, les décrochements observés sur les façades et les toitures (**Figures II. 38** et **II. 39**) ont probablement engendré une augmentation des inter-réflexions entre les différentes surfaces et donc une augmentation de la quantité d'énergie absorbée réduisant ainsi la valeur de l'albédo moyen.

Les quartiers Lyon Confluence et Tripode présentent des valeurs proches avec un albédo moyen de 0,46 pour Lyon Confluence et 0,42 pour Tripode. Cela est dû à la présence de surfaces très réfléchissantes, telles que les peintures blanches ou l'aluminium. La valeur élevée de l'albédo du quartier Lyon Confluence est aussi vraisemblablement due à sa morphologie compacte par rapport à celle de Tripode. En effet, cette fragmentation des bâtiments engendre plus d'échange d'énergie entre les surfaces, ce qui augmente systématiquement la quantité d'énergie solaire incidente et absorbée après multi-réflexion (**Tableau V. 8**).

V.3.4 La porosité des tissus

La porosité d'un quartier urbain correspond à l'évaluation du rapport entre la surface totale de ces percements et la surface totale de sa façade urbaine (**Ait amour**, 2004). Sa valeur dépend de la configuration spatiale de chaque tissu et de son orientation par rapport aux vents dominants. Elle est donnée par la relation **V.6** :

$$Porosité_{quartier} = \frac{Surface\ totale\ des\ percements}{Surface\ totale\ de\ la\ façade\ urbaine} * \cos \emptyset \qquad \textbf{V.6}$$

où Ø représente l'angle que fait chaque quartier avec la direction du vent dominant.
La porosité d'un tissu urbain peut considérablement affecter la vitesse du vent au sein d'un quartier ainsi que la température de l'air. Lorsque la densité du bâti est importante, elle protège les zones intérieures des fortes rafales. En revanche, ces zones sont souvent défavorisées du point de vue de renouvellement d'air, particulièrement dans les espaces confinés. Au contraire, lorsque la densité du bâti est moins importante, la ventilation est favorisée et la turbulence et la convection forcée peuvent se développer plus facilement.

Pour les trois quartiers d'étude, la porosité a été calculée par rapport aux vents dominants (**Figure V. 8**) caractérisant les scénarios A et B. L'angle (Ø) que fait chaque quartier avec la direction du vent dominant est de l'ordre de 45° pour le quartier de la Bottière, de 29° pour Lyon confluence et de 25° pour Tripode. Le pourcentage de porosité de chaque quartier a été calculé en utilisant l'équation **V.6**. Les résultats sont présentés dans le **Tableau V. 9**.

Les résultats du calcul de porosité présentés dans le **Tableau V. 9** montrent que les valeurs les plus faibles sont trouvées pour le quartier Lyon Confluence en raison de la faible taille de ces percements et de la densité de ces formes. Les plus grandes valeurs sont obtenues sur le quartier Bottière Chénaie. Outre son étalement horizontal, ces valeurs témoignent aussi de l'aménagement du quartier en 9 bandes vides avec des épaisseurs homogènes de 4,6 m ouvrant ainsi ses passages piétons aux vents incidents.

Eco-quartiers	Scénarios	Directions du vent dominantes pour les deux scenarios	L'angle que fait chaque quartier avec la direction du vent dominant (°)	Porosité (%)
Bottière Chénaie	A	Ouest	45°	34
	B	Nord		34
Tripode	A	Ouest	25°	21
	B	Nord		31
Lyon confluence	A	Ouest	29°	17
	B	Nord		29

Tableau V. 9 Les valeurs de la porosité pour les trois quartiers en fonction de la direction du vent pour scénarios A et B.

Pour le quartier Tripode, les valeurs calculées révèlent davantage de porosité lorsque le vent est au Nord (scénario B). Ce résultat est lié à l'ouverture du quartier sur la Loire afin de bénéficier des vues panoramiques. Cependant, lorsque le vent est à l'Ouest (scénario A) la porosité diminue considérablement. Ceci est dû principalement à la volonté des aménageurs de consolider l'opacité de la façade urbaine et de réduire la taille des passages publics contre les bruits engendrés par le boulevard du Général de Gaulle.

V.3.5 Conclusion de l'analyse morphologique

Les principaux résultats de l'analyse morpho-climatique sont récapitulés dans le **Tableau V. 10**. Ils permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La durée moyenne d'ensoleillement des éco-quartiers étant fortement dépendante des masques environnants et de la morphologie des îlots, le projet Lyon Confluence présente la durée moyenne d'ensoleillement la plus faible à cause des deux grandes tours qui surplombent le quartier. La faible hauteur et l'éparpillement des géométries masques du quartier Bottière Chénaie font que sa durée moyenne d'ensoleillement est importante malgré sa morphologie dense. Ainsi, le quartier Bottière Chénaie présente probablement en été plus de risque d'inconfort thermique que les autres quartiers

- Le facteur de vue du ciel est un indicateur qui affecte la température de l'air ainsi que la quantité d'énergie solaire incidente. Compte tenu de la taille importante de sa placette centrale et l'ouverture de son tissu, le quartier Tripode peut probablement voir d'avantage le soleil que ceux de Lyon Confluence et Bottière Chénaie.

- L'albédo des surfaces et le confort thermique sont fortement liés. En effet, plus une surface réfléchit l'énergie solaire et plus le risque d'inconfort des citadins augmente puisque l'énergie solaire globale incidente s'ajoute à celle renvoyée par les surfaces. Sur ce critère, le quartier Lyon Confluence qui est globalement le plus réfléchissant serait potentiellement plus "inconfortable".

- Le quartier Bottière Chénaie présente les plus grandes valeurs de porosité, ce qui impacte forcément la vitesse du vent à intérieur de ses espaces publics. Parallèlement, la morphologie du quartier, qui se présente en une succession de rues canyon, peut accentuer les risques d'effet de canalisation dans les rues influençant fortement la sensation d'inconfort. La porosité la plus faible est celle du quartier Lyon Confluence en raison de la densité de ces formes et de la faible taille de ces percements. Ce constat ajouté à la forte densité de ses masques devrait probablement perturber la circulation de l'air à l'intérieur de ses îlots en la diminuant, affectant ainsi les valeurs de confort.

Scénario A	Durée d'ensoleillement (%)	Durée d'ombre (%)	Facteur de vue du ciel (%)	Albédo (-)	Porosité (%)
Tripode	45	55	41,5	0,42	21
Bottière Chénaie	47,5	52,5	30,5	0,38	34
Lyon Confluence	35,7	64,3	33,2	0,46	17
Scénario B	**Durée d'ensoleillement (%)**	**Durée d'ombre (%)**	**Facteur de vue du ciel (%)**	**Albédo (-)**	**Porosité (%)**
Tripode	43,7	56,3	41,5	0,42	31
Bottière Chénaie	43,8	56,2	30,5	0,37	34
Lyon Confluence	34,5	65,5	33,2	0,46	29

Tableau V. 10 Synthèse des indicateurs calculés sur les trois configurations pour les scénarios A et B.

V.4 Caractérisation des paramètres de confort des trois quartiers pour les deux scénarios d'études

V.4.1 Analyse des résultats de l'écoulement d'air

Tout d'abord, rappelons que les simulations couplées ont été effectuées pour deux directions de vent : Ouest (270°) pour la journée 19/07 (scénario A : climat de Nantes) et Nord (0°) durant la

journée du 30/7 (scénario B : climat de Lyon). La présentation du champ de vitesse pour les trois quartiers d'étude sera faite à 12h00 (TU), dans le plan horizontal à 1,1 m du sol pour le quartier Bottière Chénaie et Lyon Confluence. Pour le quartier Tripode, les lignes de courant seront présentées à 11,2 m du sol car ce dernier est composé de trois niveaux d'espace public, dont le troisième est situé à 10,1 m du sol (**Figure V. 15**).



Figure V. 15 Coupe transversale présentant les trois niveaux de l'espace public du quartier Tripode.

Pour balayer la différence des niveaux d'observation est mieux comparer les résultats, nous avons normalisées les vitesses du vent (**vitesse-adim**) par leur valeur d'entrée en amont, au niveau du plan d'observation. Les survitesses sont donc repérées par des valeurs supérieures à 1 et les zones protégées par des valeurs inférieures à 1.

V.4.1.1 Analyse des résultats pour le scénario A

Dans le quartier Bottière Chénaie (**Figure V. 16**), le vent incident induit des surventes importantes à l'intérieur des rues canyon. Elles s'expliquent d'une part par la forme rectangulaire des rues (plusieurs couloirs à ciel ouvert) qui s'allongent sur une longueur de 55 m favorisant ainsi la canalisation de l'air et d'autre part par la dépression induite par l'écoulement de contournement. À l'intérieur des rues, on peut distinguer deux types de phénomènes résultant du contournement de l'air par les bâtiments. Le premier est la présence d'un petit tourbillon de décollement à l'entrée de la rue associée à des survitesses qui résultent de l'effet Venturi local provoqué par les volumes sortants des bâtiments (**Figure V. 17 (a)**). Ces vitesses perdent de leur intensité en aval. Le second phénomène caractérise les rues dépourvues d'éléments sortants où la zone de décollement est plus étendue avec une faible vitesse à l'entrée qui s'accroit en aval (**Figure V. 17 (b)**). La zone de survitesse occupe alors une partie importante de la rue. Ces résultats mettent en évidence que les décrochements au niveau des façades jouent le rôle de brise vent diminuant ainsi la vitesse à l'intérieur des rues. Le réseau des bâtiments forme un écran pour la zone calme située en aval et caractérisée par des mouvements tourbillonnaires de faible vitesse.

Contrairement au quartier Bottière Chénaie, l'écoulement en amont du quartier Tripode est modifié par les masques formés par des barres de grandes hauteurs qui réduisent ainsi la vitesse du vent incident (**Figure V. 16**). Les zones de surventes apparaissent au niveau des coins des bâtiments et des espaces longeant la Loire où les vitesses les plus élevées sont observées (**Figure V. 16**). Cependant, l'intérieur du quartier apparait partiellement bien protégé avec des vitesses allant de 0,20 à 0,80, les zones de faibles vitesses (0,5 à 0,20) se trouvent au niveau des sillages et des coins créés par l'aménagement des bâtiments. On observe aussi un effet de

canalisation caractérisé par des vitesses faibles au niveau des rues piétonnes intérieures et un effet de passage sous immeuble caractérisé par une entrée diffuse de l'air (**Figure V. 17 (c)**).
Pour les trois îlots du quartier de Lyon Confluence (**Figure V. 16**), la densité et la faible porosité des masques situés en amont contraignent l'écoulement à contourner le quartier, réduisant fortement l'intensité du vent dans la zone d'étude. Les cœurs d'îlot sont caractérisés par des vitesses faibles de l'ordre de 0,1 à 3,0 avec des zones très protégées (0 à 0,10) au niveau de l'îlot 11 et une partie de l'îlot 12. On voit enfin que des vitesses très élevées, de l'ordre de 6,92, apparaissent aux pieds des tours.

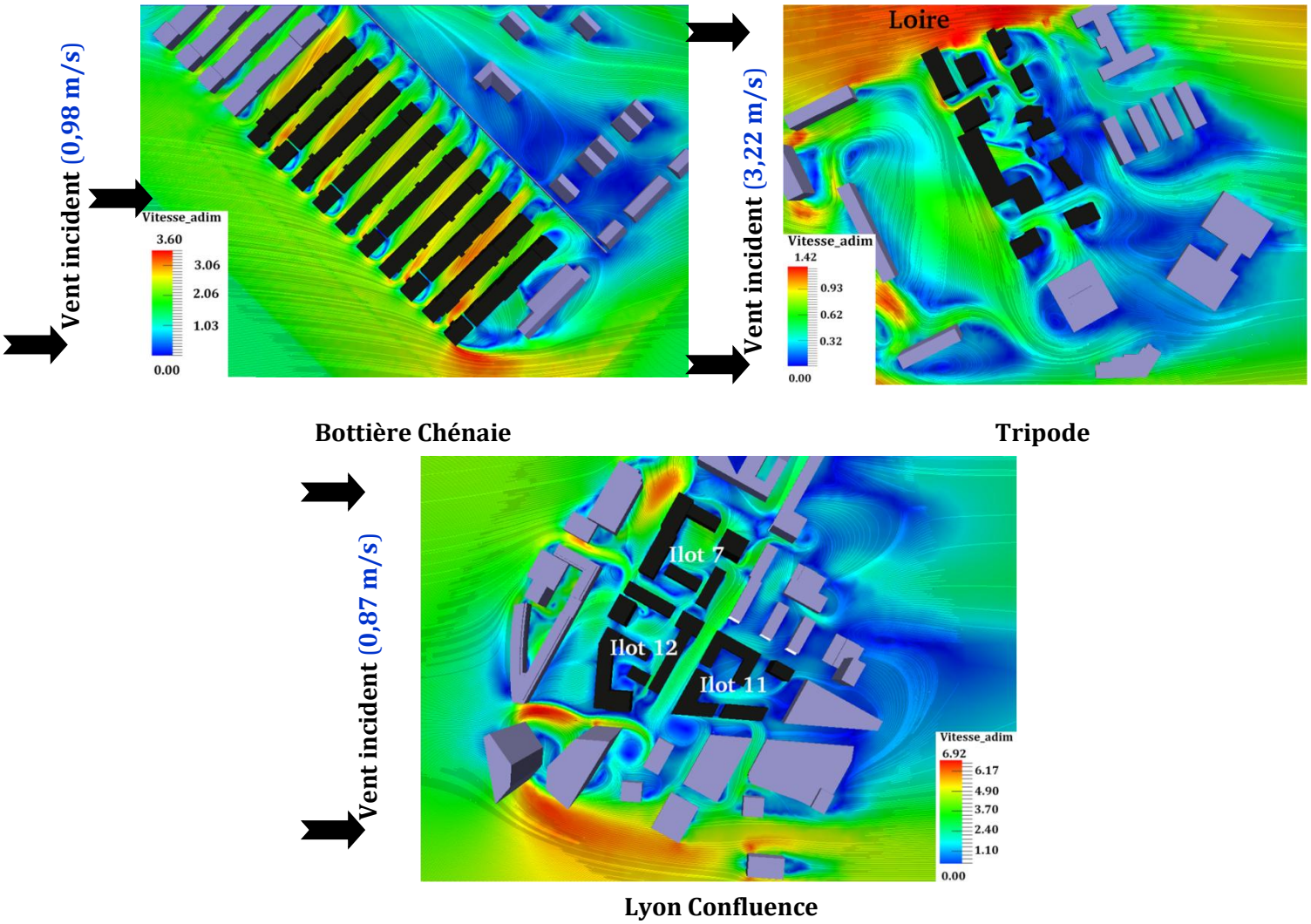
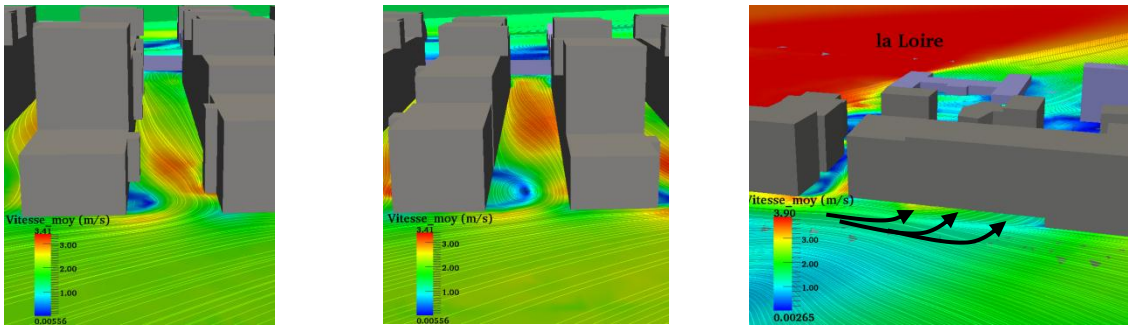


Figure V. 16 Ligne de courant et intensité du vent dans les trois quartiers à 12h00 pour le scénario A. À 1,1 m du sol pour Lyon Confluence et Bottière Chénaie et à 11,2 m du sol pour le quartier Tripode.



(a) **(b)** **(c)**

Figure V. 17 (a) premier et **(b)** second phénomène cinématique observé à l'intérieur des rues canyons du quartier Bottière Chénaie. **(c)** l'effet de passage sous immeuble.

V.4.1.2 Analyse des résultats pour le scénario B

Pour le quartier Bottière Chénaie (**Figure V. 18**), la présence des masques au Nord du quartier entraîne des perturbations de l'écoulement incident. Des survitesses relativement fortes imputables à l'effet de canalisation, de l'ordre de 2,2 à 3,1, sont visibles au niveau des quatre premières rues côté Nord.

Ensuite, une diminution de l'intensité de la vitesse entre 0,5 et 1,1 caractérise les rues qui suivent. L'absence d'élément sortant à 1,1 m du sol dans les façades d'entrée induit un écoulement homogène à l'intérieur des rues. Enfin, des zones de recirculation apparaissent en aval de chaque bâtiment avec des vitesses de vent faibles inférieures à 0,5.
Pour le quartier Tripode, l'absence de masques côté Nord entraine la formation de faibles zones de cisaillements sur le flanc Nord-Est du quartier où on observe des surventes et une zone de vent faible sur le flanc Sud-Est (**Figure V. 18**). Par ailleurs, la porosité relativement élevée du quartier côté Nord génère plusieurs jets en raison du contournement des bâtiments intérieurs par le vent. L'effet de passage sous immeuble se traduit par un jet reliant les écoulements de contournement sur le côté Sud-Ouest du quartier.

Pour Lyon Confluence (**Figure V. 18**), bien que la porosité du quartier pour ce scénario (29 %) soit supérieure à celle du scénario A (17 %), l'écoulement de l'air à l'intérieur des îlots est caractérisé par des vitesses faibles. Ces faibles valeurs sont dues à la densité des masques environnants et à l'étroitesse des percées du quartier empêchant le vent de s'engouffrer à l'intérieur des îlots. Les vitesses les plus faibles, inférieures à 1, sont trouvées au niveau de l'îlot 11. Contrairement au scénario précédent, l'îlot 12 est le siège de vitesses relativement importantes, notamment au niveau du bâtiment en forme de U.

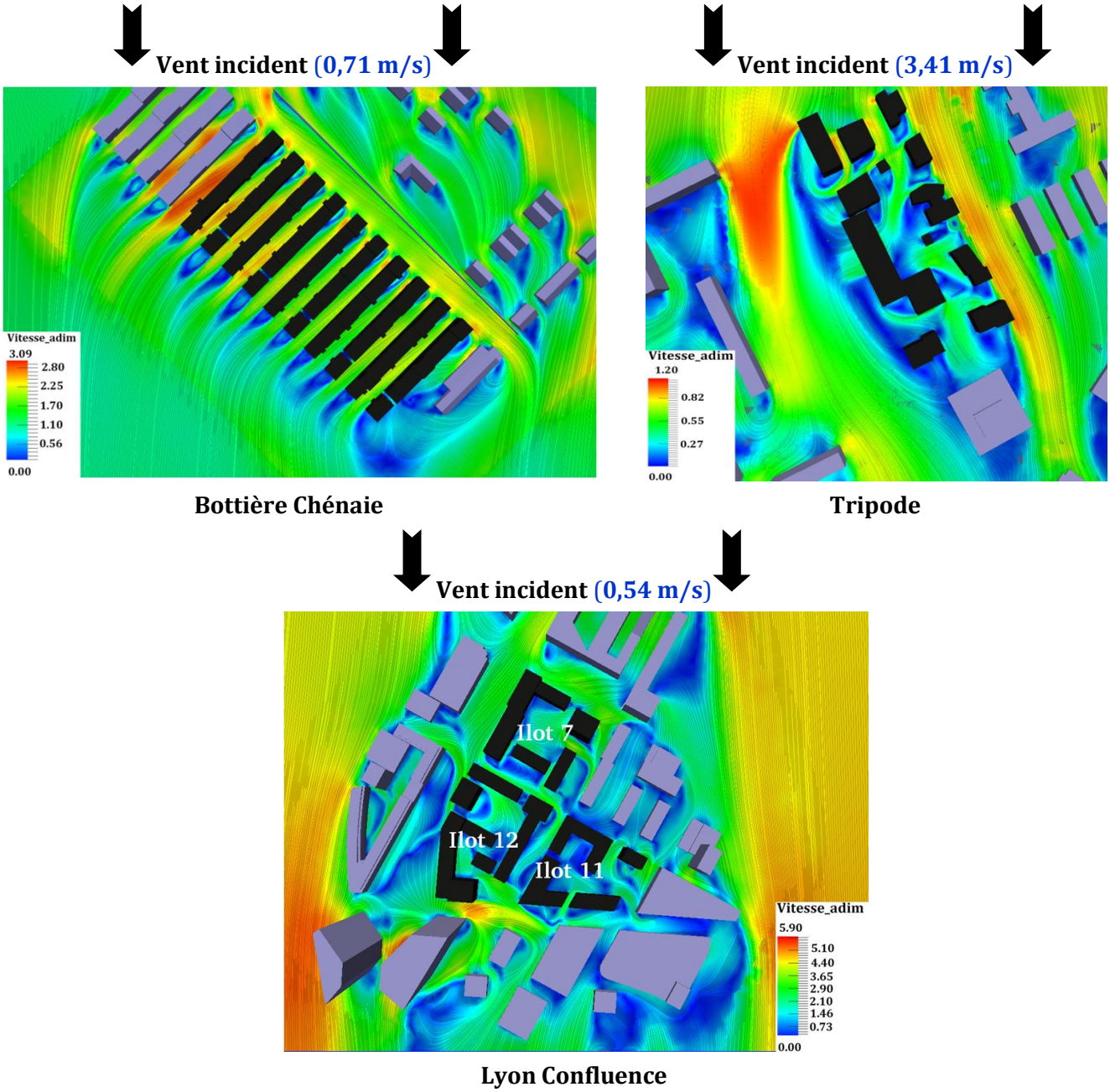


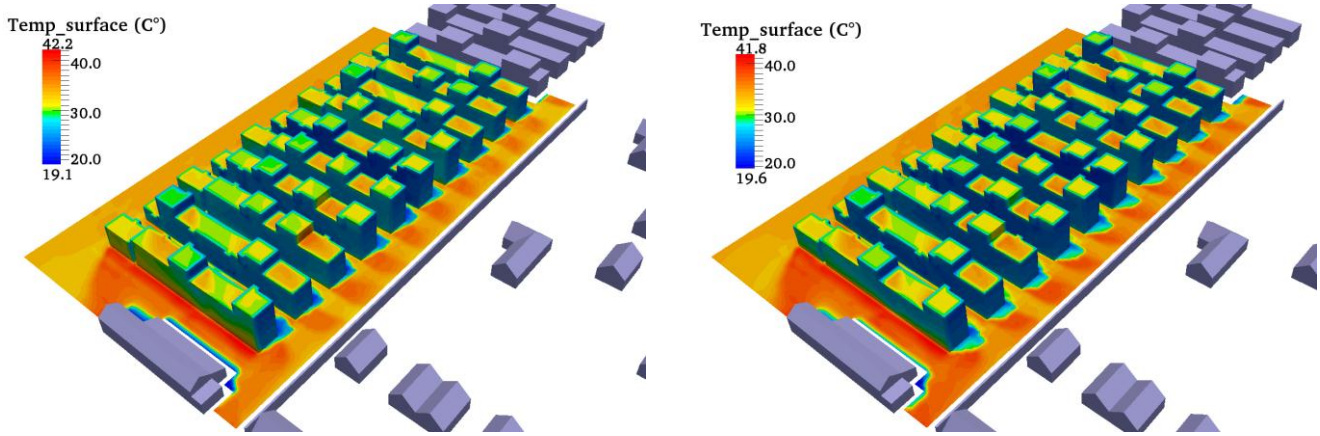
Figure V. 18 Ligne de courant est intensité du vent dans les trois quartiers à 12h00 pour le scénario B. À 1,1 m pour Lyon Confluence et Bottière Chénaie et à 11,2 m pour le quartier Tripode.

V.4.2 Analyse des températures de surface

Les températures de surfaces des trois quartiers pour les deux scénarios sont présentées sur les **Figure V. 19** et **V. 20** respectivement. On remarque une forte analogie avec les figures de vitesses de vent. En effet, les valeurs relativement faibles de la température de surface (entre 20C° et 32°C) pour le quartier Bottière Chénaie sont bien sûr localisées dans les zones ombragées, mais aussi dans les espaces caractérisés par de fortes vitesses, notamment à l'intérieur des rues canyon. Réciproquement, les températures de surface les plus élevées (entre 32°C et 43°C) correspondent aux zones de faible de vitesse du vent localisées dans le sillage des bâtiments et dans les zones de recirculation. Une autre remarque peut être faite concernant la température de surface et l'albédo. La **Figure V. 21 à gauche** montre que les parois jaunes du quartier Bottière Chénaie caractérisées par un albédo de 0,77 présentent une température moyenne de 22,5°C à 12h00. Cette valeur est inférieure de 3,7°C à celle des parois grises (albédo = 0,44). Des résultats similaires sont obtenus sur le quartier Tripode où les parois revêtues d'aluminium (albédo = 0,7) présentent une température moyenne de 28,1°C à 12h00 contre 34,5°C pour les surfaces en béton matriciel (albédo = 0,416).

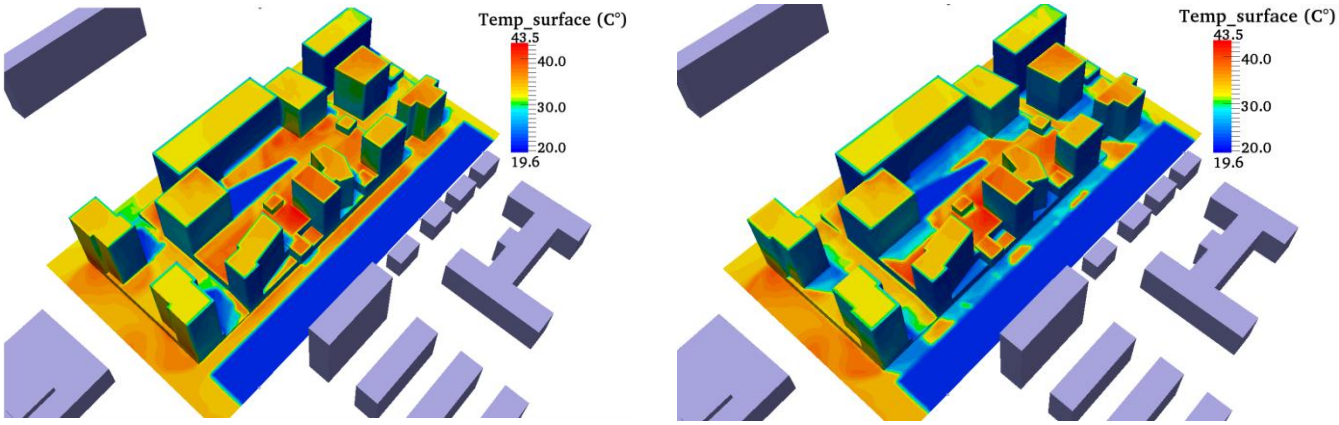
On remarque encore la présence de l'effet de dièdre défini par **Izard** (1998) dans plusieurs endroits des trois quartiers étudiés. À l'échelle de l'espace public, les différences de température des surfaces génèrent des échanges radiatifs par multi-réflexions des rayons solaires et infrarouges entre deux surfaces adjacentes. Ce phénomène est accru lorsque deux surfaces verticales sont proches ou entre une surface verticale et une autre horizontale jointes par une arête commune (**Figure V. 21 à droite**). L'effet de dièdre est ainsi prépondérant à proximité des arêtes et diminue avec les ombres générées et les fortes vitesses de vent. En effet, le croisement des températures de surface et du profil d'écoulement de l'air montre que l'effet de dièdre est accentué dans les zones de recirculation à faible vitesse de vent, comme le montre la **Figure V. 22**.

La comparaison des résultats pour les trois quartiers montre que, pour le scénario A, les valeurs les plus élevées ont été enregistrées au niveau du quartier Lyon Confluence (îlot 11) avec un pic de 49,0 C° à 14h00. Cette valeur est supérieure de 5,5°C par rapport au quartier Tripode et 7,2°C au quartier Bottière Chénaie. Pour le scénario B, la forte intensité du flux solaire incident caractérisant la journée du 30/07/2005 induit des températures de surface supérieures à celles enregistrées pour le scénario A. Les températures de surface les plus élevées sont de l'ordre 57,2°C dans le quartier Lyon Confluence ont été observées une autre fois au niveau du bâtiment présentant une forme en U de l'îlot 11. Ces températures sont supérieures de 4,8°C au quartier Bottière Chénaie et de 6,5°C au quartier Tripode.



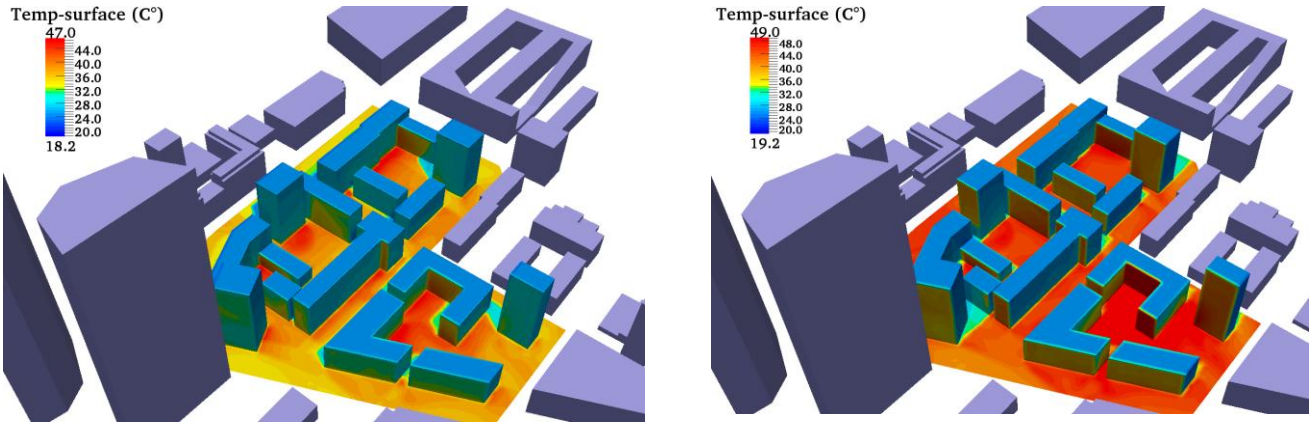
12h00 **14h00**

Bottière Chénaie



12h00 **14h00**

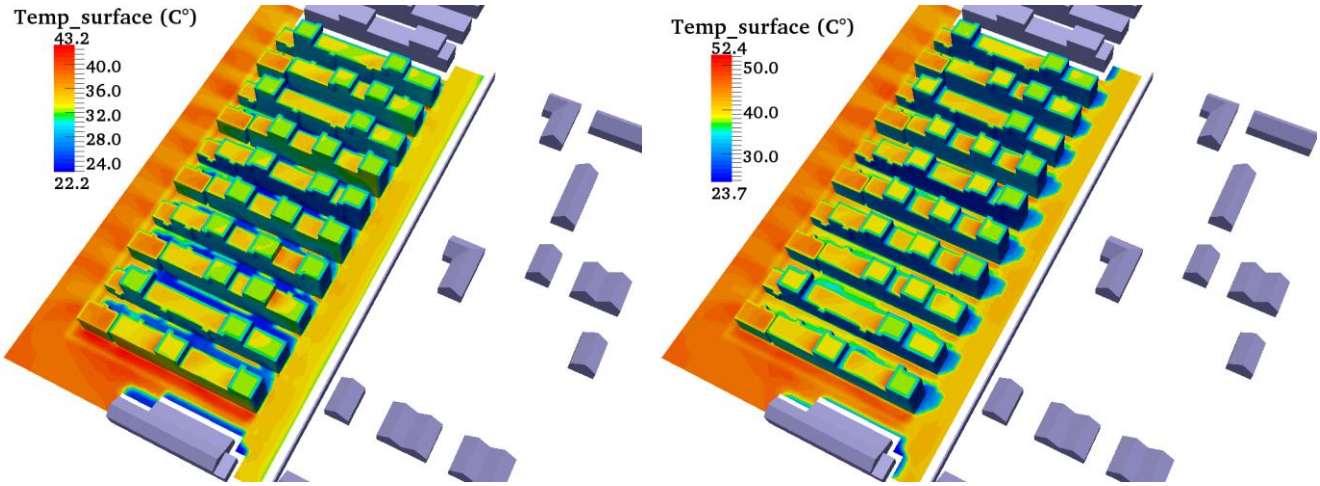
Tripode



12h00 **14h00**

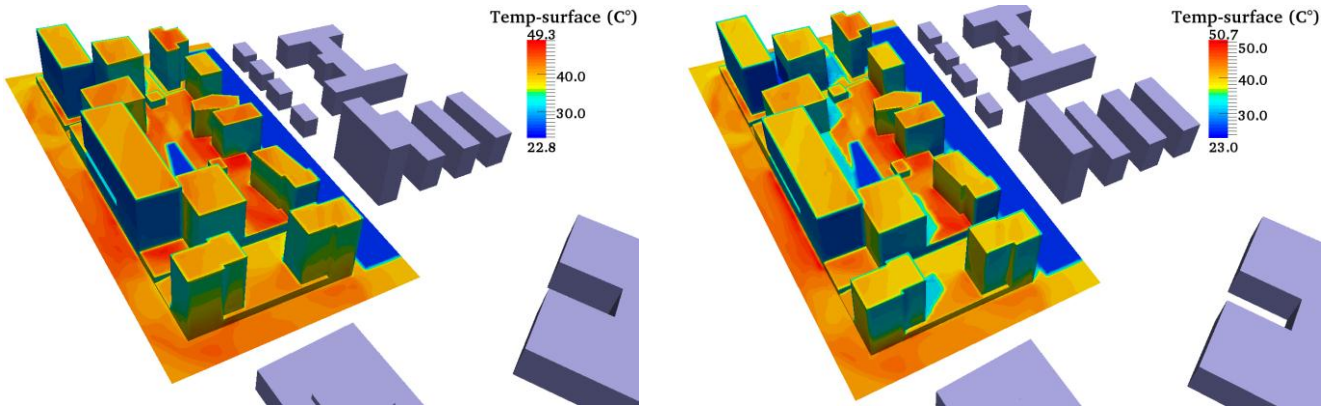
Lyon Confluence

Figure V. 19 Température de surface des quartiers : Bottière Chénaie, Tripode et Lyon Confluence à 12h00 et 14h00 pour le scénario A.



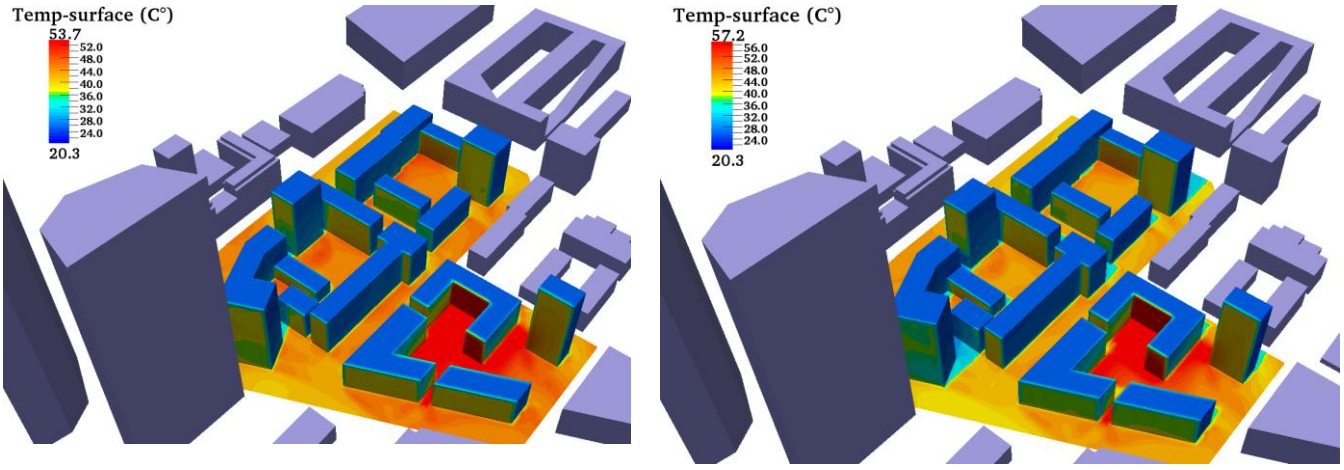
12h00 **14h00**

Bottière Chénaie



12h00 **14h00**

Tripode



12h00 **14h00**

Lyon Confluence

Figure V. 20 Température de surface des quartiers : Bottière Chénaie, Tripode et Lyon Confluence à 12h00 et 14h00 pour le scénario B.

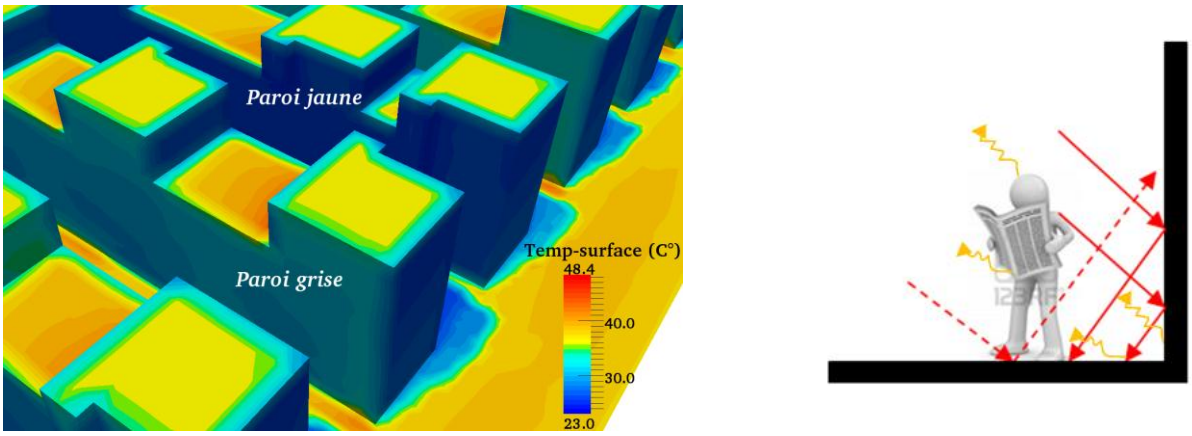


Figure V. 21 A gauche: Différence de température entre une paroi jaune et une paroi grise du quartier Bottière Chénaie (scénario B à 12h00). **A droite :** Schématisation de l'effet de dièdre.

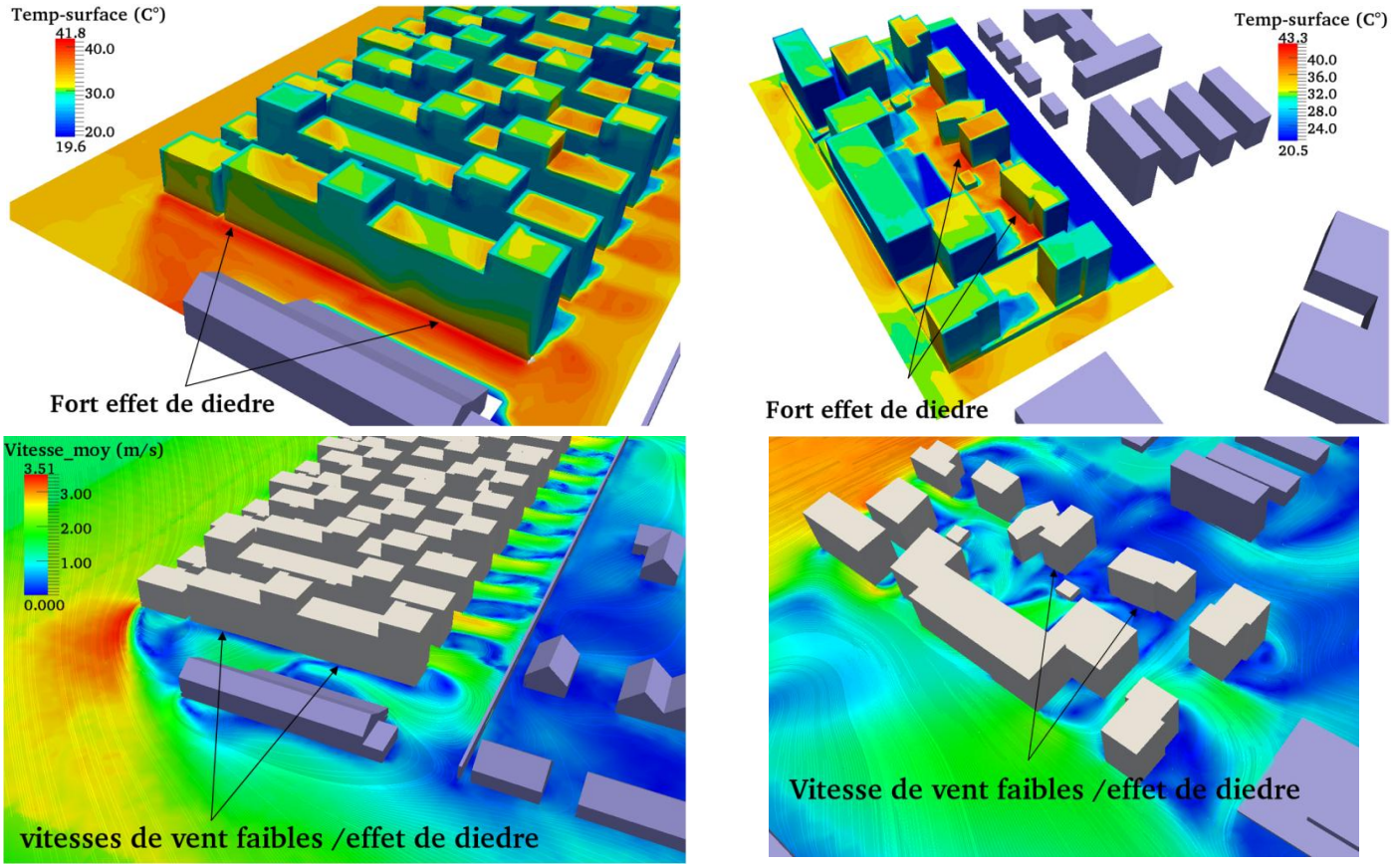
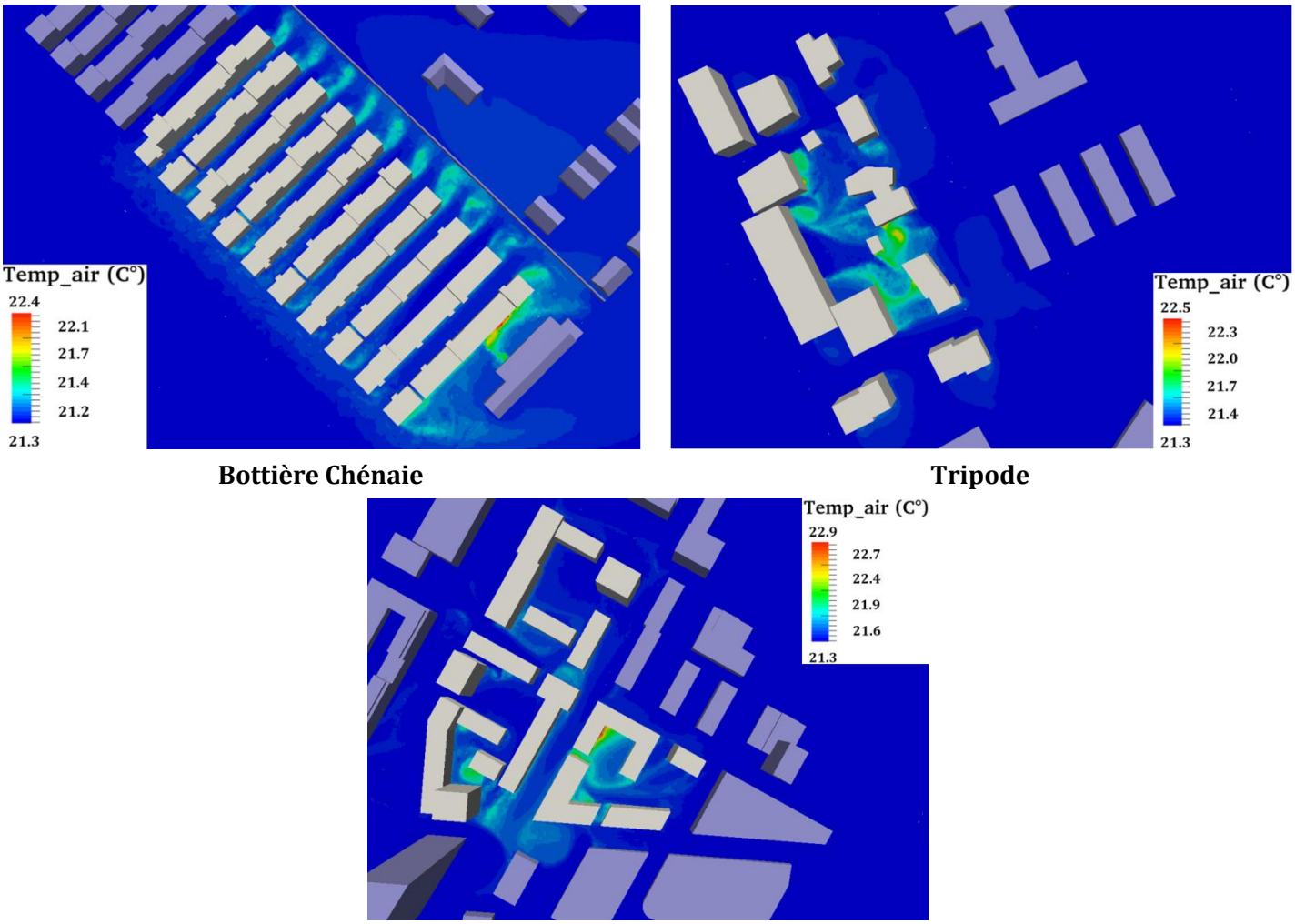


Figure V. 22 En haut : Visualisation de l'effet de dièdre dans les quartiers : Bottière Chénaie et Tripode. **En bas :** Croisement entre l'emplacement de l'effet de dièdre et les vitesses faibles du vent pour les quartiers : Bottière Chénaie (Scénario A à 12h00) et Tripode (scénario A à 14h00).

