HAL
open science

Relations entre morphologie urbaine, microclimat et confort des piétons : application au cas des écoquartiers

Stella Tsoka

To cite this version:

Stella Tsoka. Relations entre morphologie urbaine, microclimat et confort des piétons : application au cas des écoquartiers. Architecture, aménagement de l'espace. 2011. dumas-00762674

HAL Id: dumas-00762674

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00762674v1

Submitted on 7 Dec 2012

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.

Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Master Sciences et Techniques des Environnements Urbains

Spécialité : Ambiances et Formes Urbaines

Année 2010–2011

Thèse de Master STEU

Diplôme cohabilité par l'École Centrale de Nantes, l'École Nationale Supérieure des Techniques Industrielles et des Mines de Nantes, l'École Supérieure d'Architecture de Nantes, l'Université de Nantes

Présentée et soutenue par :
Stella Tsoka
le 21 septembre 2011
à CERMA

Relations entre morphologie urbaine, microclimat et confort des piétons
Application au cas des éco-quartiers

devant le jury ci-dessous :

Président:	Pascal	Joanne	Directeur du laboratoire cerma
Examinateurs:	Jérôme	Vinet	Ingénieur d'études et de recherche au cstb
	Christian	Marenne	Enseignant-chercheur à cerma
	Bernard	Bourges	Professeur à l'emn

Directeur de mémoire:	Julien	Guilhot	Ingénieur d'études et de recherche au cstb
Laboratoire/Institution:	cstb		
Co-encadrant:	Maeva	Sabre	Ingénieur d'études et de recherche au cstb
	Jérôme	Vinet	

MASTER SCIENCES ET TECHNIQUES DES ENVIRONNEMENTS URBAINS

SPECIALITE .....

Année 200./200.

PROCES-VERBAL DE SOUTENANCE DE THESE DE MASTER

LE ..... A : .....

MME/MLE/M.....
.

A soutenu la thèse intitulée : .....

.....

Devant le jury composé de :

.....

.....

.....

.....

Président du jury :
.....

Notes : /20

Le jury de soutenance :
.....

Στον Μπουμπό *&* στην Μπουμπού μου

Table des matières

Table des Matières **vii**

Liste des Tableaux **xi**

Liste des Figures **xiii**

Remerciements **xvii**

Résumé **xix**

Abstract **xxi**

Plan de thèse **xxiii**

1 Introduction **1**
1.1 Introduction 1
1.2 Problématique 2
1.3 Objectifs de l'étude 3
1.4 L'îlot de chaleur urbain 3
1.4.1 Les causes du phénomène d'îlot de chaleur 6
1.4.2 Les effets de l'îlot de chaleur 8

2 La microclimatologie urbaine **11**
2.1 Les échelles de climatologie 11
2.2 Modes de transfert de chaleur et de masse 12
2.3 Les types de rayonnement 13

2.3.1 Le rayonnement solaire 13
2.3.2 Le rayonnement thermique 14
2.4 Les effets aérodynamiques en milieu urbain 15
2.4.1 Les couches atmosphèriques près de la surface du sol 15
2.4.2 Description de l'écoulement autour de bâtiment 18
2.4.3 Description de l'écoulement dans une rue 18
2.4.4 Les effets aérauliques en milieu urbain 19
2.5 La notion du confort thermique dans les espaces extérieurs 20
2.6 Les études sur la micro climatologie urbaine et le confort thermique . . 24

3 Les indicateurs retenus 29
3.1 Critères et Indicateurs proposés 29
3.1.1 Les Indicateurs géométriques 30
3.1.2 Les indicateurs morphologiques 31
3.1.3 Les indicateurs physiques 34
3.1.4 L'indicateur morpho-climatique "Surface totale pondérée de Facteur de Vue du Ciel (FVC)" 35

4 Application au cas des éco-quartiers 37
4.1 Présentation des trois projets urbains 37
4.1.1 L'éco-quartier Tripode 37
4.1.2 L'éco-quartier Bottière Chénaie 44
4.1.3 L'éco-quartier Lyon Confluence 46
4.2 Les logiciels utilisés 50
4.3 Analyse géométrique des trois projets 52
4.3.1 Évaluation du Facteur de Vue du Ciel 52
4.4 Analyse morphologique des trois projets 55
4.4.1 Évaluation de la compacité 55
4.4.2 Évaluation de la densité surfacique et de la densité volumique . 57
4.4.3 Évaluation de la minéralisation 59
4.4.4 Évaluation de la porosité 62
4.5 Analyse physique des trois projets 66
4.5.1 Évaluation de la durée d'ensoleillement 66
4.5.2 Évaluation de l'albédo moyen 68
4.6 Analyse morpho-climatique des trois projets 73
4.6.1 Évaluation de la surface totale pondérée de FVC 73
4.7 Discussion des résultats obtenus 74

5 Conclusion et Perspectives 79

Annexes

A Le bilan radiatif **85**
A.1 Le bilan radiatif pour une surface horizontale 85
A.2 Le bilan radiatif à l'échelle urbaine 85
A.3 Le bilan énergétique à l'échelle de la surface 86
A.4 Le bilan énergétique à l'échelle urbaine 87

B Matériaux des surfaces du projet Tripode **89**
B.1 Les matériaux des surfaces des immeubles de bureaux 89
B.2 Les matériaux des surfaces des immeubles de logement 89
B.3 Coefficient d'absorption solaire de différents matériaux 103
B.4 Propriétés thermiques des matériaux de construction 104