V.4.3 Analyse des températures de l'air

Les **Figure V. 23 V. 24** présentent le champ de température de l'air à 12h00 sur un plan horizontal des trois quartiers pour les deux scénarios respectivement. Les plus forts écarts entre maximum et minimum sont observés dans le quartier Lyon Confluence avec 1,6°C. Ceci s'explique par les faibles vitesses du vent dans les espaces intérieurs de ce quartier réduisant ainsi le renouvellement de l'air et le rafraîchissement des espaces et des parois. Pour les quartiers Bottière Chénaie et Tripode ces écarts sont respectivement de 1,1°C et 1,2°C.
Les températures de l'air les plus fortes sont localisées au niveau des zones marquées par des effets de dièdre. Ces derniers, caractérisés par des températures de surfaces élevées, amplifient les échanges convectifs avec l'air. L'analyse montre aussi la formation de plusieurs panaches d'air chaud au niveau des zones de sillage et de recirculation à faible vitesse de vent observées sur la **Figure V. 16**.



Bottière Chénaie **Tripode**

Lyon Confluence

Figure V. 23 Température de l'air à 12h00 pour le scénario A dans les quartiers Bottière Chénaie, Tripode et Lyon Confluence.

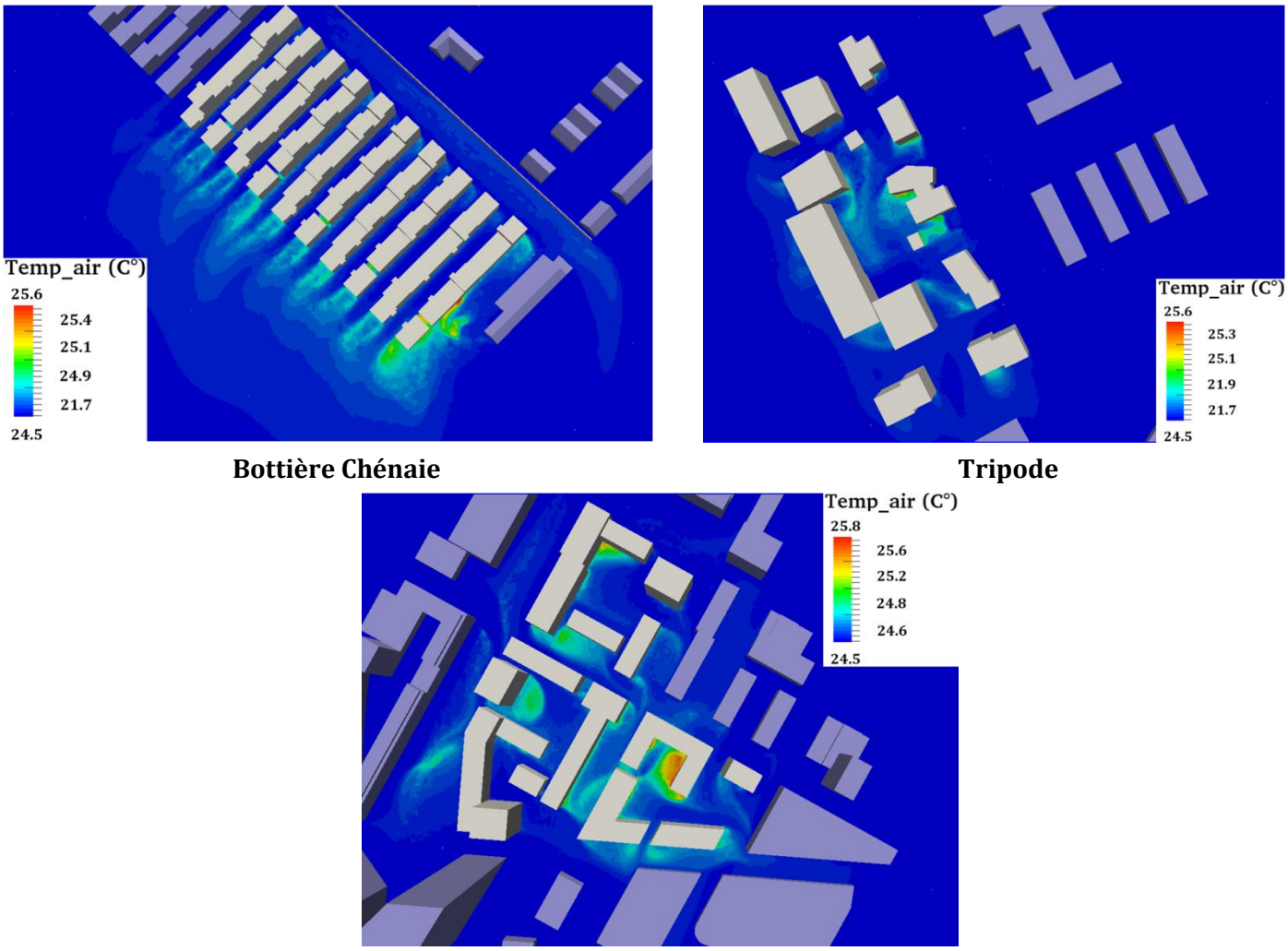
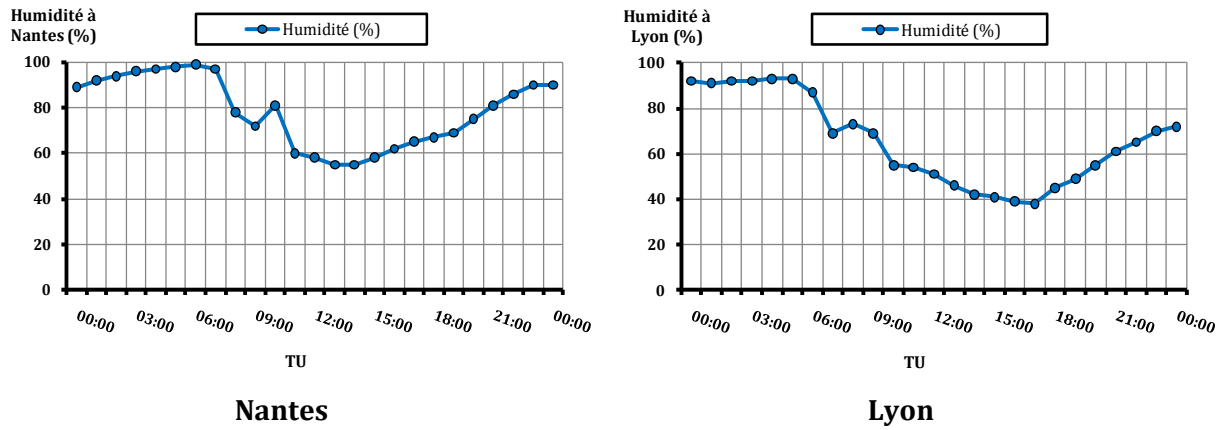


Figure V. 24 Température de l'air à 12h00 pour le scénario B dans les quartiers Bottière Chénaie, Tripode et Lyon Confluence.

V.4.4 L'humidité de l'air

Les courbes de la **Figure V. 25** donnent l'évolution journalière de l'humidité de l'air en moyenne horaire fournie par les stations de Bouguenais à Nantes et de Bron à Lyon. Cette donnée est intégrée directement dans le modèle de confort. Pour les deux scénarios, l'humidité de l'air varie au cours de la journée. Les valeurs les plus élevées sont enregistrées la nuit entre 00h00 et 06h00 avec un maximum vers 05h00 de l'ordre de 98 % pour le scénario A et 93 % pour le scénario B. Durant la matinée, l'humidité diminue avec l'apparition du soleil. Les valeurs les plus faibles sont enregistrées vers 14h00 pour le scénario A (55 %) et à 17h00 pour le scénario B (38 %). Le taux humidité de l'air augmente ensuite dans la soirée et jusqu'en la fin de journée. Cette augmentation est plus nette pour le scénario A que pour le scénario B.



Nantes **Lyon**

Figure V. 25 Evolution journalière de l'humidité de l'air en moyenne horaire pour les journées estivales "représentatives" sélectionnées.

V.5 Caractérisation du confort à l'échelle des trois quartiers étudiés

V.5.1 Indices de confort choisis et méthodologie de calcul

Dans la littérature, différents indices caractérisant le confort thermique d'un individu ont été proposés par différents chercheurs. On peut citer : le vote moyen prévisible (PMV) (**Fanger**, 1970), la température effective (ET*) et la température standard équivalente (SET*) (**Gagge** *et al.*, 1986), la température standard effective extérieure (OUT_SET*) (**Pickup** *et al.*, 2000) et la température équivalente physiologique (PET) (**Höppe**, 1999). Les indices PMV, ET* et SET* sont principalement employés pour la caractérisation du confort dans les espaces intérieurs (**Spagnolo** *et* **De Dear**, 2003). Dans les espaces extérieurs où la considération du vent et du rayonnement solaire est plus difficile à appréhender, **Spagnolo** *et* **De Dear**, (2003) recommandent l'utilisation des indices OUT_SET* et aussi le PET qui est actuellement, l'indice le plus utilisé pour l'évaluation du confort dans les espaces extérieurs et notamment au sein des tissus urbains (**Johnson** *et al.*, 2006 ; **Lin**, 2009 et **Lin** *et al.*, 2010). Ceci s'explique par la prise en compte des flux solaires de courtes et de grandes longueurs d'ondes en provenance des parois environnantes dans le calcul du bilan thermique d'un individu. **Höppe** (1999) le définit comme "*la température de l'air à laquelle, dans un local typique intérieur avec* $\boldsymbol{V_{air}}$ *= 0,1m/s,* $\boldsymbol{P_{vapeur\ eau}}$ *= 1200 Pa et* $\boldsymbol{T_{mrt}}$ [22] *=* $\boldsymbol{T_{air}}$ *= 20°C, le bilan énergétique du corps humain est équilibré avec les mêmes températures internes de la peau et le même taux de sueur que ceux calculés pour les conditions extérieures*".

[22] $\boldsymbol{T_{mrt}}$ est la température radiante moyenne définie comme la moyenne des températures des parois pondérée par leur surface.

Dans son calcul, l'indice PET est basé sur le modèle d'énergie équilibré de Munich pour les individus (MEMI) (**Höppe**, 1999) et plus spécifiquement sur l'équation (**V.7**) qui définit le bilan énergétique du corps humain:

$$\boldsymbol{S = (M - W) + R + C + E + K + C_{res} + E_{res}} \qquad \textbf{(V.7)}$$

où $\boldsymbol{S}$ (Watt) est le bilan des échanges thermiques instantanés entre un individu et son environnement, $\boldsymbol{M}$ est le métabolisme basal, $\boldsymbol{W}$ est le travail externe par unité de temps, $\boldsymbol{R}$ est la perte par rayonnement, $\boldsymbol{C}$ est l'échange par convection, $\boldsymbol{E}$ **et** $\boldsymbol{K}$ sont respectivement les échanges par évaporation et conduction. $\boldsymbol{C_{res}}$ et $\boldsymbol{E_{res}}$ sont les échanges par convection respiratoire et par respiration latente et sèche.

Les flux d'énergie de l'équation (**V.7**) sont sensibles à plusieurs paramètres météorologiques : la température de l'air $\boldsymbol{T_{air}}$ (°C) qui influence les paramètres $\boldsymbol{C}$ et $\boldsymbol{C_{res}}$, l'humidité relative (%) qui influence $\boldsymbol{E}$, $\boldsymbol{C_{res}}$ et $\boldsymbol{E_{res}}$, la vitesse de l'air $\boldsymbol{V_{air}}$ (m/s) qui influence $\boldsymbol{C}$ et $\boldsymbol{E_{res}}$ et la température moyenne radiante $\boldsymbol{T_{mrt}}$ (°C) qui est liée à $\boldsymbol{R}$. Ainsi, les paramètres nécessaires pour calculer l'indice PET sont la température, la vitesse et l'humidité de l'air ainsi que la température moyenne radiante. Cette dernière intègre les flux de courtes et de grandes longueurs d'ondes et le facteur de forme entre l'individu et les parois environnantes. Elle est calculée à partir de l'équation (**V. 8**) (**Genussa** *et al.*, 2005).

$$\boldsymbol{T_{mrt} = \left[T_{mrt}^{*4} + \frac{f_p a_k I_b}{\varepsilon \sigma}\right]^{0,25}} \qquad \textbf{(V.8)}$$

où $\boldsymbol{f_p}$ est la surface de projection horizontale d'une personne debout (0,082 m^2), $\boldsymbol{I_b}$ est l'apport solaire direct en W/m^2, a_k est le coefficient d'absorption des flux solaires de courtes longueurs d'ondes (0,7), $\boldsymbol{\varepsilon}$ est l'émissivité du corps humain (0,97), $\boldsymbol{\sigma}$ est la constante de Stephan-Boltzmann ($5{,}67\ 10^{-8}$ W m^{-2} K^{-4}). $\boldsymbol{T_{mrt}^{*}}$ est la température moyenne rayonnante des flux solaires de grandes longueurs d'ondes et des flux diffus de courtes longueurs d'ondes liés aux parois environnantes. Elle est donnée par l'équation (**V.9**) (**Genussa** *et al.*, 2005).

$$\boldsymbol{T_{mrt}^{*} = \left[\frac{1}{\sigma}\sum_{i=1}^{n}\left(\varepsilon_i \sigma T_i^4 + \frac{a_k I_{di}}{\varepsilon}\right) F_i\right]^{0,25}} \qquad \textbf{(V.9)}$$

où $\boldsymbol{n}$ est le nombre de parois environnantes, $\boldsymbol{\varepsilon_i}$ est l'émissivité de chaque parois (0,95), $\boldsymbol{T_i}$ est la température en Kelvin de chaque surface, $\boldsymbol{I_{di}}$ est le flux solaire diffus en W/m^2 et $\boldsymbol{F_i}$ est le facteur de forme entre chaque paroi et une personne en debout.

Notons que, l'indice de convection $\boldsymbol{hc}$ est défini pour une personne en posture debout par la relation empirique suivante (**Sasaki** *et al.*, 2000).

$$\boldsymbol{hc = 2,67 + 6,5\, V_{air}^{0,67}} \qquad \textbf{(V.10)}$$

Tous les paramètres météorologiques nécessaires pour calculer l'indice PET sont définis à 1,1 m du sol, représentant la hauteur moyenne du centre de gravité d'un européen (**Matzarakis** *et* **Mayer**, 1996). Dans notre étude, les valeurs de PET sont calculées en intégrant les équations citées ci-dessus à l'aide du logiciel MATLAB.

Le **Tableau V. 11** donne la correspondance entre l'indice de confort thermique PET et la perception thermique d'un individu "moyen" avec un métabolisme de travail de 80 W (activité légère) et une résistance de transfert thermique de vêtements de 0,9 clo [23] (**Matzarakis** *et* **Mayer**, 1996).

Perception thermique ressentis par un individu	Valeurs PET en C°
très chaud	>41
chaud	35-41
chaud modéré	29-35
légèrement chaud	23-29
confortable	18-23
légèrement frais	13-18
froid modéré	8-13
froid	4-8
très froid	< 4

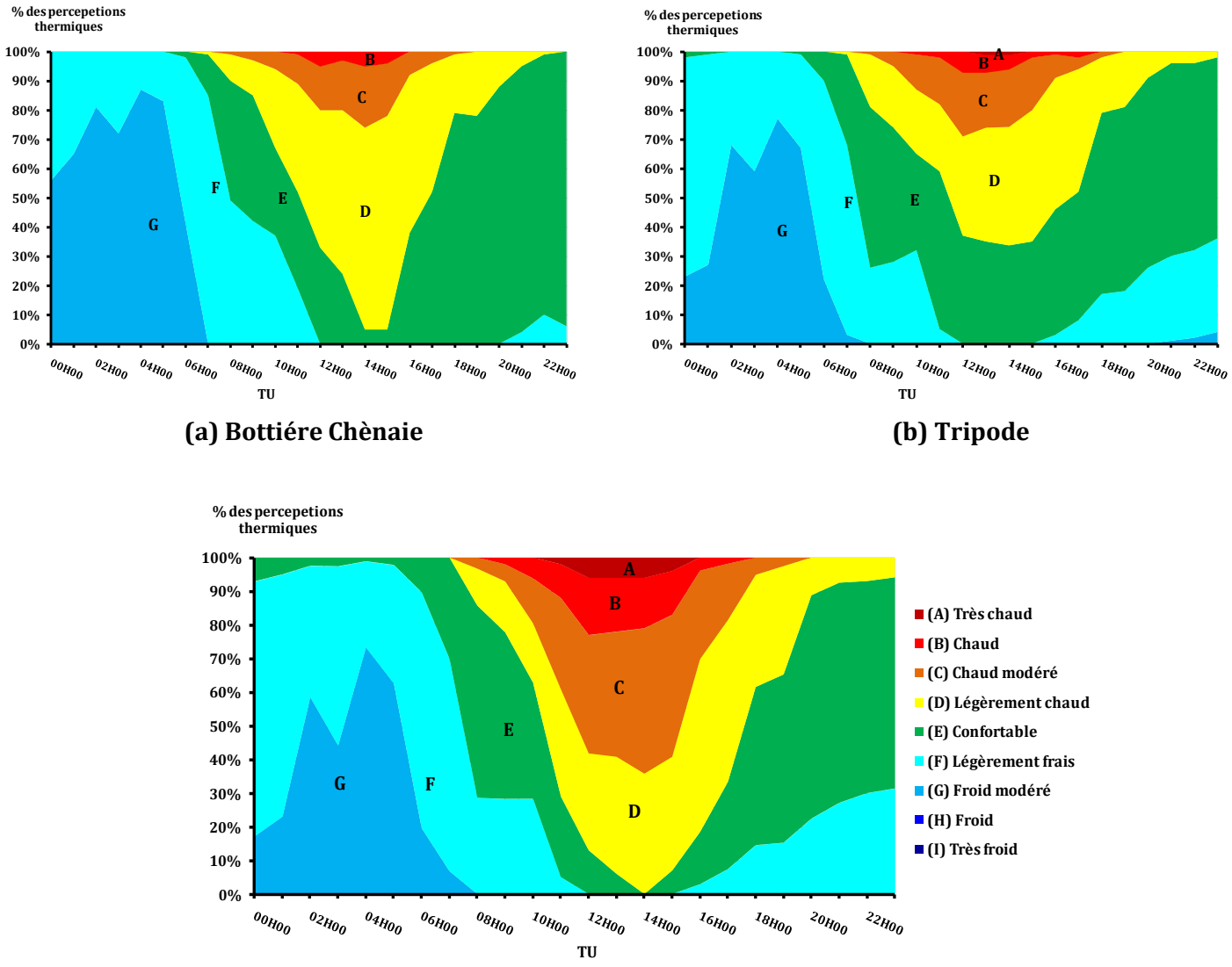
Tableau V. 11 Correspondance entre PET et perceptions thermiques (**Matzarakis** *et* **Mayer**, 1996).

V.5.2 Analyse du confort

V.5.2.1 Analyse des résultats pour le scénario A

Durant la nuit (de 00h00 à 06h00) (**Figure V. 26 (a)**, **(b)** et **(c)**), une sensation "**légèrement frais**" et "**froid modéré**" domine la perception thermique dans la majorité des quartiers. Une alternance des pourcentages durant cette période est observée entre ces deux sensations. Elle dépend de la vitesse du vent et de la température de l'air. En effet, les maxima de la sensation "**froid modéré**" sont enregistrés à 04h00 du matin où les températures sont les plus faibles, de l'ordre de 11,4°C (**Figure V. 11**). Durant cette période, le quartier Lyon confluence présente les valeurs les plus satisfaisantes avec un pourcentage élevé de zones "**légèrement frais**" relativement aux zones de "**froid modéré**". Cela est probablement dû aux faibles vitesses du vent caractérisant l'intérieur de ces espaces.

[23] Le **clo** est l'unité de mesure de l'isolation thermique des vêtements. **1 clo** = 0,155 K.m^2/W.

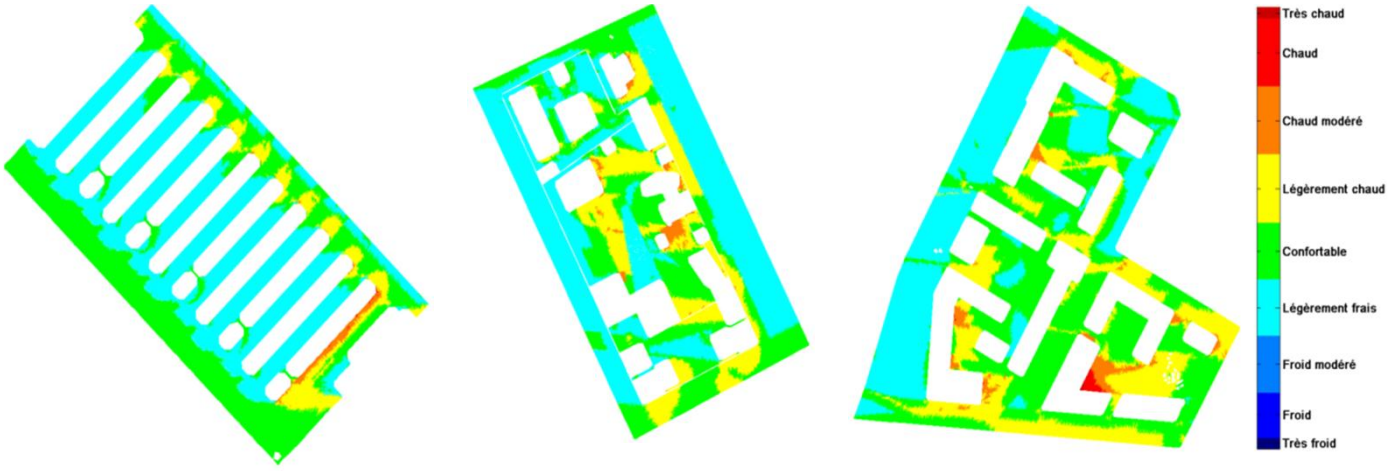


(a) Bottière Chènaie **(b) Tripode**

(c) Lyon Confluence

Figure V. 26 (a) (b) et **(c)** : Evolution journalière du pourcentage de zones présentant les différentes perceptions thermiques ressenties par un individu pour les trois cas d'études.

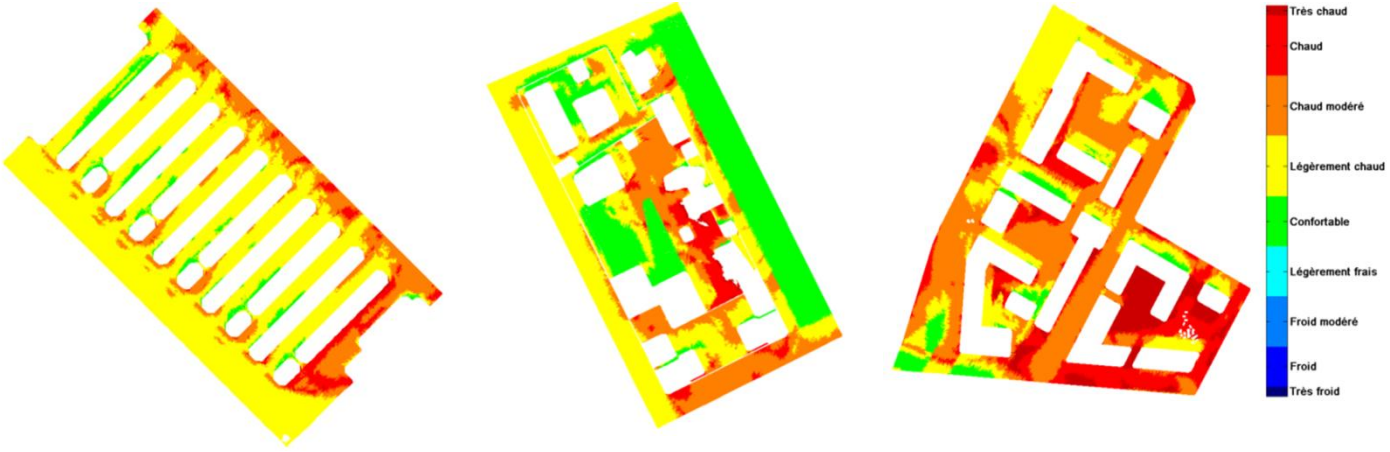
En début de matinée et jusque vers 11h00, le pourcentage des zones de "**froid modéré**" diminue en faveur des zones "**confortable**" et "**légèrement chaud**" (**Annexe V Figures 1**, **2** et **3**). Cette diminution est due à l'augmentation de la température de l'air ambiant, chauffée par convection par les parois chaudes. Le pic matinal de zones "**confortable**" est atteint à 08h00 avec 54 % pour les quartiers Lyon Confluence, 55 % pour Tripode et 41 % pour Bottière Chénaie. La faible performance du quartier Bottière Chénaie est en partie liée à sa morphologie. En effet, l'organisation des bâtiments en forme de rue canyon favorise l'effet de canalisation permettant de générer des surventes du vent et la création d'une sensation thermique "**légèrement frais**", comme le montre la carte de PET (**Figure V. 27** et **Annexe V. Figures 1**, **2** et **3**). A partir de 09h00, les zones "**confortable**" diminuent en faveur des zones "**légèrement chaud**" et "**chaud modéré**".



(a) **(b)** **(c)**

Figure V. 27 Valeurs de PET cartographiées à 08h00 pour les quartiers : **(a)** Bottière Chénaie, **(b)** Tripode, **(c)** Lyon Confluence.

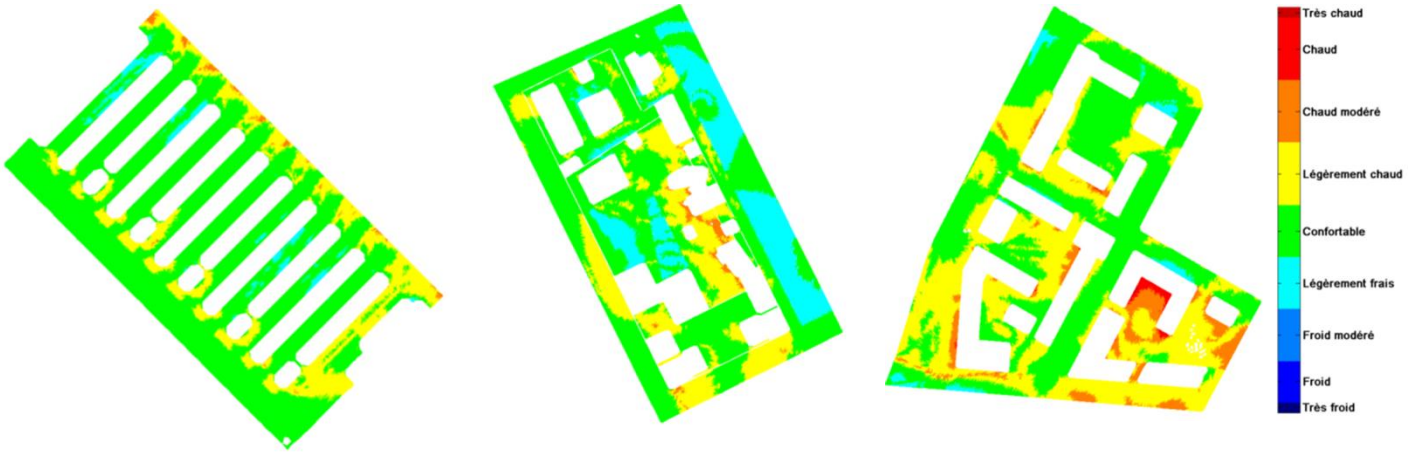
En milieu de journée, entre 11h00 et 14h00, l'amplification des flux solaires incidents engendre une augmentation des températures de surface et de l'air ambiant, qui se traduit par des sensations de chaleur. À ce moment de la journée, le soleil est au zénith, ce qui induit une réduction des surfaces ombragées et donc des zones "**confortable**" associées à ces zones. La fraction des zones "**confortable**" est minimale à 14h00, de l'ordre de 5 % pour Bottière Chénaie et Lyon Confluence et de 35 % pour Tripode. Ces résultats pour le quartier Tripode sont essentiellement dus à la présence de plans d'eau favorable à la sensation "**confortable**" (**Figure V. 26 (a)**, **(b)** et **(c)**, **Figure V. 28** et **Annexe V. Figures 2**). Parallèlement, une augmentation des zones de sensation "**chaud**" est visible. Les sensations les plus extrêmes "**très chaud**" sont localisées au niveau des espaces présentant des effets de dièdres (**Annexe V Figures 1**, **2** et **3**). Le pourcentage le plus élevé apparaît au niveau du quartier Lyon confluence avec 6 % des surfaces présentant une sensation "**très chaud**" à 14h00 (**Figures V. 26 (c)** et **V. 28**). Les sensations "**chaud**" et "**chaud modéré**" apparaissent dans les zones de recirculation notamment dans le sillage des bâtiments. Les meilleurs résultats sont obtenus dans le quartier Tripode avec 5 % de zones "**chaud**" et 20 % de zones "**chaud modéré**" et les plus mauvais dans le quartier Lyon Confluence avec 17 % et 43 % respectivement (**Figure IV. 26 (c)** et **Figure V. 28**). Ceci est dû principalement aux faibles vitesses de vent caractérisant les cœurs des îlots et ne permettant pas de refroidir les espaces et d'assurer le renouvellement d'air.



(a) **(b)** **(c)**

Figure V. 28 Valeurs de PET cartographiées à 14h00 pour les quartiers : **(a)** Bottière Chénaie, **(b)** Tripode, **(c)** Lyon Confluence.

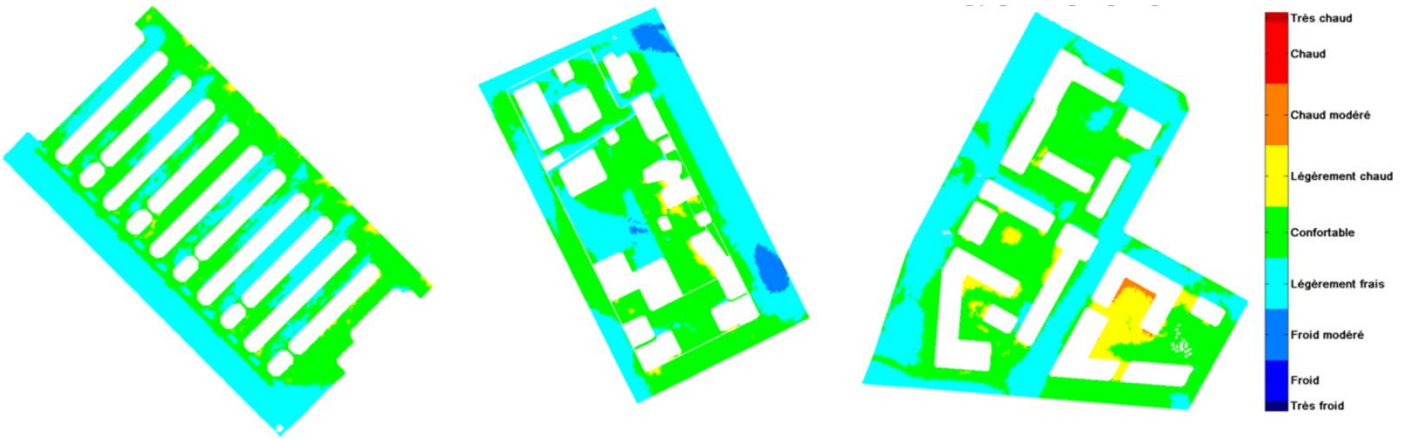
Durant l'après-midi et jusqu'à 20h00, l'intensité d'énergie solaire incidente diminue progressivement avec la hauteur zénithale du soleil et les ombres portées s'étendent sur le sol et les façades à 15h00, les zones "**confortable**" réapparaissent au niveau des zones ombragées et des zones à forte vitesse de vent. Le pourcentage de ces zones augmente très rapidement pour atteindre 79 % des surfaces à 18h00 contre 6 % à 15h00 pour le quartier Bottière Chénaie et 66% contre 35 % respectivement pour le quartier Tripode (**Figures V. 26 (a)** et **Figure V. 29**). Par ailleurs, malgré sa faible porosité de 17 % ne permettant pas de rafraichir les espaces par le vent, le quartier Lyon Confluence présente une forte augmentation du pourcentage des zones "**confortable**" de 7% à 15h00 à 55 % à 18h00 (**Figures V. 26 (c))**. Ceci est la conséquence des ombres générées par les bâtiments du quartier et des deux tours voisines de 120 m. Toutefois, le quartier comporte à 18h00 un fort pourcentage de zones "**légèrement chaud**" avec 39 % contre 19 % pour Bottière Chénaie et 20 % pour Tripode (**Figures V. 26 (b) et (c)**). Ces résultats montrent que la morphologie du quartier Lyon Confluence est favorable au piégeage radiatif (**Figure V. 29** et **Annexe V. Figures 3**). Notons que des zones "**légèrement frais**" apparaissent dans le quartier Tripode au niveau des plans d'eau, atteignant 17 % à 18h00.



(a) **(b)** **(c)**

Figure V. 29 Valeurs de PET cartographiées à 18h00 pour les quartiers : **(a)** Bottière Chénaie, **(b)** Tripode, **(c)** Lyon Confluence.

En fin de journée de 19h00 à 23h00, les zones "**confortable**" continuent de s'étendre avec un maximum à différentes heures selon les quartiers. Ils sont de l'ordre de 66 % pour le quartier Tripode à 21h00, de 77 % pour Lyon Confluence à 20h00 et de 94 % pour Bottière Chénaie à 23h00 (**Figures V. 26 (a)**, **(b)** et **(c)**). Des zones "**légèrement frais**" apparaissent là où les vitesses de vent sont élevées. Par ailleurs, des petits îlots de chaleur restent présents dans le quartier Lyon Confluence dans les endroits protégés du vent.



(a) **(b)** **(c)**

Figure V. 30 Valeurs de PET cartographiées à 23h00 pour les quartiers : **(a)** Bottière Chénaie, **(b)** Tripode, **(c)** Lyon Confluence.

Enfin, une comparaison de l'évolution journalière de la fraction de surface présentant un caractère de sensation "**confortable**" (**Figure V. 31**) montre que ces zones apparaissent en premier lieu dans les quartiers Tripode et Lyon Confluence à 06h00 suivie par Bottière Chénaie à 07h00. Cela est probablement dû à la morphologie du quartier de Bottière Chénaie. En effet, l'aménagement horizontal du quartier en une succession de rues canyon de 4,5 m et 12 m de

hauteur présente moins de surface de captage solaire le matin par rapport aux autres quartiers, qui s'étalent verticalement.

Durant la journée et jusqu'à 16h00, les résultats les plus satisfaisants en termes de zones "**confortable**" sont obtenus au niveau du quartier Tripode. Ces résultats s'expliquent en grande partie par la faible température de surface des plans d'eau qui participent ainsi au rafraichissement de la sensation thermique extérieure. Une autre raison est liée à l'aménagement du quartier en bâtiments isolés limitant les effets de dièdre. En fin de journée, le quartier Bottière Chénaie reprend l'avantage et son confort augmente jusqu'à 23h00, atteignant 95 %. Ce résultat s'explique par le couplage d'une forte porosité et des effets de canalisation, favorisant la restitution de la chaleur journalière accumulée.

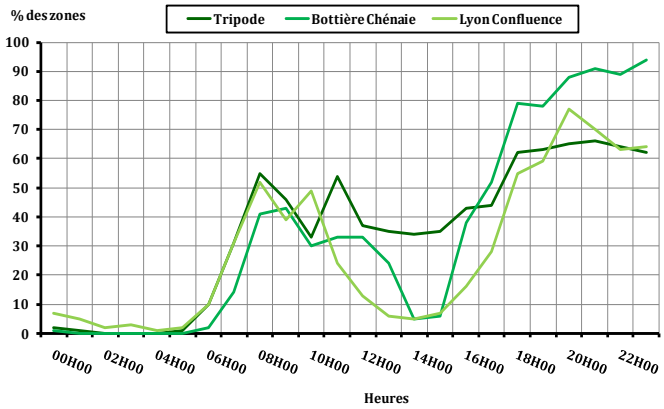
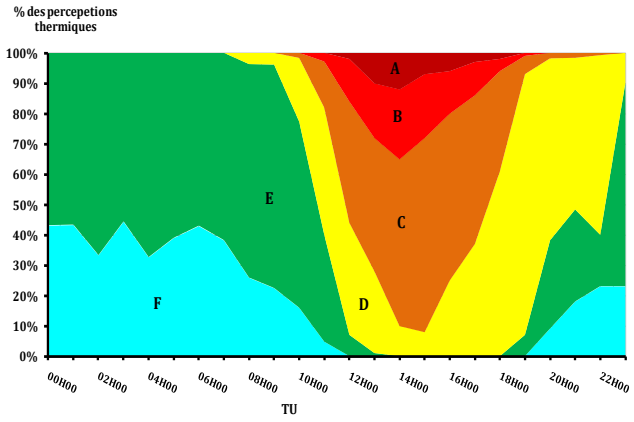


Figure V. 31 Comparaison de l'évolution journalière des zones "**confortable**" pour les trois cas d'études.

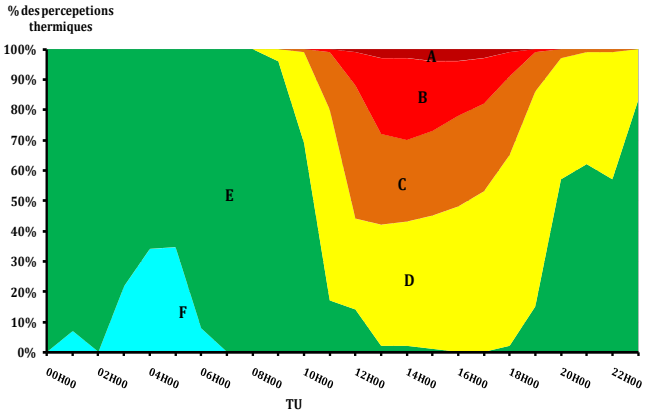
V.5.2.2 Analyse des résultats pour le scénario B

Durant la nuit, les trois quartiers présentent de forts pourcentages de zones "**confortable**" notamment entre 00h00 et 02h00 (**Figure V. 32 (a)**, **(b)** et **(c)**). Cette période correspond à des températures d'air comprises entre 18,8°C et 19,3°C. Entre 03h00 et 05h00, les températures d'air chutent de 1°C induisant une diminution des zones "**confortable**" et l'apparition de zones "**légèrement frais**". Ces résultats confirment la corrélation étroite entre les températures de l'air nocturnes et la perception thermique du confort. Notons que durant cette période, la vitesse du vent peut être considérée comme constante et faible (**Figure V. 14**).

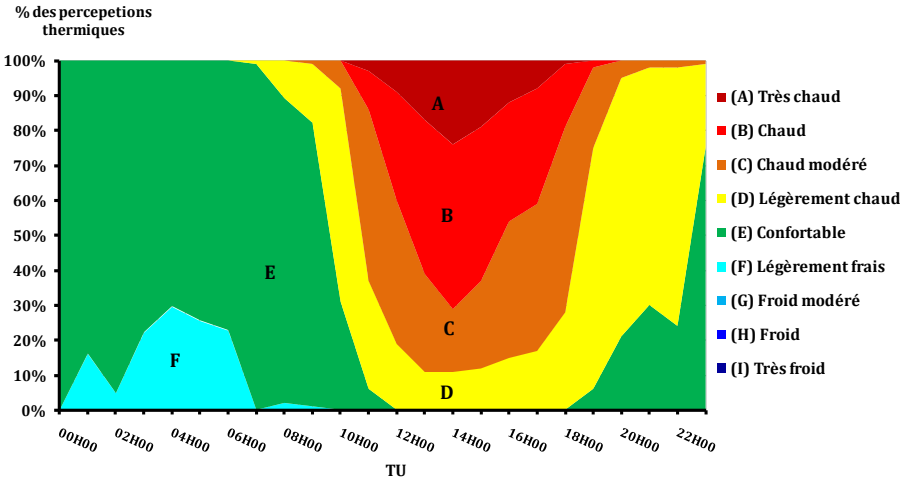
En début de matinée et jusqu'à 11H00, les zones "**confortable**" prédominent en raison de l'apparition du soleil, avec notamment un pic de 100 % à 07h00. Ensuite, l'augmentation de la hauteur solaire engendre l'apparition de zones présentant des sensations de chaleur avec un déphasage dans le temps lié à l'intensité du rayonnement solaire incident. Cette période correspond à une forte diminution des zones "**confortable**" qui disparaissent complètement après 11h00 pour le quartier Bottière Chénaie et Lyon Confluence (**Annexe V Figures 4**, **5** et **6**).



(a) Bottière Chènaie



(b) Tripode



(c) Lyon Confluence

Figure V. 32 (a) (b) et **(c)** : Evolution journalière du pourcentage de zones présentant les différentes perceptions thermiques ressentis par un individu pour les trois cas d'études.

En milieu de journée, les sensations thermiques chaudes dominent avec des valeurs extrêmes au niveau des zones de recirculation de faible vitesse de vent et à proximité des parois ensoleillées. Par ailleurs, la sensation "**chaud modéré**" est visible dans les zones ventilées et à l'ombres des bâtiments (**Figure V.** 33, **Annexe V Figures 4, 5** et **6**). Parmi les trois configurations, le quartier Lyon Confluence présente les pourcentages de sensation de chaleur les plus fortes : 47 % de zone "**chaud**" et 24 % de zone "**très chaud**" à 14h00 contre 27% et 3% pour Tripode et 23 % et 12 % pour Bottière Chénaie (**Figure V. 32 (a)**, **(b)** et **(c)**). Notons que durant cette période, le flux solaire global incident est de 968 W/m^2. Ces sensations extrêmes de chaleur diminuent à partir de 15h00 en faveur des sensations "**chaud modéré**" et "**légèrement chaud**". Des zones "**confortable**" réapparaissent à partir de 19h00 dans les parties ombragées (**Figures V. 33** et **V. 34**). A ce moment de la journée, l'environnement thermique des trois quartiers est dominé par une sensation "**légèrement chaud**" avec 66 % pour Bottière Chénaie, 69 % pour Lyon Confluence et 71 % pour Tripode (**Figure V. 32 (a), (b)** et **(c)**).