C Vitesse **105**
C.1 Calcul de la vitesse moyenne du vent 105

D Indices de confort thermique **107**
D.1 Les indices du confort en espace extérieure 107
D.1.1 L'indice PMV modifié : Vote Moyen Prévisible modifié 107
D.1.2 L'indice PET : Température Equivalente Physiologique 109
D.1.3 L'indice "Universal Thermal Climate Index" 110

Bibliographie **113**

Liste des tableaux

4.1 Valeurs d'albédo des surfaces du projet Tripode 43
4.2 Valeurs d'albédo des surfaces du projet Bottière Chénaie 46
4.3 Valeurs d'albédo des surfaces du projet Lyon Confluence 49
4.4 Évaluation du Facteur de Vue du Ciel et des flux d' énergie solaire diffus et global cumulés, pour les éco-quartiers Tripode ,Bottière Chénaie et Lyon Confluence 54
4.5 Évaluation de la compacité nette C_f et de la compacité utile C_{ut} pour les éco-quartiers Tripode, Bottière Chénaie et Lyon Confluence. 56
4.6 Évaluation de la densité surfacique et la densité volumique pour les éco-quartiers Tripode, Bottière Chénaie et Lyon Confluence 57
4.7 Évaluation de l'indicateur de minéralisation M pour le projet Tripode,Bottière Chénaie et Lyon Confluence 60
4.8 Évaluation de la porosité pour les éco-quartier Bottière Chénaie, Tripode et Lyon Confluence 64
4.9 Évaluation de la durée d'ensoleillement pour les éco-quartiers : Tripode, Bottière Chénaie et Lyon Confluence 66
4.10 Évaluation de l'albédo moyen pour les éco-quartiers Bottière Chénaie, Tripode et Lyon Confluence 69
4.11 Évaluation de la surface totale pondérée de FVC pour les éco-quartiers Bottière Chénaie, Tripode et Lyon Confluence 73

B.1 Coefficient d'absorption solaire de différents matériaux 103
B.2 Propriétés thermiques des matériaux de construction 104

C.1 Parametres de rugosite de terrains 106

Table des figures

1.1 L'îlot de chaleur urbain 4
1.2 Principales composantes de l'atmosphère urbaine 5
1.3 L'albédo des matériaux de contruction 7

2.1 Le rayonnement solaire 13
2.2 Représentation des échelles climatiques et atmosphériques 16
2.3 Répartition verticale de la couche limite urbaine 17
2.4 Ecoulement autour d'un bâtiment 18
2.5 Regimes d'ecoulements aérauliques dans la rue 19
2.6 Représentation graphique de l'effet de canalisation, Venturi, Wise, barre et coin 21
2.7 Différents profils de rue 25

3.1 Facteur de vue du ciel 30
3.2 Calcul du facteur de vue du ciel pour les trois types de quartier proposés 31

4.1 Plan masse du projet Tripode 38
4.2 La répartition des bâtiments de bureaux et de logements à Tripode . . 39
4.3 Le modèle géométrique 3-D d'éco-quartier Tripode 39
4.4 La répartition des matériaux pour les façades du projet Tripode 41
4.5 La nature des revêtements des façades de bureaux de Tripode 42
4.6 Le plan masse de Bottière Chénaie 44
4.7 Le modèle géométrique 3-D d'eco-quartier Bottière Chénaie 44
4.8 Vue Sud-est du projet Bottière Chénaie et vue des espaces de circulation des usagers 45

4.9 Localisation du projet Lyon Confluence et répartition de deux phases de construction 47
4.10 L'aménagement urbain de la deuxième phase de construction sur Lyon Confluence 48
4.11 Le modèle géométrique 3-D d'eco-quartier Lyon Confluence 48
4.12 Définition du ciel sur Solène 51
4.13 Le Facteur de Vue du Ciel pour les trois éco-quartiers, évalué sur le logiciel Solène 53
4.14 Évaluation de la densité volumique en relation avec les indicateurs de compacité 58
4.15 Évaluation de la densité surfacique en relation avec le FVC 59
4.16 Relation entre la densité surfacique et le taux des surfaces minéralisées au sein de Tripode,de Bottière Chénaie et de Lyon Confluence 60
4.17 La rose des vents de Nantes pour les années 1997–2007 62
4.18 La rose des vents de Lyon 63
4.19 Relation entre la durée d'ensoleillement en fonction du FVC pour les quartiers Tripode, Bottière-Chénaie et Lyon Confluence 67
4.20 Évaluation de flux solaire diffus, direct et global pour un élément de maille d'une surface de toiture à Bottière Chénaie 70
4.21 Représentation graphique pour le flux d'énergie global incident pour les éco-quartiers Bottière-Chenaie, Tripode et Lyon Confluence 71
4.22 Évaluation de la surface totale pondérée de FVC pour le projet de bottière Chénaie, de Tripode et de Lyon Confluence 74