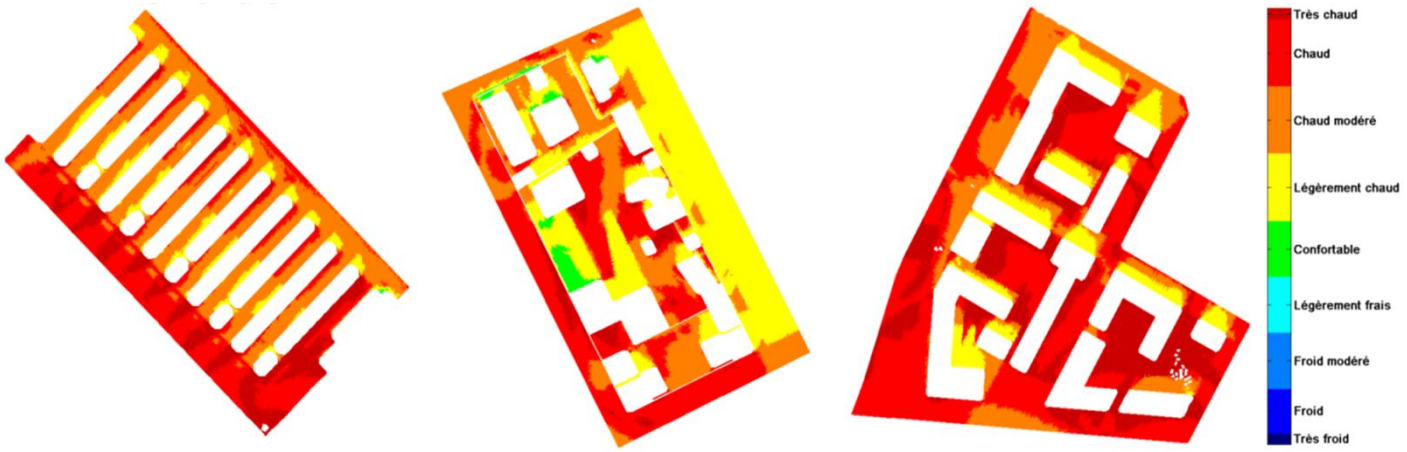


Figure V. 33 Valeurs de PET cartographiées à 14h00 pour les quartiers : **(a)** Bottière Chénaie, **(b)** Tripode, **(c)** Lyon Confluence.

En fin de journée, entre 19h00 et 23h00, une augmentation des zones "**confortable**" est observée jusqu'à 21h00 notamment dans le quartier Tripode. Puis entre 21h00 et 22h00, ce pourcentage chute probablement à cause de la diminution de la vitesse de vent (**Figure V. 14**) et remonte avec l'augmentation de la vitesse entre 22h00 et 23h00 où les valeurs maximales sont atteintes.

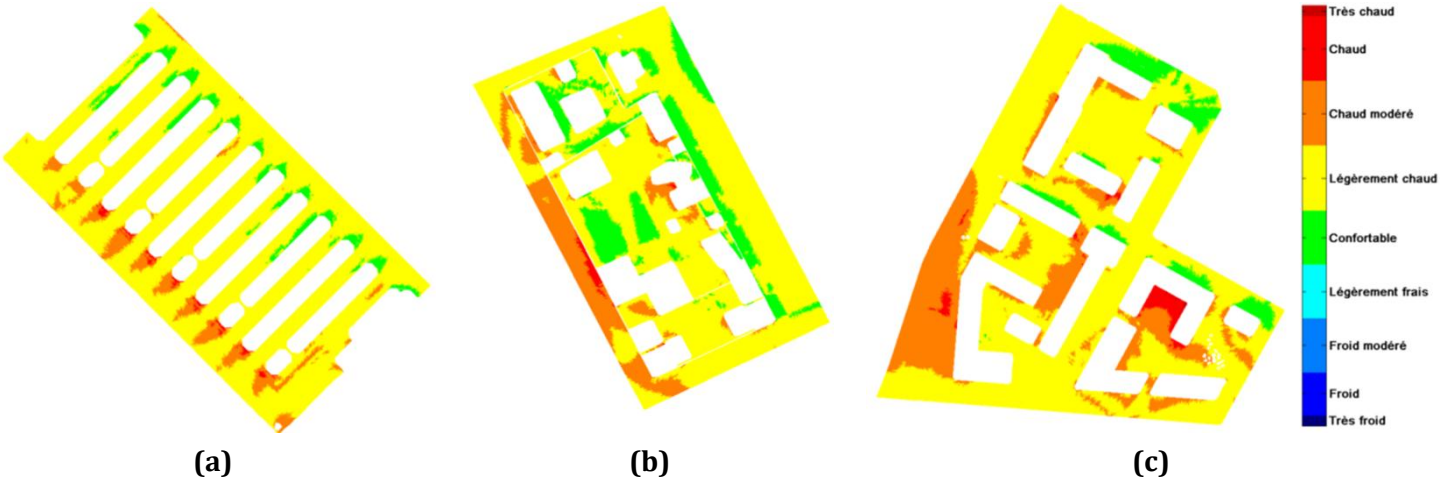


Figure V. 34 Valeurs de PET cartographiées à 19h00 pour les quartiers : **(a)** Bottière Chénaie, **(b)** Tripode, **(c)** Lyon Confluence.

Enfin, l'évolution journalière la fraction de surface présentant un caractère de sensation "**confortable**" (**Figure V. 35**) montre que, durant la nuit le quartier Lyon Confluence présente des valeurs de confort les plus optimales en raison de la faible porosité (29%) et de la densité des masques diminuant les vitesses de vent dans le cœur des îlots. Durant la journée, les trois quartiers suivent les mêmes évolutions des zones de confort avec un léger avantage pour

Bottière Chénaie et Tripode. Par ailleurs, les résultats liés aux différentes échelles de sensations thermiques chaudes montrent que le quartier Tripode comporte le moins de sensations extrêmes de chaleur alors que Lyon Confluence présente le pourcentage le plus élevé faisant de lui le quartier le moins confortable en moyenne.

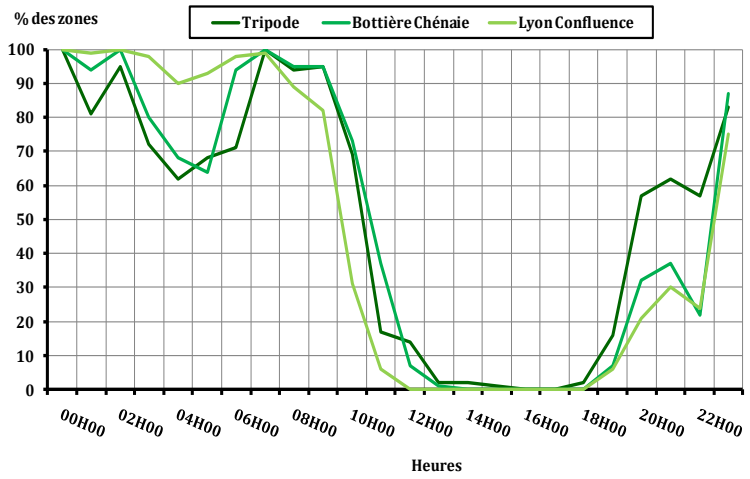


Figure V. 35: Comparaison de l'évolution journalière des zones "**confortable**" pour les trois cas d'études.

V.6 Dépendance et indépendance des indicateurs morphologiques avec le confort extérieur : lectures et corrélations

Cette analyse a pour objectif de valider l'hypothèse selon laquelle des corrélations existent entre les indicateurs caractérisant la morphologie des quartiers et le pourcentage de zone de confort durant la journée. Ceci revient à croiser la distribution de ces paramètres pour rechercher des relations fonctionnelles de dépendance ou d'indépendance entre ces deux types de variables. Ainsi, nous avons recensé trois indicateurs physico-morphologiques présentant une influence notable sur le confort. Il s'agit de la porosité, de l'albédo et du facteur de vue du ciel. Nous précisons ici, que le mot "corrélation" utilisé signifie une relation existant entre deux paramètres *(corrélation simple)* et non pas une *corrélation au sens statistique.* Il n'est pas possible d'établir une corrélation statistique sur seulement trois échantillons d'éco-quartiers.

La porosité : L'augmentation de la porosité traduit une augmentation de la surface des ouvertures au vent par rapport à la surface des façades projetées dans la direction du vent. Le **Tableau V. 12** montre que le plus souvent, l'augmentation de la porosité entraîne une augmentation des pourcentages de zone de confort neutre. Le quartier Bottière Chénaie illustre cette corrélation, avec des valeurs optimales de pourcentage de zone de confort pour le scénario A et B. Parallèlement, l'augmentation de la porosité du quartier Tripode pour le scénario B, de 21% à 31 %, induit une augmentation des zones de confort de 8 % (**Tableau V. 12**). Notons que, les autres indicateurs physico-morphologiques restent relativement constants pour les deux

scénarios. Toutefois, l'indicateur de porosité reste fortement lié à la densité des masques environnants. Plus les masques sont denses et fermés, plus cet indicateur perd de son influence. En effet, la porosité élevée du quartier Lyon Confluence pour le scénario B par rapport à celle du scénario A à une infime influence sur les résultats de confort. En revanche pour le quartier Bottière Chénaie, la dispersion et la faible densité de ces masques (pour le scénario B) entrainent une baisse non significative des pourcentages des zones de confort de l'ordre de 2 % (**Tabelau V. 12**). Par ailleurs, le couplage de l'indicateur de porosité et des effets aérodynamiques définis par **Gandemer** (1976) (effet de canalisation ou de trou sous immeuble ou l'effet venturi par exemple) peut constituer une solution adéquate pour optimiser le confort dans les espaces intérieurs des quartiers traversants. En effet, l'association de la porosité et de l'effet de canalisation dans le quartier Bottière Chénaie (**Figures V. 16** et **V. 26**) engendre une optimisation des résultats de confort à travers une forte dissipation de la chaleur durant l'après-midi notamment pour le premier scénario d'étude. Pour le quartier Lyon Confluence, l'association de la porosité et de l'effet venturi augmenterait probablement la ventilation notamment à l'intérieur des îlots et améliorerait le confort de ses espaces.

L'albédo moyen des surfaces ne présente pas de corrélation avec les résultats de confort. En revanche, nous avons constaté l'impact de la nature des surfaces du sol urbain sur le pourcentage des zones "**confortable**". En effet, les plans d'eau du quartier Tripode caractérisés par leur albédo élevé participent activement par leur température de surface faible à augmenter le pourcentage des zones de confort neutre et à réduire la sensation de chaleur. Pour les quartiers de Lyon Confluence et de Bottière Chénaie, la proximité des valeurs d'albédo du béton et des espaces verts respectivement de l'ordre de 0,35 et 0,33, ne permet pas de différencier l'impact des surfaces sur le pourcentage des zones de confort neutre.

Le facteur de vue du ciel : le FVC est un paramètre morphologique qui affecte lui aussi le confort extérieur. En effet, un tissu qui présente un FVC élevé dissipe la nuit plus rapidement la chaleur accumulée durant la journée. L'analyse de confort pour le scénario B a montré que le quartier Tripode présentant un FVC de 41,5 % dissipe plus de chaleur l'après-midi à partir de 18h00 par rapport aux autres configurations moins ouvertes. Ce constat est confirmé par les résultats du quartier Bottière Chénaie. En effet, pour le scénario B et contrairement au scénario A, les masques environnants entraînent une diminution de la vitesse incidente aux abords et à l'intérieur du quartier empêchant la chaleur de se dissiper. Ce constat est accentué par la faible ouverture au ciel du quartier, de l'ordre 30,5 %, diminuant les échanges entre le quartier et l'atmosphère. Le facteur de vue du ciel est lié à la porosité. En effet, une grande porosité combinée à un fort facteur de vue du ciel favorise le confort à l'intérieur des quartiers comme la montre l'analyse du confort du quartier Tripode. Cependant, l'inverse produit des situations de gêne liées aux sensations de chaleur et la formation de petits îlots de chaleur, notamment dans le quartier Lyon Confluence.

Les indicateurs de durée d'ensoleillement et de durée d'ombre restent indépendants des résultats du confort. Ainsi, aucune corrélation n'a été trouvée entre ces deux indicateurs et le pourcentage des zones "**confortable**". Toutefois, les zones ombragées représentent une source de zones "**confortable**" par excellence et réduit les sensations de chaleur engendrées par le fort rayonnement solaire du milieu de journée. Le quartier Lyon confluence représente un très bon exemple. En effet, les ombres produits par les tours voisines contribuent fortement au rafraichissement du quartier dans l'après-midi, spécialement pour le scénario A.

Scénario A : 19/07/09	Durée d'ensoleillement (%)	Durée d'ombre (%)	Facteur de vue du ciel (%)	Albédo (-)	Porosité (%)	Pourcentage moyen des zones "confortables" (%)
Tripode	45	55	41,5	0,42	21	34
Bottière Chénaie	47,5	52,5	30,5	0,38	34	36
Lyon Confluence	35,7	64,3	33,2	0,46	17	29
Scénario B : 30/7/05	**Durée d'ensoleillement (%)**	**Durée d'ombre (%)**	**Facteur de vue du ciel (%)**	**Albédo (-)**	**Porosité (%)**	**Pourcentage moyen des zones "confortables" (%)**
Tripode	43,7	56,3	41,5	0,42	31	42
Bottière Chénaie	43,8	56,2	30,5	0,37	34	34
Lyon Confluence	34,5	65,5	33,2	0,46	29	28

Tableau V. 12 Croisement des paramètres morphologiques et des pourcentages de zones "**confortable**" pour les trois configurations et les deux scénarios.

V.7 Conclusion

Les études de cas relatifs aux trois éco-quartiers représentatifs des différentes sous-configurations de la forme traversante ont permis de présenter un exemple concret de traitement du confort à l'échelle des espaces extérieurs. L'analyse des résultats de confort issus de l'indice de PET a permis de tirer les conclusions suivantes :

- Durant la nuit, le confort est régi par les températures de l'air et par le champ de vitesses de vent. Les espaces les plus confortables sont localisés dans les zones protégées du vent (le sillage des bâtiments et les zones de recirculation).

- Durant la journée, le rayonnement solaire incident et le vent sont les facteurs qui contrôlent le confort thermique. Les zones de confort apparaissent au niveau **(1)** des surfaces ombragées par les bâtiments du quartier et les masques environnant, **(2)** des zones caractérisées par de fortes vitesses de vent et enfin **(3)** des surfaces de sol urbain présentant des valeurs relativement élevées d'albédo. A contrario, les surfaces

présentant des sensations d'inconfort correspondent essentiellement aux zones de faibles vitesses d'air. Les valeurs extrêmes sont identifiées au niveau des surfaces présentant le phénomène de dièdre.

D'un point de vue climatique, le confort lié au scénario A (climat océanique) comporte d'avantage de sensations "**confortable**". En milieu de journée, l'environnement thermique est caractérisé par des sensations "**chaud modéré**". En revanche, le scénario B (climat semi-continental) présente un fort pourcentage des sensations de chaleur extrêmes ("**chaud**" et "**chaud modéré**") et des faibles pourcentages de sensations "**confortable**". Pour ce climat, des aménagements urbains supplémentaires sous la forme de structures végétales et/ou de plans d'eau à l'intérieur des quartiers, constituent une solution adéquate pour limiter les sensations de gêne thermique.

Du point de vue de la morphologie de ces trois tissus urbains, nous avons constaté que les formes d'urbanisation entraînent des situations de confort thermique différentes. L'analyse comparative des trois quartiers a montré que la forme urbaine ouverte représentée par le quartier Tripode présente les résultats de confort les plus satisfaisants. Cette conclusion s'explique par l'aménagement du quartier en bâtiments autonomes ouvrant ses espaces intérieurs aux vents incidents, favorisant la ventilation des espaces, limitant les effets de coin et de dièdre. Par ailleurs, l'organisation du quartier autour d'un espace intérieur ouvert relié à l'extérieur par des artères piétonnes favorise la dissipation de la chaleur accumulée durant la journée. Enfin, notons que, l'environnement immédiat joue un rôle très sensible sur les paramètres physiques de confort. Il est donc primordial de prendre en considération cet indicateur dans les processus de conception afin d'anticiper les effets induits et ainsi optimiser la forme des structures urbaines.

Conclusion générale, perspectives et recommandations pour la conception d'un espace extérieur urbain confortable

Nous proposons, en guise de conclusion et de perspective, une relecture transversale de notre travail selon ces cinq axes. Nous mettrons en évidence les principales conclusions dans un premier temps ainsi que les principales perspectives qui pourraient faire suite à cette étude.

Nous rappelons aussi que l'objectif principal de ce travail de recherche était de caractériser, par le biais de la modélisation et la simulation numérique, l'impact de l'hétérogénéité morphologique des éco-quartiers sur le confort de leur espace extérieur. Le confort dans un espace extérieur est traduit, en partie, par une adaptation plus ou moins importante de l'individu aux changements microclimatiques (baisses ou hausses de température de l'air, variations des vitesses du vent et de l'ensoleillement par exemple). Ces changements sont influencés par différentes caractéristiques urbaines et morphologiques. L'étude bibliographique a ainsi permis de détailler le rapport entre la morphologie urbaine et le confort de l'individu dans l'espace extérieur. L'étude de ce rapport a nécessité deux phases d'intervention. La première étape est basée sur une identification des différents indicateurs physico-morphologiques agissant sur les paramètres physiques de confort. Cette identification a permis de formaliser une liste d'indicateurs thermo-radiatifs (en relation avec le rayonnement solaire et la température de surface) et d'indicateurs aérauliques (en relation avec la vitesse de l'air). Ensuite, une analyse typologique de tissus urbains caractérisant les villes européennes a permis de distinguer les formes les plus représentatives. Quatre principales formes distinctes ont été identifiées (compacte, pavillonnaire, verticale et traversante) par le biais d'une analyse de l'évolution des formes, en établissant le lien entre le contexte historique, la forme urbaine et architecturale. Nous avons également évoqué les conséquences de ces hétérogénéités morphologiques sur les situations de confort dans l'espace extérieur. De cette façon, nous avons pu analyser l'influence sur le microclimat des différents types de tissus urbains cités précédemment, à l'exception de la forme traversante. En effet, cette forme, toujours à l'état embryonnaire, fait actuellement l'objet de débats et de recherches dans la communauté des chercheurs, aménageurs et urbanistes. Cette première phase de l'analyse bibliographique a souligné l'impact important des formes urbaines sur les paramètres de confort. Elle a également permis de remarquer que les situations de confort dépendent du rapport entre la morphologie urbaine et les éléments physiques du microclimat.

Dans la continuité de cette analyse bibliographique, le sens du terme "éco-quartier", élément clé de cette étude, a été précisé afin d'éclaircir sa définition et son histoire. Les *proto-quartiers* étaient tout d'abord issus d'une volonté forte d'habitants militants, localisés principalement dans les pays du Nord de l'Europe. Sont venus ensuite les *quartiers prototypes* représentés par la génération des quartiers : Bo01 (Malmö), Hammarby Sjöstad (Stockholm), Vauban (Fribourg)... Créés dans les années 1990, ces premières réalisations possèdent la particularité d'être portées par la volonté des pouvoirs publics de répondre aux enjeux du développement durable. Enfin les *quartiers types* présentent d'autres spécificités tout en ne dérogeant pas aux cadres réglementaires de l'urbanisme classique et moderne. À l'heure actuelle, ils se multiplient et se diffusent vers le sud de l'Europe.
Ces quartiers doivent répondre à un certain nombre de critères pour bénéficier de l'appellation "éco-quartier". Ces critères s'institutionnalisent de plus en plus. On retrouve notamment :

- Optimisation de la densité et de la compacité des formes urbaines (**Lynch**, 1981) et (**Bovet**, 2009) ;
- Favorisation de la connectivité physique avec la ville et lumineuse avec le soleil (**Newman *et* Kenworthy**, (1999), **De Portzemparc**, (1996) et **Boutté**, (2007)) ;
- Accroitre l'utilisation des ressources naturelles et réduire la consommation d'énergie (**Tillman**, (1994) et **Girardet**, (1999)) ;
- Favorisation de la mixité sociale et fonctionnelle (**Putnam**, (1995)).

Afin de sélectionner des configurations pour notre étude de confort, nous avons procédé à une analyse typo-morphologique de plusieurs éco-quartiers en France et en Europe. Cette analyse a permis de distinguer des différences morphologiques entre les éco-quartiers suivant leur contexte urbain, leur morphologie d'îlot et le tracé des voies de circulation. L'analyse a permis d'identifier les trois sous-configurations caractérisant la forme traversante non recensée dans la littérature. Il s'agit des formes : ouverte, semi ouverte et intermédiaire. Trois quartiers caractérisant ces sous-configurations ont été choisis pour une étude plus approfondie des indicateurs physico-morphologique et de confort physique.
Pour caractériser les paramètres micro-météorologiques au sein des éco-quartiers sélectionnés, un modèle numérique a été développé, basé sur un couplage itératif entre un modèle CFD (le *Code_Saturne* développé par EDF) et un modèle thermo-radiatif (le Code *Solene* développé par le laboratoire CERMA). Quelques adaptations ont été réalisées sur le *Code_Saturne* concernant les conditions limites à l'entrée de la veine numérique, le post traitement des résultats de sortie et la prise en compte de la végétation comme terme puits/sources pour de futurs travaux de recherche.
Une validation statistique et expérimentale a permis de vérifier la robustesse du modèle numérique et son aptitude à simuler de façon satisfaisante les paramètres physiques du confort sur un site réel. La première validation par le biais d'outils statistiques a montré une bonne performance générale du modèle pour simuler la vitesse moyenne du vent, la température de l'air et celle des surfaces, exception faite de l'énergie cinétique turbulente. Ensuite, les comparaisons aux mesures locales ont montré que la qualité des résultats n'était pas limitée à

une statistique d'ensemble, mais se vérifiait aussi très localement pour les températures de surface et de l'air et la vitesse de vent. En revanche, de même que pour la validation statistique, des améliorations restent à apporter pour améliorer la prédiction de l'énergie cinétique turbulente. A l'entrée de la veine, l'adaptation du profil de l'énergie cinétique turbulente défini par la relation de **Launder** *et* **Spalding**, (1972) permet d'améliorer les résultats des calculs. On a vu aussi qu'il serait souhaitable de réaliser des ajustements sur la physique des transferts de chaleur par conduction dans le modèle de sol du code *Solene* afin de prendre en compte les transferts de chaleur horizontaux. Par ailleurs, la validation a révélé le rôle prépondérant que jouent les conditions aux limites sur la qualité des résultats. Par exemple, des paramètres comme la longueur de rugosité peuvent considérablement affecter les résultats de la vitesse de l'air.

Suite à la validation du modèle numérique développé, celui-ci a pu être appliqué aux trois configurations d'éco-quartiers représentatives des trois sous-configurations de la forme urbaine traversante. Les résultats de l'indicateur de confort PET ont été croisés aux résultats de l'analyse des indicateurs physico-morphologiques afin de déterminer des relations de dépendance et d'indépendance. Ainsi, trois indicateurs physico-morphologiques présentent une influence notable sur le confort : la porosité des quartiers au vent, l'albédo et le facteur de vue du ciel. En revanche, les indicateurs de durée d'ensoleillement et de durée d'ombre n'ont pas d'impact significatif sur le confort physique. L'analyse comparative entre les trois sous-configurations de la forme traversante a montré que la forme ouverte présente le confort extérieur le plus satisfaisant. En effet, L'organisation des structures bâties en forme dispersée et poreuse autour d'un espace public intérieur favorise sa ventilation et la dissipation de la chaleur accumulée durant la journée par les surfaces. Les résultats montrent qu'il est important de prendre en considération l'effet des masques environnants sur les paramètres physiques de confort.

Perspectives

A partir des conclusions de ce travail de thèse, plusieurs axes de recherches sont proposés afin d'aboutir à une caractérisation du confort extérieur mieux affinée, plus précise et instructive.

La réduction des temps de calcul

L'inconvénient majeur du couplage numérique développé réside dans les temps de calcul important nécessaire. A l'heure actuelle, des simulations représentatives d'une année entière n'est pas envisageable avec un tel modèle. Des améliorations de la méthodologie de couplage et une augmentation la capacité de calcul des ordinateurs sont nécessaires pour tenter de diminuer les temps de calcul.

La prise en compte de la végétation

La végétation constitue une composante intégrante des éco-quartiers, dont il convient de quantifier l'impact sur le confort extérieur. Pour cela, une adaptation a d'ores et déjà été réalisée, en intégrant un terme puits dans l'équation de bilan de quantité de mouvement et des termes sources dans les deux équations de la turbulence (voir **annexe III**).

L'élargissement du champ de l'étude morphologique et microclimatique

L'étude comparative de ce travail s'est focalisée sur les trois sous-configurations de la forme traversante. Il serait intéressant d'élargir cette étude à l'ensemble des formes génériques compactes, verticales et pavillonnaires qui caractérisent les villes européennes, afin de mieux comprendre les particularités de chaque forme et identifier, pour des conditions et scénarios climatiques donnés, les plus pertinentes en termes de confort extérieur.

Le développement des outils d'aide à la décision

L'approche de croisement des résultats entre les indicateurs de confort et les indicateurs physico-morphologiques reste incomplète et ne peut prétendre conduire à des conclusions définitives. Néanmoins, elle esquisse des possibilités de croisements différents. Plusieurs perspectives sont alors envisagées pour mener à bien ce développement :

- la validation des indicateurs en relation avec le confort : les indicateurs de porosité, l'albédo moyen des surfaces et le facteur de vue du ciel devraient être testés sur d'autres échantillons urbains et pour différents climats.
- L'amélioration du système mis en place par l'intégration d'autres indicateurs, tels que les indicateurs liés à la végétation ou aux bassins d'eau. L'intégration de ces indicateurs dans le système permettrait d'affiner les résultats obtenus.

Recommandations pour la conception d'un espace urbain extérieur confortable

La prise en compte de la dimension environnementale lors de la conception d'un nouvel espace extérieur ou lors de la réhabilitation d'un espace existant peut offrir la possibilité d'améliorer les conditions de confort extérieur. Les solutions apportées doivent impérativement prendre en considération la morphologie urbaine locale et environnante, scénarios climatiques, climat et la

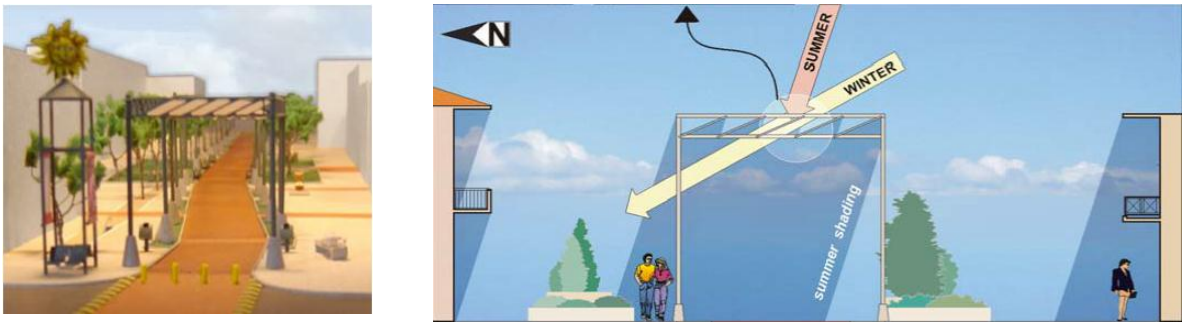
nature esthétique du projet envisagé. Ce travail a permis d'apporter quelques recommandations destinées aux concepteurs afin d'offrir un environnement attractif et confortable. Ces recommandations sont basées sur les résultats de cette étude et les suggestions de la littérature.

L'ouverture de la forme urbaine

La forme urbaine ouverte constitue une bonne solution pour optimiser le confort des espaces publics. Les résultats des simulations effectuées dans le chapitre V ont montré la bonne performance de cette forme sur le pourcentage des surfaces confortables. En outre, d'après **De Portzamparc** (2006) et **Boutté** (2007), cette forme favorise son ouverture à la lumière et réduit l'impression de lourdeur liée à l'aspect massif caractérisant notamment les formes compactes. Les futurs quartiers devraient être aménagés en bâtiments autonomes poreux ouvrant les espaces publics intérieurs aux vents incidents, favorisant ainsi la ventilation des espaces et limitant les effets de coin à l'origine de l'effet de dièdre qui génère des sensations de chaleur désagréables. Par ailleurs, l'organisation du quartier autour d'un espace intérieur ouvert relié à l'extérieur par des artères piétonnes favorise la dissipation de la chaleur accumulée durant la journée.

Optimiser le choix des matériaux de surface et les solutions

Les matériaux de surface affectent de façon très significative à la fois l'aspect thermique et visuel. Des couleurs claires ou des matériaux réfléchissants peuvent limiter la surchauffe des surfaces, mais ils peuvent également causer l'éblouissement et la réflexion thermique sur les usagers et sur les surfaces ou bâtiments environnants. A l'inverse, les surfaces foncées peuvent s'échauffer lorsqu'elles sont exposées au rayonnement solaire. La plupart des surfaces végétales empêchent les réflexions et favorisent le rafraichissement par évapotranspiration. Pour les voies de circulation, l'asphalte est souvent utilisé malgré son albédo faible et son aptitude à stocker la chaleur. Un concept de galerie a été proposé pour les chaussées par **Chrisomallidou** *et al.,* (2002). Cette galerie abrite un chemin pour les piétons et un espace pour les véhicules légers (**Conclusion. Figure. 1 à gauche**). Le toit est composé de lames orientées au sud et espacées avec un intervalle régulier de manière à permettre les échanges et de diminuer le piégeage de l'air. L'inclinaison de ces lames permet au soleil de pénétrer dans la galerie durant l'hiver et garantit un plein ombrage durant l'été (**Conclusion. Figure. 1 à droite**).



Conclusion. Figure. 1 à gauche : Concept de galerie proposé par **Chrisomallidou** *et al.,* (2002). **A droite :** Vue en coupe.

Favoriser les surfaces ombragées

Le contrôle de la température est essentiel quand il s'agit de confort. L'ombre est un facteur important qui permet le contrôle de la température de l'air ambiant. Une multitude d'installations générant de l'ombre ainsi que divers types de végétation peuvent être employés suivant le type d'ombrage recherché. Des installations verticales ou légèrement en pente telles que des brise vent constituent de bonnes solutions à condition de prévoir leur impact sur la ventilation des espaces extérieurs (**Gandemer**, 1981). Un ombrage peut également être obtenu à partir d'arbres avec l'effet supplémentaire de rafraichissement de l'air par évapo-transpiration et d'une possibilité d'exposition au soleil l'hiver (**Conclusion. Figure. 2 à gauche**). Les aménagements horizontaux, tels que les "pergolas" ou "galeries", offrent de l'ombre durant une plus grande période de la journée. Ces solutions sont utiles est adaptées pour ombrager les chemins piétonniers par exemple (**Conclusion. Figure. 2 à droite**). Là encore, elles doivent être conçues de manière à empêcher le piégeage radiatif.



Conclusion. Figure. 2 A gauche : Des arbres à feuilles caduques offrent de l'ombre en été et accroissent le refroidissement par évapotranspiration. En hiver, ils permettent l'exposition du site au soleil (**Vinet**, 2000). **A droite :** Des galeries le long d'une zone piétonne peuvent offrir ombre et protection contre la pluie (**Ali-Toudert** *et* **Mayer**, 2007).

Bibliographie

[1] **Aida, M. (1977).** "*Scattering of solar radiation as a function of cloud dimensions and orientation*". Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer 17(3), pp. 303-310.

[2] **Aida, M. (1982)**. "*Urban albedo as a function of the urban structure: a model experiment (part I)*". Boundary-layer meteorology (23), pp. 405-413.

[3] **Aida, M. et Gotoh K. (1982)**. "*Urban albedo as a function of the urban structure: a two dimensional numerical simulation (part II)* ". Boundary-layer meteorology (23), pp. 415-424.

[4] **Allard, F. (1987)**. "*Contribution à l'étude des transferts de chaleur dans les cavités thermiquement entraînées à grand nombre de Rayleigh*". Thèse d'Etat, INSA Lyon- Université Claude Bernard Lyon 1.

[5] **Ait-Ameur, K (2002)**. "Vers une méthode multicritère de caractérisation du microclimat dans les espaces publics urbains : Validation d'un système d'indicateurs "morpho-climatique" et d'un indicateur de confort". Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'université de Nantes.

[6] **Akbari H., Davis S., Dorsano S., Huang J. and Winert S. (1992)**. "*Cooling our Communities: A Guidebook on Tree Planting and Light Colored Surfacing*". US Environmental Protection Agency, Office of Policy Analysis, Climate Change Division, January.

[7] **Akbari, H., Bretz, S., Taha, H., Kurn, D., Hanford, J. (1997)**. "*Peak power and cooling energy savings of high albedo roofs*". Journal of Energy and Buildings – Special Issue on Urban Heat Islands and Cool Communities, 25(2), 117–126.

[8] **Akbari, H., L. Shea Rose et H. Taha. (2003)**. "*Analyzing the land cover of an urban environment using high-resolution orthophotos*". Landscape and Urban Planning 63(1), pp. 1-14.

[9] **Akbari. H, R. Levinson, S. Stern (2008)**. "*Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies*". Solar Energy 82 (2008) 648–655.

[10] **Ali-Toudert, F. et H. Mayer (2006)**. "*Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate*". Building and Environment 41(2), pp. 94-108.

[11] **Ali-Toudert F. et Mayer H. (2007)**. "*Thermal comfort in an east–west oriented street canyon in Freiburg (Germany) under hot summer conditions*". Theoretical Applied Climatology 2007. 223–37.

[12] **Archambeau F., Mechitona N. et Sakiz M. (2003).** "*Code_Saturne : a Finite Volume Code for the Computation of Turbulent Incompressible Flows-Industrial Applications. International*" Journal of Finite Volumes, 42, 48.

[13] **Arnfield, A. J.and C. S. B. Grimmond, (1998)**. "*An urban canyon energy budget model and its application to urban storage heat flux modeling*". Energy and Building, 27, 61–68.

[14] **ASHRAE handbook, fundamentals (2005)**. Atlanta, Georgia: ASHRAE; 2005. pp. 36.1–36.4.

[15] **Athamena K. (2008)**. " *Indicateurs pour l'analyse de la contribution d'un projet urbain à l'îlot de chaleur*". Rapport master, ENSA Nantes. p 133

[16] **Athamena K, Musy M, Bouyer J. (2009)**. "*Proposal of indicators dedicated to the analyze of contribution of urban projects to urban heat island*". PLEA2009 - 26th Conference on Passive and Low Energy Architecture, Quebec City, Canada, 22-24 June 2009

[17] **Azari S, Bierman J. (2005)**. "*System and method for energy-conserving roofing*". United States Patent No. 0064175.

[18] **Ben Messaoud O. (2009)**, "*Approche physico-morphologique de l'albédo effectif*". Mémoire de Master, ENSA de Nantes.

[19] **Benevolo L. (1995).** "*The European City*" Carl Ipsen. p 165.

[20] **Bensalma A. (2012)**. "*Caractérisation de la qualité des ambiances architecturales et urbaines dans les grands ensembles par une approche pluridisciplinaires des ambiances climatiques et visuelles des grands ensembles*". Ecole Centrale de Nantes, 330p.

[21] **Berdahl P, Bretz S.E. (1997)**. "*Preliminary survey of the solar reflectance of cool roofing materials*". Energy and Buildings 25(2), 149-158, 1997.

[22] **Berdahl P, Akbari H, Jacobs J, Klink F. (2005)**. "*Surface roughness effects on the solar reflectance of cool asphalt shingles*". Solar Energy Materials and Solar Cells 92(4), 482-489.

[23] **Bernabé A (2010). "***Préconisations en termes de matériaux pour la prévention du phénomène d'îlot de chaleur***"** Rapport master, ENS Cachan, 79p.

[24] **Boutaud B. (2009)**. "Quartier durable ou éco-quartier ?", Cybergeo : European Journal of Geography.

[25] **Boukhezer h. (2002)**. "*Caractérisation environnementale des tissus urbains en vue de leur classification*". Masters thesis, Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'université de Nantes, 2002, 153p.

[26] **Bougiatioti. (2006)**. "*Effect of urban geometry on surface temperatures of "skin" materials in Greek cities*'' PLEA2006 - The 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture, Geneva, Switzerland, 6-8, September 2006.

[27] **Bourbia F, Awbi H-B. (2004)**. "*Building cluster and shading in urban canyon for hot dry climate: Part 1: Air and surface temperature measurements*". Renewable Energy 29(2), pp. 249-262.

[28] **Bovet P. (2009)**. "*Eco-quartiers en Europe*". Edition : terre vivante, 139p.

[29] **Bouyer J. (2009)**. "*Modélisation et simulation des microclimats urbains : étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments*". Université de Nantes, Ecole Centrale de Nantes 324 p.

[30] **Castex J, Celeste P, Panerai P. (1980)**. "*Lecture d'une ville : Versailles, Paris*", Le Moniteur.

[31] **CERTU. (2007)**" *La forme urbaine et l'enjeu de sa qualité*" Lavoisier éditions, p 91.

[32] **Cherqui F. (2005).** "*Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier : méthode ADEQUA*". Université de La Rochelle, Pôle sciences et Technologie. P 179

[33] **Chrisomallidou N, Tsikaloudaki K, Theodosiou T. (2002). «** *Quality of life and open spaces: a survey of microclimate and comfort in outdoor urban areas*", Design with the Environment, Proceedings of PLEA (Passive Low Energy Architecture), pp. 345-350.

[34] **Charlot-Valdieu C, Outrequin P. (2009)**. "*L'urbanisme durable : Concevoir un éco-quartier*". Le Moniteur. p295.

[35] **Chimklai P, Hagishima A, Tanimoto J. (2004)**. "*A computer system to support Albedo calculation in urban areas*". Building and Environment 39(10), pp. 1213-1221.

[36] **Chang J.C, Hanna S.R, (2004)**, "*Air quality model performance evaluation*" Meteorol. Atmos. Physique, 87, 167-196.

[37] **Chen Q, Van der Kooi J. (1988)**. "*A computer program for combined problems of energy analysis, indoor airflow, and air quality*". ASHRAE Transactions 1988; 94 (2) 196–214.

[38] **Colombert, M. (2008)**. "*Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville*". Thèse de doctorat Génie urbain, Université Paris-Est, 2008.

[39] **Dalpé, B. et Masson, C. (2007)**. "*Recommended practices when analysing wind flow near a forest edge with wasp*". In European Wind Energy Conference, EWEC 2007 Proceedings, Milan, Italy.

[40] **Delaunay, D. (1995)**. "S*imulation numérique de l'écoulement du vent en milieu urbain*". Université de Nantes, ENSA Nantes.

[41] **Devillers, C. (2006)**. "*Cet éco-quartier qui réinvente la ville*". Edition parenthèse, p 86

[42] **Delhay, F, (2009)**. *'Vers de nouveaux logements sociaux*" Cité des affaires, EuraLille, p 120.

[43] **De Portzamparc, C. (1996**). "*Généalogie des formes / genealogy of forms*". Edition : Dis Voir.

[44] **De Portzamparc, C. (2004)**. "*Grand prix de l'urbanisme 2004*". Ministère de l'équipement des Transports, de l'Aménagement du Territoire, du Tourisme et de la Mer, Direction générale de l'urbanisme de l'habitat et de la construction. p 88.

[45] **De Portzamparc, C. (2006) «** *Architecture : figures du monde, figures du temps* », Leçons inaugurales au Collège de France, Collège de France/Fayard, Paris, 2006

[46] **Eliasson B, Riemer, and Wokaun A. (1999)**. "*Freenhouse Gas Control Technologies*". Pergamon, Amesterdam.

[47] **Emelianoff, C. (2010)**. "*Les pionniers de la ville durable*" Récits d'acteurs, portraits de villes en Europe Villes en mouvement, p294.

[48] **Escourrou, G. (1980)**. "*Climat et environnement*". Paris, Masson.

[49] **Escourrou, G. (1991)**. "*Le climat et la ville*". Paris, Nathan.

[50] **Jenger, J. (2004).** "*Le Corbusier : L'architecture pour émouvoir*" Découvertes Gallimard Arts, p 151.

[51] **Harzallah, A, Siret, D. (2006).** "*Architecture et contrôle de l'ensoleillement*". Conférence IBPSA France, Saint-Pierre de la Réunion.

[52] **Harzallah, A. (2007)**. "*Instrumentation des phénomènes d'ambiance dans les théories architecturales de la modernité (fin 19e-début 20e siècle)*". Nantes, Université de Nantes Ecole Polytechnique de L'université de Nantes.

[53] **Héloise M, Vincent P, Loubna R, Christelle V. (2009)** *" Euro Nantes Tripode".* Miniprojet Master STEU, phase II : Etude scientifique, février 2009.

[54] **Henon A. (2008)**. "*Température mesurées, modélisées, et observées par télédétection infrarouge, dans la canopée urbaine: Modélisation aéro-thermo-radiative des flux de chaleur urbaine*". Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes.

[55] **Höppe, P (1999)** "*The Physiological equivalent Temperature – A Universal Index for Biometeorological Assessment of the Thermal Environment*''. International Journal of biometeorology, 1999, vol. 43, p. 71-75.

[56] **Hunter J. Johnson, G. T., L, and A. J, Arnfield (1991)**. "*Preliminary field test of an urban canyon wind flow model*". Energy Build, 15, 325–332.

[57] **Idczak M, Groleau D, Mestayer P, Rosant J-M, Sini J-F (2010)**. *"An application of the thermo-radiative model SOLENE for the evaluation of street canyon energy balance".* Building and Environment 45, 1262–1275

[58] **Idczak M, (2009) «** *L'influence des conditions micro météorologiques dans une rue canyon sur les caractéristiques énergétiques d'un bâtiment »,* thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Politechnika Warszawska, 272pp.

[59] **Inard C. (1988)**. "*Contribution à l'étude du couplage thermique entre un émetteur de chauffage et un local*". Thèse de doctorat, INSA de Lyon- Université Claude Bernard Lyon 1.

[60] **Izard, J-L. (1999).** "*Les indicateurs de la performance thermique du bâtiment et leurs implications en pédagogie du projet d'architecture*". Comm. au 3e Colloque Franco-Canadien; "Thermique des systèmes à température modérée"; Montréal; Mai 1999.

[61] **Izard, J-L. (1998).** "*Thermal comfort in atria: thermal stratification and architectural design*" PLEA 98 "Environmentally Friendly Cities", Lisbonne, Juin 1998.

[62] **Gagge AP, Fobelets AP, Berglund LG (1986)**. "A standard predictive index of human response to the thermal environment". ASHRAE Transactions 1986;92:709e31.

[63] **Gandemer, J. (1976)**. "Intégration *du phénomène vent dans la conception du milieu bâti*" La documentation française, CSTB, 132p.

[64] **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.

[65] **Grafmeyer Y. Joseph, I. (1984)**. "*L'école de Chicago. Naissance de l'écologie urbaine*", Paris, Aubier.

[66] **Grimmond, C. S. B., H. A. Cleugh, and T. R. Oke, (1991)**. "*An objective urban heat storage model and its comparison with other schemes*". Atmos. Environ., 25B, 311–326

[67] **Grimmond, C. S. B., and T. R. Oke (1999)**. "*Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form*". J. Appl. Meteor., 38, 1262–1292.

[68] **Groleau D, Miguet F (1998)**. « *Solène et la simulation des éclairements directs et diffus des projets architecturaux et urbains* ». in : *IBPSA France '98 Modéliser pour améliorer les,*

performances des Bâtiments, Sophia Antipolis, 10-11 décembre 1998. Sophia Antipolis : IBPSA. 1998. pp. 61-65

[69] **Groleau, D., (2000)**. « *Solène un outil de simulation des éclairements solaires et lumineux dans les projets architecturaux et urbains* ». in : "Les professionnels de la Construction" Confort intérieur : Outils informatiques d'aide à la conception et à la prévision du confort thermique, acoustique et d'éclairage Etudes de cas, Rouen, 10-11 février 2000. [s.l] : [s.n]. 2000. 8p

[70] **Karlessi .T, M. Santamouris, K. Apostolakis, A. Synnefa, I. Livada (2009)**. "*Development and testing of thermochromic coatings for buildings and urban structures*". Solar Energy 83 (2009) 538–551.

[71] **Katul, G., Mahrt, L., Poggi, D. et Sanz, C. (2004)**. "*One and two equation models for canopy turbulence*". Boundary-Layer Meteorology, 113:81–109.

[72] **Kofoed A.G Fleisher, S.M. (2005)**. "*The impact of urban street layout on local atmospheric environment*" International Journal of biometeorology, vol. 43, p. 71-75.