A.1 Transfert des flux d'énergie en surface 86

B.1 La répartition des immeubles des bureaux sur le terrain du projet de Tripode 91
B.2 Les surfaces des bureaux construites en principe de voile percé 92
B.3 Les matériaux des surfaces Nord de l'immeuble $B1a$ et $B1b$ et de la surface Nord de $B2b$ de Tripode 93
B.4 Les matériaux des surfaces Est de l'immeuble $B2a$ et $B3b$ de Tripode. . 94
B.5 Les matériaux des façades Est des immeubles 2,3 et 4 de logement à Tripode 95
B.6 Les matériaux de la façade Nord du logement 2 et dela façade Sud du logement 4 à Tripode 96
B.7 Les matériaux des façades Est des immeubles 2,3 et 4 de logement à Tripode 97
B.8 Les matériaux des façades Ouest des immeubles des logements 2,3 et 4 à Tripode 98
B.9 Les matériaux des façades Sud de l'immeuble du logement 1 à Tripode 99

B.10 Les matériaux des façades Nord, Ouest et Sud de l'immeuble du logement 1 à Tripode 100
B.11 Les matériaux des façades des logements 2,3 et 4 qui sont perpendiculaires au canal, à Tripode 101
B.12 Les matériaux des façades des lofts à Tripode 102

D.1 Le processus du calcul d'UTCI 112

Remerciements

En premier lieu, je remercie chaleureusement Julien Guilhot, mon directeur de stage pour son aide et son soutien précieu à l'ébaloration de cette recherche. Je tiens aussi à remercier chaleureusement Jérôme Vinet et Maeva Sabre, co-encadrants de mon stage qui ont toujours montré une disponibilité et ont apporté des suggestions très intéressantes. Je remercie également Khaled Athamena, doctorant et co-encadrant de ce stage, pour son aide et ses conseils importants pendant ces six mois.
J'adresse mes remerciements aux membres du jury qui ont pris le temps d'examiner ce rapport et qui ont accepté l'invitation d'être présents à cette soutenance.
Je remercie également les membres du laboratoire CERMA, Marjorie Musy et Christian Marenne pour leur disponibilité et leur conseils toujours éclairés. J'adresse des remerciements chaleureux à Pascal Joanne pour ses encouragements, son accueil et son soutien pendant cette année de Master.
Je remercie l'ensemble du personnel du CSTB qui a participé de près ou de loin au bon déroulement de ce stage.

Stella Tsoka
Nantes, le 7 novembre 2011

Résumé

Les grandes agglomérations sont de plus en plus souvent accusées de provoquer des modifications microclimatiques dont la plus importante et connue sous le nom de l'effet d'îlot de chaleur urbain. La chaleur excessive entrainée pendant la période estivale peut provoquer à la fois une consommation énergétique accrue pour des raisons de climatisation et induire de l'inconfort thermique aux usagers. Les urbanistes, les ingénieurs et les architectes sont face à l'enjeu d'élaborer des méthodes afin de diminuer l'impact de l'urbanisation sur le microclimat et sur la sensation thermique des piétons. Dans le cadre actuel, cette recherche s'intéresse à étudier la manière avec laquelle la morphologie urbaine influence les conditions climatiques des villes ainsi que les sensations thermiques des piétons. L'étude de la relation entre la morphologie, le microclimat et l'ambiance thermique est basée sur le calcul d'un système d'indicateurs géométriques, morphologiques, physiques et morpho-climatiques, caractéristiques des milieux urbains. Leur évaluation nous permet de caractériser la morphologie des trois projets réels d'éco-quartier : Tripode et Bottière Chénaie sur Nantes et le projet de Lyon Confluence. Il s'agit de trois nouveaux quartiers dont l'aménagement est très différent. L'évaluation des indicateurs a été effectuée sur les logiciels Gambit et Solène. Une analyse comparative en fonction de ces facteurs retenus, nous permet de définir l'impact au niveau des trois géométries sur les conditions microclimatiques et par conséquent sur le confort thermique dans les espaces extérieurs. Cette dernière partie fait ressortir des résultats de l'influence de la morphologie sur le microclimat et l'ambiance thermique.

Mots-clés : Morphologie urbaine, Indicateurs, Microclimat urbain, Confort thermique, éco-quartiers.

Abstract

The large urban agglomerations are quite often held responsible for a great deal of negative impact on the micro-climatic changes, more precisely the so called "urban heat island". The rise of the temperature, a consequence of the latter phenomenon, apart from the inconvenience that the residents undergo, results in an increase in terms of energy consumption dedicated to air-conditioning. The urbanists, along with the civil engineers and the architects have therefore to tackle with a new project : to implement new methods that will mitigate the negative impact of the urban agglomeration on the micro-climate, and therefore improve the conditions that the urban residents' experience. In the current work, we are focused in studying the correlation between the urban morphology, the micro-climate and the *thermal ambiance*. In order to do so, a calculation of a set of indices is performed, with the aid of dedicated software packages (Solene and Gambit) and by analysing real data taken from three different eco-quartiers : the "Tripode" and the "Bottière Chénaie" in the city of Nantes and the "Lyon Confluence" in the city of Lyon, France . A comparative analysis allows us to deduce the impact of the different quartiers' geometries on the micro-climate conditions as well as to the thermal comfort in exterior spaces. The last part of the study is dedicated to quantify the results, demonstrating the differences in the micro-climate and the thermal comfort, due to the varying geometrical (morphological) aspects of the analyzed agglomerated areas.

Keywords : Urban Morphology, Indicators, Micro-climate, Thermal comfort, sustainable urban quarters.

Plan de thèse

Dans le chapitre 1 (page 1) nous exposons la problématique qui nous a incité à étudier la morphologie urbaine en relation avec le microclimat de villes. Nous présentons les objectifs de notre analyse ainsi que le contexte de notre recherche.

Dans le chapitre 2 (page 11), les paramètres qui définissent le microclimat urbain sont etudiés. Les différents types de transfert de chaleur et de masse sont presentées. Leur étude constitue la base de compréhension du microclimat urbain. Ensuite, nous étudions les effets radiatifs et aérodynamiques qui ont lieu dans les villes. La notion du confort thermique et les éléments du microclimat qui l'influence seront également présentés. Des'études scientifiques, menées sur le domaine de la micro climatologie urbaine sont présentées.

Dans le chapitre 3 (page 29) nous présentons le système des indicateurs retenus pour notre analyse. Nous précisons leur définition et leurs valeurs de référence. Leur évaluation nous permettra de caractériser la morphologie des éco-quartiers Tripode, Bottière Chénaie et Lyon Confluence.

Dans le chapitre 4 (page 37) nous allons présenter trois sites d'étude : Le quartier Tripode, le quartier Bottière Chénaie et le quartier Lyon Confluence. Nous allons analyser les trois projets urbains en fonction des indicateurs morphologiques, géométriques, physiques et morpho-climatiques exposées précédemment. Une analyse des résultats obtenus est effectuée afin de comparer et de caractériser la morphologie des trois tissus. En tenant compte l'analyse bibliographique sur les études déjà faites, nous allons discuter de l'impact des géométries étudiées sur le microclimat urbain.

Une conclusion dans le chapitre 5(page 79) contient les points majeurs et les résultats principaux de notre étude.

CHAPITRE 1

Introduction

Dans ce premier chapitre nous allons exposer la problématique qui nous a incité à étudier la morphologie urbaine en relation avec le microclimat des villes. Nous allons établir les objectifs de notre analyse ainsi que le contexte de notre recherche.

1.1 Introduction

La population urbaine augmente d'une manière constante et elle représente aujourd'hui la plus grande partie de la population mondiale. Les grandes agglomérations de nos jours sont souvent accusées de développer dans leur milieu plusieurs problèmes microclimatiques. Ils sont principalement dus aux activités humaines ainsi qu'à la transformation de la morphologie du tissu urbain. Le plus connu de ces problèmes est l'effet d'îlot de chaleur urbain. Ce phénomène implique une augmentation excessive des températures au centre ville en comparaison avec les températures ambiantes relevées en zones rurales. Les observations ont démontré que les températures aux centres villes peuvent atteindre de 4°C à 10°C de plus que dans les régions rurales [Akbari 92].On est alors en face d'une modification importante des paramètres microclimatiques. Les changements provoqués résultent d'une interaction complexe entre différents paramètres. Plus spécifiquement, les phénomènes physiques comme le rayonnement solaire, l'écoulement du vent et l'humidité interagissent avec les éléments qui constituent la ville comme les aménagements urbains, les matériaux de construction ainsi que l'activité humaine qui se développe en son sein.

Plusieurs études menées sur la climatologie urbaine ont montré que l'effet d'îlot de chaleur peut avoir des retombées néfastes sur l'ambiance extérieure puisque il peut

influencer la ventilation à l'échelle régionale et par conséquent la fraicheur du milieu urbain. De plus, l'augmentation de la température de l'air ambiant en relation avec les gaz à effet de serre émis par les activités humaines détériorent la qualité des ambiances dans le milieu urbain. Autrement dit, l'effet d'îlot de chaleur augmente le risque d'inconfort des habitants voire le taux de mortalité en cas de grandes vagues de chaleur[Rebetez 06]. D'autre part, cette augmentation excessive des températures observées dans les villes, entraine également de fortes consommations énergétiques pour des raisons de climatisation de l'air.

Face à cet enjeu climatique, les études sur le microclimat urbain se concentrent sur la définition de stratégies qui vont atténuer l'effet d'îlot de chaleur d'une part et d'autre part, mener à l'amélioration des ambiances et du confort thermique en espaces extérieurs. Dans le cadre de notre recherche, nous allons étudier la morphologie de trois nouveaux quartiers en France, caractérisés comme "éco-quartiers". L'éco-quartier est une opération d'aménagement durable exemplaire qui vise à améliorer la qualité de vie de citoyens. Il s'agit d'une nouvelle manière de concevoir la ville tout en prenant en considération un grand nombre de problématiques sociales, économiques et environnementales. Un éco-quartier doit intégrer en amont de sa conception de nombreux critères parmi lesquelles l'utilisation de matériaux écologiques pour la construction, l'implantation des énergies renouvelables et l'amélioration du microclimat et de la qualité d'ambiance thermique en espaces extérieurs. Aujourd'hui, plusieurs pays comme la France, la Suède, l'Angleterre et le Portugal, ont adopté les éco-quartiers comme une nouvelle approche d'urbanisation [Ministère 11].

1.2 Problématique

La transformation de la morphologie urbaine pendant le processus d'urbanisation est un paramètre important quant à l'évolution de l'îlot de chaleur. La configuration des quartiers urbains, les propriétés thermiques et l'imperméabilité des matériaux de construction ainsi que la perte des espaces verts sont certains facteurs qui entrainent la modification du microclimat et l'élévation des températures.