[73] **Kondo, A., M. Ueno, A. Kaga, and K. Yamaguchi (2001)**. "*The influence of urban canopy configuration on urban albedo*". Bound.-Layer Meteor., 100, 225–242.

[74] **Launder, B.E. et Spalding D.B. (1972) "***Mathematical models of turbulence*". Academic Press Inc. (London) Limited. Paper, 169pp.

[75] **Lévy, A. (2005)**. "*Formes Urbaines et significations : revisiter la morphologie urbaine*". Espace et société. No 122, Pages 25 - 48.

[76] **Lévy, A. (1996)**. «*Crise et dysfonctionnements de la ville de l'âge démocratique : l'urbanisme en question*», dans J.P. Charrié (sous la dir. de), Villes en projets, Bordeaux, Maison des Sciences de l'Homme d'Aquitaine.

[77] **Lin TP. (2009) "***Thermal perception, adaptation and attendance in a public square in hot and humid regions*". Building and Environment 2009; 44:2017-2026.

[78] **Lin TP, Matzarakis A, Hwang RL (2010).** "*Shading effect on long-term outdoor thermal Comfort."* Building and Environment 2010; 45:213-21.

[79] **Lynch, K. (1960)**. "*The image of the city*", Cambridge Mass, MIT Press.

[80] **Lynch, K. (1981).** "*A Theory of Good City Form*". M.I.T Press, Cambridge.

[81] **Marta J.N, Oliveira P, Helder J.P, Gonc–alves, Paulo M.C. Ferrao (2009)**. "*Numerical analysis of the street canyon thermal conductance to improve urban design and climate*". Building and Environment 44 177–187.

[82] **Masmoudi, S, Mazouz, S (2004)**. "*Relation of geometry, vegetation and thermal comfort around buildings in urban settings, the case of hot arid regions*". Energy and Buildings 36 (2004) 710–719

[83] **Masson, V., C. S. B. Grimmond, and T. R. Oke, (2002)**. "*Evaluation of the Town Energy Balance (TEB) scheme with direct measurements from dry districts in two cities*". J. Appl. Meteor., 41, 1011–1026.

[84] **Matzarakis A, Mayer H (1996)**. "*Another kind of environmental stress: thermal stress*". WHO Collaborating Centre for air Quality Management and air Pollution Control. Newsletters 1996;18:7-10.

[85] **Merlin, P. (1998)** " *les banlieues des villes française*". La documentation française, 1997.

[86] **Miguet, F. (1996)**. "*Analyse microclimatique des formes urbaines : Un outil de simulation de l'effet conjoint des éclairements direct et diffus en milieu urbain*". in : *Paysage & Ambiances : 3èmes rencontres des doctorants des écoles d'architecture*, Toulouse, 23-24 mai 1996. Toulouse : Ecole d'Architecture de Toulouse. pp. 68-75

[87] **Miguet, F. (2000) «** *Paramètres physiques des ambiances architecturales : un modèle numérique pour la simulation de la lumière naturelle dans le projet urbain* » Ecole polytechnique de l'université de Nantes : Nantes : CERMA, 2000. - 360 p.

[88] **Niachou K. Livada I., Santamouris M (2008)**. "*Experimental study of temperature and airflow distribution inside an urban street canyon during hot summer weather conditions. Part I: Air and surface temperatures*". Building and Environment 43 1383–1392

[89] **Newman, P.; Kenworthy, J. (1999)**. "*Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence*". Island Press, Washington D.C.

[90] **Oke, T. R, (1981)**. "*Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations*". J. Climatol., 1, 237–254.

[91] **Oke, T. R. (1987)**. "*Boundary layer climates*". Second Edition. 435 pp. University press, Cambridge, ISBN 0 415 04319 0.

[92] **Oke T.R, Nakamura Y. (1988)**. "*Wind, temperature and stability conditions in an east-west oriented urban canyon*". Atmospheric Environment 22: 2691-2700.

[93] **Oke, T. R. (1988)**. "*Street design and urban canopy layer climate*". Energy and Buildings 11(1-3), pp. 103--113.

[94] **Panâo, J.N., Gonçalves, J.P, Ferrâo, M.C (2008).** "*Optimization of the urban building efficiency potential for mid-latitude climates using a genetic algorithm approach*". Renewable Energy 33 (2008) 887-896.

[95] **Panerai, P. ; Langé, J. (2001)**. "*Formes urbaines, tissus urbains. Essai de bibliographie raisonnée*", MELT-DGUHC, Centre de Documentation de l'Urbanisme.

[96] **Panerai, P. ; Depaule J.C. ; Demorgon M. (1999)**. "*Analyse urbaine*". Edition parenthèse, collection Eupalinos, p 189

[97] **Panerai, P.; Castex, J.; Depaule, J-C (1997)**. "*Formes urbaines: de l'îlot à la barre*". Editions Parentheses, 1997 - 196 pages

[98] **Papadopoulos, A. M. (2001)**. "*The influence of street canyons on the cooling loads of buildings and the performance of air conditioning systems*". Energy and Buildings 33(Issue 6), pp. 601-607.

[99] **Peneau J-P. (1989)**. "*SOLENE : un outil au service de l'architecture et de l'urbanisme*". Bâtiment-Energie. 1989, septembre, 57, pp.30-32.

[100] **Penwarden, A.D. and Wise, A.F.E. (1975)**. "*Wind environment around buildings. Department of the Environment BRE*". Her Majesty's Stationery Office, London.

[101] **Pinon, P. (1994)**. "*Composition urbaine I, II*", Paris, DAU-STU.

[102] **Plate, E. J. et Kiefer H. (2001)**. "*Wind loads in urban areas*." Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 89(14-15), pp. 1233-1256.

[103] **Putnam, R. (1995)**. "*Bowling Alone: America's Declining Social Capital*", Journal of Democracy, 6, 65-78.

[104] **Ratti, C. (2001)**. "*Urban analysis for environmental prediction*". PhD Dissertation, University of Cambridge.

[105] **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

[106] **Robitu M. (2005)**. "*Etude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement urbain : influence sur les conditions de confort en espaces extérieurs*". Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Nantes et Université de Nantes.

[107] **Roncayolo, M. (1996)**. "*Les grammaires d'une ville : essai sur la genèse des structures urbaines à Marseille*", Paris, EHESS.

[108] **Rotach, M. (2000)**. "*Review of atmospheric turbulence over cities*". Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 126, 941–990.

[109] **Rowley FB, Algren AB, Blackshaw JL. (1930)**. "*Surface conductances as affected by airvelocity, temperature and character of surface*". ASHRAE Trans; 38:33–46.

[110] **Sakakibara, Y. (1996)**. "*A numerical study of the effect of urban geometry upon the surface energy budget*". Atmospheric Environment 30(3), pp. 487-496.

[111] **SAMOA, (2007)**. "*Dossier de presse Tripode*". Conférence de presse.

[112] **Santamouris, M., N. Papanikolaou, I. Livada, I. Koronakis, C. Georgakis, A. Argiriou et D. N. Assimakopoulos (2001)**. "*On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings*". Solar Energy 70(3), pp. 201-216.

[113] **Santamouris M. and Doulos L. (2001)**. "*Comparative Study of Almost 70 Different Materials for Streets and Pavements*". M.Sc. Final Report, University of Athens, Department of Physics, Athens 47p.

[114] **Sarradin, F. (2004).** " *Analyse morphologique des espaces ouverts urbains le long de parcours mesure des variations des formes de ciel par la squelettisation".* Université de Nantes Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes.

[115] **Sasaki R, Yamada M, Umeatsu Y et Saeki H, (2000)**. "*Comfort environment assessment based on bodily sensation in open air: relationship between comfort sensation and meteorological factors*", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, vol. 87, p. 93 -110.

[116] **Shashua-Bar, L., M. E. Hoffman et Y. Tzamir (2006)**. "*Integrated thermal effects of generic built forms and vegetation on the UCL microclimate*". Building and Environment 41(3), pp. 343-354.

[117] **Simpson, J.R, McPherson, E.G (1997).** "*The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona*". Energy and Buildings 25(2), 127-137, 1997.

[118] **Sini J.-F., Anquetin S., Mestayer P.G. (1996)**. "*Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons*". Atmospheric Environment 30: 2659-2677.

[119] **SCI-Lyon-Confluence (2006)**. "*Projet Lyon Confluence, permis de construire, volet paysager*".

[120] **Spagnolo .J, De Dear .R (2003)**. "*A field study of thermal comfort in outdoor and semi-outdoor environments in subtropical Sydney Australia*". Building and Environment 38 (2003) 721 – 738

[121] **Stoll MJ, Brazel AJ. (1992)**. "*Surface air–temperature relationships in the urban environments of Phoenix*". Arizona, Physics Geography; 13 160–79.

[122] **Synnefa, A., Dandou, A., Santamouris, M., Tombrou, M. (2007a)**. "*An energy efficient solution to mitigate heat islands and reduce cooling energy loads*". In Braganca, L. (Ed.), Proceedings of Sustainable Buildings 2007, International Conference, Lisbon, Portugal, pp. 895– 902.

[123] **Synnefa, A., Santamouris, M., Akbari, H. (2007b)**. "*Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions*". Journal of Energy and Buildings 39, 1167–1174.

[124] **Taha H. (1997)**. "*Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the South Coast Air Basin*." Atmospheric Environment 31(11), pp. 1667--1676.

[125] **Taha H, Bornstein, R. (1999)**. "*Urbanization of meteorological models and implications on simulated heat islands and air quality*". Proc. Int. Conf. on Urban Climatology (ICB-ICUC '99), Sydney, Australia, Macquarie University, 431–435.

[126] **Terjung, W.H., Louie, S.S.-F. (1973)**. "*Solar radiation and urban heat islands*". Annals AAG 63, 181-207.

[127] **Tillman Lyle, J. (1994)**. "*Regenerative Design for Sustainable Development, Willey, New York Girardet*". H. (1999), Creating Sustainable Cities, Green Books, Devon, UK.

[128] **Tiraoui, S. (2000)**. "*Les indicateurs physico-sensibles pour une exploitation des ambiances lumineuses*". Mémoire de DEA. Nantes : Université de Nantes, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes. p 80.

[129] **Tsangrassoulis A, Niachou K, Papakostantinou N, Pavlou C, Santamouris M. (2002)** "*A numerical method to estimate time-varying values of diffuse irradiance on surfaces in complex geometrical environments*" Renewable Energy 27 (2002) 427–439.

[130] **Tzu-Ping L, Matzarakis A, Hwang R-L (2010)**, " *Shading effect on long-term outdoor thermal comfort* " Building and Environment 45 (2010) 213–221.

[131] **URBAT**. **(2006)**. "*Approche méthodologique de la construction durable en milieu urbain : le microclimat urbain et son impact environnemental sur les constructions*".- Auteur(s) Allard, F ; Bozonnet, E. ; Musy, M; Chazelas, M. ; Guarracino, G Organisme(s) auteur(s) Université de La Rochelle.

[132] **Vinet, J. (2000)**. "*Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain : Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs*". Université de Nantes Ecole Polytechnique de l'Université de Nantes.

[133] **Viollet P-L (1988)** "*On the numerical modeling of stratified flows".* Physical processes in estuaries, J. Drokers, W. Van leussen eds, 257-277. 1988

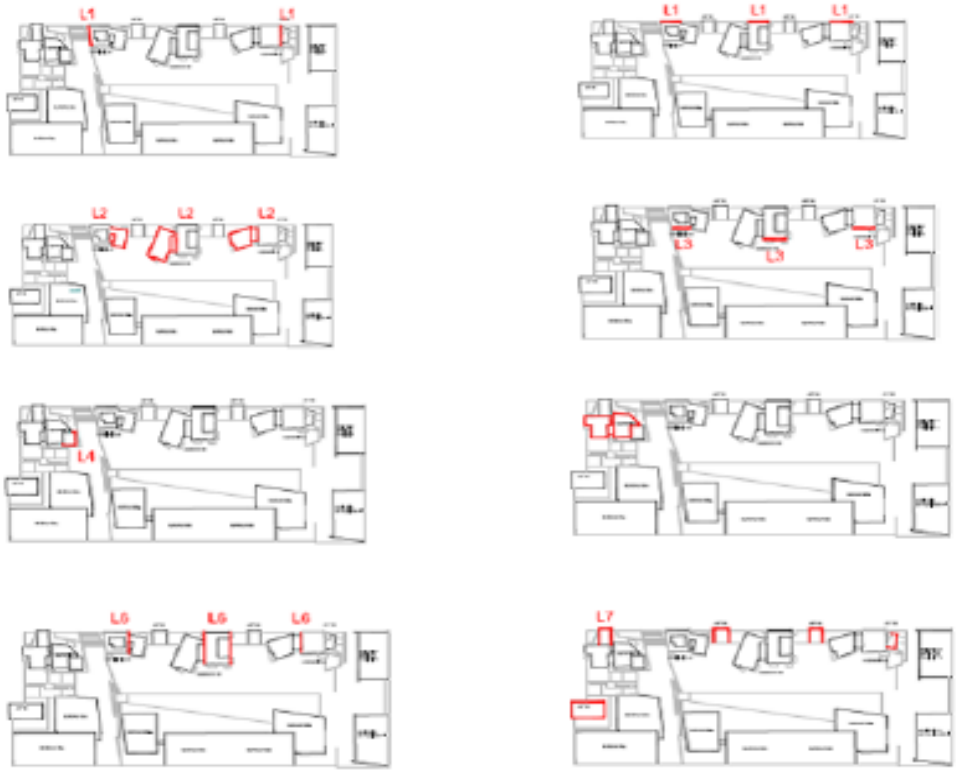
[134] **Watts, D., Battista, L., Zunino, J. (2006)**. "*Smart coating system*". United States Patent No. 0182160.

[135] **Zhai. Z, Chen. Q, Haves P., Klems J.H., (2002)**. "*On approaches to couple energy simulation and computational fluid dynamics programs*". Building and Environment 37 (2002) 857–864.

[136] **Zhai. Z, Chen. Q, (2003)**. "*Solution characters of iterative coupling between energy simulation and CFD programs*". Energy and Building 35 (5) (2003) 493– 505.

Annexes II

Projet TRIPODE - Une description plus détaillée de la nature des matériaux de surface par bâtiment



Annexe II. Figure. 1 La répartition des matériaux pour les façades du projet Tripode.

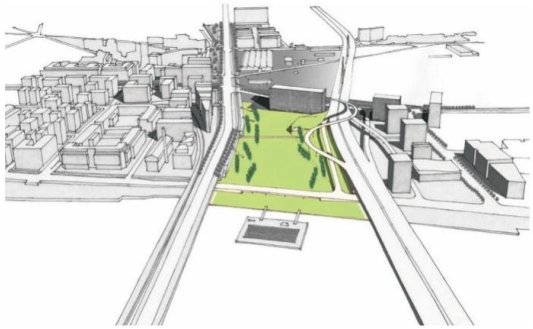
La Figure. 1 de l'annexe II présente la répartition des matériaux pour les façades du projet Tripode :

- **L1**: Les façades Est des logements 2, 3 et 4 sont en béton matricé. La façade Nord du logement 2 et la façade Sud du logement 4 sont en béton matricé avec balcons en béton lisse peint. Le béton matricé, obtenu par l'application d'une trame sur la surface fraîche du béton, permet de donner formes et couleurs décoratives à la surface du mur ou du sol. Les matrices permettent l'imitation de matières naturelles à travers la reproduction des motifs tels que les pavés ou les briques.
- **L2** : Les façades Est des logements 2, 3, 4 sont peintes en blanc.
- **L3**: Pour les logements 2, 3 et 4, les façades Ouest des bâtiments perpendiculaires au bassin sont revêtues de peinture minérale colorée.
- **L4**: La façade de la tour de verre du logement 1 est vitrée avec des occultations en bois
- **L5**: Les façades Nord, Ouest et Sud du logement 1 sont en enduit sur isolation extérieure
- **L6**: Pour les logements 2, 3 et 4, les façades Sud qui sont perpendiculaires au canal sont en béton lisse de teinte grise

- **L7:** Les façades des lofts sont en bardage métallique coloré, posé verticalement avec une épaisseur d'isolant thermique.

En ce qui concerne les façades des bureaux, la plupart des surfaces sont construits de voile percé. Les tôles d'aluminium sur allèges de béton ou de verre émaillé sont en alternance avec de vitrages émaillés de différentes teintes. Les façades Est des bâtiments 2 et 3 sont en vitrage.

- Les toitures des logements 1 et 4 sont couvertes avec des panneaux photovoltaïques.
- Les toitures des bureaux 1a et 1b ainsi que les toitures des résidences de tourisme sont végétalisées en sedum.
- Les toitures des bâtiments des logements 2 et 3 sont partiellement accessibles ou végétalisées. La partie accessible est en dalle béton et la partie végétale est couverte de sedum.
- En ce qui concerne les bâtiments 2 et 3 des bureaux, leurs toitures sont également des toitures terrasses et le béton est le principal matériau de construction. Une partie de leur surface est en sedum.









Quartier Masséna, Paris Rive Gauche, Paris, France

Dénomination de l'opération

Quartier Masséna, Paris Rive Gauche. Paris. France

Quartier référence

Architecte et urbaniste :

Christian de Portzamparc

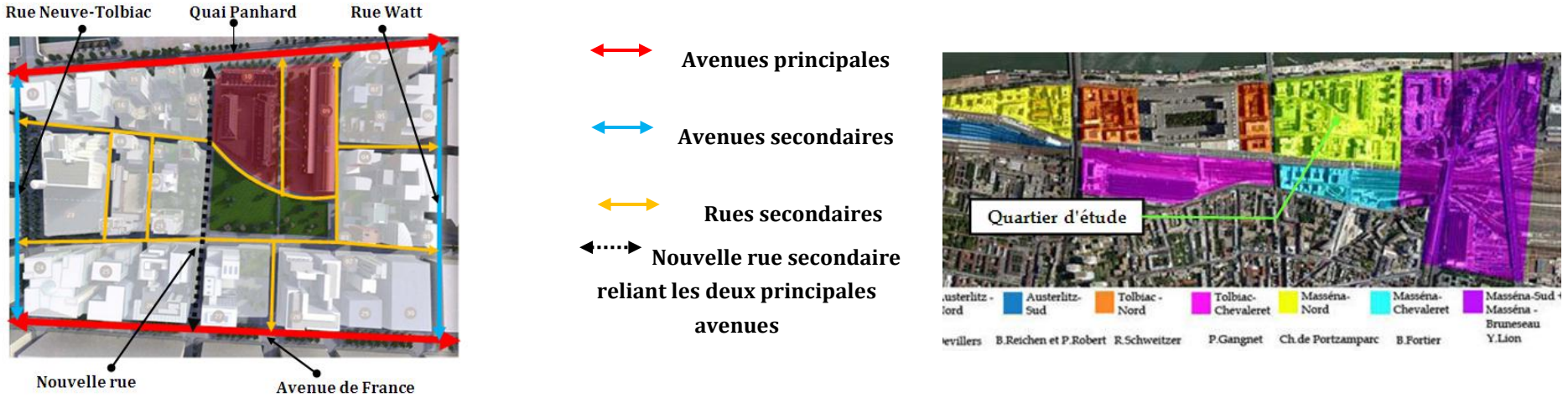


Chef de projet : **SEMAPA (Société d'économie mixte d'aménagement de Paris)**

Fonction : **785 logements ; locaux universitaires, bureaux, activités et commerces. SHON : 235, 000 m². Espace public : 77, 515 m². Espace vert : 12, 000 m²**



	Analyse
Contexte urbain	• Le nouvelle ZAC (Zone d'Aménagement Concerté) Paris Rive gauche est aménagée sur une ancienne friche ferroviaire et industrielle. Elle est située à 4 Km du centre-ville de Paris. Le périmètre urbain du quartier s'étend de la Gare d'Austerlitz au boulevard Masséna, longeant la Seine d'un côté et bordant la rue du Chevaleret de l'autre (**Annexe II. Figure. 2 à droite**). Il est divisé en trois quartiers : Austerlitz, Tolbiac et Masséna. Ce dernier, qui fait l'objet d'analyse, est délimité par la Seine au Nord-Est et l'avenue de France au Sud-Ouest (au-dessus des voies ferrées), le boulevard Masséna au Sud-Est et la rue Neuve-Tolbiac au Nord-Ouest (**Annexe II. Figure. 2 à gauche**).
Voies et tracé	• Le tracé des différentes voies composant le tissu du quartier Masséna est majoritairement régulier. Deux principaux axes Sud-Est et Nord-Ouest (Quai Panhard et l'avenue de France) structurent le quartier et jouent un rôle de liaison inter-quartiers. Les voies secondaires aménagées à l'intérieur du tissu sont réservées essentiellement aux riverains et jouent un rôle de desserte entre les différents îlots du quartier. Ce réseau secondaire a été complété par une nouvelle voie permettant de relier la circulation entre le quai Panhard et l'avenue de France.

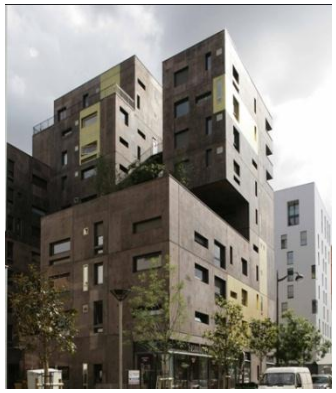


Annexe II. Figure. 2 A gauche: Plan de déplacement du quartier Masséna. **A Droite :** Plan de situation du quartier Masséna.

Profil de l'îlot	• Le quartier Masséna est composé de treize îlots. Pour diversifier l'architecture du quartier, chaque îlot est différent des autres par ces matériaux de revêtement (cuivre, verre, enduit vénitien, zinc et aluminium) d'un côté et par la forme de ses bâtiments de l'autre (**Annexe II. Figure. 3 (a)** et **(b)**). Cependant, ces îlots présentent tous une des formes ouvertes caractérisées par des cœurs d'îlots pénétrant aménagés en jardins verts, des bâtiments avec des hauteurs variées et un respect de l'alignement aux rues (**Annexe II. Figure. 3 (c)**). • Cette porosité des îlots est une composante majeure du quartier. Selon **Christian de Portzamparc** (2004), elle permet des cheminements hors des voies traditionnelles, offre des vues traversantes et plus lointaines et des jardins continus entre dans les différents cœurs d'îlots.



(a)



(b)



(c)

Annexe II. Figure. 3(a) et (b) Diversité de matériaux et de couleurs qui constituent une sorte de paysage coloré **(c)** L'aménagement du quartier Masséna en forme de plusieurs îlots ouverts.

Espace public / espace privé	• Le quartier Masséna est organisé autour d'un espace central, aménagé en place verte (**Annexe II. Figure. 4**). Cette place constitue un point d'articulation du projet est un vide qui contraste avec la forte densité du plein qui l'entoure. Au niveau des îlots, la discontinuité du bâti multiplie les espaces libres dans l'îlot, les vides sont essentiellement constitués par des jardins publics et privés. Les limites espaces publics/espaces privés sont clairement établies par des clôtures végétales. Leur diversité permet une multiplicité d'ambiances. • Notons aussi que dans le quartier Masséna, la surface des espaces vides reste dominée par le plein des bâtiments. En effet, le quartier est caractérisé par une forte densité d'occupation du sol (0,7) et des bâtiments élevés verticalement. Ce constat est dû probablement à la forte valeur du foncier.



Annexe II. Figure. 4 Plusieurs vues sur la place centrale du quartier.






Quartier Lyon confluence (Phase 2), Lyon, France

Dénomination de l'opération

Quartier Lyon confluence. Lyon. France

Palmarès dans la catégorie Densité et Formes Urbaines en 2009

Architecte et urbaniste :

Herzog & De Meuron



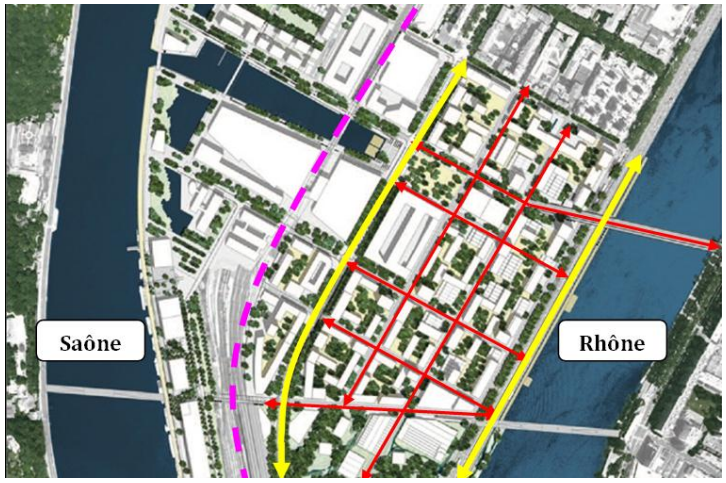
Chef de projet : **SPLA Lyon Confluence**

Fonction :

En cours d'élaboration



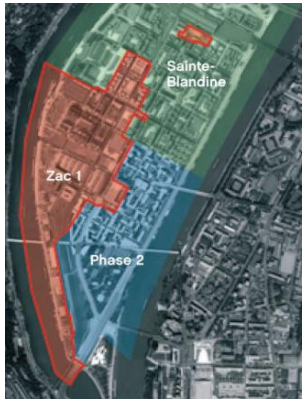
	Analyse
Contexte urbain	• La phase 2 du projet Lyon Confluence est aménagée sur une ancienne friche industrielle située à 3 km du centre-ville de Lyon. Le nouveau quartier se développe sur une surface de 150 ha. Il s'étend de la Confluence du Rhône et de la Saône au Sud jusqu'au quartier Sainte Blandine au Nord et de l'autoroute du soleil à l'Est et jusqu'à la phase 1 du projet aménagé à l'Ouest comme le montre l'**Annexe II. Figure. 5 à droite**.
Voies et tracé	• Le tracé des voies du nouveau quartier est basé sur la structure de l'ancienne trame urbaine présentant une forme régulière, linière et répétitive (**Annexe II. Figure. 5 à gauche**). L'organisation urbaine repose sur une séparation entre les circulations automobiles et piétonnes. La circulation automobile est supprimée à l'intérieur des îlots. Seuls les abords des îlots sont circulables et les parkings sont aménagés dans les sous-sols des îlots. L'intérieur des îlots essentiellement piéton s'organise autour des jardins vert intérieurs.

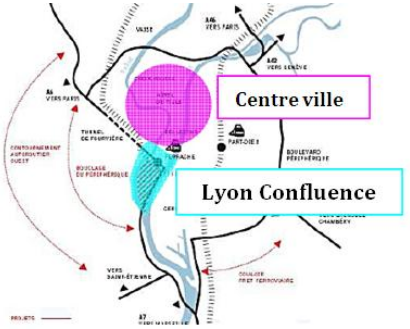


Principales avenues

Rues secondaires

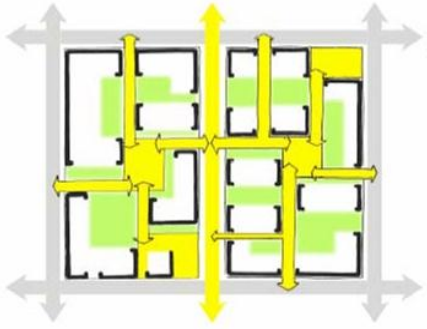
Ligne de chemin de fer (Lyon/Saint Etienne)

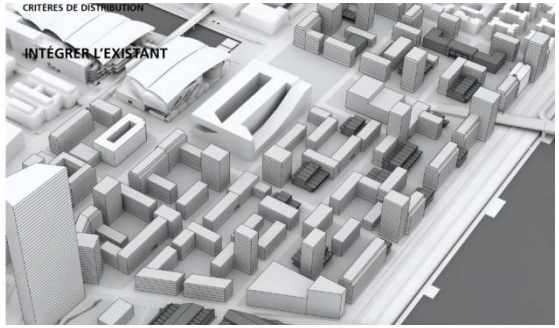


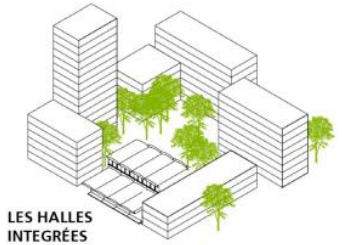


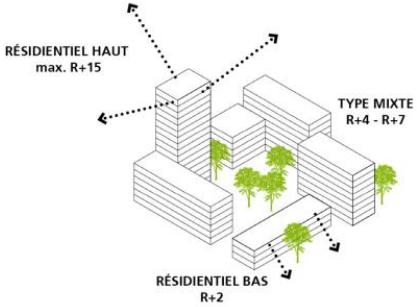
Annexe II. Figure. 5 A gauche: Plan de déplacement de la phase 2 du projet Lyon Confluence. **A Droite :** Plan de situation du quartier par rapport à son voisinage et par rapport au centre-ville.

Profil de l'îlot	• Le quartier est caractérisé par une typologie variée de bâtiments multifonctionnels : certaines des halles du marché sont conservées, contribuant ainsi, avec leur caractère industriel, à l'identité du nouveau quartier et à l'installation d'équipements et d'activités culturelles et résidentielles. Par ailleurs, des nouveaux bâtiments présentant des hauteurs variées ont été proposés par les aménageurs. Des bâtiments bas correspondent à l'échelle des halles existantes, des constructions de hauteurs intermédiaires s'inscrivent dans la continuité de la ville historique, enfin, des immeubles plus hauts offrent des vues panoramiques et libèrent des espaces ouverts au sol (**Annexe II. Figure. 6 (c)**). • L'organisation des îlots respecte l'alignement des grands boulevards (le Quai Perrache et le boulevard Charlemagne) mais garde une certaines ouvertures sur les cœurs d'îlots (**Annexe II. Figure. 6 (a)** et **(b)**). Notons que la discontinuité et le chevauchement des volumes constituent les deux principes qui caractérisent l'aménagement du quartier. Cette idée d'aménagement crée une richesse volumétrique et permet de produire plusieurs cœurs d'îlots. • Contrairement au plan ouvert de Christian de Portzamparc où la hauteur des bâtiments est plus au moins homogène, Herzog et De Moreau préfèrent le jeu des volumes suivant leurs fonctions créant ainsi une richesse visuelle.









(a) **(b)** **(c)**

Annexe II. Figure. 6 (a) et (b) Respect de l'alignement sur les grands boulevards et les rues secondaires et l'organisation libres aux cœurs des îlots. **(c)** intégration des halls du marché et les typologies variées des bâtiments.





Quartier du théâtre de Narbonne, Montpellier, France

Dénomination de l'opération

Quartier du théâtre de Narbonne. Montpellier. France

Programme CONCERTO RENAISSANCE

Architecte et urbaniste :

urbanistes A.D. et Jean Pierre Gary

Chef de projet :

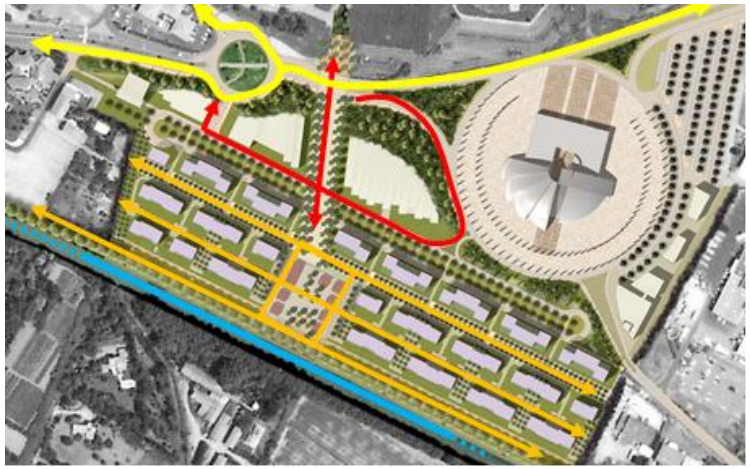
Ville de Narbonne

Fonction :

Bâtiments résidentiels (1,000 à 1,800 logements), commerces et bureaux, campus universitaire, équipements publics et sportifs.



	Analyse
Contexte urbain	• Le nouveau quartier du Théâtre de Narbonne est aménagé à la périphérie de la ville (**Annexe II. Figure. 7 à droite**), sur une ancienne friche industrielle (station d'épuration des eaux usées). Il est situé à 6 km du centre de la ville de Narbonne. Le quartier est délimité au Nord par le nouveau complexe sportif et le boulevard périphérique et au Sud, par le canal de la Robine.
Voies et tracé	• Le tracé des voies de circulation est orthogonal pour les voies piétonnes, autour des bâtiments et sinueux pour les voies de circulation mécanique secondaires (**Annexe II. Figure. 7 à gauche**). La placette centrale et les allées qui conduisent au stade constituent la colonne vertébrale du quartier. Il marque le quartier par son emprise et constitue la base du plan de composition. Le quadrillage détermine le reste de la composition. Par ailleurs, plus on s'approche du canal de la Robine, plus les déplacements doux prennent de l'importance

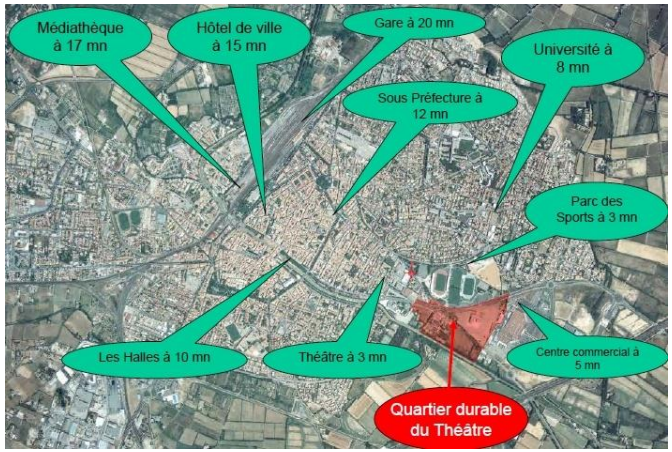


Boulevard périphérique

Voies de mécanique secondaire

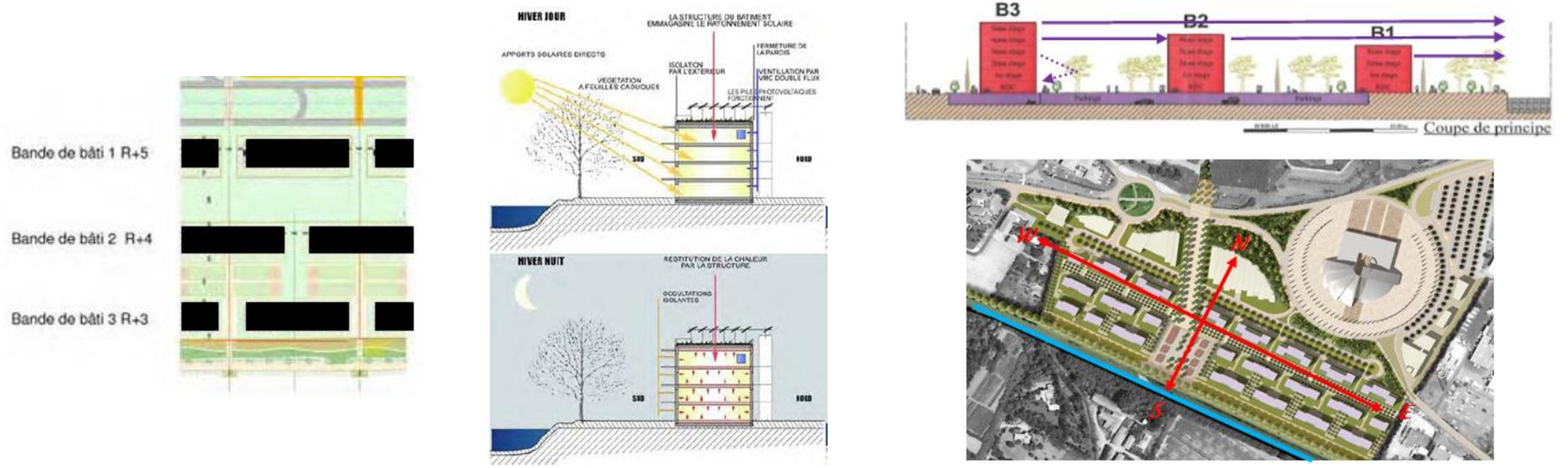
Rues piétonnes à l'intérieur du quartier

Canal de la Robine



Annexe II. Figure. 7 A gauche: Plan de déplacement du quartier du Théâtre de Narbonne. **A Droite :** Plan de situation du quartier par rapport aux principaux points de repère de la ville de Narbonne.

Profil de l'îlot	• Le quartier s'organise en plusieurs ***îlots verticaux*** avec des bâtiments de formes rectangulaires. Ces derniers sont organisés horizontalement en trois rangées parallèles au canal de la Robine (**Annexe II. Figure. 8 (c) en bas**). L'aménagement du quartier a été influencé par les vues panoramiques offertes par le Parc Naturel Régional de la Narbonnaise. Verticalement, les bâtiments s'organisent en gradins de trois rangées. Cette disposition a pour objectif de créer des vues lointaines sur le parc pour les résidents et optimiser le captage des rayons solaires en hiver (**Annexe II. Figure. 8 (a), (b)** et **(c) en bas**).



(a) **(b)** **(c)**

Annexe II. Figure. 8(a) et (b) et (c) en haut : Organisation verticale des bâtiments en gradins ouverts sur les vues panoramiques du parc naturelle et sur le soleil. **(c) en bas :** Organisation horizontale des bâtiments en trois rangées parallèles au canal de la Robine.

Espace public / espace privé	• Les espaces publics du quartier sont composés de la place centrale et du boulevard piéton reliant le canal de la Robine aux quartiers voisins. Ces espaces ont été aménagées en square avec des aires de jeux, bancs, pergolas végétales (**Annexe II. Figure. 9 à droite**). Aux abords des bâtiments, des jardins potagers semi-publics sont séparés des passages piétons par des haies basses (**Annexe II. Figure. 9 à gauche**).





Annexe II. Figure. 9 A gauche : Aménagement des jardins potagers aux abords des bâtiments. **A droite :** Espaces publics et semi-publics du quartier du Théâtre de Narbonne.

Annexes III

1. Modélisation de la végétation

a) Modélisation aérodynamique

Les effets des arbres sur l'écoulement du vent sont intégrés par un terme puits dans l'équation de quantité de mouvement et par un terme source dans les deux équations de turbulence.

Modélisation du terme puits dans l'équation de quantité de mouvement :

Les effets des structures végétales sur les écoulements d'air se traduisent par une réduction de la vitesse du vent en apportant une résistance à l'écoulement d'air. Ce degré de réduction dépend de plusieurs paramètres : la hauteur, l'épaisseur et la porosité de l'arbre. Ainsi, le frein engendré par la végétation sur l'écoulement du vent peut être modélisé en ajoutant un terme puits (pertes de charge) dans le second membre de l'équation de quantité de mouvement. Les composantes de ce terme dépendent de la vitesse du vent dans chaque direction spatiale. Pour exprimer le terme puits, l'équation de (**Katul** *et al.,* 2004) a été utilisée :

$$\boldsymbol{S_{ui} = -\rho_{air} C_d LAD \|\vec{u}\| u_i} \qquad \textbf{(IV. 1)}$$

où, $\boldsymbol{\rho_{air}}$ est la masse volumique de l'air en kg m^{-3}.
Le terme puits fait intervenir les caractéristiques aérodynamiques (coefficient de traînée $\boldsymbol{C_d}$) et de structures (densité foliaire $\boldsymbol{LAD}$) des arbres. Pour un arbre, le coefficient de traînée aérodynamique $\boldsymbol{C_d}$ dépend de la forme, de la dimension et de l'inclinaison des feuilles. Plusieurs travaux de recherches préconisent l'utilisation d'une valeur $\boldsymbol{C_d}$ égale à 0,2 avec une incertitude de 0,1. Ce terme puits a été ajouté à la routine utilisateur "*ustsns*" du *Code_Saturne*.

Modélisation des termes sources dans les deux équations de la turbulence :

Dans un second temps, les effets des structures végétales sur l'écoulement de l'air se traduisent par une augmentation du taux de turbulence. Un terme source a été ajouté dans les équations du modèle de turbulence $k-\varepsilon$. Le terme source ajouté dans l'équation **IV.2** est proposé par **Katul** *et al.,* (2004) et est donné par la relation :

$$\boldsymbol{S_k = \rho_{air} C_d LAD(\beta_p \|\vec{u}\|^3 - \beta_d \|\vec{u}\| k)} \qquad \textbf{(IV. 2)}$$

où, $\boldsymbol{\beta_p}$ est le coefficient empirique de conversion d'énergie cinétique moyenne en énergie cinétique turbulente par l'effet de sillage. $\boldsymbol{\beta_d}$ est le coefficient empirique de dissipation d'énergie cinétique turbulente par déflection.
Par ailleurs, la végétation génère un nombre important de petits tourbillons qui se dissipent très rapidement dans le sillage de leur structure. Le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente est modifié par un terme source proposé par **Katul** *et al.,* (2004) s'exprimant par :

$$\boldsymbol{S_\varepsilon = C_{4\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} S_k} \qquad \textbf{(IV. 3)}$$

où $\boldsymbol{C_{4\varepsilon}}$ est la constante empirique de fermeture de la turbulence du modèle $k-\varepsilon$ spécifique à la végétation. Les valeurs de constantes empiriques citées précédemment sont données par (**Dalpé** *et* **Masson**, 2007) et présentées dans l'**Annexe III. Tableau. 1** ci-dessous :

$\boldsymbol{\beta_p}$	$\boldsymbol{\beta_d}$	$\boldsymbol{C_{4\varepsilon}}$
1,00	5,03	0,78

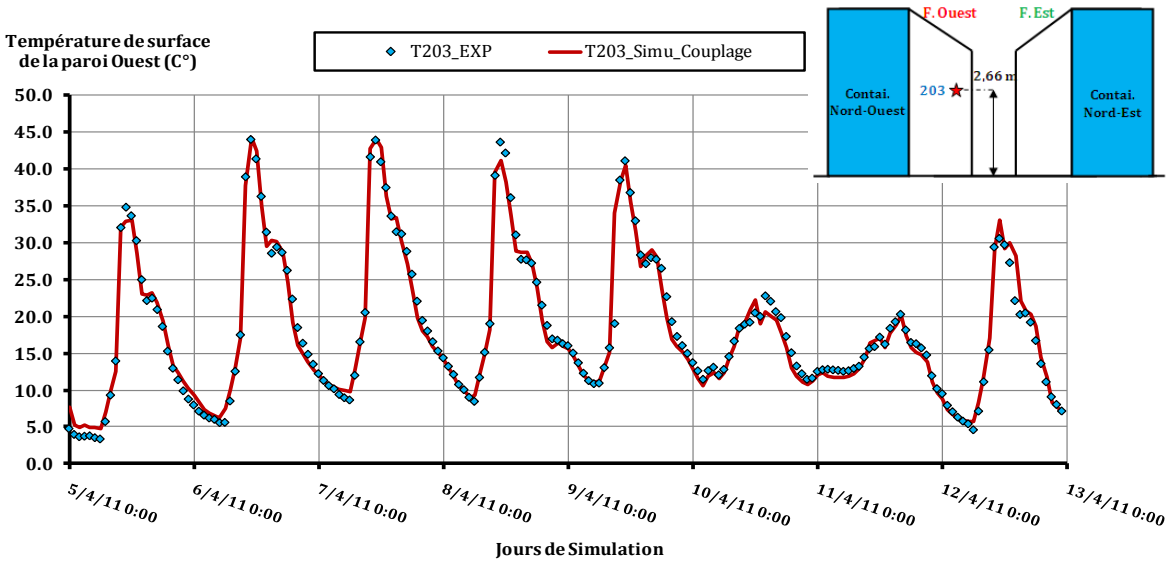
Annexe III. Tableau. 1 Valeurs des constantes empiriques utilisées pour la modélisation de la turbulence dans la végétation (**Dalpé** *et* **Masson**, 2007).