Dans le cadre de notre recherche, on s'intéresse à l'amélioration des ambiances en relation avec le confort thermique des usagers en espaces extérieurs, au sein des éco-quartiers. La conception d'un éco-quartier a comme objectifs entre autres, l'amélioration de la qualité de vie des usagers. Nous cherchons ainsi à analyser de quelle manière la morphologie de trois nouveaux projets urbains agit sur les conditions microclimatiques et comment le confort thermique est affecté par cette modification.

L'étude morphologique en relation avec l'analyse et la caractérisation du confort thermique sera une aide à la décision quant à la planification et l'aménagement urbain. La compréhension du confort thermique dans les espaces extérieurs est un paramètre de base pour la conception durable de la ville.

1.3 Objectifs de l'étude

La présente recherche vise à étudier les caractéristiques morphologiques du milieu urbain en relation avec le microclimat et le confort thermique des piétons aux espaces extérieurs. Nous allons effectuer notre étude au sein de trois quartiers urbains sur la ville de Nantes et sur Lyon. Pour répondre à la problématique identifiée précédemment, les travaux comprennent les étapes suivantes :

- Analyse bibliographique en fonction des études scientifiques effectuées sur la morphologie urbaine, le microclimat et le confort thermique.
- Étude des éco-quartiers Tripode, Bottière Chénaie et Lyon Confluence en utilisant un certain nombre d'indicateurs morphologiques, géométriques, physiques et morphoclimatiques.
- Étude de la relation entre les indicateurs retenus et les caractéristiques microclimatiques qui influencent le confort thermique des usagers.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons divisé notre étude en deux parties.
La première partie du mémoire présente le contexte général du phénomène d'îlot de chaleur ainsi que les modifications induites sur les conditions microclimatiques en milieu urbain. Sur la base de la problématique, nous allons présenter les éléments naturels du microclimat urbain ainsi qu'un nombre d'études menées afin d'étudier la relation de la morphologie urbaine, le climat des villes et la notion du confort thermique. Ensuite,nous allons présenter le système des indicateurs géométriques, morphologiques, physiques et morphoclimatiques dont le calcul nous permettra d'étudier trois sites urbains.
La deuxième partie du memoire traite l'experimentation des trois sites urbains qui ont été choisis pour notre analyse. Nous allons étudier la morphologie urbaine à travers les résultats du calcul des indicateurs morphologiques retenus. Ensuite, nous allons expliquer la relation de la morphologie urbaine avec les conditions microclimatiques pour les trois sites. En tenant compte des études scientifiques déjà effectuées, nous allons discuter de l'impact de la morphologie des trois eco-quartiers sur le confort thermique des usagers en espaces extérieurs.

1.4 L'îlot de chaleur urbain

L'effet d'îlot de chaleur urbain est un phénomène largement étudié dans le cadre de la climatologie urbaine. Il est l'élément principal du microclimat des villes. Il s'agit d'une observation de températures élevées en milieu urbain par rapport à celles mesurées dans les espaces ruraux environnants. L'effet d'îlot de chaleur est alors défini comme l'élévation de température localisée en milieu urbain par rapport aux zones rurales voisines [Unger 04]. La figure 1.1 représente l'évolution spatiale de la température qui atteint son pic au niveau de l'agglomération urbaine.

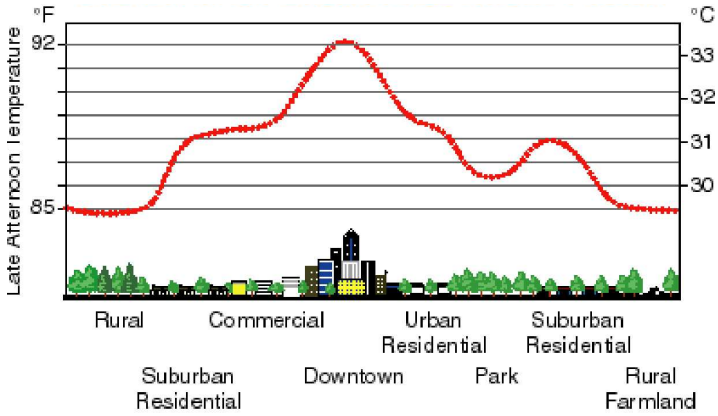


Fig. 1.1 – L'îlot de chaleur urbain. Le phénomène est caractérisé par une élévation de température localisée en milieu urbain par rapport aux zones rurales voisines [Bozonnet 05].

L'évolution de la température est en forme des valeurs concentriques, semblable à un îlot, ce qui explique le nom du phénomène. En plus, l'écart de température entre le centre ville et la région rural dépendra des caractéristiques de la ville comme la densité urbaine, la géométrie des rues etc [Cermak 95].

L'effet d'îlot de chaleur peut avoir des effets positifs pendant l'hiver en ce qui concerne les dépenses pour chauffer l'intérieur des édifices. Par contre, dans les climats chauds, l'augmentation de la température extérieure entraine une élévation de la demande énergétique de climatisation [Akbari 92]. L'effet d'îlot de chaleur n'a pas une intensité constante tout au long de la journée. L'intensité du phénomène ainsi que les facteurs qui l'influence ont été largement étudiés par les chercheurs. L'îlot de chaleur urbain est caractérisé par une variabilité journalière puisque son intensité est plus forte pendant la nuit. Plus spécifiquement, l'intensité maximum se situe le soir, après le coucher du soleil. De plus, l'îlot de chaleur urbain s'affaibli avec le vent et disparait pour des vitesses supérieures à 11 m/s. En outre, la nébulosité joue un rôle important quant à l'affaiblissement du phénomène puisque les nuages modifient le refroidissement radiatif nocturne. Les nuages absorbent une partie de rayonnement infrarouge émis par les surfaces de villes et ils la réemetent vers la Terre empechant ainsi le refroidissement nocturne. [Pigeon 07]. L'intensité du phénomène est également liée avec la population du site étudiée. Plus le quartier est dense et les formes urbaines compactes, plus la modification du lieu est importante provoquant ainsi une augmentation de la température de l'air ambiant. Les chercheurs ont étudié la relation de ces effets en réalisant des mesures des paramètres microclimatiques sur 10 villes de Canada dont la population varie de 1000 à 2 million d'habitants. Les mesures ont été menées le soir, trois heures après la couché du soleil où l'îlot de chaleur atteint son intensité maximale. Il a été montré que la différence de température entre la zone urbaine et la zone rurale est de 2°C pour les

villes de 1000 habitants et de 12°C pour les villes de 2 million d'habitants. Il a ensuite proposé [Oke 73] une relation empirique (1.1) qui lie l'intensité du phénomène $\Delta T_{\text{u-r}}$ avec la population P et la vitesse du vent U.

$$\Delta T_{\text{u-r}} = \frac{0.25 P^{0.25}}{U^{0.5}} \tag{1.1}$$

L'îlot de chaleur urbain peut être examiné à trois différents niveaux au sein d'une ville. On constate trois niveaux d'observation à l'échelle verticale [Cermak 95]. Le premier est l'îlot de chaleur de surface, dénommé en anglais *Surface Heat Island* (SHI). Il est possible de noter certaines zones de milieu urbain où la température de surfaces est plus élevée en comparaison avec les autres surfaces de la ville. La deuxième échelle d'observation est celle de la canopée urbaine appelé îlot de chaleur de la canopée urbaine ou en anglais *Urban Canopy Layer Heat Island* (UCLHI). La canopée urbaine est une sous-couche atmosphérique, définie par la hauteur moyenne des constructions du milieu urbain qui font obstacle aux écoulements du vent. C'est la couche dans laquelle la plupart des activités humaines se déroulent [Bozonnet 06].

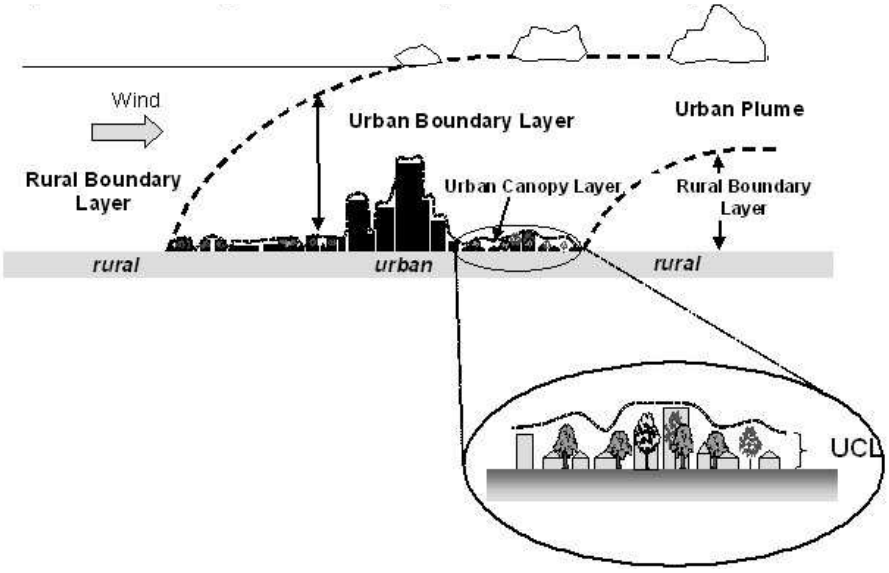


Fig. 1.2 – Principales composantes de l'atmosphère urbaine. La canopée urbaine (UCL) correspond à la hauteur moyenne des constructions du milieu urbain. La couche limite urbaine (UBL), située au-dessus de la canopée urbaine, a une épaisseur qui peut atteindre plusieurs centaines de mètres [Bozonnet 06].

La troisième échelle est celle de la frontière atmosphérique dans laquelle on observe l'îlot de chaleur de la couche limite urbaine, dénommé en anglais *Boundary Layer Heat Island* (BLHI). La couche limite urbaine, située au-dessus de la canopée urbaine, a une

épaisseur qui peut atteindre plusieurs centaines de mètres. Sa structure est complexe du fait que les zones urbaines ne présentent pas une rugosité homogène sur toute leur étendue.

La canopée urbaine et la couche limite urbaine font partie de la couche limite atmosphérique. Elles seront présentés en detail dans le chapitre 2. Les îlots de chaleur de la canopée urbaine et de la couche limite urbaine font référence à la température de l'air ambiante. Les trois échelles d'observation sont directement liées l'une avec l'autre. Néanmoins, cette étude sera concentrée sur l'échelle de canopée urbaine dans la mesure où les activités humaines et les infrastructures qui influencent le phénomène et par conséquent le confort thermique font partie de cette échelle. La figure 1.2 montre les couches atmosphériques décrites précédemment.