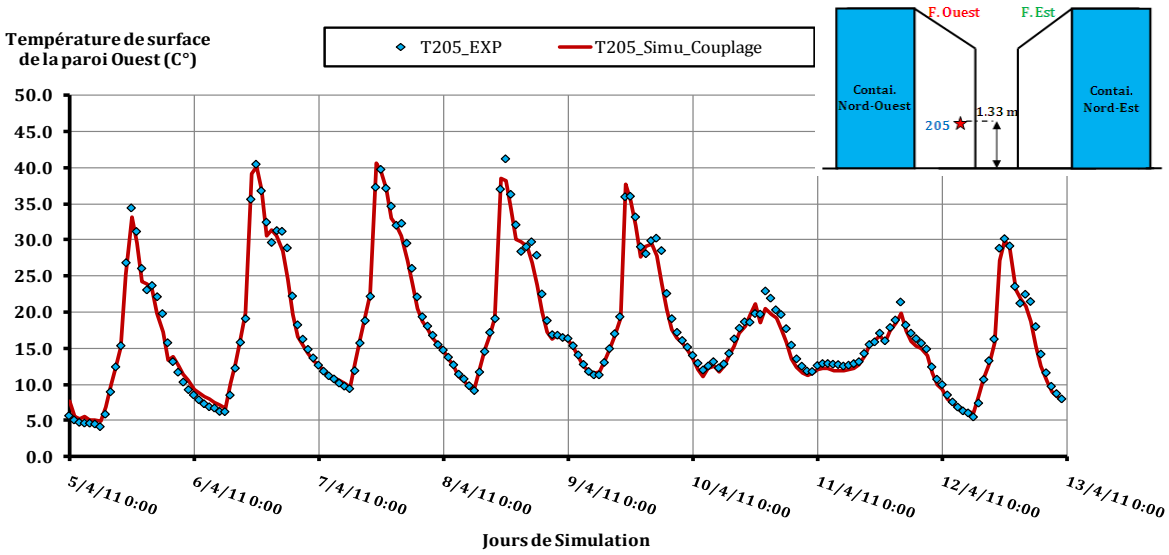
Ces deux termes sources ont été ajoutés aux deux équations de turbulence par l'intermédiaire de la routine utilisateur "*ustske*" du *Code_Saturne*.

Annexes IV

1. Comparaison calcul/mesure de températures de surface pour les parois intérieur de la rue

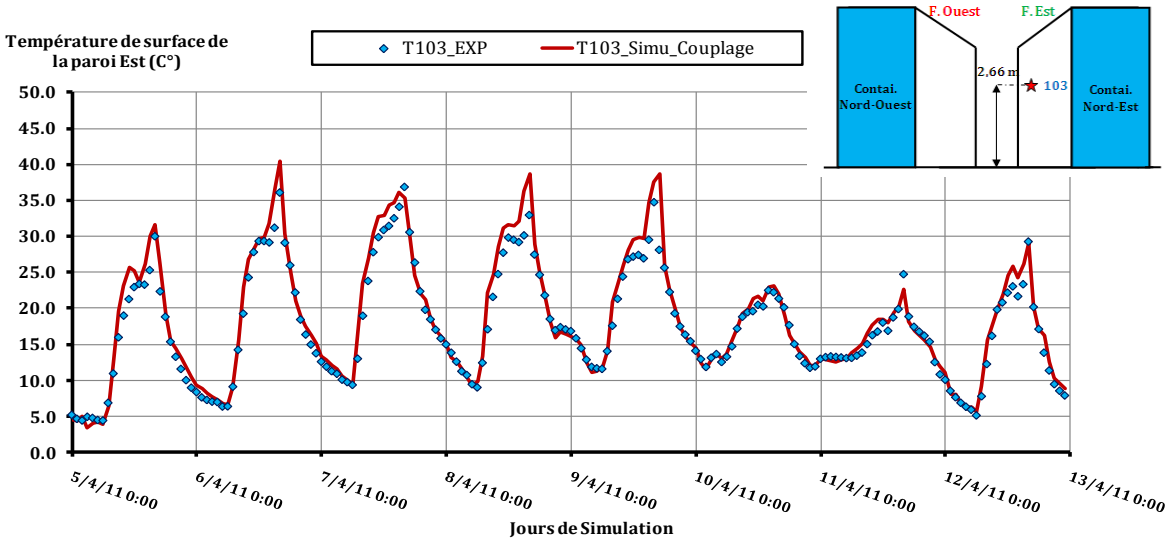
a) Façade Ouest

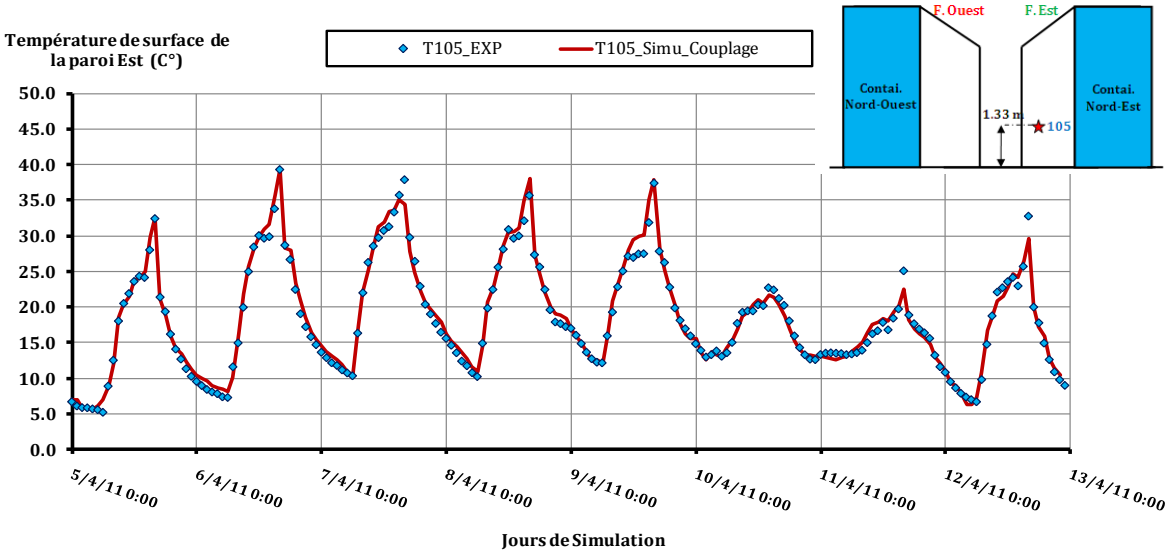




Annexe IV. Figure. 1 Evolution de la température de la paroi Ouest simulée et mesurée pour les capteurs 203 et 205.

b) Façade Est

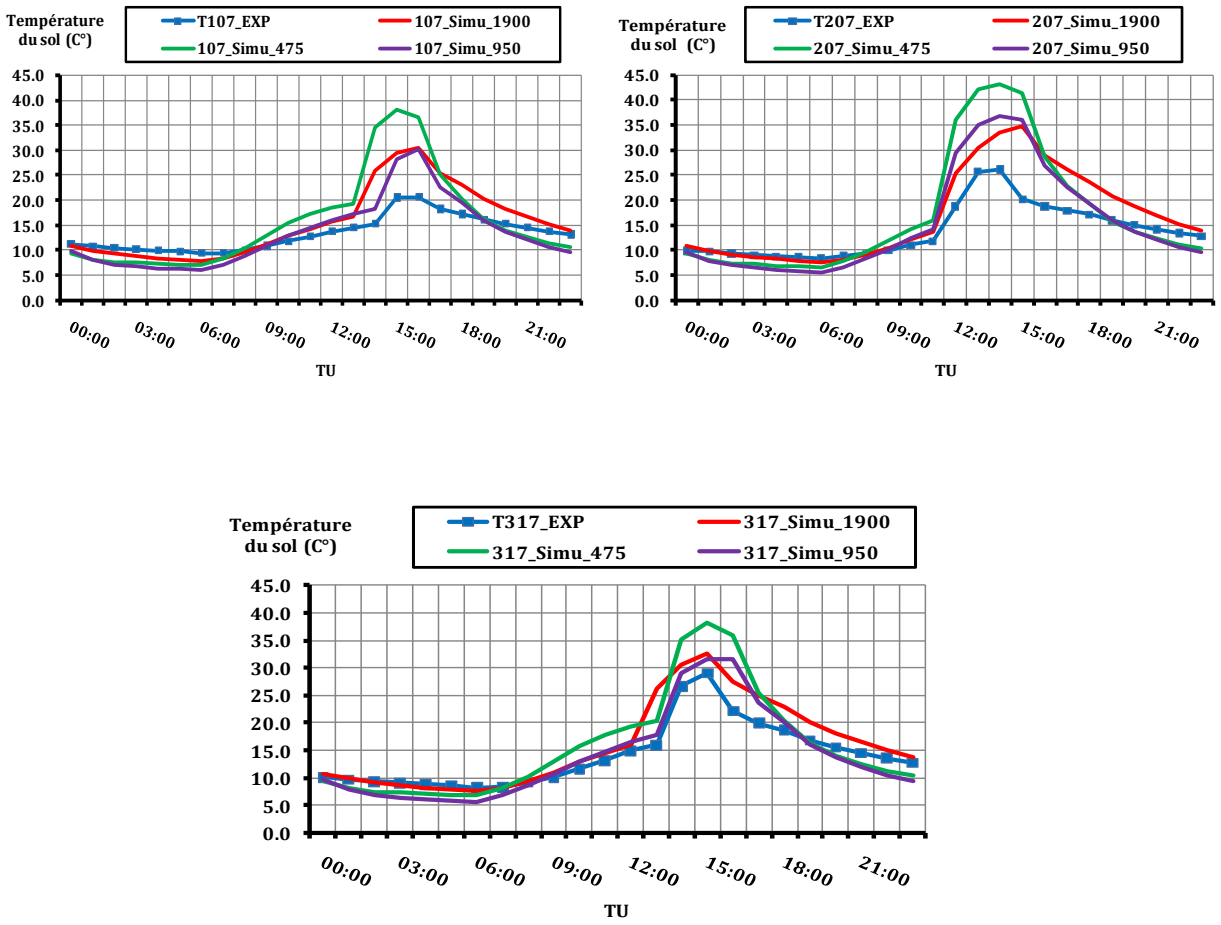




Annexe IV. Figure. 2 Evolution de la température de la paroi Est simulée et mesurée pour les capteurs 103 et 105.

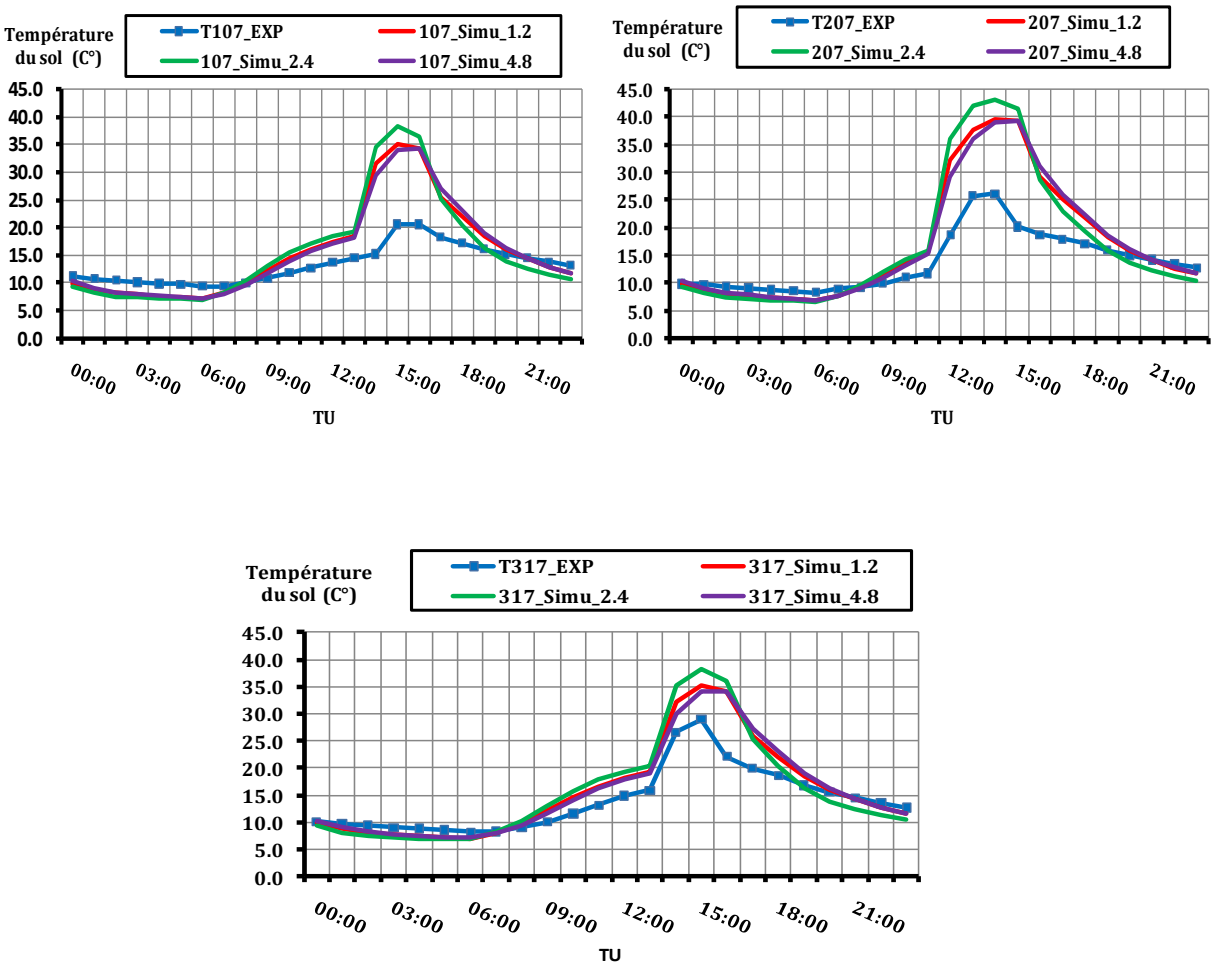
2. Analyse de sensibilité sur l'impact du changement des propriétés physiques des matériaux du sol sur la température de surface

- **Première simulation** : on conserve les valeurs initiales de la couche de terre ainsi que la conductivité de l'asphalte et on fait seulement varier sa capacité thermique en la multipliant et en la divisant par deux;



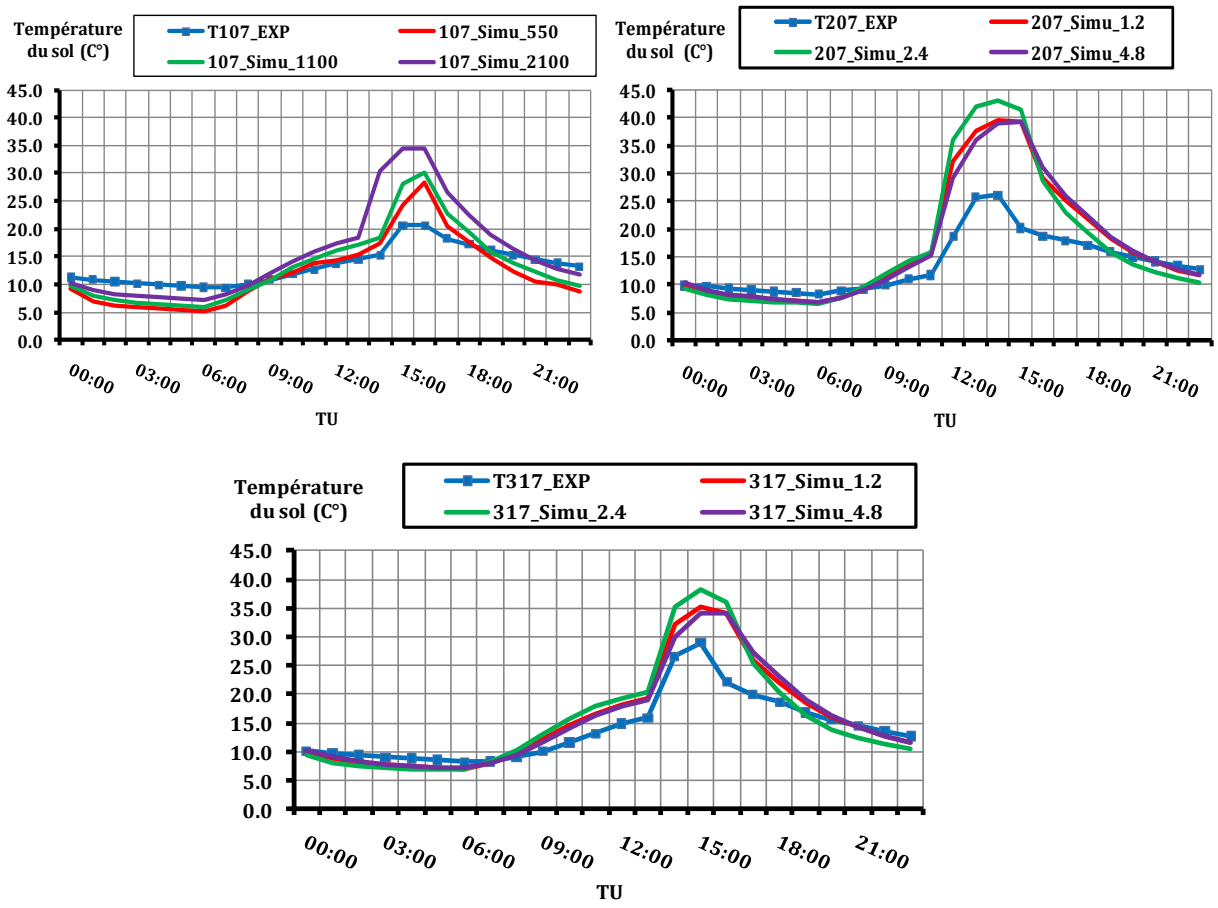
Annexe IV. Figure. 3 Impact du changement de la capacité thermique de l'asphalte sur la température de surface du sol.

- **Deuxième simulation** : on conserve les valeurs initiales de la couche de terre ainsi que la capacité de l'asphalte et on fait varier seulement sa conductivité thermique en la multipliant et en la divisant par deux;



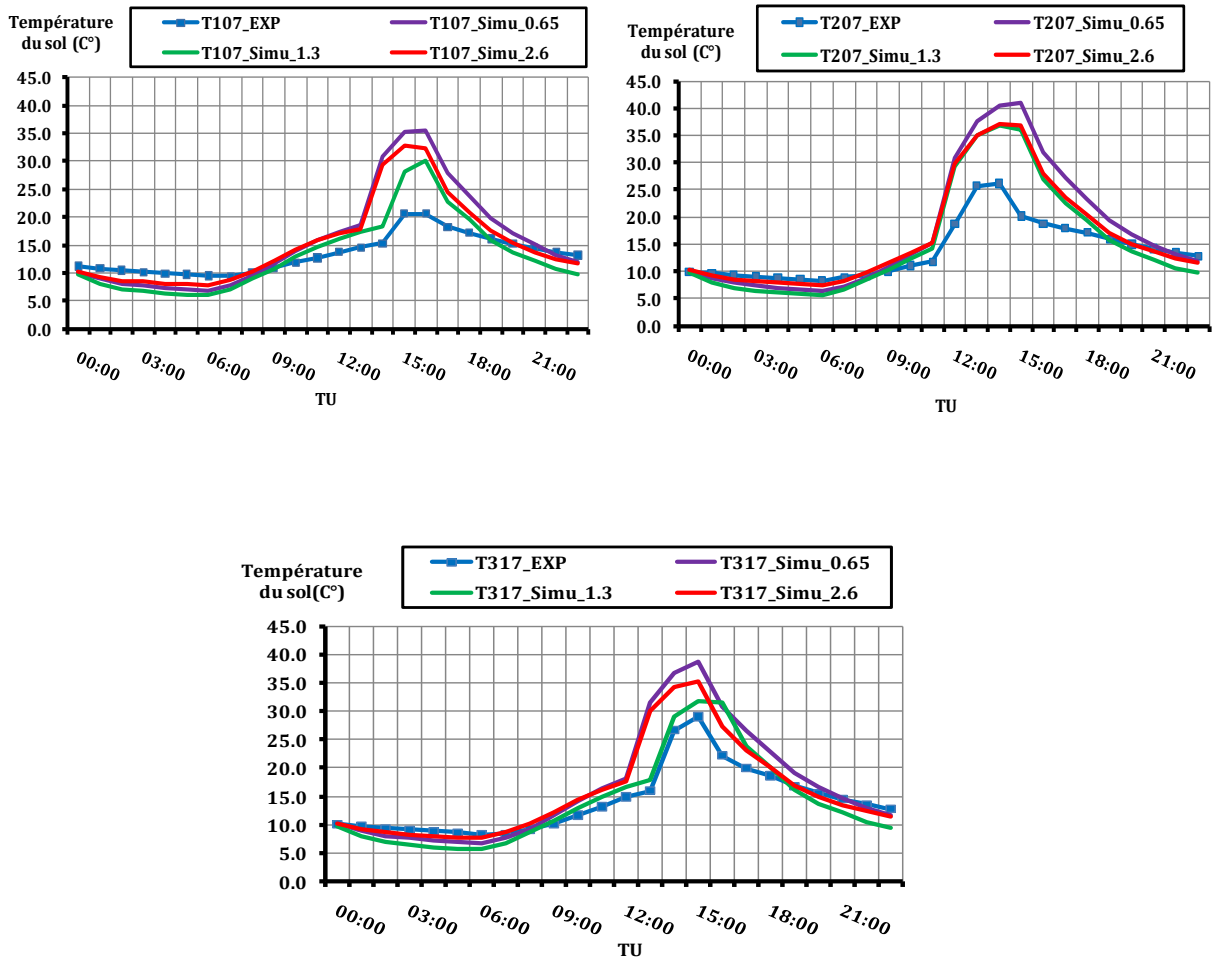
Annexe IV. Figure. 4 Impact du changement de la conductivité thermique de l'asphalte sur la température de surface du sol.

- **<u>Troisième simulation</u>** : on conserve les valeurs initiales de l'asphalte ainsi que la conductivité de la terre et on fait varier seulement sa capacité thermique en multipliant et en la divisant par deux;



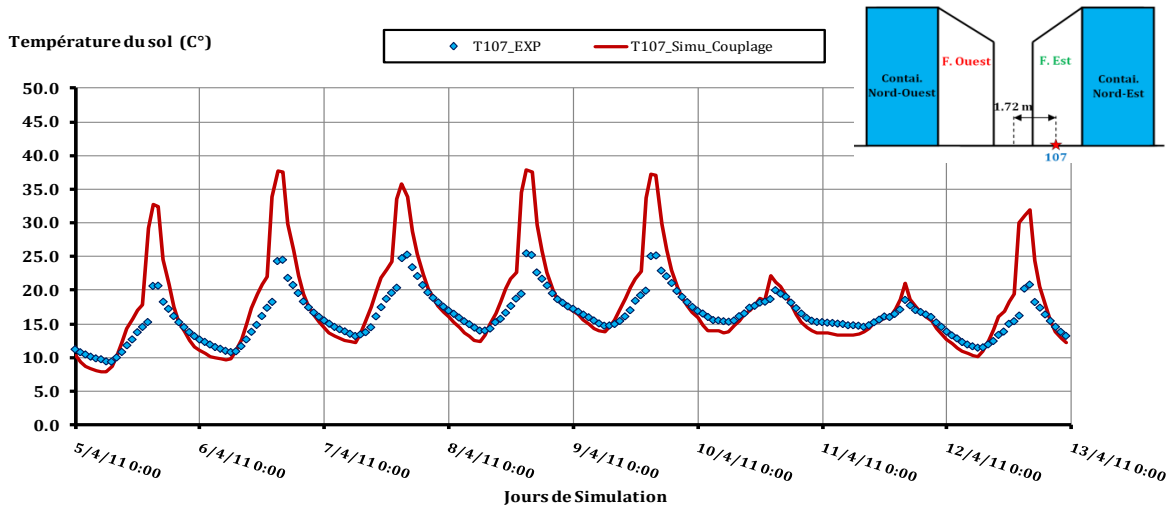
Annexe IV. Figure. 5 Impact du changement de la capacité thermique de la terre sur la température de surface du sol.

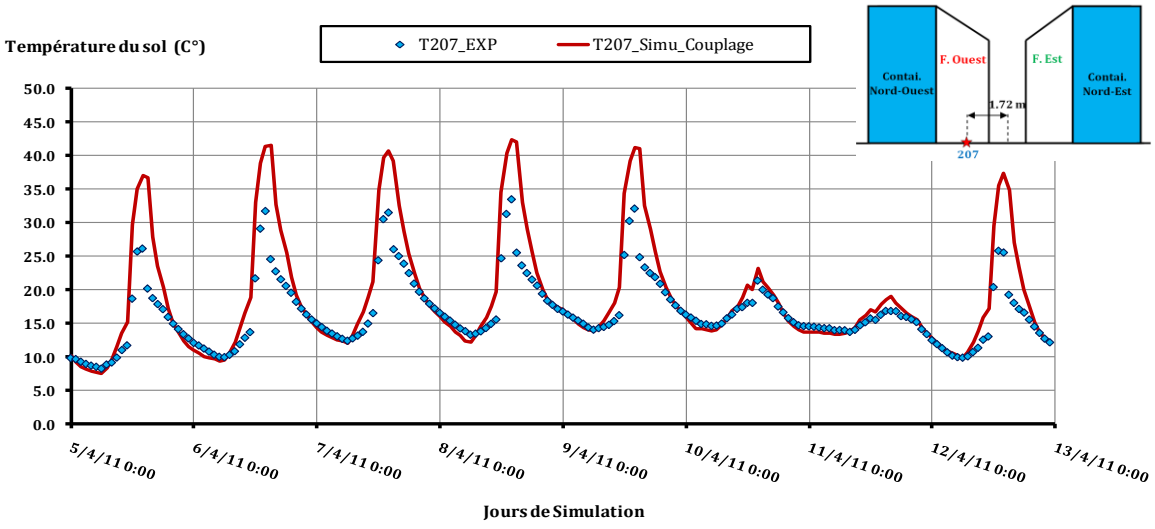
- **Quatrième simulation** : on conserve les valeurs initiales de l'asphalte ainsi que la capacité de la terre et on fait varier seulement sa conductivité thermique en la multipliant et en la divisant par deux.



Annexe IV. Figure. 6 Impact du changement de la conductivité thermique de la terre sur la température de surface du sol.

- **<u>cinquième simulation</u>** : simulation de l'évolution pour la semaine d'étude de la température de surface du sol avec une conductivité thermique de la terre égale à $\boldsymbol{\lambda = 2.6\ W/m^2.K}$;

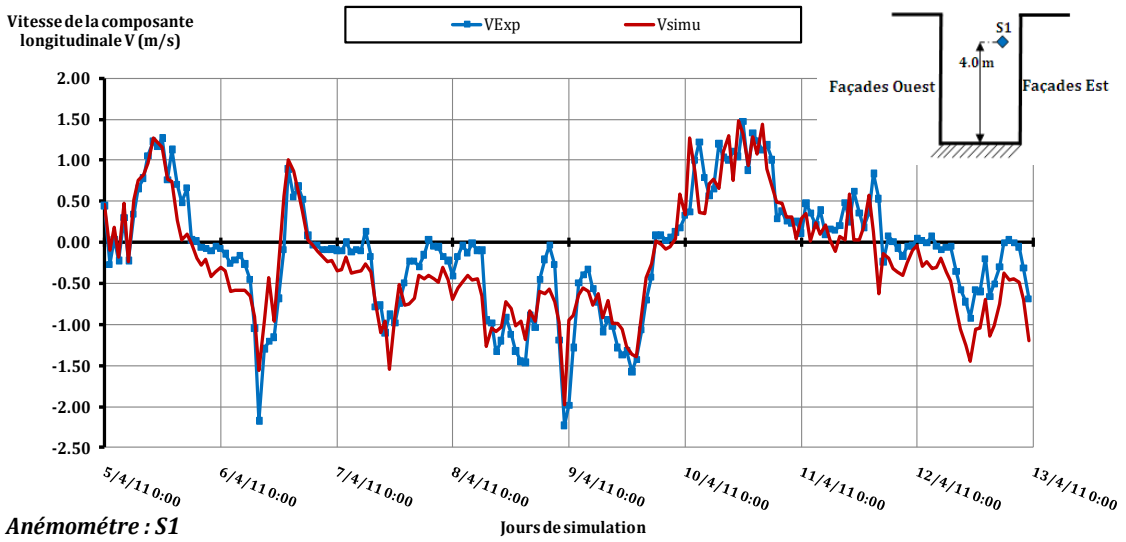




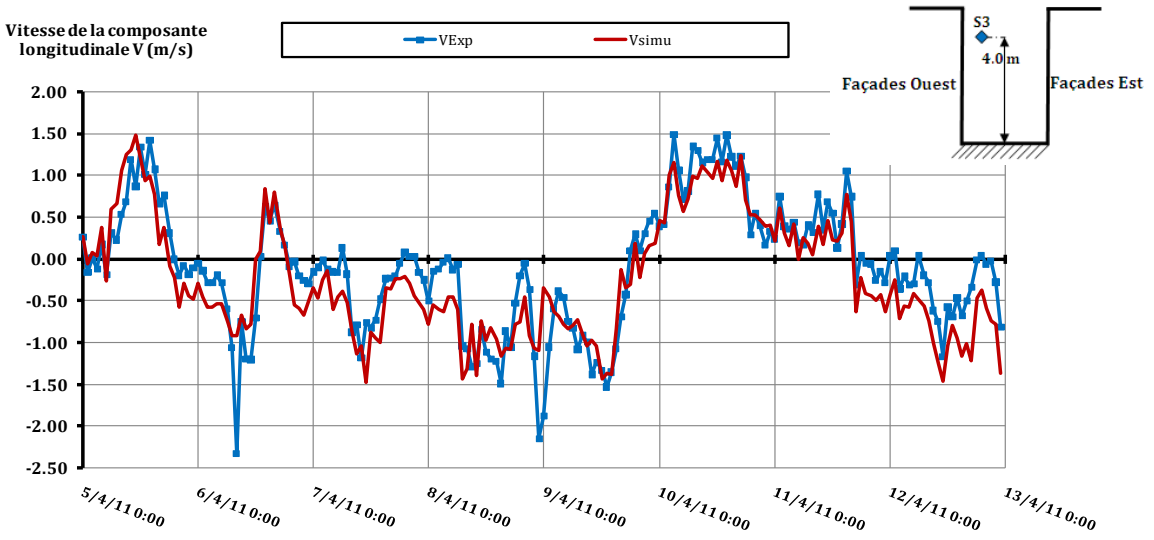
Annexe IV. Figure. 7 Evolution de la température de surface du sol simulée et mesurée pour les capteurs 107 et 207 calculé à partir avec une conductivité thermique de la terre égale à $\boldsymbol{\lambda = 2.6\ W/m^2.K}$.

3. Comparaison calcul/mesure de l'écoulement d'air à l'intérieur de la rue

a) Comparaison calcul/mesure pour la composante longitudinale V

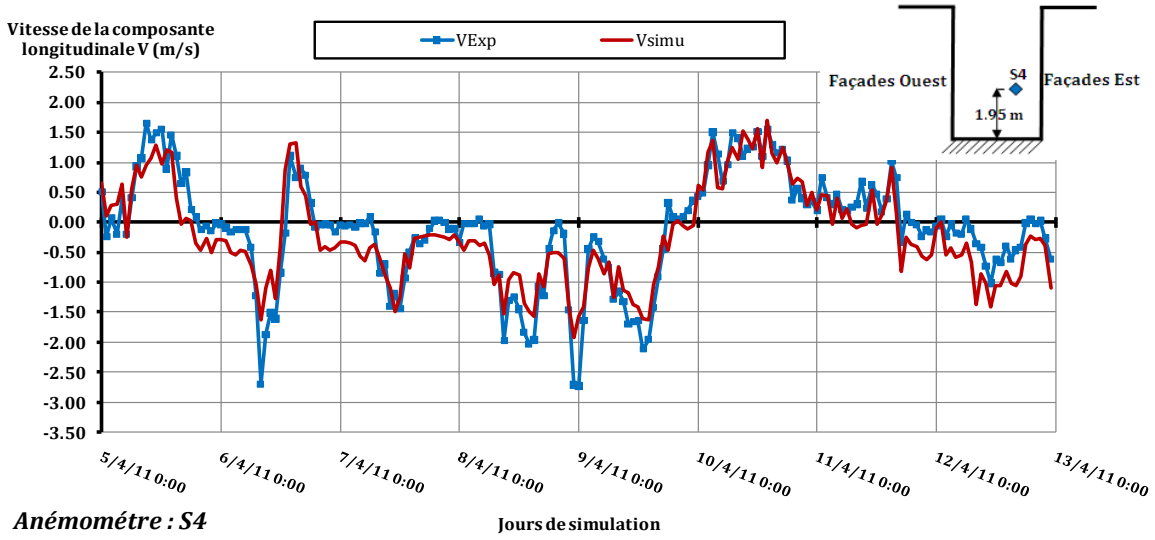


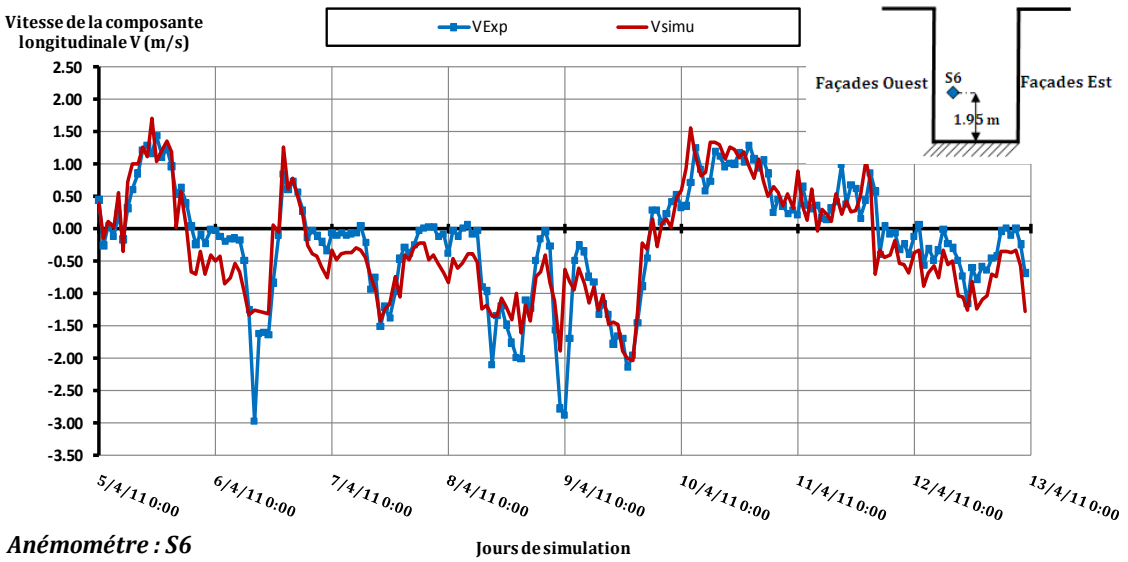
Anémomètre : S1



Anémomètre : S3

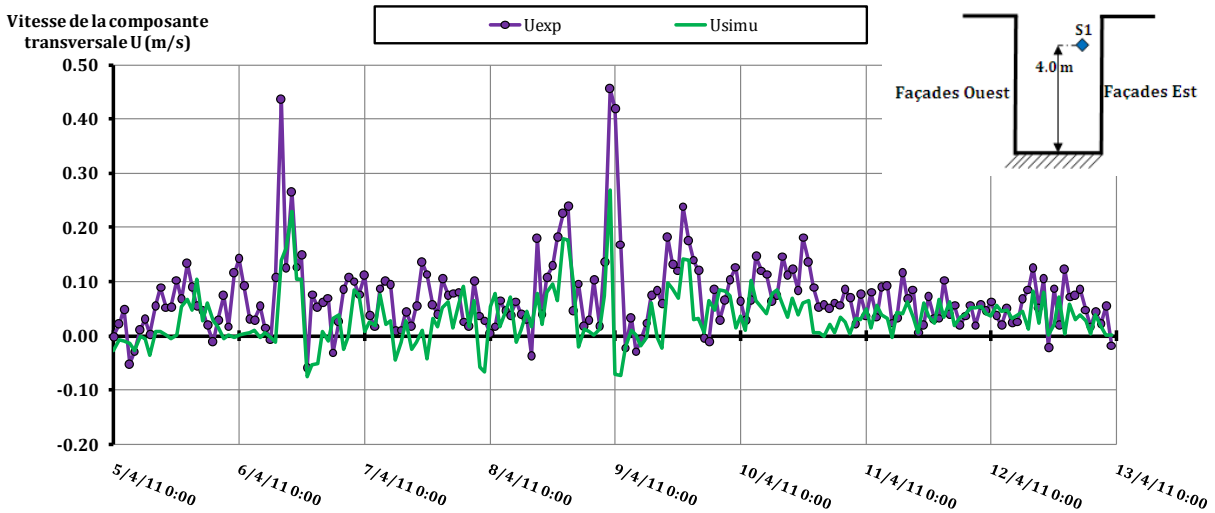
Annexe IV. Figure. 8 Evolution de la composante longitudinale V simulée et mesurée pour les anémomètres soniques S1 et S3.



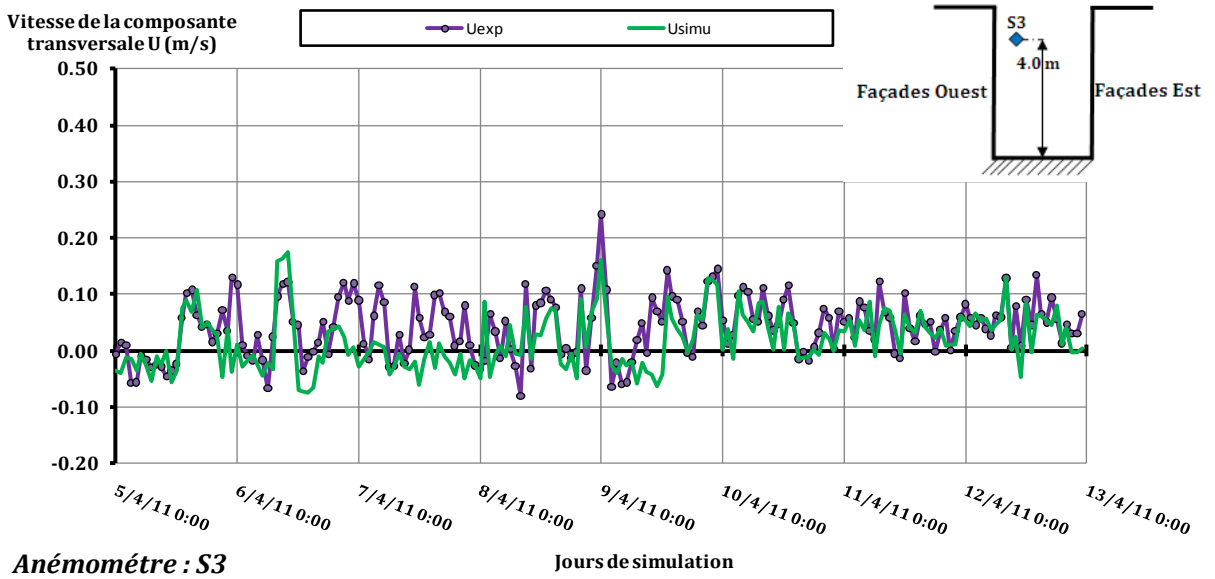


Annexe IV. Figure. 9 Evolution de la composante longitudinale V simulée et mesurée pour les anémomètres soniques S4 et S6.

b) Comparaison calcul/mesure pour la composante transversale U

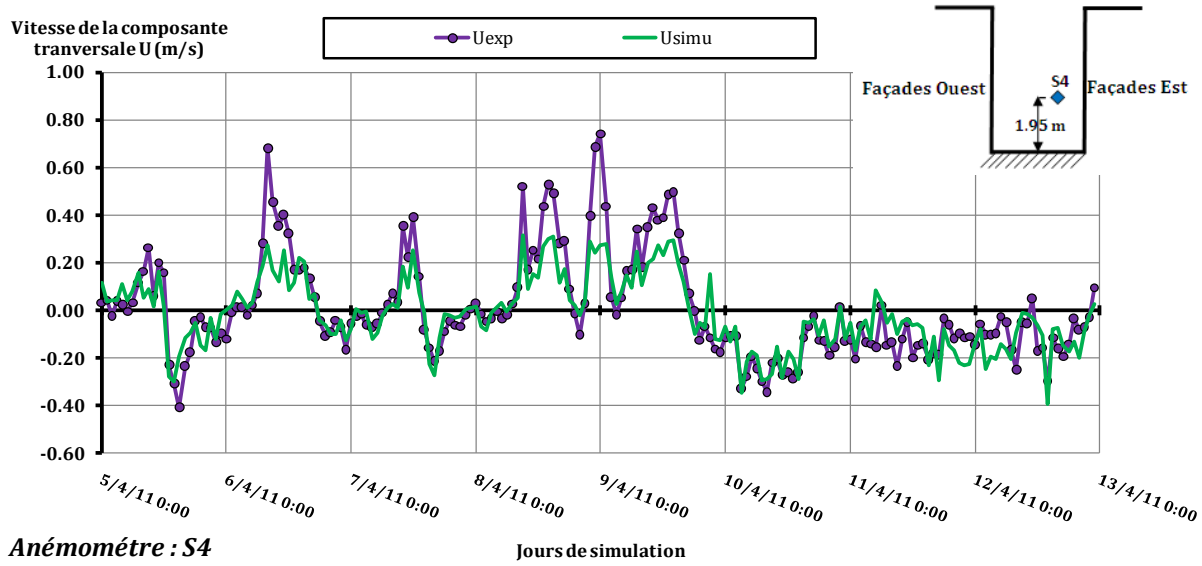


Anémométre : S1

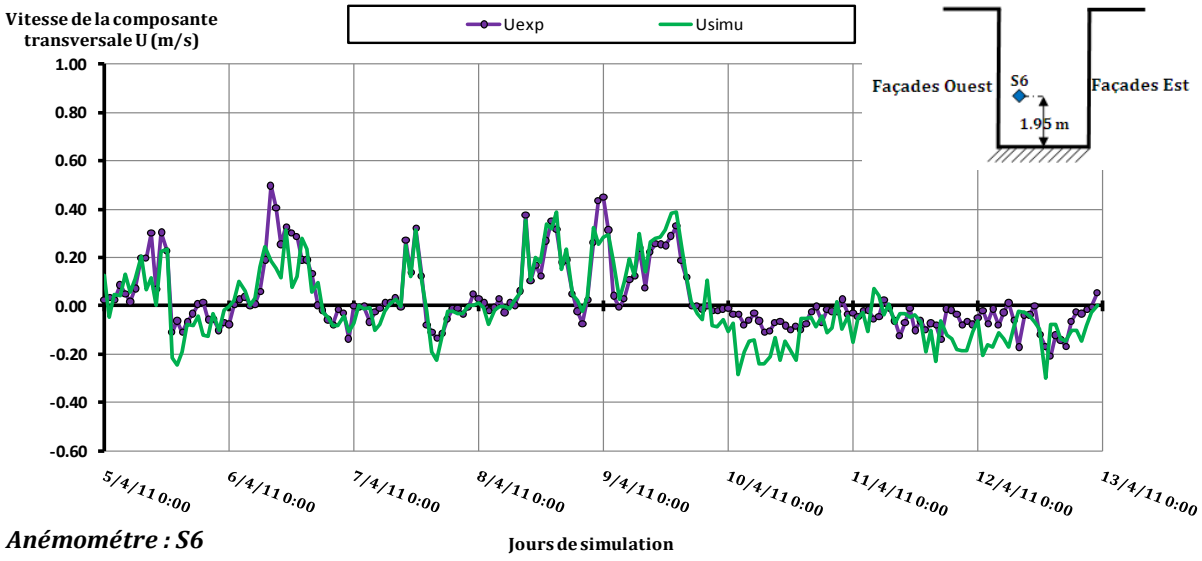


Anémométre : S3

Annexe IV. Figure. 10 Evolution de la composante transversale U simulée et mesurée pour les anémomètres soniques S1 et S3.



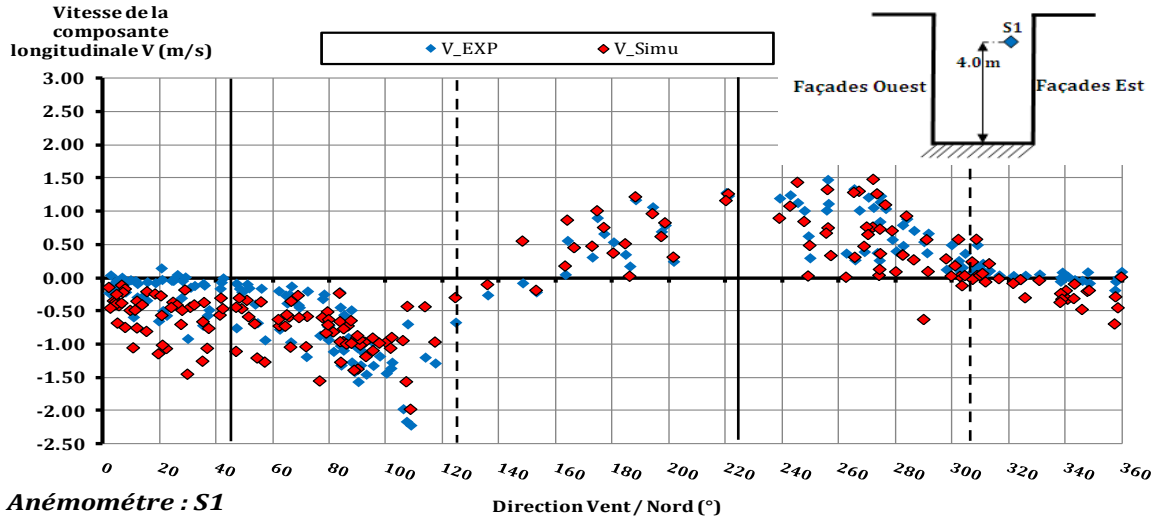
Anémométre : S4

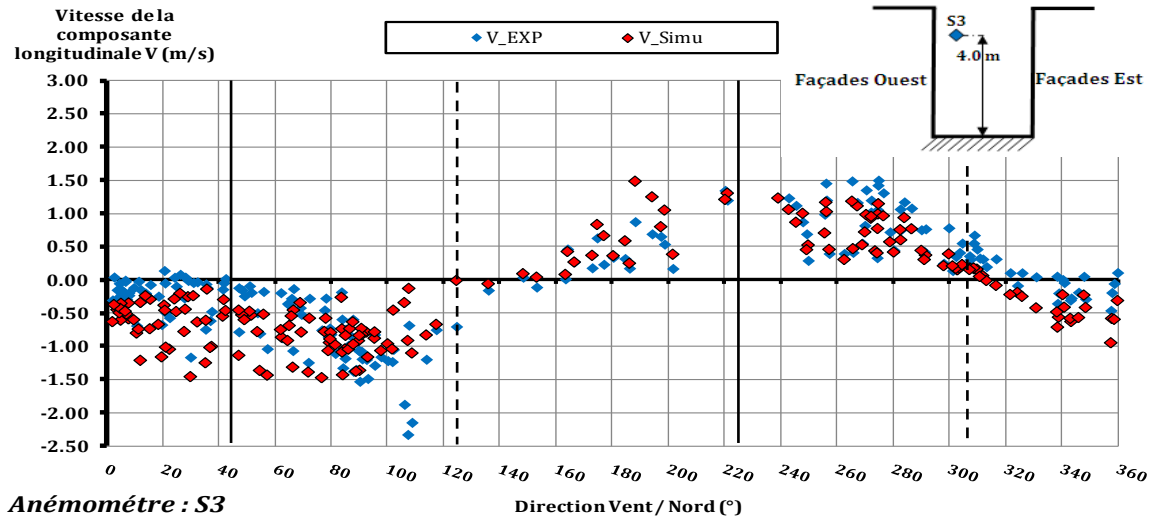


Anémométre : S6

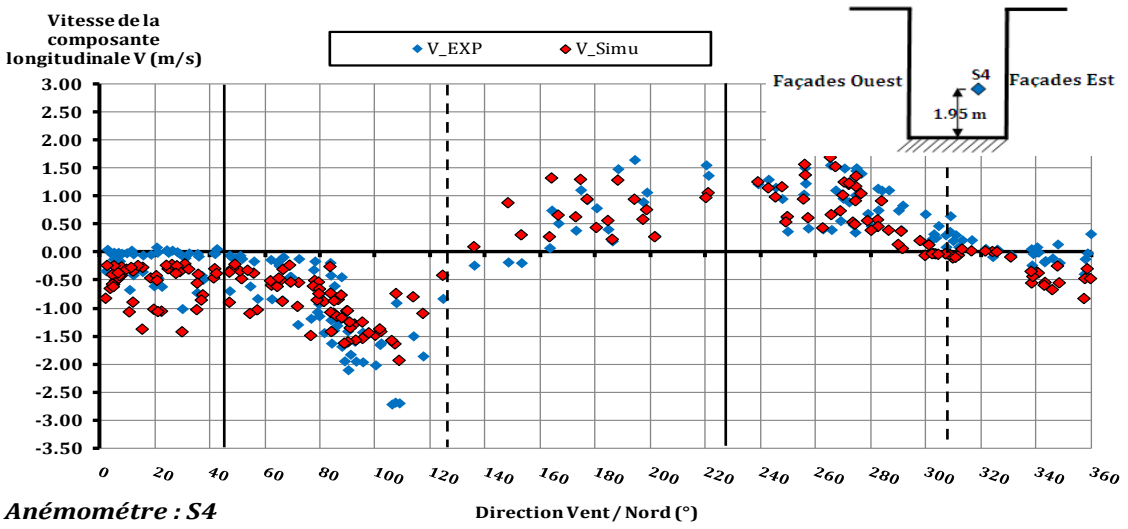
Annexe IV. Figure. 11 Evolution de la composante transversale U simulée et mesurée pour les anémomètres soniques S4 et S6.

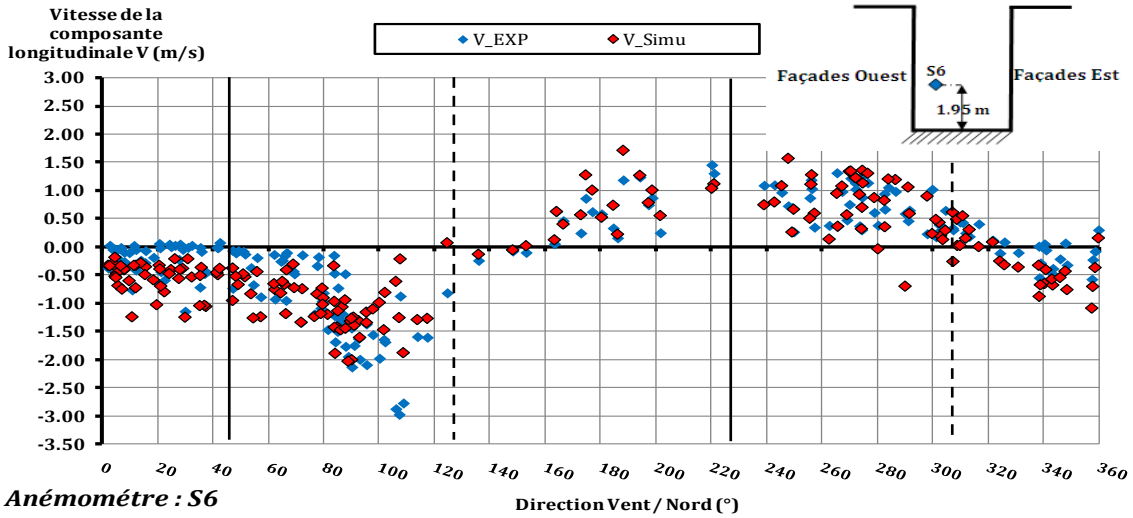
c) Comparaison calcul/mesure pour la composante longitudinale V en fonction de la direction du vent





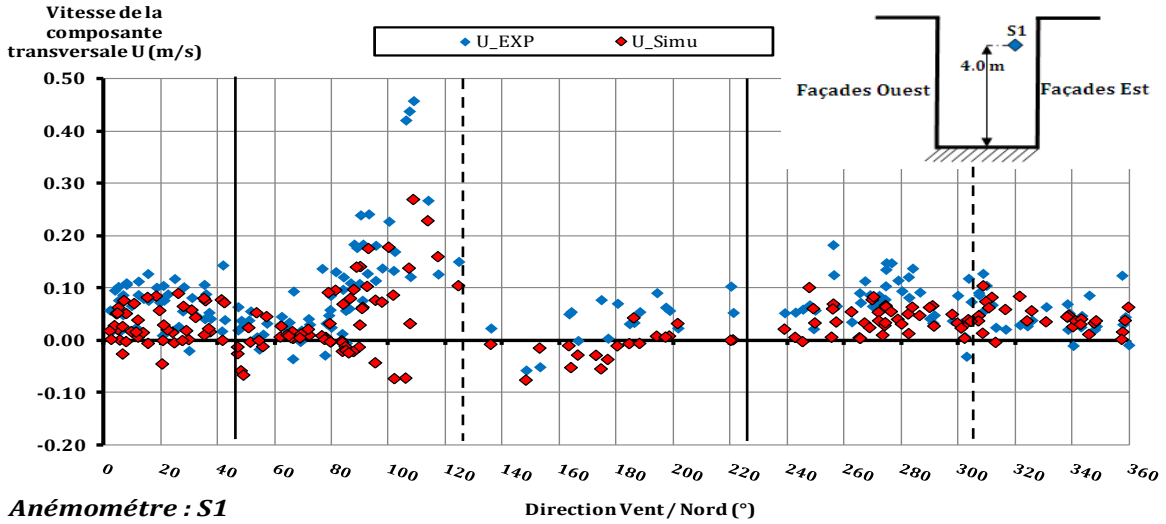
Annexe IV. Figure. 12 Vitesse longitudinale V expérimentale et numérique en fonction de la direction du vent pour les anémomètres soniques S1 et S3 (les lignes continues indiquent l'axe de la rue et les lignes discontinues indiquent la direction perpendiculaire à l'axe de la rue).

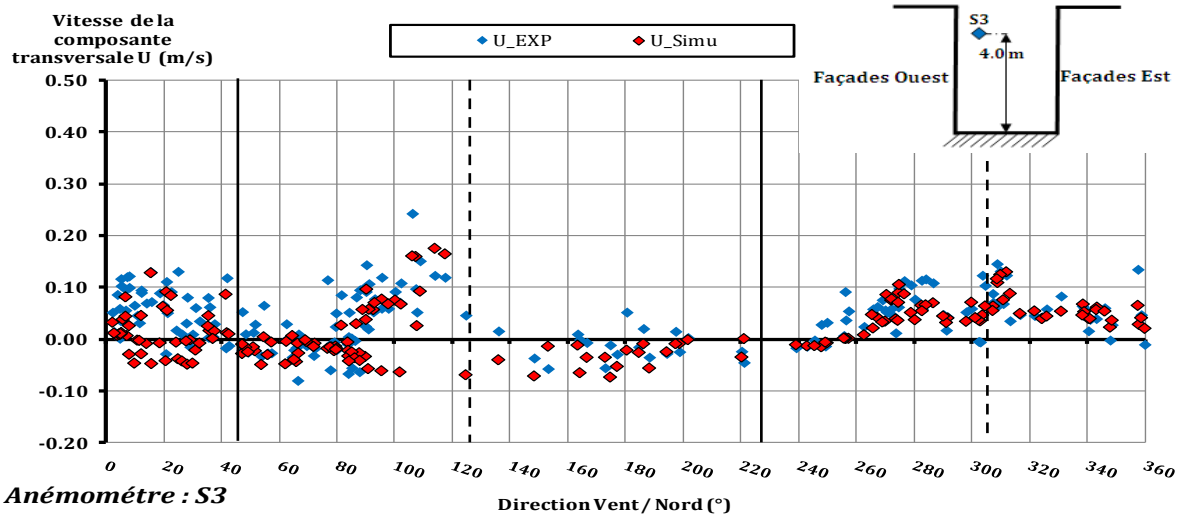




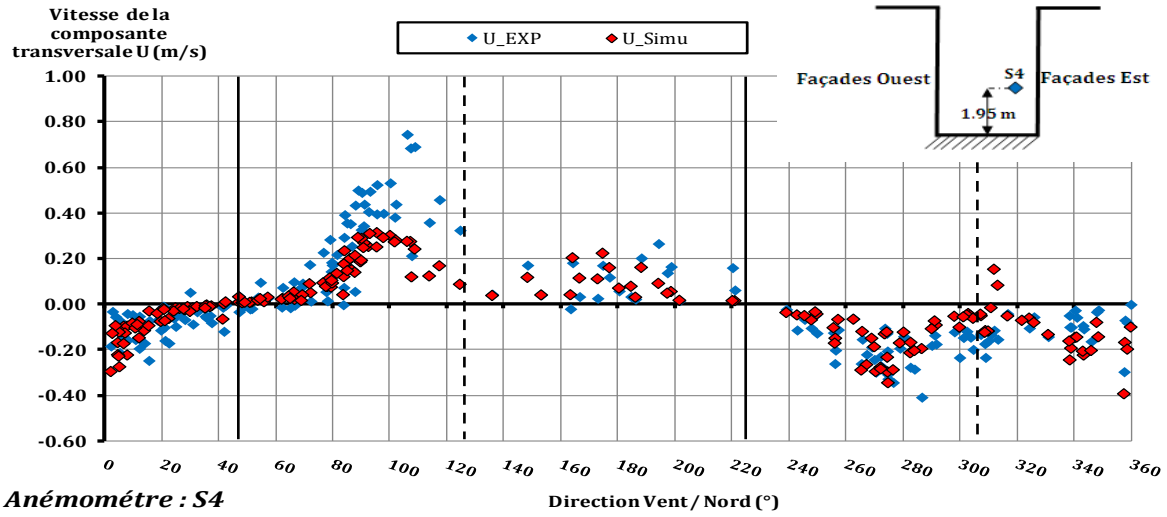
Annexe IV. Figure. 13 Vitesse longitudinale V expérimentale et numérique en fonction de la direction du vent pour les anémomètres soniques S4 et S6 (les lignes continues indiquent l'axe de la rue et les lignes discontinues indiquent la direction perpendiculaire à l'axe de la rue).

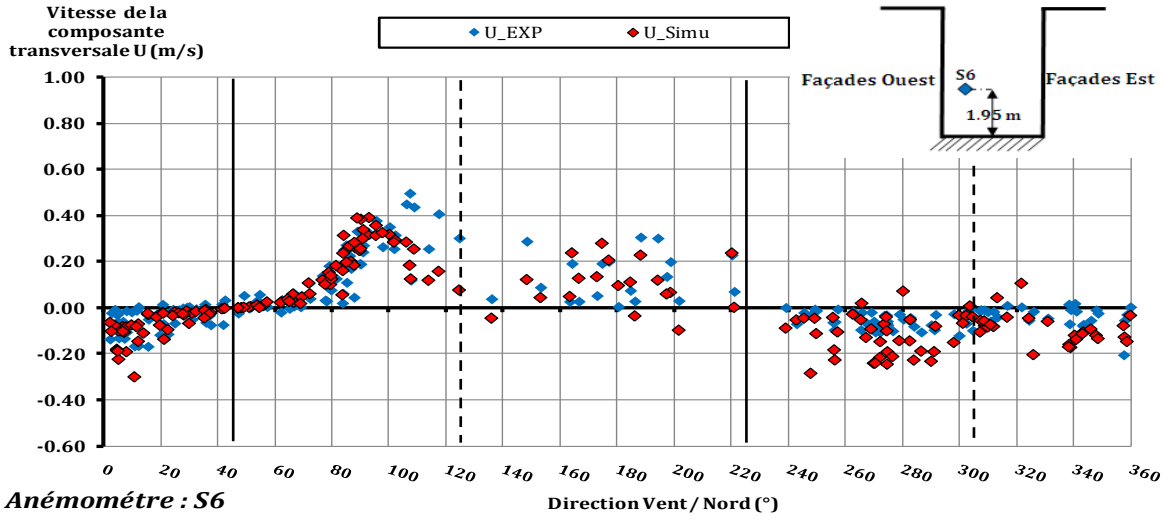
d) Comparaison calcul/mesure pour la composante transversale U en fonction de la direction du vent





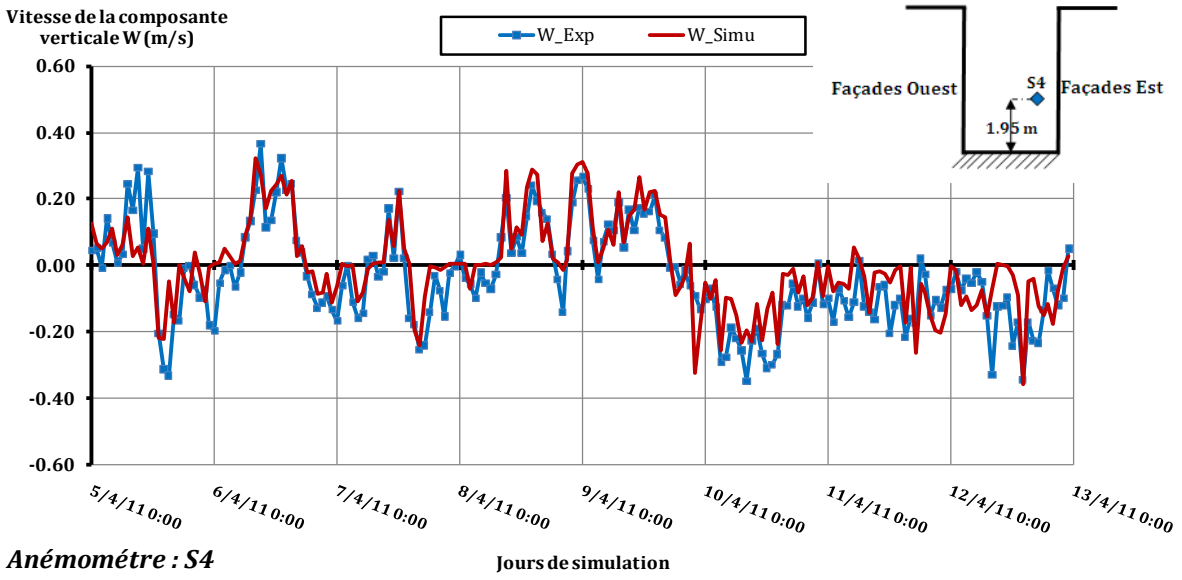
Annexe IV. Figure. 14 Vitesse transversale U expérimentale et numérique en fonction de la direction du vent pour les anémomètres soniques S1 et S3 (les lignes continues indiquent l'axe de la rue et les lignes discontinues indiquent la direction perpendiculaire à l'axe de la rue).



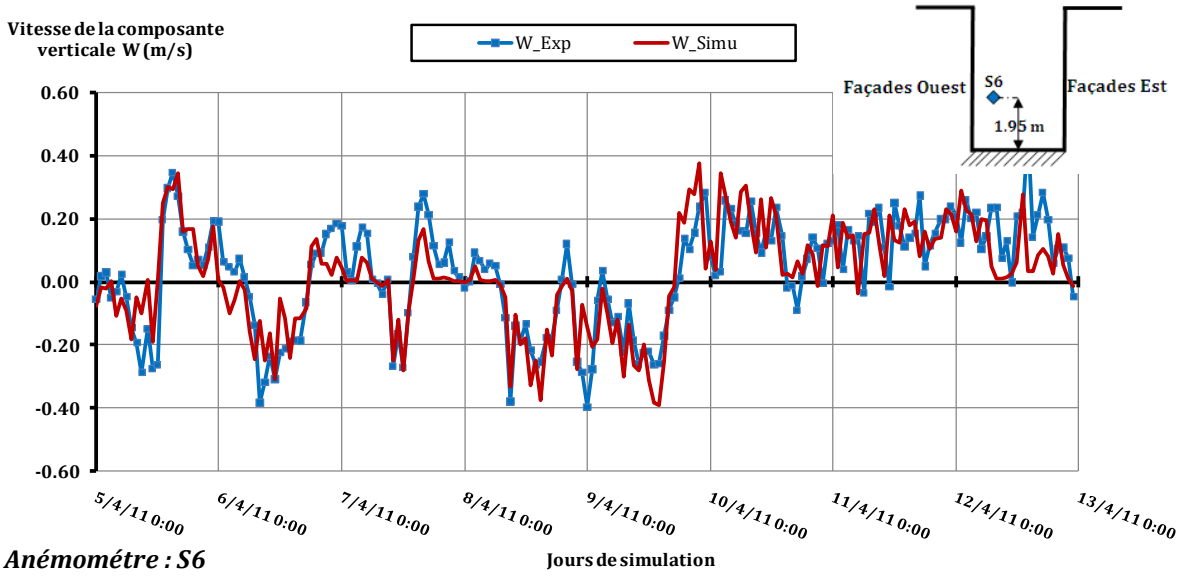


Annexe IV. Figure. 15 Vitesse transversale U expérimentale et numérique en fonction de la direction du vent pour les anémomètres soniques S4 et S6 (les lignes continues indiquent l'axe de la rue et les lignes discontinues indiquent la direction perpendiculaire à l'axe de la rue).

e) Comparaison calcul/mesure de la composante Verticale W

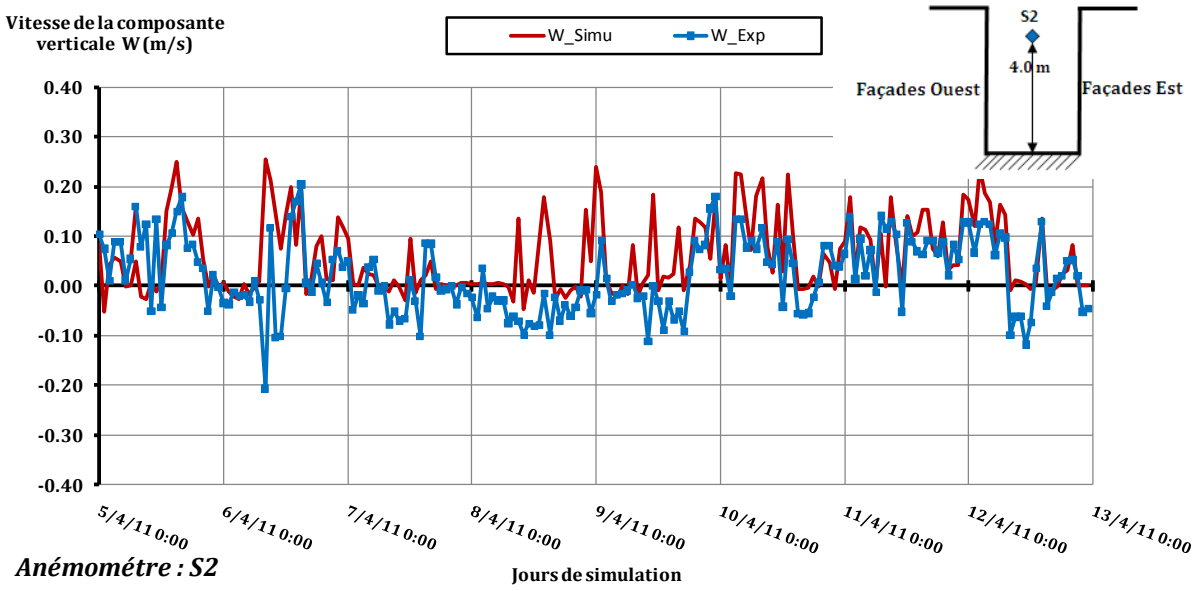


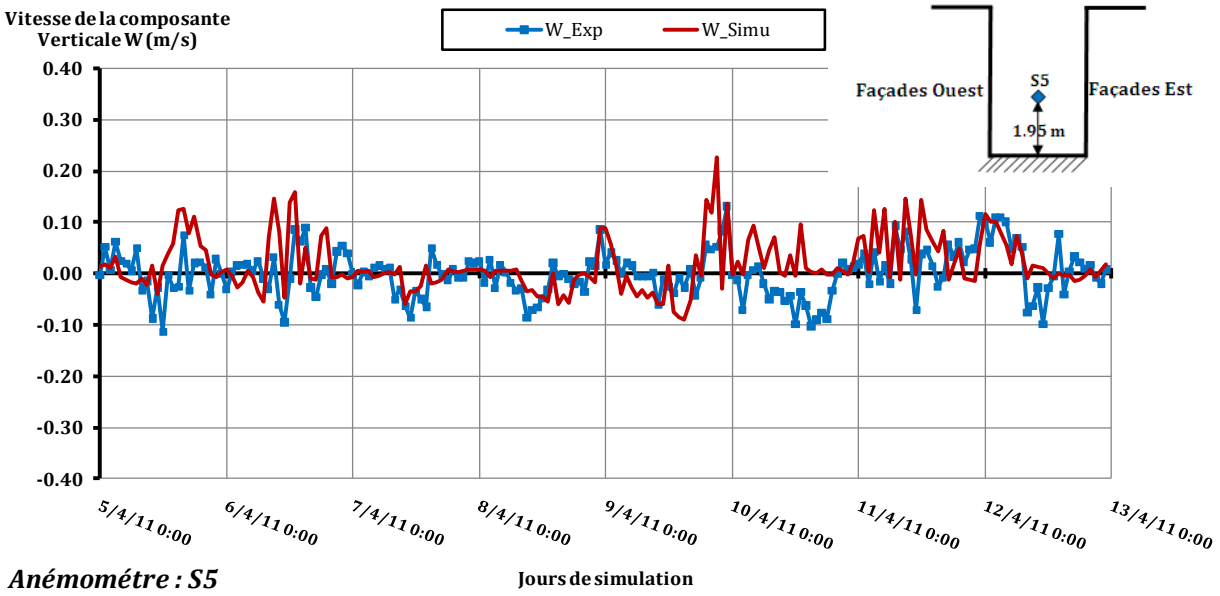
Anémométre : S4



Anémométre : S6

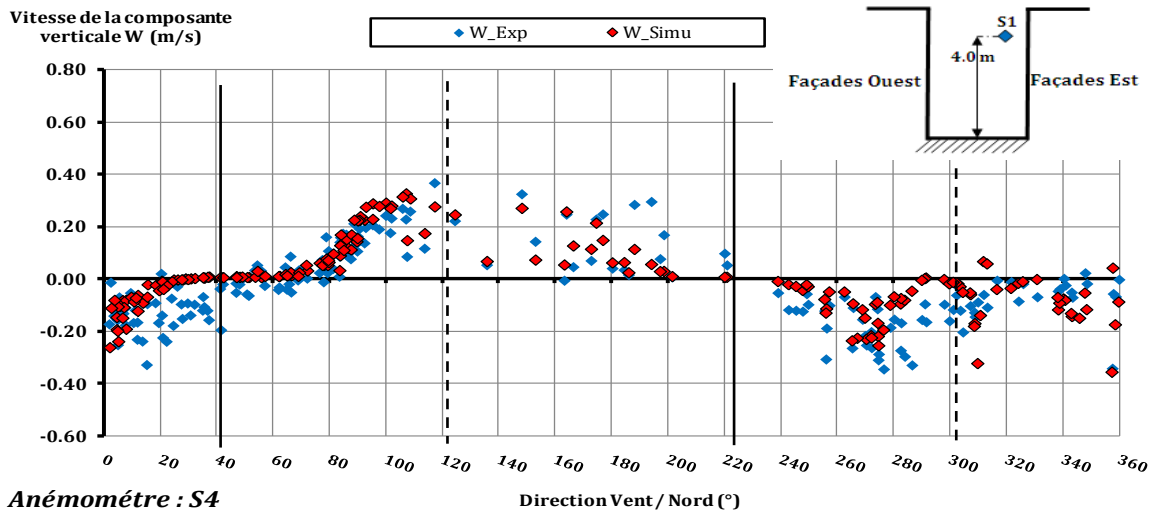
Annexe IV. Figure. 16 Evolution de la composante verticale W simulée et mesurée pour les anémomètres soniques S4 et S6 (les lignes continues indiquent l'axe de la rue et les lignes discontinues indiquent la direction perpendiculaire à l'axe de la rue).

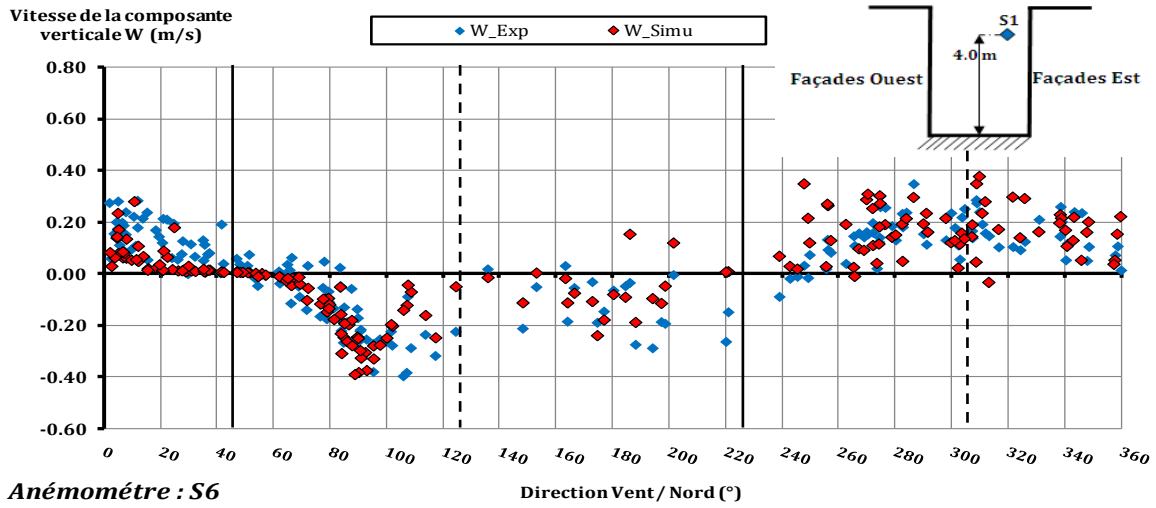




Annexe IV. Figure. 17 Evolution de la composante verticale W simulée et mesurée pour les anémomètres soniques S2 et S5 (les lignes continues indiquent l'axe de la rue et les lignes discontinues indiquent la direction perpendiculaire à l'axe de la rue).

f) Comparaison calcul/mesure pour la composante transversale U en fonction de la direction du vent

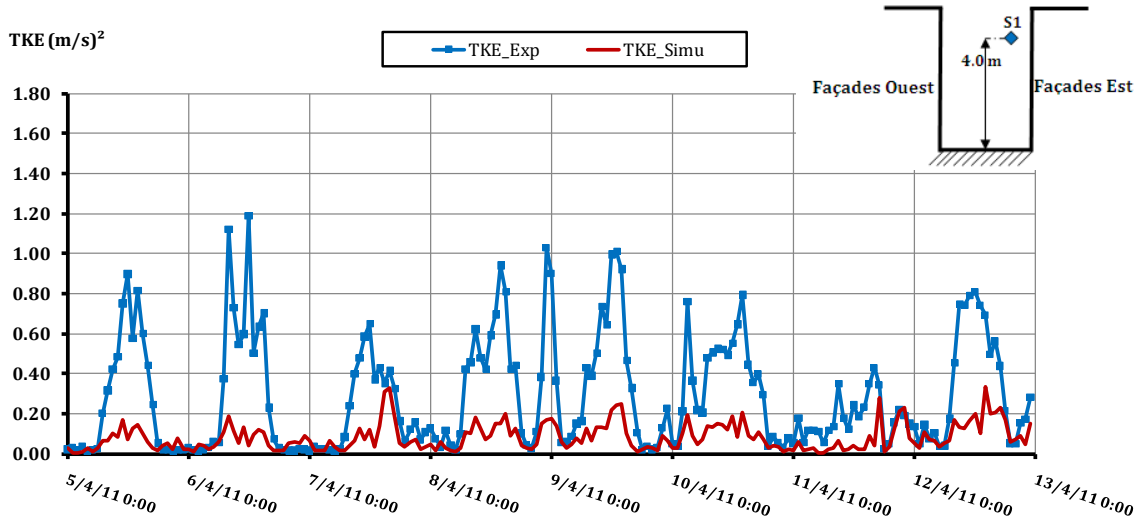


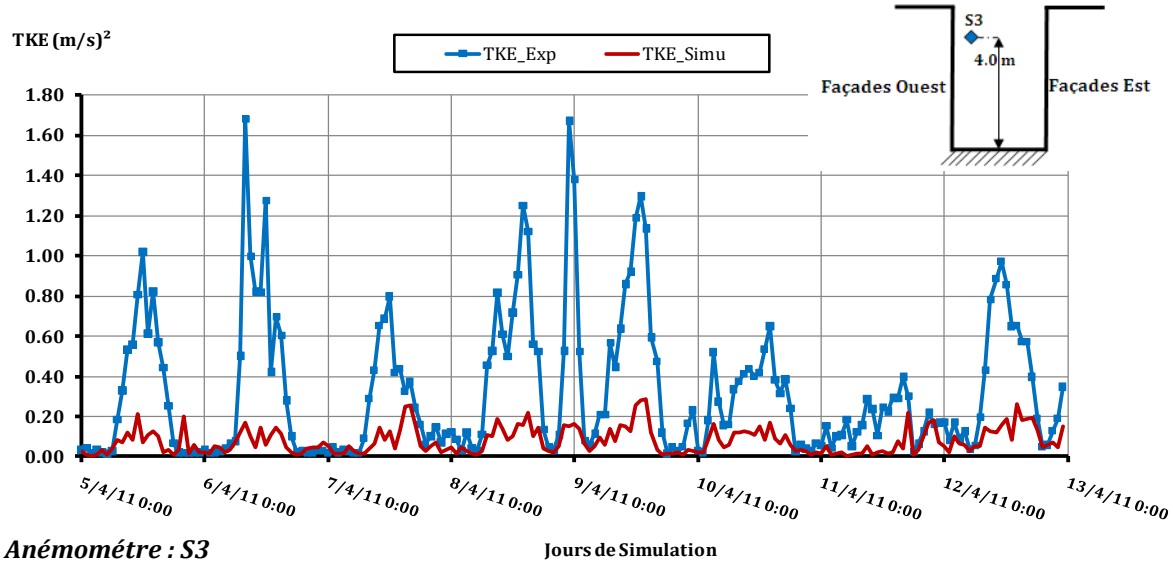


Annexe IV. Figure. 18 Composante verticale de la vitesse mesurée et simulée en fonction de la direction du vent pour les soniques S4 et S6 (les lignes continues indiquent l'axe de la rue et les lignes discontinues indiquent la direction perpendiculaire à l'axe de la rue).

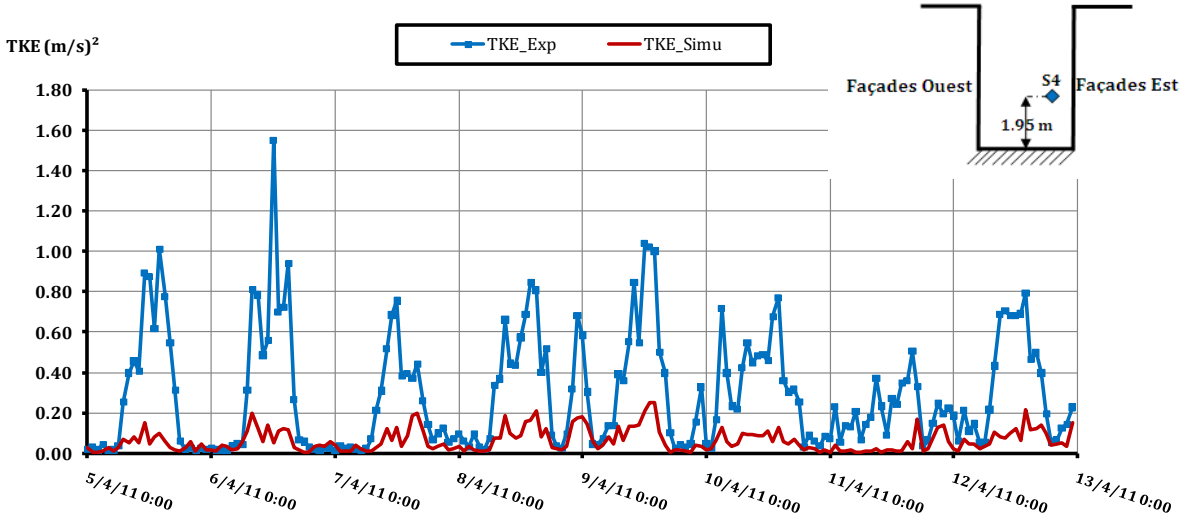
4. Comparaison calcul/mesure de l'énergie cinétique turbulente TKE

- Les figures (**Annexe IV. Figure. 19 Annexe IV. Figure. 20**) correspondent à des conditions d'entrée où les profils de turbulence et de dissipation à l'entrée de la veine sont calculés avec les équations **IV.3** et **IV. 4**;

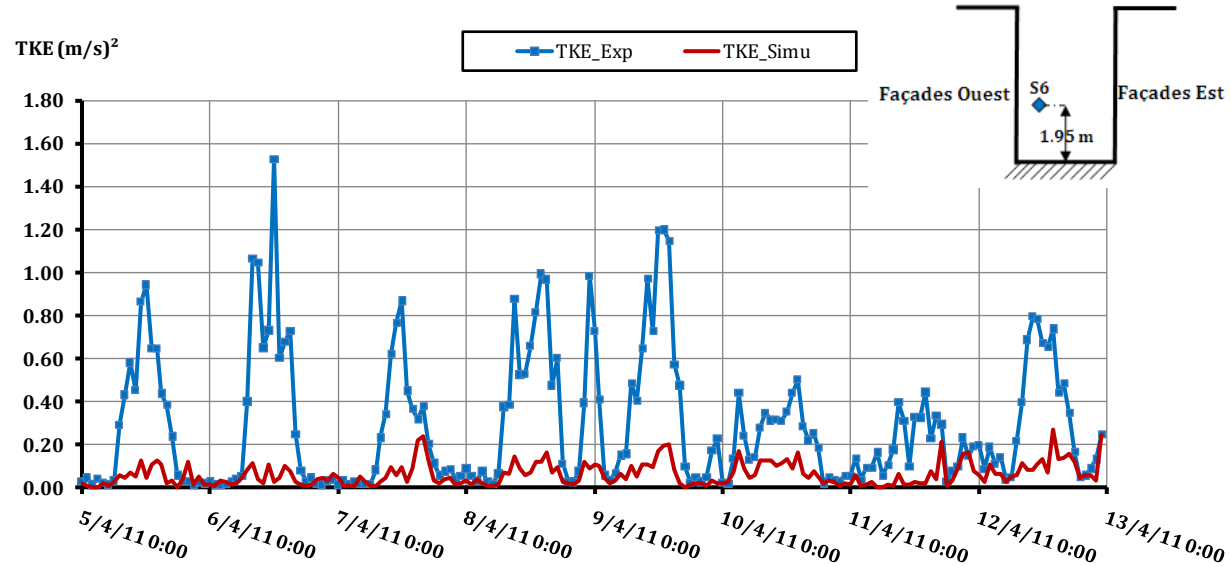




Annexe IV. Figure. 19 Evolution de l'énergie cinétique turbulente simulée et mesurée pour les anémomètres soniques S1 et S3.



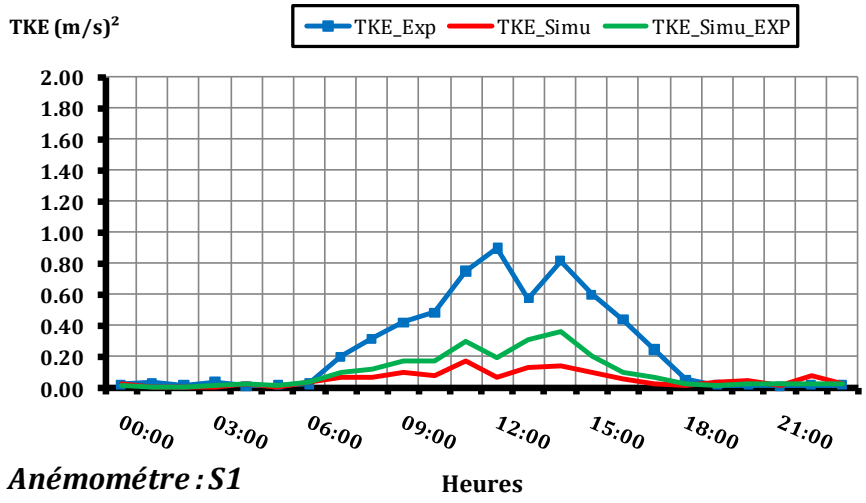
Anémométre : S4

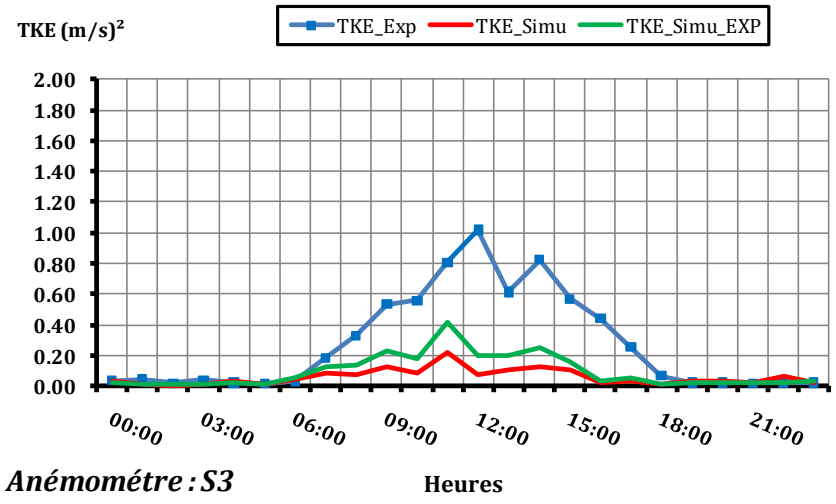


Anémométre : S6

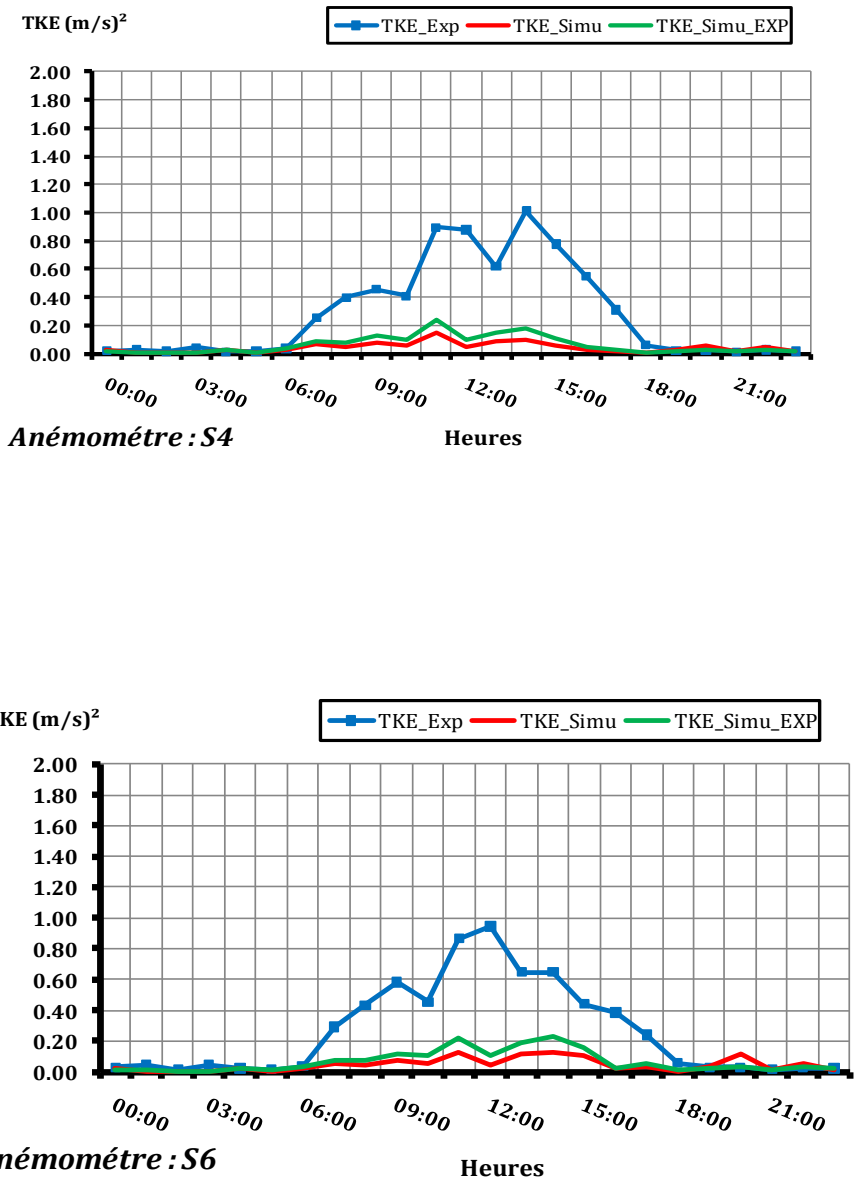
Annexe IV. Figure. 20 Evolution de l'énergie cinétique turbulente simulée et mesurée pour les anémomètres soniques S4 et S6.