1.4.1 Les causes du phénomène d'îlot de chaleur

La présence d'îlot de chaleur urbain peut être expliquée par l'existance de l'environnement urbain. Son évolution est un phénomène complexe qui repose sur la contribution de plusieurs facteurs différents.

Tout d'abord, la morphologie des villes et la densité urbaine jouent un rôle très important en ce qui concerne les changements microclimatiques dans les villes. Les rues étroites, les grands bâtiments ainsi que la forte densité urbaine nuisent à la bonne ventilation de centre ville, un élément nécessaire afin de garantir la fraîcheur en ville. La géométrie de rues étroites favorise l'accumulation et le piégeage de rayons solaires du fait des inter-réflexions sur les surfaces ce qui empêche le refroidissement de la rue.

Une étude sur trente villes américaines et européennes, de lattitude moyenne a montré que l'effet d'îlot de chaleur nocturne est lié à la morphologie urbaine. Plus spécifiquement l'intensité du phénomène est en relation avec la géométrie des rues et le Facteur de Vue du Ciel. Le Facteur de Vue du Ciel(FVC) est un indicateur géométrique qui caractérise le champ de vision et l'ouverture du site vers le ciel.

Une faible valeur de FVC résulte du piégeage de rayons de grandes longueurs d'ondes, émis par les surfaces pendant le soir et ainsi, les rues ne se refroidissent pas. Une valeur élevée de FVC facilite l'émission des rayons solaire sous forme d'infrarouge diminuant ainsi l'intensité du rechauffement nocturne [Oke 88]. Nous allons présenter ce facteur en détail dans le chapitre 3.

Un autre facteur qui accentue l'augmentation de la température dans les espaces urbains est la modification des propriétés thermiques des matériaux de construction. Les matériaux des façades, des toitures, des rues et des trottoirs forment l'enveloppe de la ville [Giguère 09]. Chaque matériau est caractérisé par un nombre de propriétés thermiques.Les matériaux utilisés en milieu urbain comme l'asphalte et le béton ont des propriétés thermiques qui favorisent le stockage d'énergie solaire. L'énergie emmagasinée est ensuite réémise vers l'atmosphère, augmentant ainsi la température de l'air

ambiant pendant la nuit. Les propriétés thermiques des matériaux utilisés pendant la construction sont mentionées dans l'annexe B.

L'albédo est un autre paramètre qui influence le phénomène d'îlot de chaleur. Chaque matériau a une valeur d'albédo qui modifie la fraction d'énergie solaire réfléchie ou absorbée par la surface. Les matériaux utilisés en ville sont généralement de bas albédos, une grande partie d'énergie solaire incidente est absorbée au lieu d'être réfléchie, augmentant ainsi la température des surfaces. Les propriétés thermiques en relation avec l'albédo influencent alors significativement l'effet d'îlot de chaleur puisque l'énergie solaire emmagasinée est ensuite réémise vers l'atmosphère sous forme d'infrarouge [Santamouris 11]. La figure 1.3 montre les valeurs d'albédo pour certain matériaux typiques dans le milieu urbain.

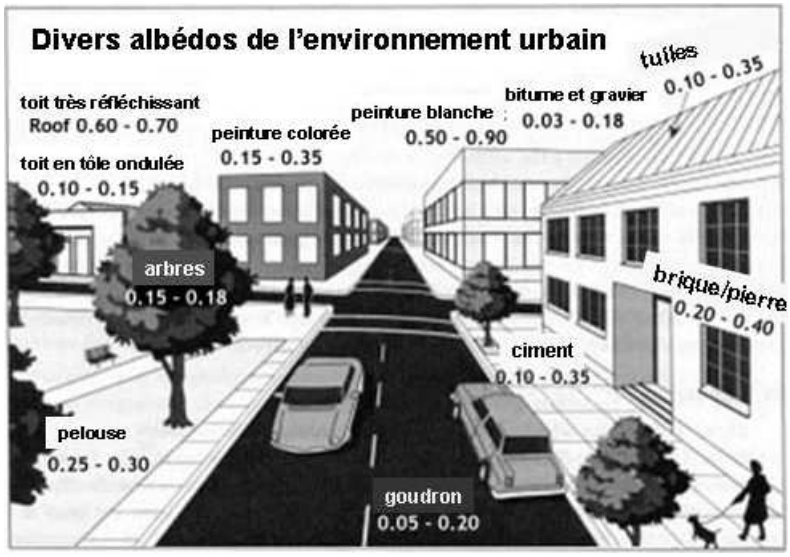


Fig. 1.3 – L'albédo de l'environnement urbain [Bozonnet 06].

L'utilisation des matériaux des surfaces de haute réflectivité et émissivité d'énergie infrarouge peut contribuer à l'attenuation de l'effet d'îlot de chaleur. La haute réflectivité amene à la diminution du rayonnement solaire absorbé et par conséquent la température de surface reste basse. La haute émissivité qui caractérise ces matériaux empêche le stockage de la chaleur. Il s'avère que l'utilisation des matériaux avec ces caractéristiques thermiques contribue à la réduction de la température de l'air ambiante dans le milieu urbain [Santamouris 01].