- Les figures (**Annexe IV. Figure. 21Annexe IV. Figure. 22**) correspondent à des conditions d'entrée où les profils de turbulence sont calculés à partir de l'énergie cinétique turbulente mesurée et le profil de dissipation est exprimé par l'équation **IV.3**, U^* étant calculée en inversant l'équation **IV.4**. Les simulations ont été effectuées seulement pour la journée 05/04.





Annexe IV. Figure. 21 Comparaison de l'énergie cinétique turbulente simulée et mesurée à l'intérieur de la rue pour les soniques S1 et S3 (**Vert** : TKE simulée avec le profil d'entrée donné par l'équation **IV.3**. **Rouge** : TKE simulée avec le profil d'entrée basé sur les mesures. **Bleu** : TKE mesurée).



Annexe IV. Figure. 22 Comparaison de l'énergie cinétique turbulente simulée et mesurée à l'intérieur de la rue pour les soniques S1 et S3 (**Vert** : TKE simulée avec le profil d'entrée donné par l'équation **IV.3**. **Rouge** : TKE simulée avec le profil d'entrée basé sur les mesures. **Bleu** : TKE mesurée).

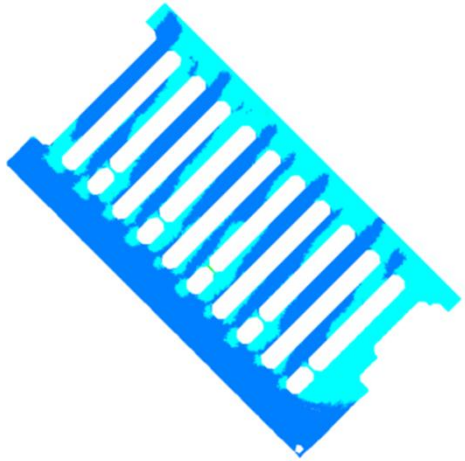
Annexes V

Sommaire

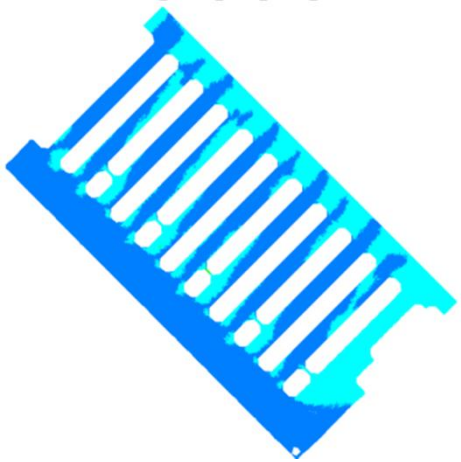
Nous présentons ci-dessous les résultats du calcul de l'indice de confort PET sous forme de carte de confort pour les trois quartiers d'étude durant les deux journées "représentatives" sélectionnées.

L'évolution journalière du pourcentage de zones présentant les différentes perceptions thermiques ressenties par un individu est présentée ensuite pour les trois cas d'étude dans des tableaux de mesure.

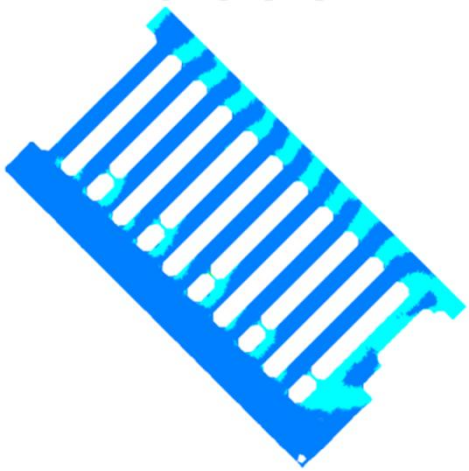
1. Cartes de confort journalière pour le quartier Bottière Chénais durant la journée du 19/07/2009



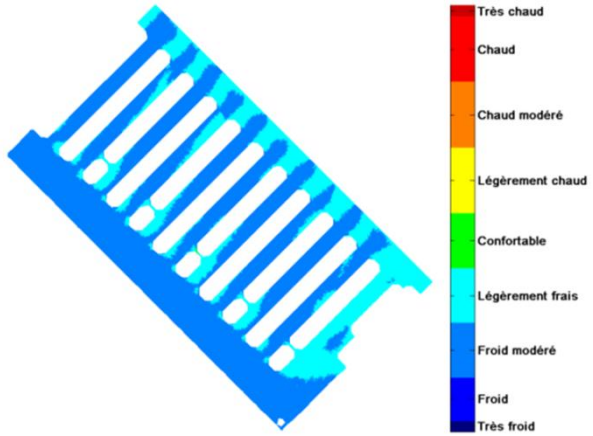
00H00



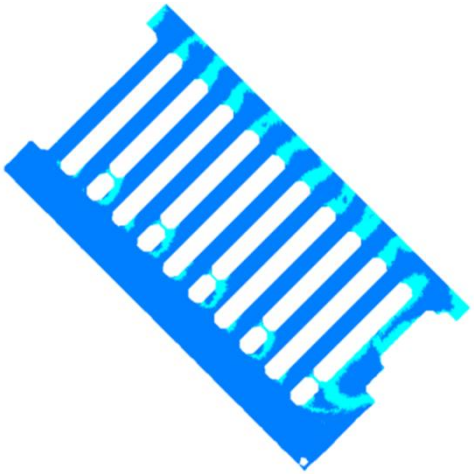
01H00



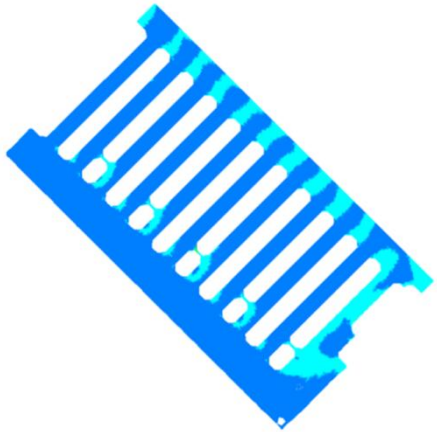
02H00



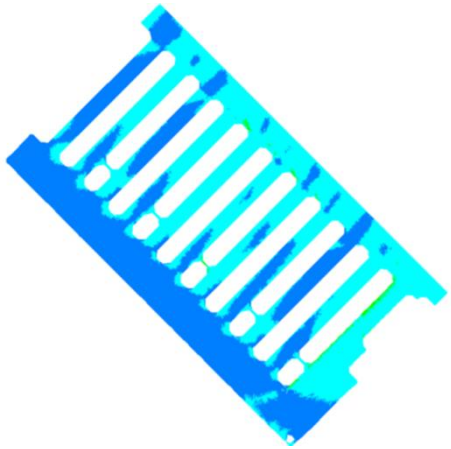
03H00



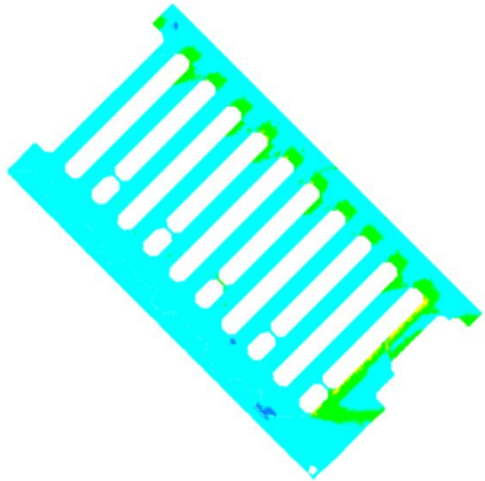
04H00



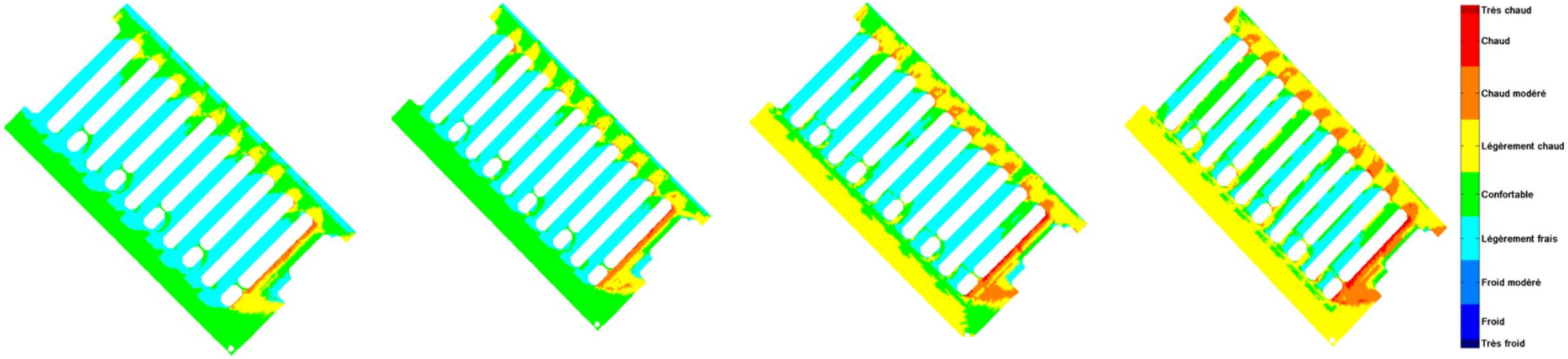
05H00



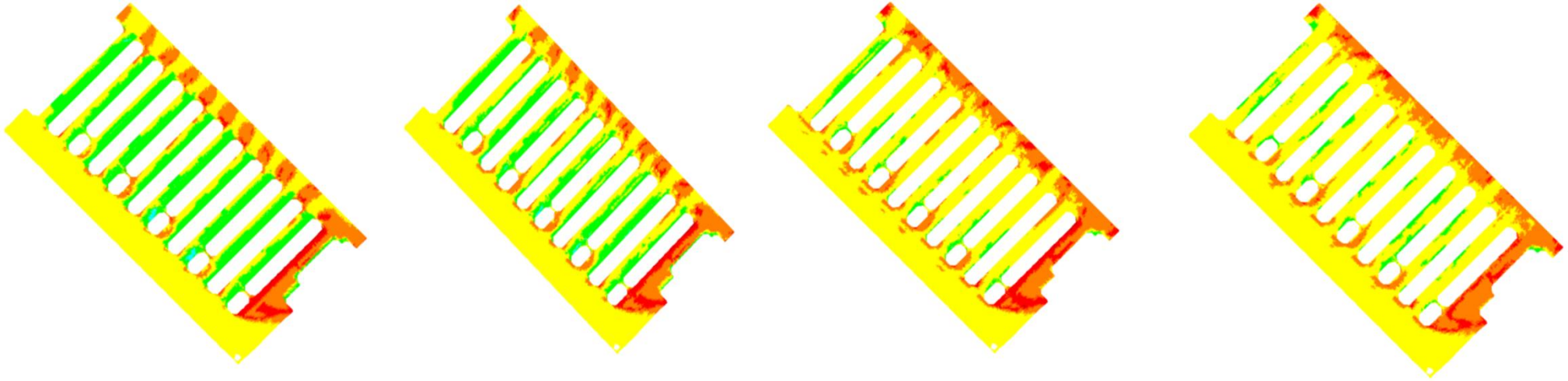
06H00



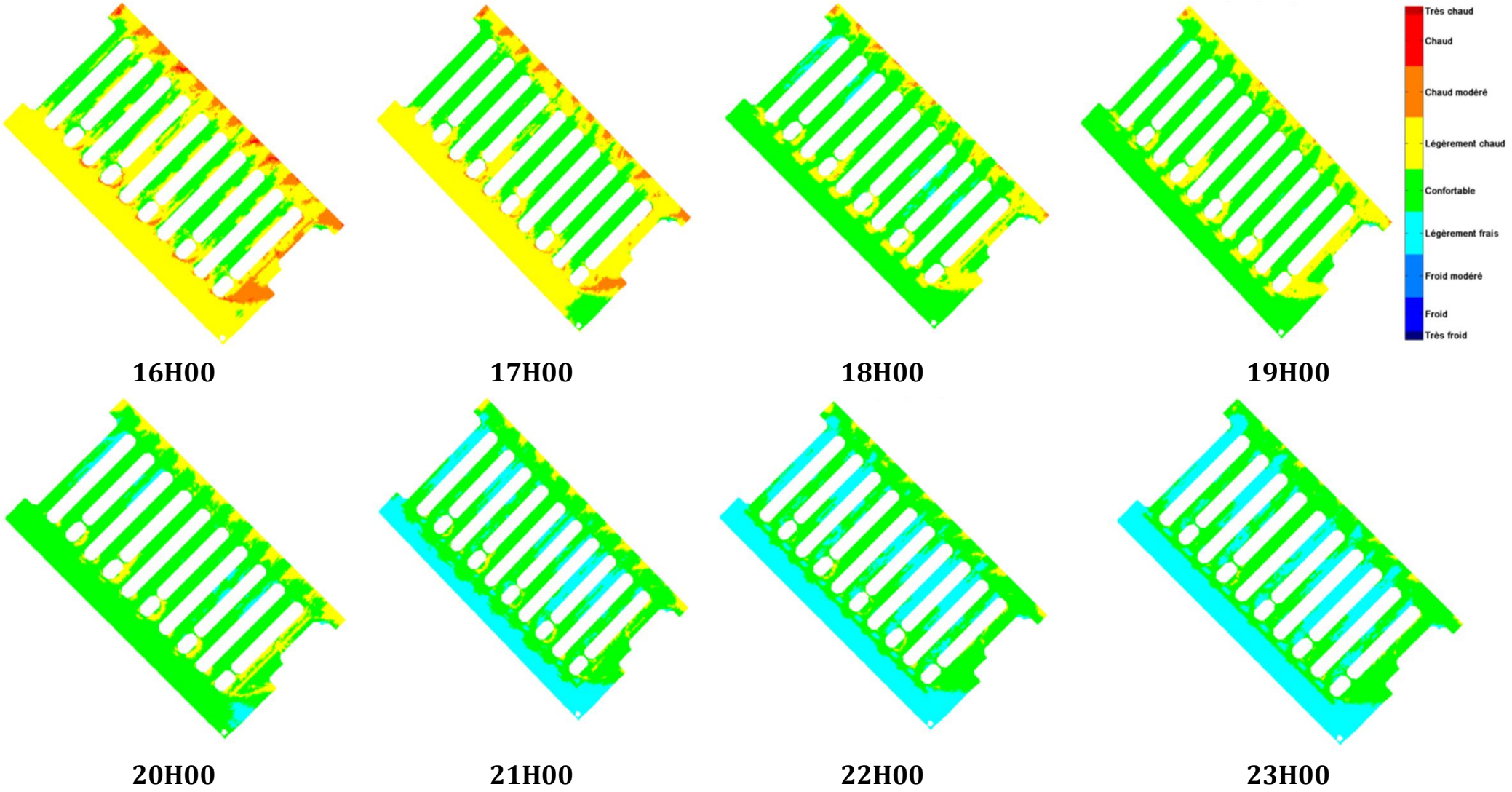
07H00



08H00 **09H00** **10H00** **11H00**

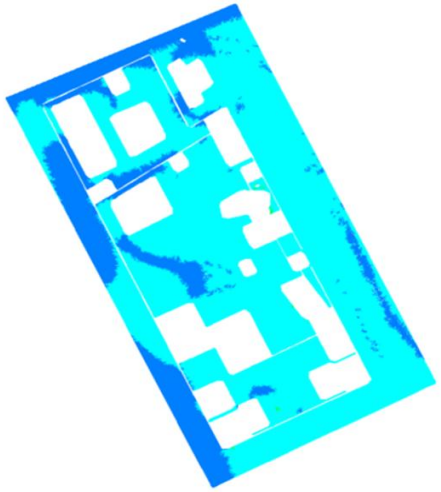


12H00 **13H00** **14H00** **15H00**

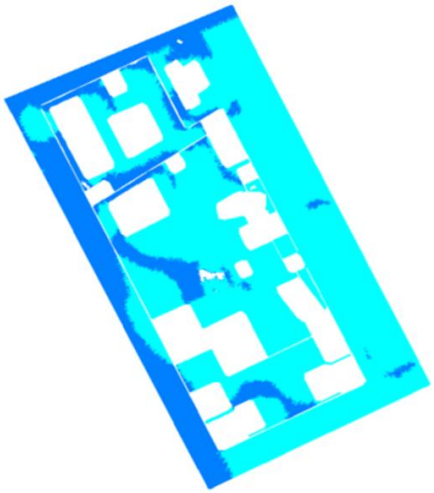


Annexe V. Figure. 1 Evolution journalière de l'indice PET pour le quartier Bottière Chénaie durant la journée du 19/07/2009 (scénario A : climat Nantes).

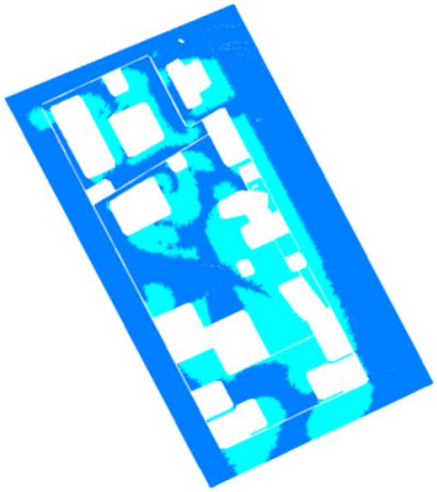
2. Cartes de confort journalière pour le quartier Tripode durant la journée du 19/07/2009



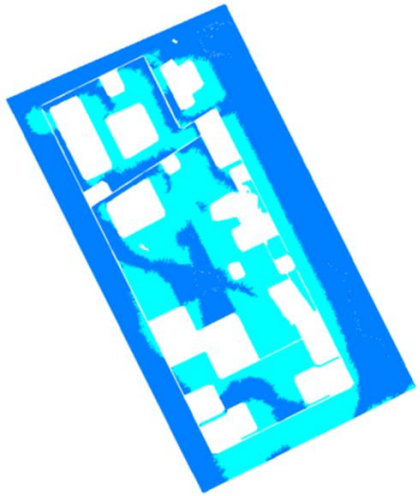
00H00



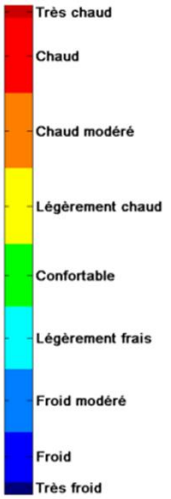
01H00

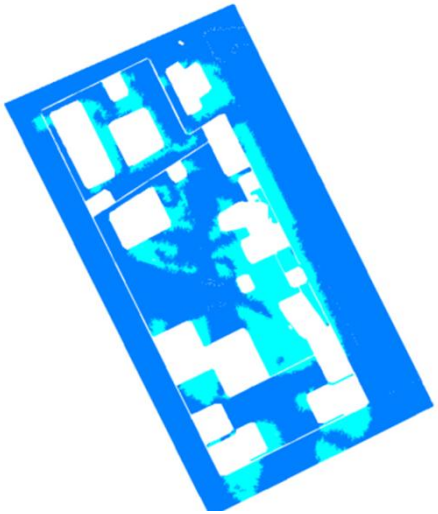


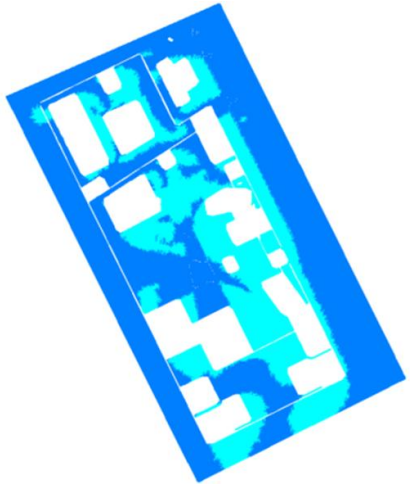
02H00

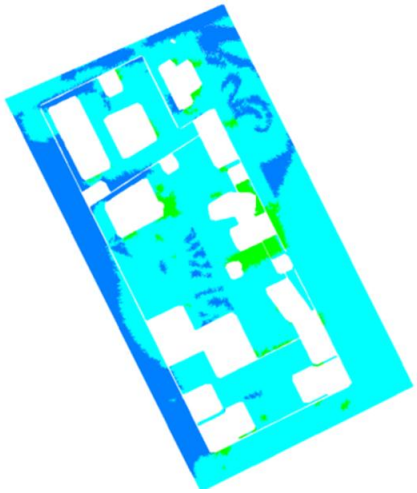


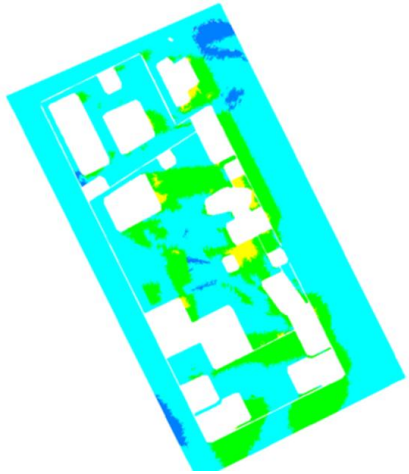
03H00



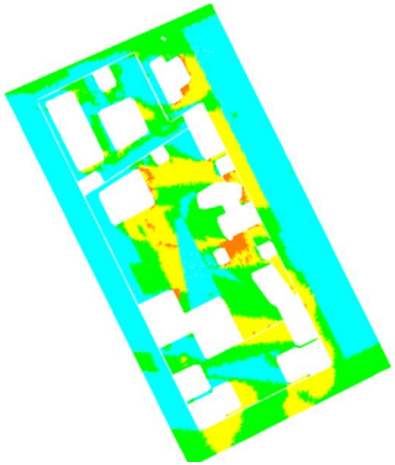




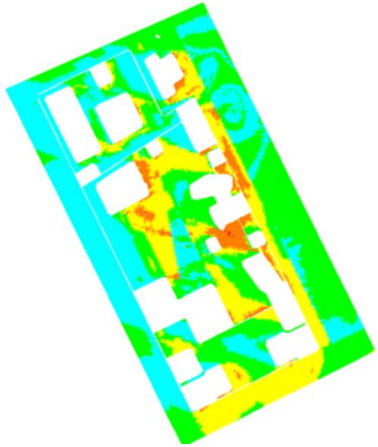




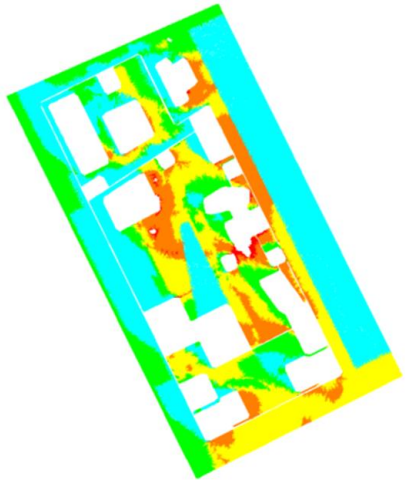
04H00



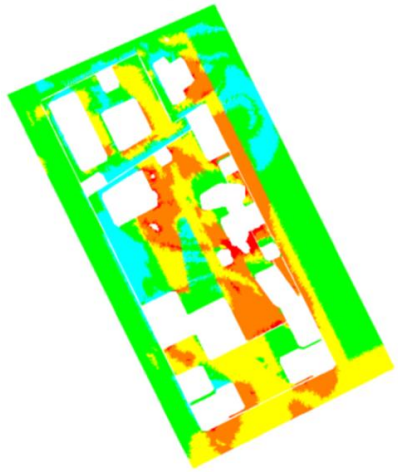
05H00

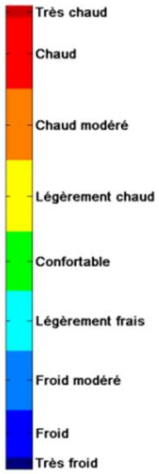


06H00

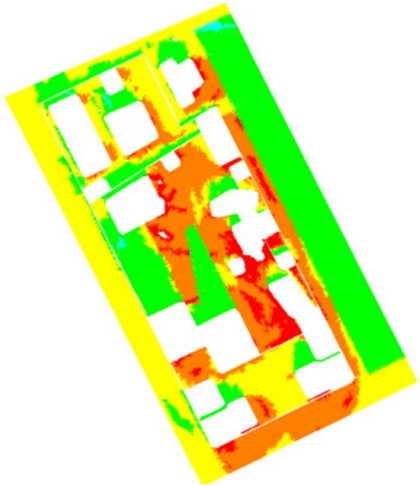


07H00

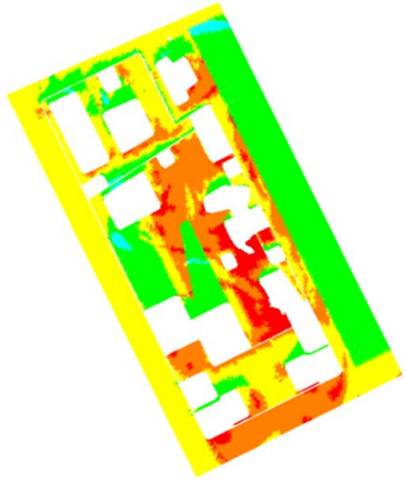




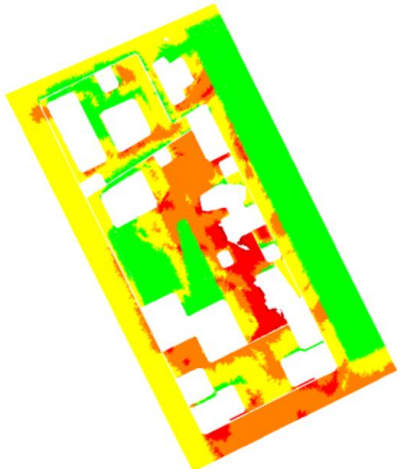
08H00



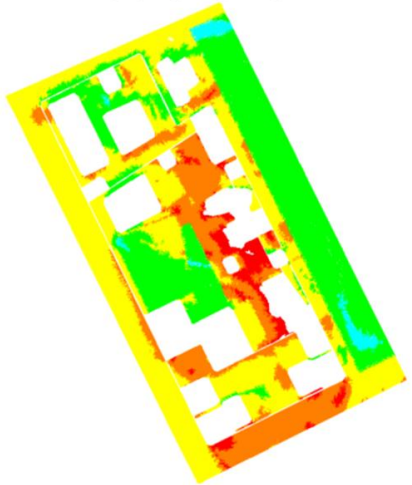
09H00



10H00



11H00

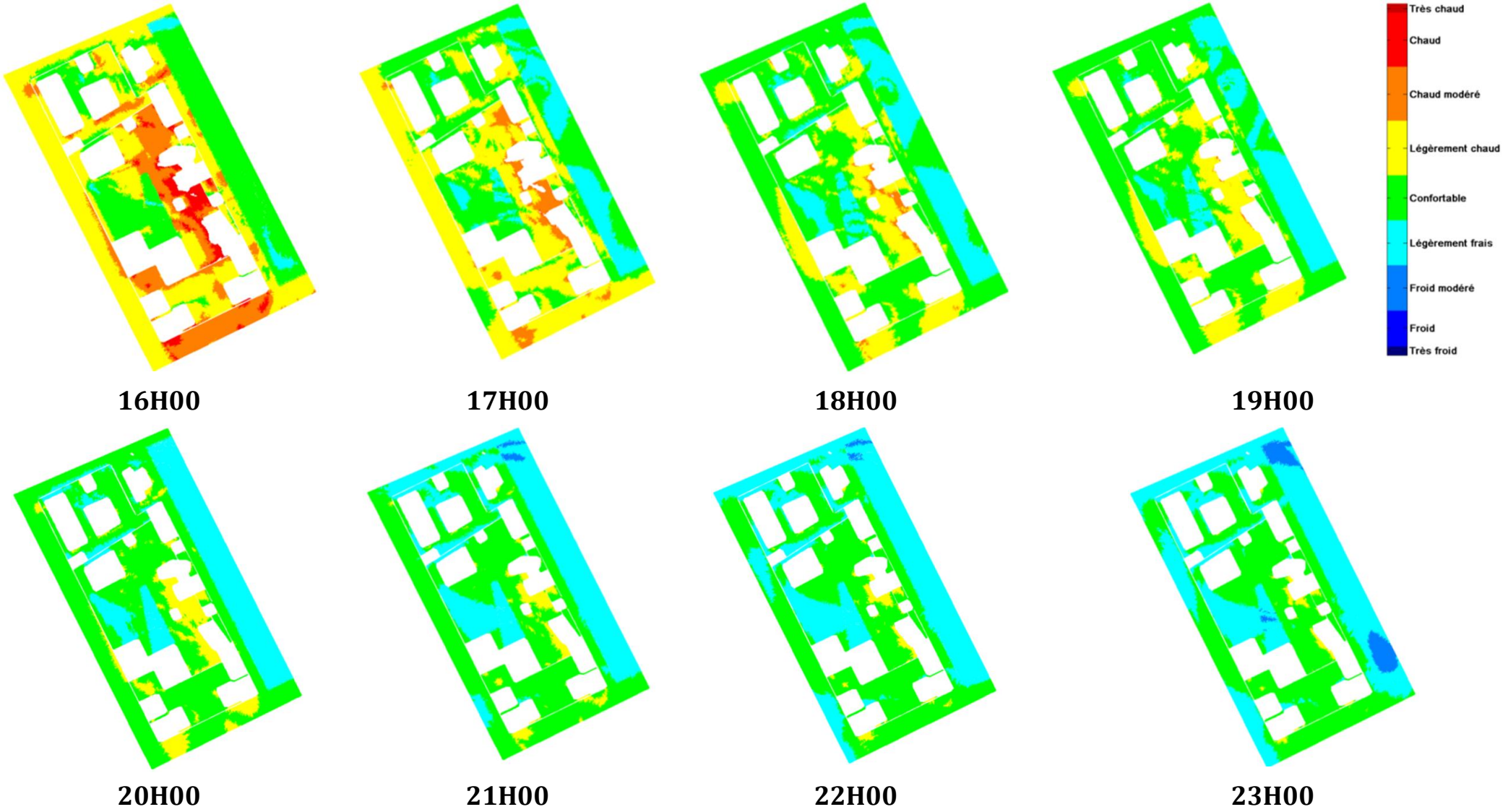


12H00

13H00

14H00

15H00



Annexe V. Figure. 2 Evolution journalière de l'indice PET pour le quartier Tripode durant la journée du 19/07/2009 (scénario A : climat Nantes).

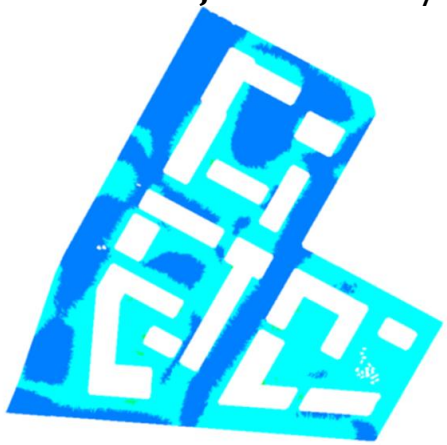
3. Cartes de confort journalière pour le quartier Lyon Confluence durant la journée du 19/07/2009



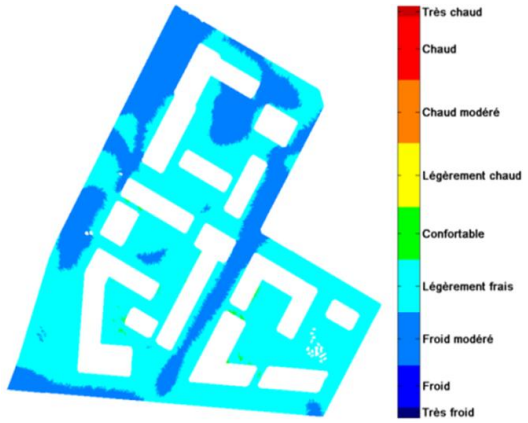
00H00



01H00



02H00



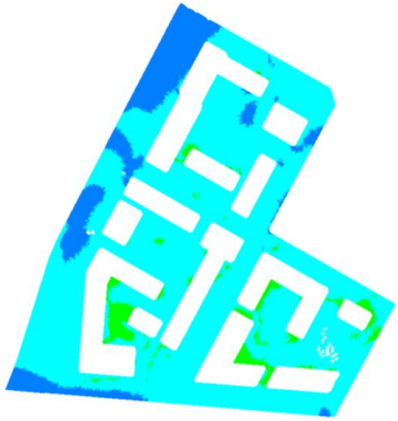
03H00



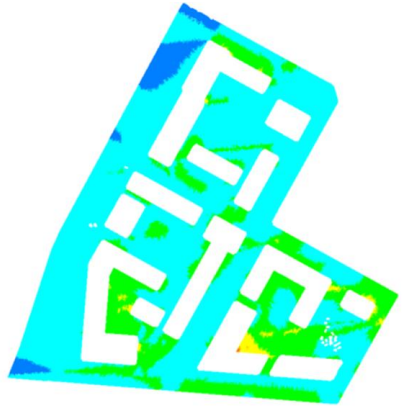
04H00



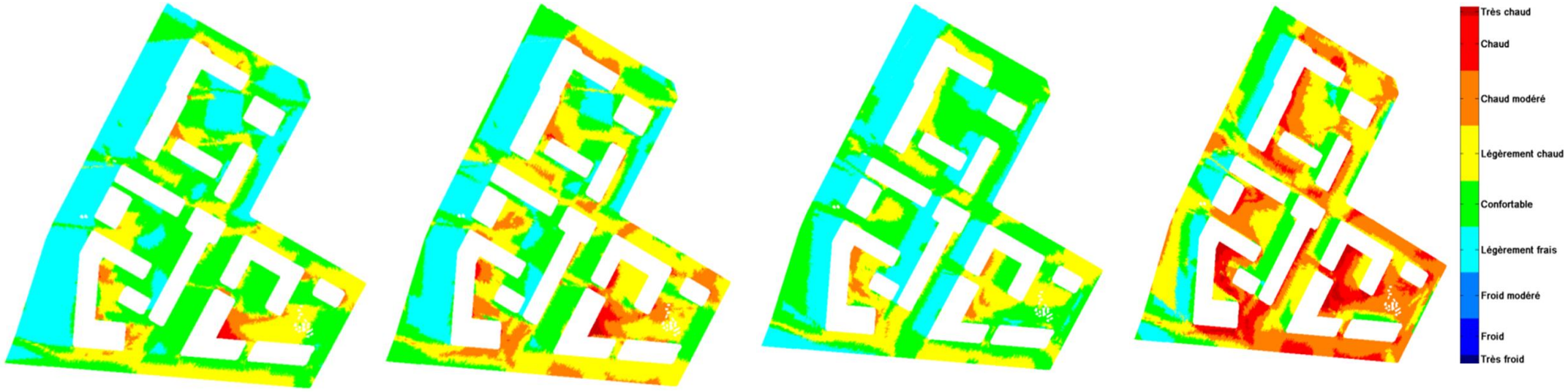
05H00



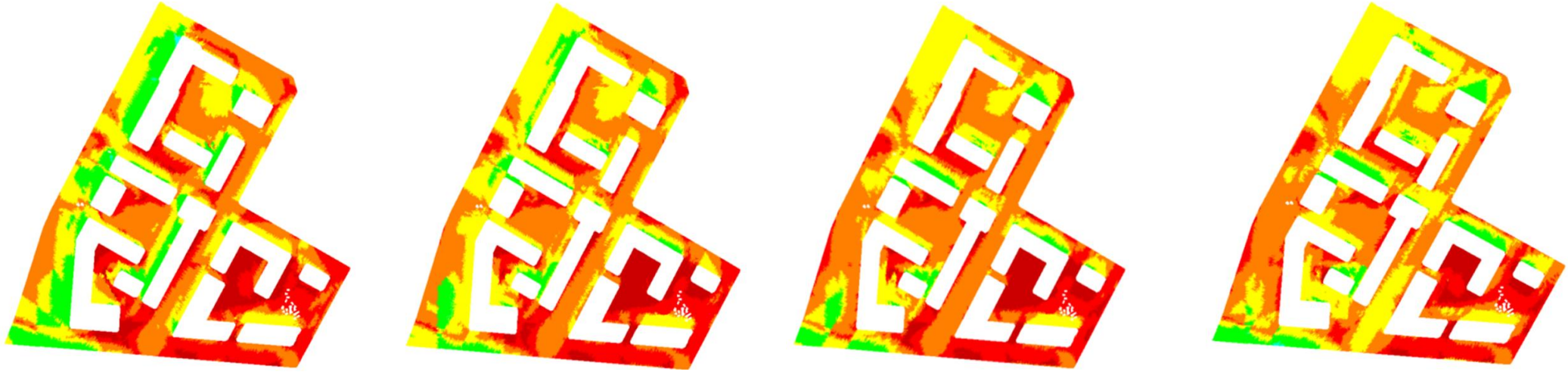
06H00



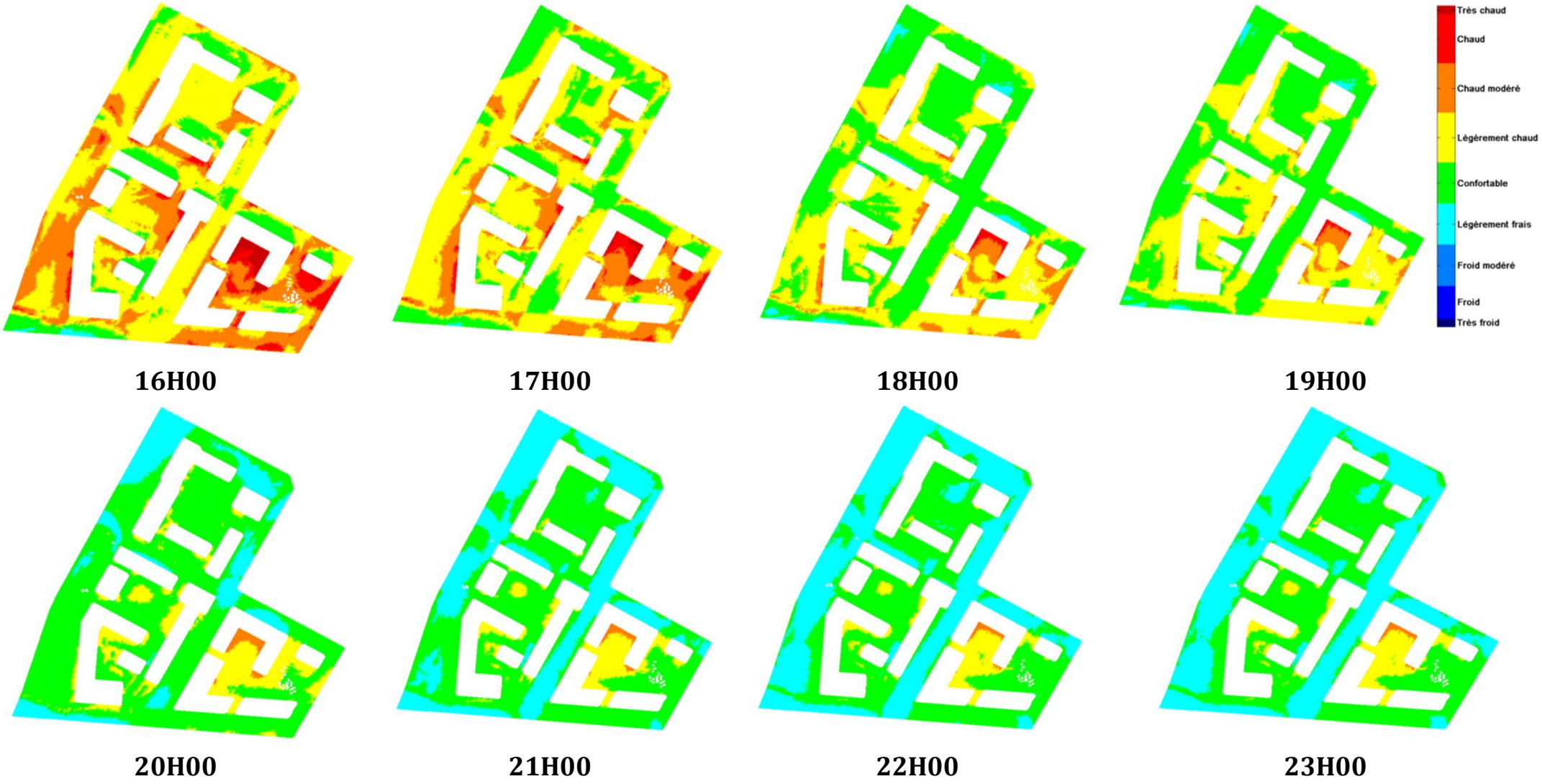
07H00



08H00 **09H00** **10H00** **11H00**

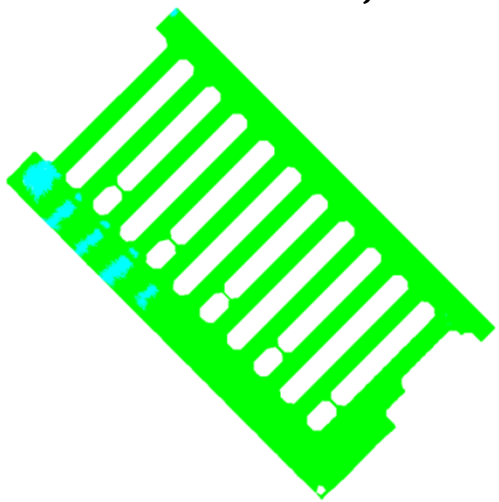


12H00 **13H00** **14H00** **15H00**

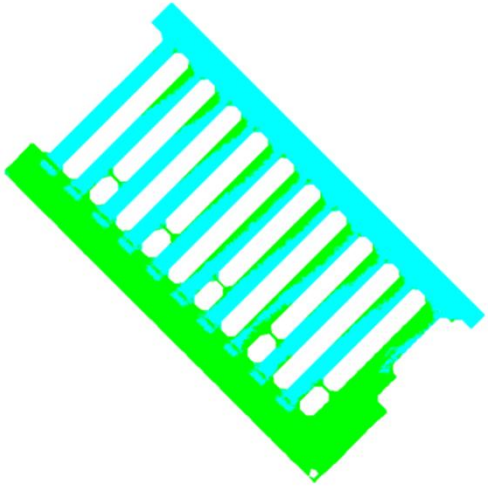


Annexe V. Figure. 3 Evolution journalière de l'indice PET pour le quartier Lyon Confluence durant la journée du 19/07/2009 (scénario A : climat Nantes).

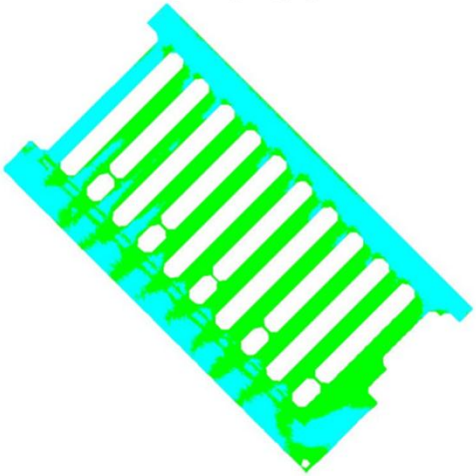
4. Cartes de confort journalière pour le quartier Bottière Chénais durant la journée du 30/07/2005



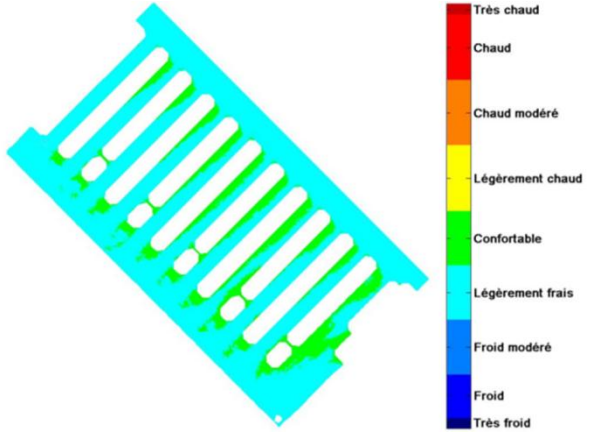
00H00



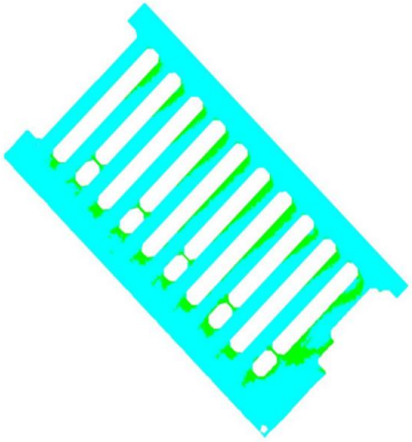
01H00



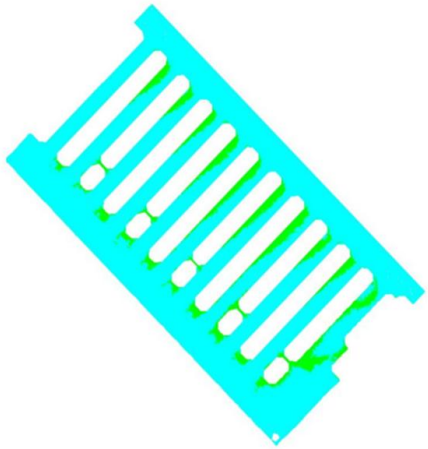
02H00



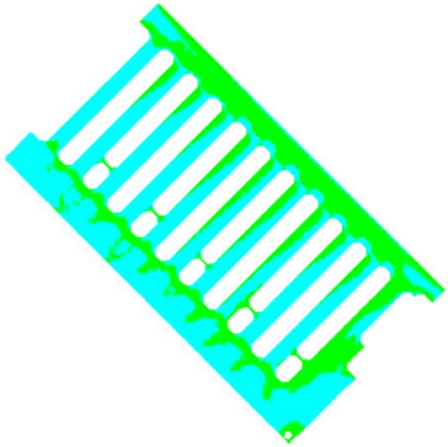
03H00



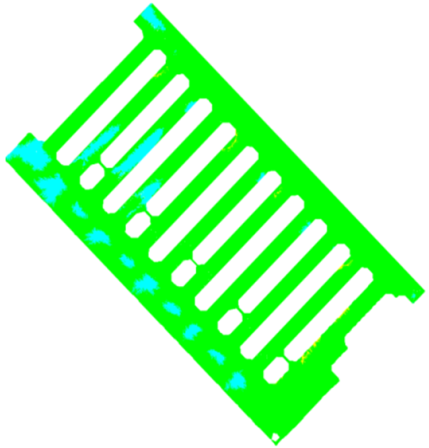
04H00



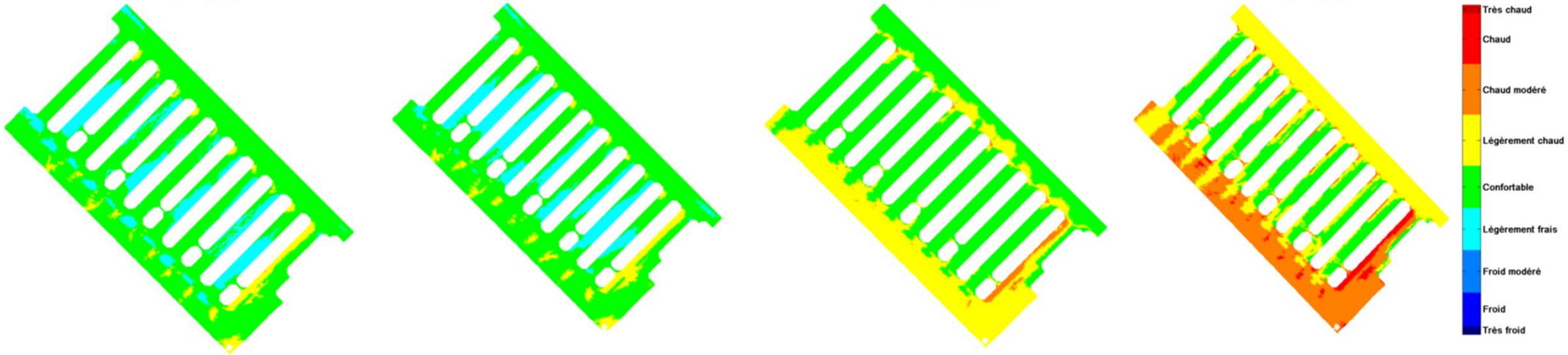
05H00



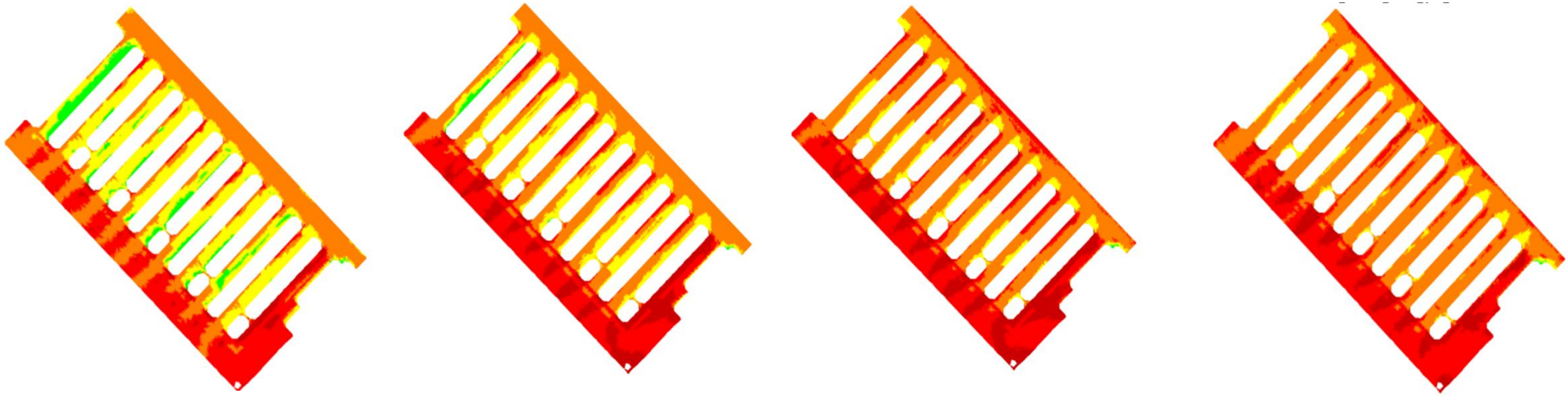
06H00



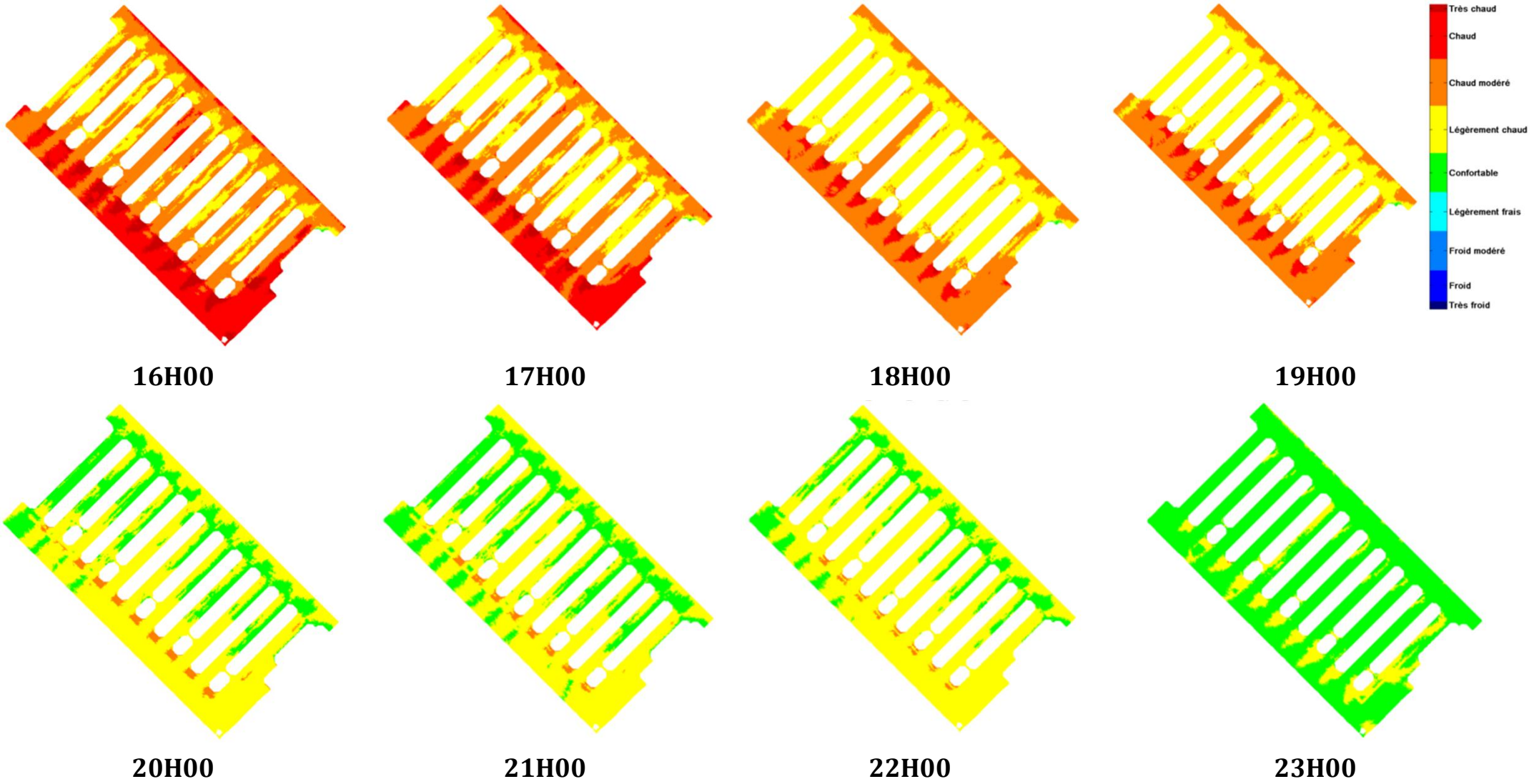
07H00



08H00 **09H00** **10H00** **11H00**

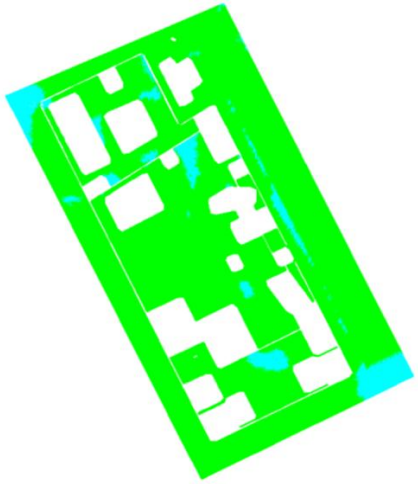


12H00 **13H00** **14H00** **15H00**

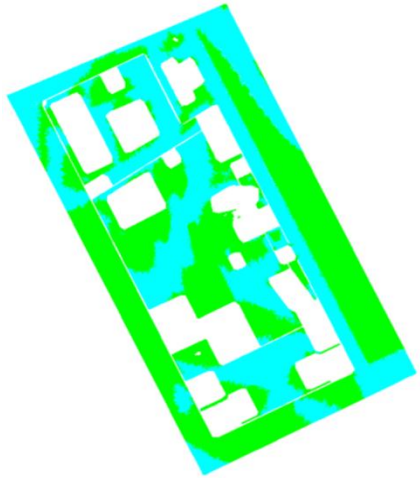


Annexe V. Figure. 4 Evolution journalière de l'indice PET pour le quartier Bottière Chénaie durant la journée du 30/07/2005 (scénario B : climat Lyon).

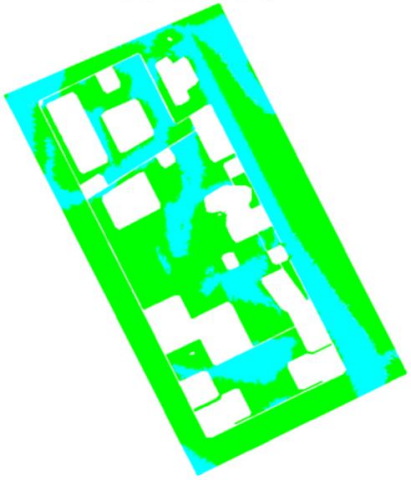
5. Cartes de confort journalière pour le quartier Tripode durant la journée du 30/07/2005



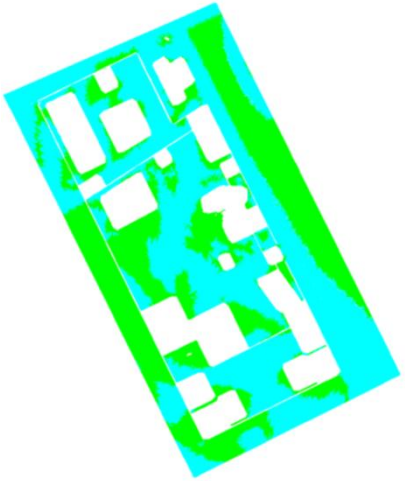
00H00



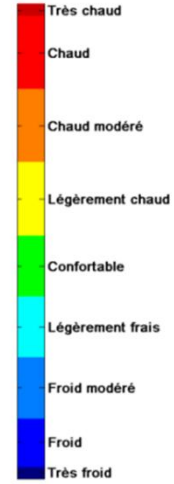
01H00

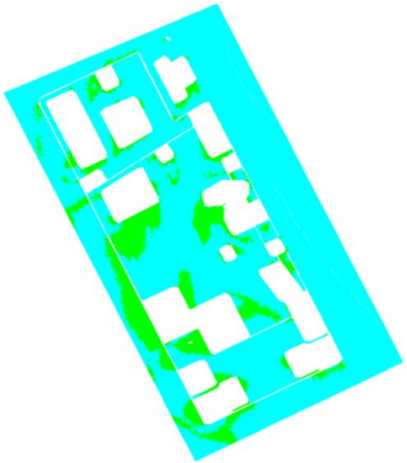


02H00

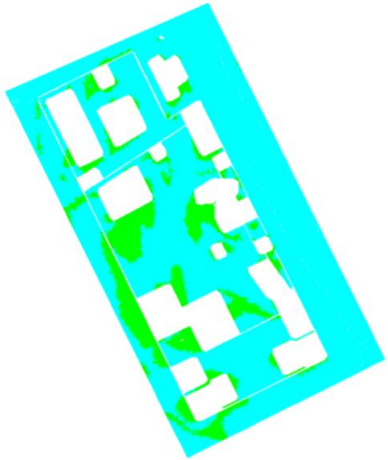


03H00

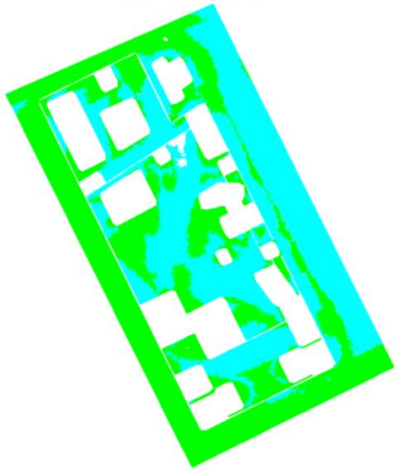




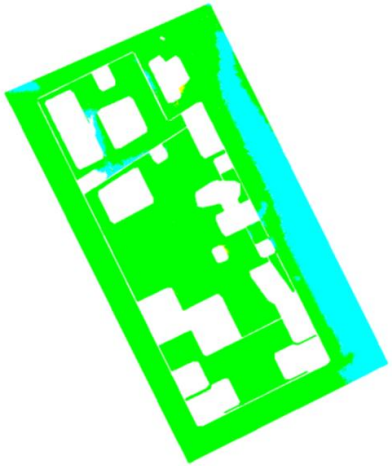
04H00



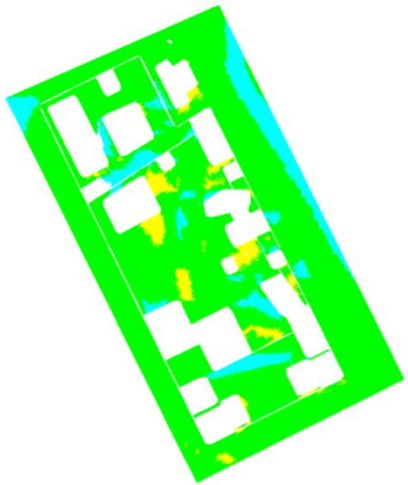
05H00



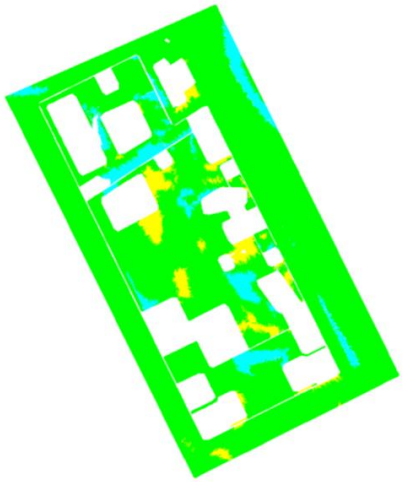
06H00



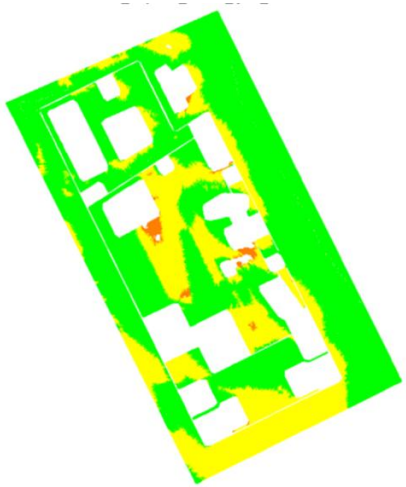
07H00



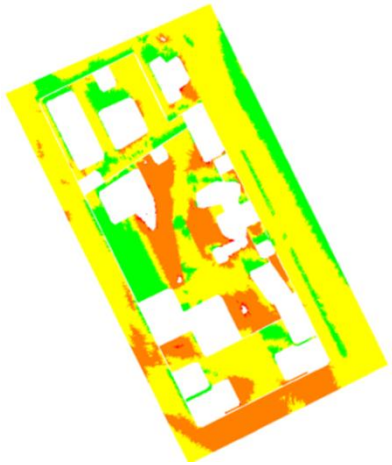
08H00



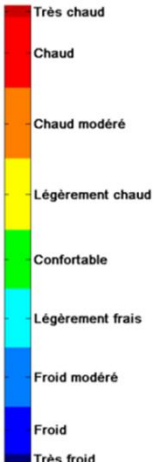
09H00

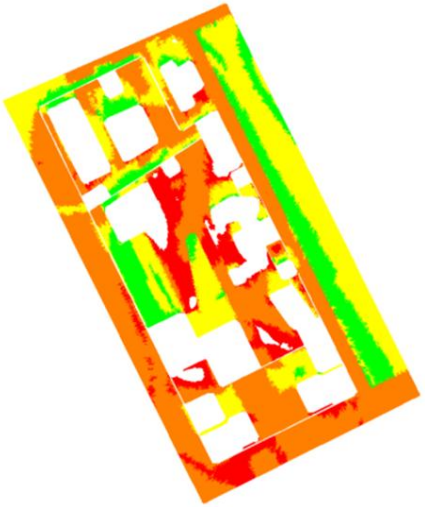


10H00

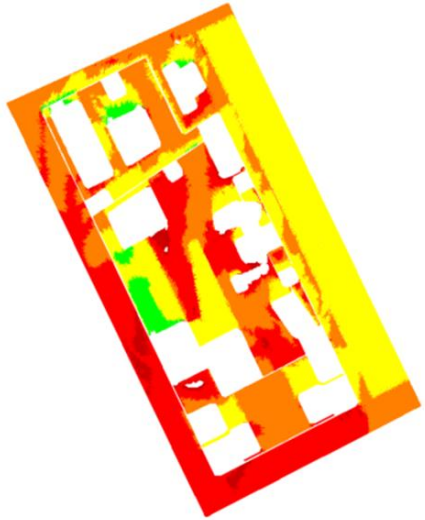


11H00

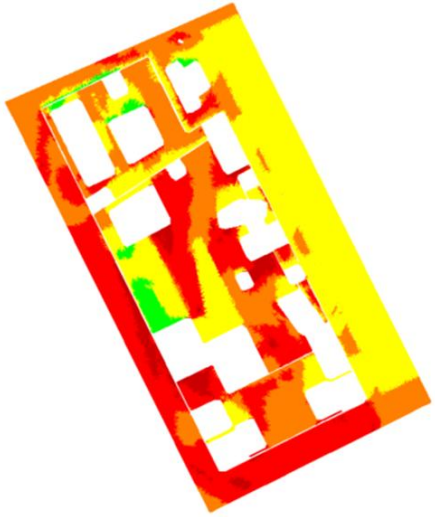




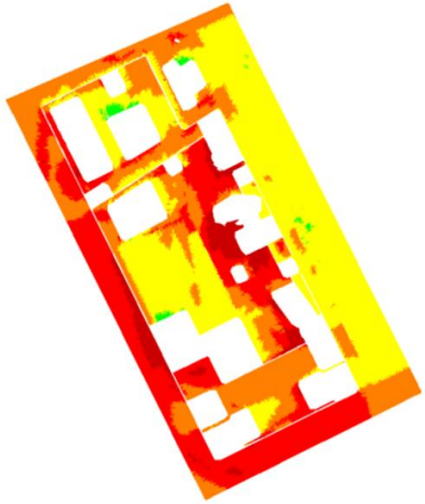
12H00



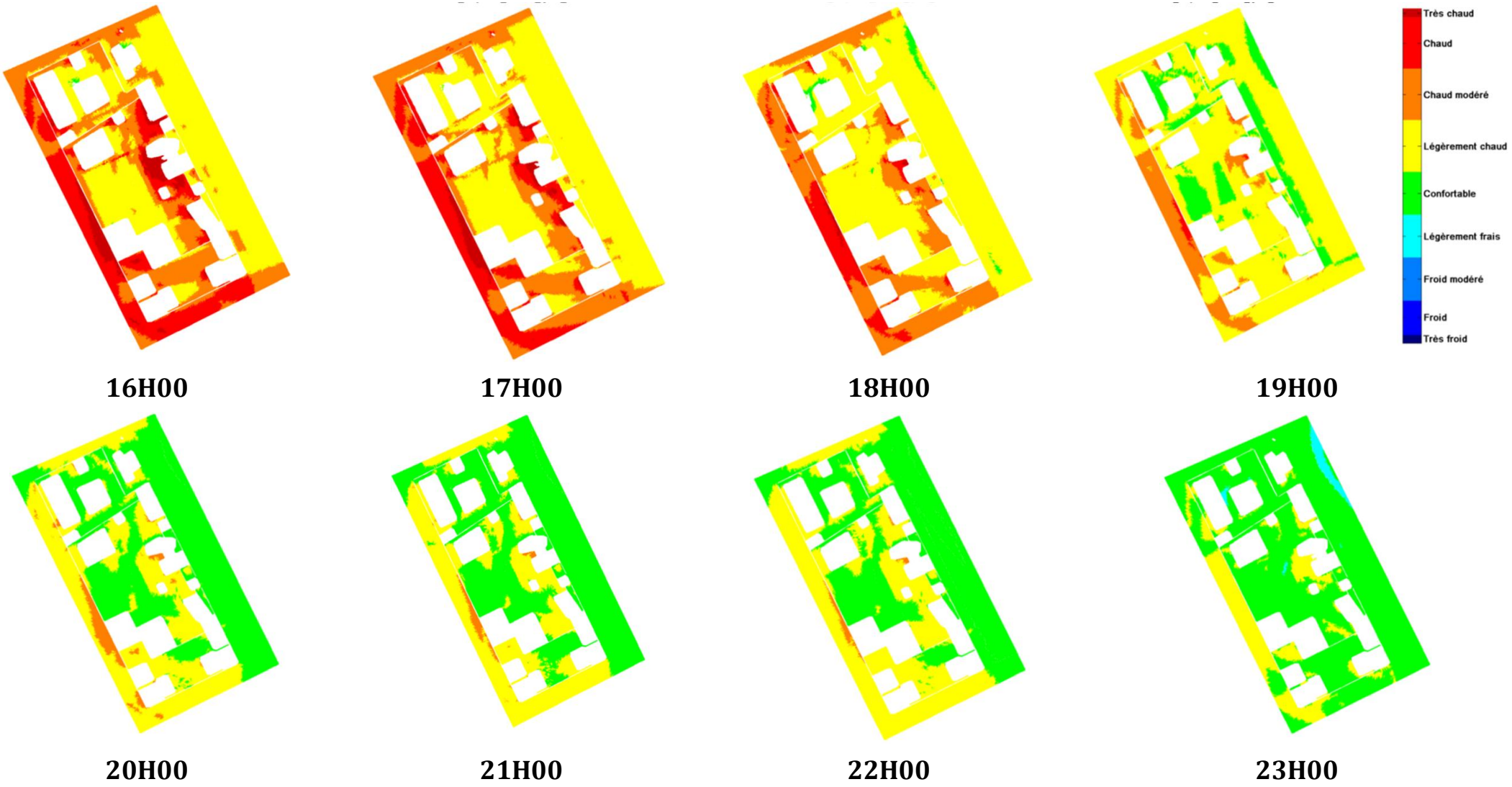
13H00



14H00



15H00



Annexe V. Figure. 5 Evolution journalière de l'indice PET pour le quartier Tripode durant la journée du 30/07/2005 (scénario B : climat Lyon).

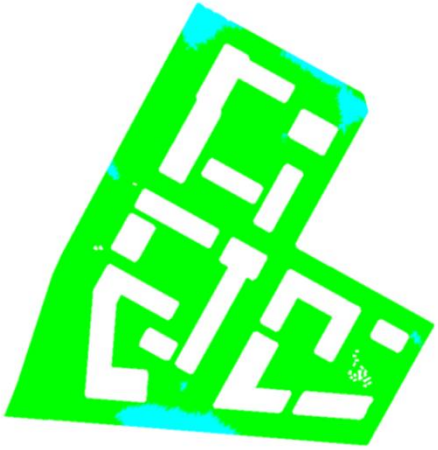
6. Cartes de confort journalière pour le quartier Lyon Confluence durant la journée du 30/07/2005



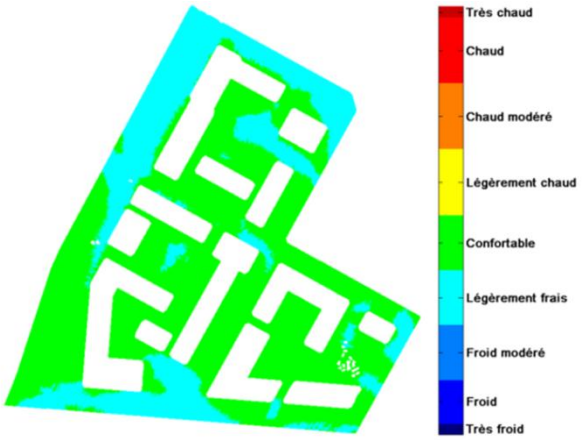
00H00



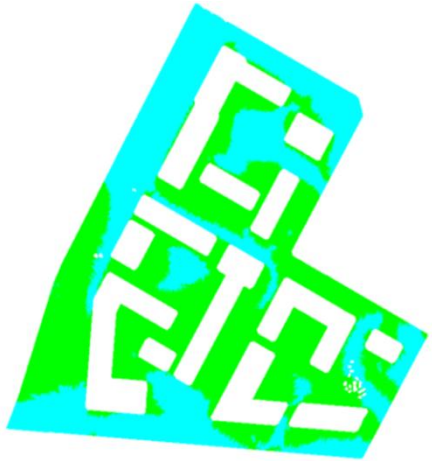
01H00



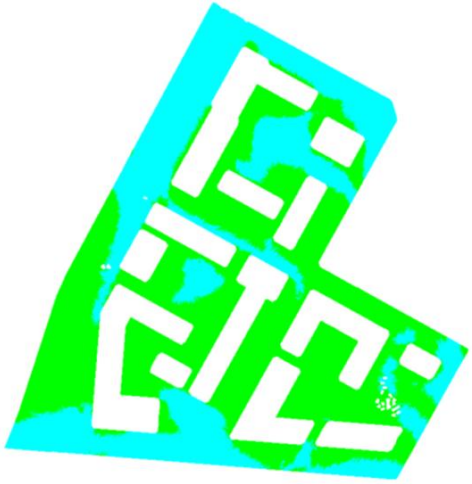
02H00



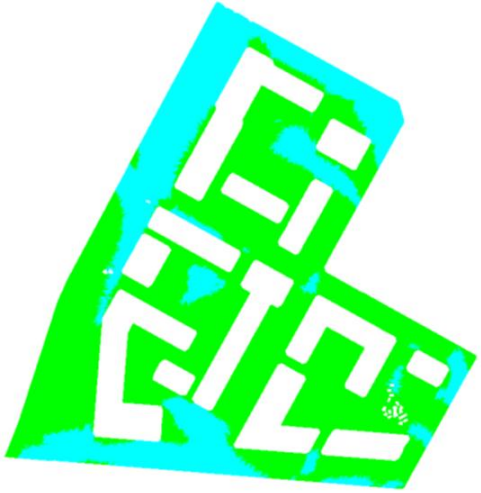
03H00



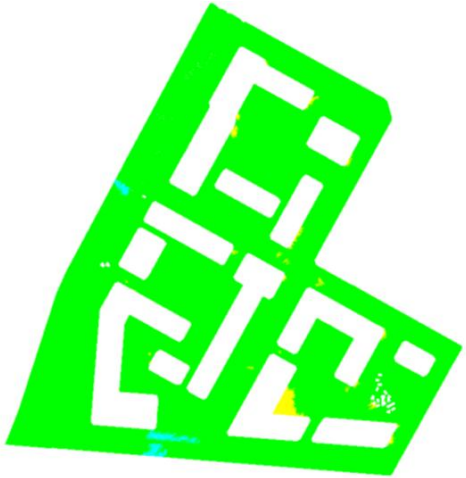
04H00



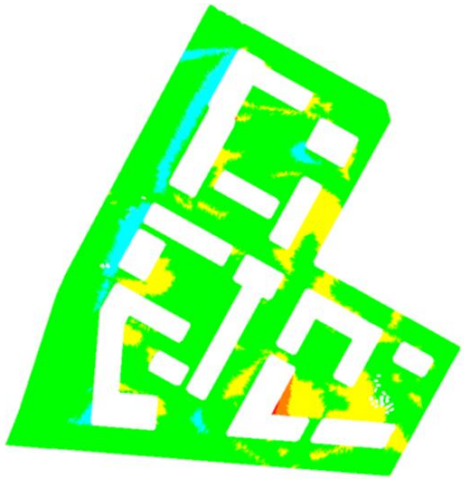
05H00



06H00



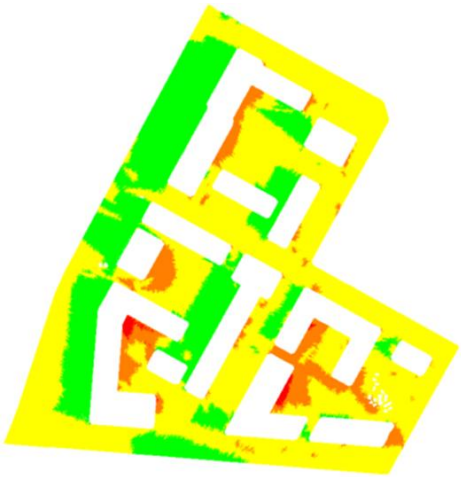
07H00



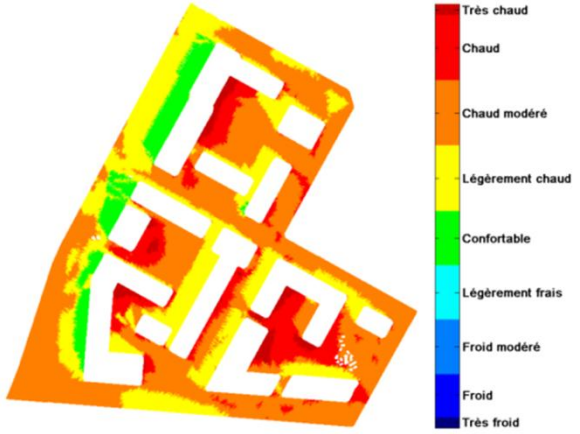
08H00



09H00



10H00



11H00



12H00



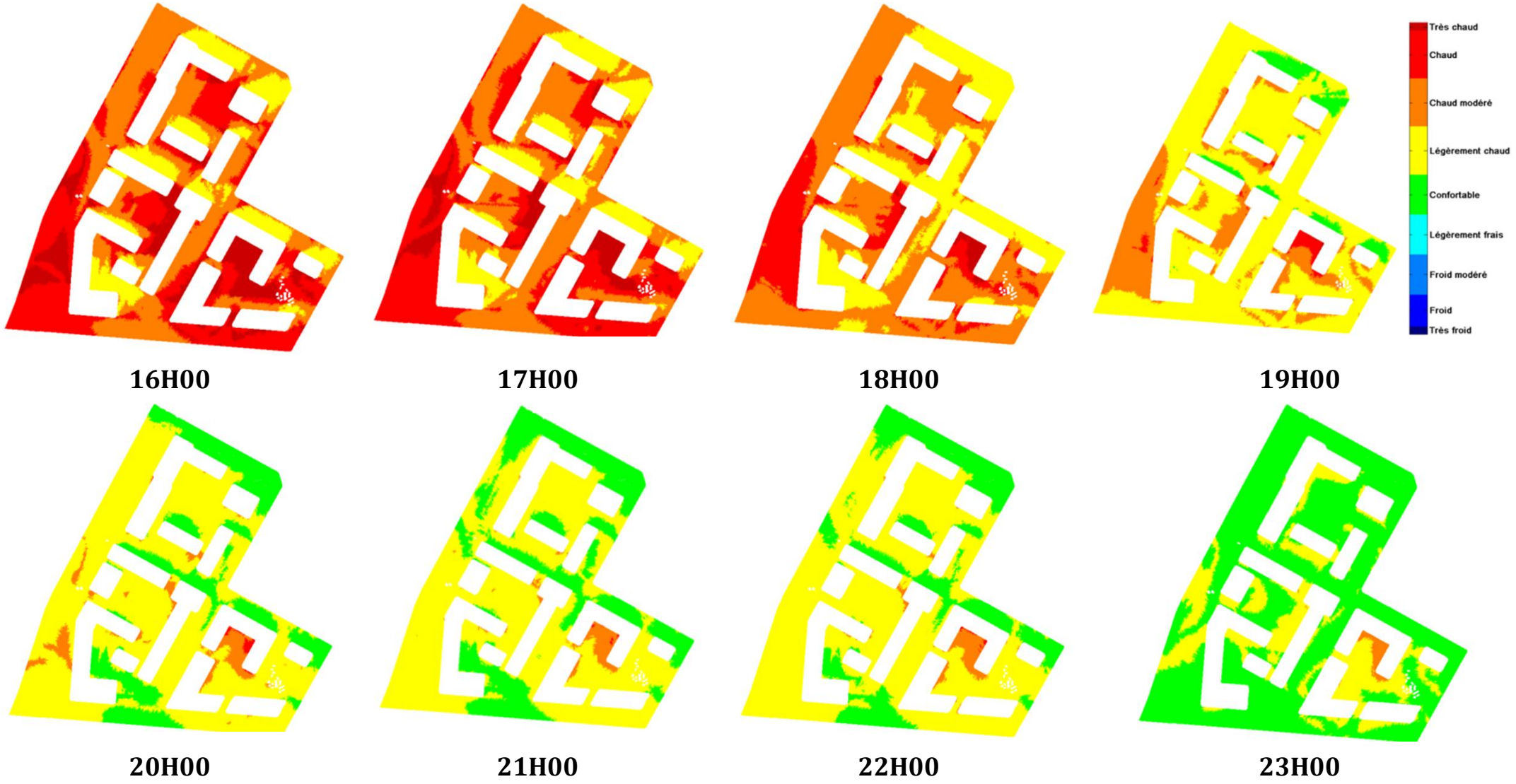
13H00



14H00



15H00



Annexe V. Figure. 6 Evolution journalière de l'indice PET pour le quartier Lyon Confluence durant la journée du 30/07/2005 (scénario B : climat Lyon).

7. Evolution journalière du pourcentage de zones présentant les différentes perceptions thermiques ressenties par un individu pour les trois cas d'études (scénario A).

Bottière scénario A	00H	01H	02H	03H	04H	05H	06H	07H	08H	09H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
très froid																								
froid																								
froid modéré	56	65	81	72	87	83	41																	
légèrement frais	44	35	19	28	13	17	57	85	49	42	37	19										4	10	6
confortable							2	14	41	43	30	33	33	24	5	5	38	52	79	78	88	91	89	94
légèrement chaud								1	9	12	27	37	47	56	69	73	54	44	20	22	12	5	1	
chaud modéré									1	3	6	10	15	17	21	18	8	4	1					
chaud												1	5	3	5	4								
très chaud																								

Annexe V. Tableau. 1 Evolution journalière du pourcentage des perceptions thermiques du quartier Bottière Chénaie pour le scénario A.

Tripode scénario A	00H	01H	02H	03H	04H	05H	06H	07H	08H	09H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
très froid																								
froid																								
froid modéré	23	27	68	59	77	67	22	3														1	2	4
légèrement frais	75	72	32	41	23	32	68	65	26	28	32	5					3	8	17	18	26	29	30	32
confortable	2	1				1	10	31	55	46	33	54	37	35	34	35	43	44	62	63	65	66	64	62
légèrement chaud								1	18	21	22	23	34	39	41	45	45	42	19	19	9	4	4	2
chaud modéré									1	5	12	16	22	19	20	18	8	4	2					
chaud											1	2	7	6	5	2	1	2						
très chaud														1	1									

Annexe V. Tableau. 2 Evolution journalière du pourcentage des perceptions thermiques du quartier Tripode pour le scénario A.

Lyon scénario A	00H	01H	02H	03H	04H	05H	06H	07H	08H	09H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
très froid																								
froid																								
froid modéré	17	23	48	34	66	57	18	7																
légèrement frais	76	72	50	64	33	41	71	62	25	19	29	5									10	22	30	30
confortable	7	5	2	2	1	2	10	31	52	39	49	24	13	6	5	7	16	28	55	59	77	70	63	64
légèrement chaud									20	29	20	32	29	35	28	34	53	52	39	38	13	8	6	6
chaud modéré									3	11	2	27	35	37	43	42	27	18	6	3				
chaud										2		10	17	16	17	13	4	3						
très chaud												2	6	6	6	4								

Annexe V. Tableau. 3 Evolution journalière du pourcentage des perceptions thermiques du quartier Lyon Confluence pour le scénario A.

8. Evolution journalière du pourcentage de zones présentant les différentes perceptions thermiques ressenties par un individu pour les trois cas d'études (scénario B).

Bottière scénario B	00H	01H	02H	03H	04H	05H	06H	07H	08H	09H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
très froid																								
froid																								
froid modéré																								
légèrement frais		6		20	32	36	6																	
confortable	100	94	100	80	68	64	94	100	95	95	73	37	7	1						7	32	37	22	87
légèrement chaud									5	5	25	44	37	27	10	8	25	37	61	86	66	61	77	13
chaud modéré											2	16	40	44	55	64	55	49	33	6	2	2	1	
chaud												3	14	18	23	21	14	11	4	1				
très chaud													4	2	12	7	6	3	2					

Annexe V. Tableau. 4 Evolution journalière du pourcentage des perceptions thermiques du quartier Bottière Chénaie pour le scénario B.

Tripode scénario B	00H	01H	02H	03H	04H	05H	06H	07H	08H	09H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
très froid																								
froid																								
froid modéré																								
légèrement frais		19	5	28	38	32	29		2	1														
confortable	100	81	95	72	62	68	71	100	94	95	69	17	14	2	2	1			2	16	57	62	57	83
légèrement chaud										4	30	63	30	40	41	44	48	53	63	71	40	37	42	17
chaud modéré											1	19	44	30	27	28	30	29	27	13	3	1	1	
chaud												1	11	25	27	23	18	15	8	1				
très chaud													1	3	3	5	2	3	1					

Annexe V. Tableau. 5 Evolution journalière du pourcentage des perceptions thermiques du quartier Tripode pour le scénario B.

Lyon scénario B	00H	01H	02H	03H	04H	05H	06H	07H	08H	09H	10H	11H	12H	13H	14H	15H	16H	17H	18H	19H	20H	21H	22H	23H
très froid																								
froid																								
froid modéré																								
légèrement frais		1		2	10	7	2																	
confortable	100	99	100	98	90	93	98	99	89	82	31	6								6	21	30	24	75
légèrement chaud								1	11	17	61	31	19	11	11	12	15	17	28	69	74	68	74	24
chaud modéré										1	8	49	41	28	18	25	39	42	53	23	5	2	2	1
chaud												11	31	44	47	44	34	33	18	1				
très chaud												1	9	7	24	19	12	8	1					

Annexe V. Tableau. 6 Evolution journalière du pourcentage des perceptions thermiques du quartier Lyon Confluence pour le scénario B.

Modélisation et simulation des microclimats urbains :
Étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort dans les espaces extérieurs. Cas des éco-quartiers

Résumé: Les éléments bâtis du tissu urbain modifient fortement les paramètres microclimatiques à l'échelle locale en perturbant la distribution de l'écoulement du vent et en amplifiant les transferts de chaleur entre les surfaces. Le bilan énergétique thermo-radiatif des espaces extérieurs est ainsi étroitement lié à la nature et à la morphologie des arrangements de bâtiments. Ce travail de recherche vise à étudier par le biais de la modélisation et de la simulation numérique la relation entre la morphologie urbaine spécifique des éco-quartiers, le microclimat et le confort ou l'inconfort thermique dans les espaces publics extérieurs.
Pour caractériser cet impact, nous avons développé une approche numérique basée sur un couplage entre un modèle CFD (*Code_Saturne* développé par EDF) et un modèle thermo-radiatif (*Solene* développé par le laboratoire CERMA). Les paramètres physiques simulés (température de surface, température de l'air, vitesse du vent et énergie cinétique turbulente) permettant d'évaluer les indices de confort du milieu extérieur ont été comparés avec les données de mesure obtenues durant la campagne expérimentale EM2PAU (Nantes, 2010-2011) afin de valider la pertinence et la robustesse du modèle numérique développé.
Nous avons par la suite appliqué le modèle numérique développé à trois configurations d'éco-quartiers représentatives d'une forme urbaine particulière afin d'analyser leurs impacts sur le confort extérieurs. Les résultats de cette étude ont été croisés avec ceux de l'étude des indicateurs physico-morphologiques menée en parallèle pour évaluer les effets de la géométrie urbaine sur les ambiances dans les espaces extérieurs. Les conclusions de cette recherche ont abouti à l'élaboration de quelques recommandations sur la conception des éco-quartiers pour les architectes et les urbanistes.

Mots clés : Morphologie urbaine, éco-quartiers, modélisation numérique, microclimat urbain, confort thermique extérieur.

Modelling and simulation of urban microclimates:
Study of the impact of urban morphology on outdoor thermal comfort. Case of Eco-districts.

Abstract: The building elements of urban fabric induce significant change in the microclimatic parameters at local scale by affecting the local wind field and increasing the heat transfers between walls, ground and air. The thermo-radiative energy balance of outdoor spaces is closely linked to the nature and morphology of the building arrangement. This research work aims to study the relationship between urban forms of eco-districts, microclimate and outdoor thermal comfort in public outdoor spaces through modeling and numerical simulations.
To characterize this impact, we developed a numerical approach based on a coupling of a CFD model (*Code_Saturne* software developed by E.D.F) and thermo-radiative model (*Solene* software developed by CERMA laboratory). The results of variables allowing evaluating comfort parameters (surface and air temperature, wind speed and turbulent kinetic energy) were compared with in situ data obtained during the EM2PAU campaign, aiming to validate the relevance and robustness of the numerical model.
Then we applied this numerical model on three eco-district configurations to analyze their impact on outdoor comfort. The physical results of this study were crossed with those of the physic-morphological indicators study that we carried out in parallel, to evaluate the effects of urban geometry on outdoor space environment. The findings of this research led in the elaboration of some recommendations on the eco-districts conception for architects and urban planners.

Key words: Urban morphology, eco-districts, numerical modeling, urban microclimate, outdoor thermal comfort.