La perte progressive des espaces verts dans la ville est un paramètre à prendre en compte dans l'étude de l'îlot de chaleur urbain. La végétation joue un rôle important quant à la modification du microclimat du fait des phénomènes d'évapotranspiration et d'ombrage. Pendant l'évapotranspiration, l'air ambiant au voisinage de l'arbre, se

refroidit en cédant une partie de sa chaleur pour permettre l'évaporation. Les feuilles des arbres réduisent les apports solaires incidents, diminuant ainsi l'absorption d'énergie et la température des surfaces [Robitou 06, Vinet 00]. La contribution importante de la végétation sur la fraicheur des villes est évident si on prend en compte qu'un arbre qui transpire 450 litres d'eau a un effet de refroidissement égal à celui de cinq climatisateurs qui fonctionnent au total 20 heures par jour [Johnston 04]. Finalement la chaleur anthropique issu des activités humaines en relation avec la production de gaz à effet de serre contribuent à la détérioration de la qualité de conditions microclimatiques. L'activité humaine, les véhicules et l'activité industrielle sont des sources de chaleur émises en milieu urbain. Ces sources émettent également des gaz à effet de serre qui participent au réchauffement de l'atmosphère puisque ils piègent l'énergie solaire, bloquant ainsi le refroidissement de l'air ambiant [Sailor 04].

1.4.2 Les effets de l'îlot de chaleur

L'effet d'îlot de chaleur est un élément caractéristique de villes d'aujourd'hui. Il peut être considéré comme bénéfique en période d'hiver vu que les besoins de chauffage sont diminués. Par contre, l'augmentation excessive des températures en été, en comparaison avec celles obtenues en zone rurale proche entraine des élévations au niveau de consommation énergétique pour des raisons de climatisation. Dans la littérature, plusieurs études démontrent l'ampleur du problème et mettent en évidence la hausse de demande énergétique, surtout pendant les jours estivaux les plus chauds. Les dissipations thermiques des bâtiments participent de façon importante à l'amplification du réchauffement en milieu urbain. La densification des villes en relation avec l'accroissement général des consommations énergétiques résultent de l'augmentation de l'énergie dissipée. Une étude menée sur des villes américaines dont la population est supérieure de 100000 personnes, dans le but de trouver une relation entre l'augmentation de température et la demande énergétique. Il a été montré que les citoyens consommaient de 1.5 à 2% plus d'énergie pour chaque 1°C augmentation de la température. En outre, les dernières décennies, la température aux centres villes des Etats Unis a augmenté de près de 2°C à 4°C, ce qui se traduit à une consommation énergétique augmentée de 3 à 8%[Akbari 92]. Dans le même esprit, les résultats d'une étude réalisée au centre ville d'Athènes ont montré l'impact de l'îlot de chaleur sur la demande énergétique pour la climatisation et pour le chauffage d'un bâtiment représentatif. L'intensité d'îlot de chaleur d'Athènes est très forte et peut atteindre les 10°C. Il a été mis en évidence que la demande énergétique afin de climatiser l'intérieur de l'immeuble a été doublée, voire triplée pour la période du point où la température atteint sa valeur maximale. Par contre, l'effet d'îlot de chaleur avait un impact positif pendant l'hiver, puisque le charge thermique nécessaire pour chauffer les pièces a été diminué de près de 30% en comparaison avec les bâtiments qui se situent aux espaces ruraux environnants [Santamouris 01].

En dehors des conséquences au niveau économique, le changement climatique en

corrélation avec l'effet d'îlot dans les villes, peut amener à la dégradation de qualité de confort thermique ainsi qu'à des risques sérieux pour la santé publique. Les personnes âgées, défavorisées ou ayants des maladies chroniques deviennent plus vulnérables face à ce problème. Des analyses ont été faites afin de trouver la relation entre l'augmentation de la température et la surmortalité due à la chaleur excessive. Une étude épidémiologique a été ménée en Italie après les grandes vagues de chaleur de 2003. Pendant les trois mois d'été, les températures maximales ont dépassé les $37°C$ ce qui a contribué à une élévation de mortalité, surtout de citoyens âgés et vulnérables. Les analyses ont duré trois mois et les résultats ont mis en évidence une élévation de nombre de décès en comparaison avec ceux de 2002, pour la période estivale. Il est à signaler que les plus vulnérables étaient les personnes de plus de 75 ans dont le taux de mortalité a augmenté à 21.3% au lieu de 16% en 2002 [Conti 05]. L'intérêt majeur de la lutte contre l'îlot de chaleur reste alors de diminuer l'inconfort des piétons en espaces extérieurs ainsi que d'éviter les risques sanitaires liés aux canicules et vagues de chaleurs en milieu urbain. En observant les causes du phénomène, des nombreuses solutions pourraient être envisageables au sein de grandes villes. La végétalisation des espaces urbains par l'implantation des parcs, des arbres ou des toitures vertes pourrait être certains mesures proposées. Il est important de réduire les sources de la chaleur anthropique provoquée par la consommation énergétique de bâtiments ainsi que par les véhicules et l'industrie. Dans le cadre de propositions de mesures contre l'îlot de chaleur, la proposition d'intervention afin d'améliorer la morphologie des infrastructures urbaines semble aussi pertinente. Notre étude sera concentrée à cette dernière proposition. Nous allons analyser les caractéristiques morphologiques du milieu urbain (géométrie, formes urbaines, propriétés de matériaux) en relation avec les conditions microclimatiques, liées à l'îlot de chaleur et au confort thermique des usagers.

CHAPITRE 2

La microclimatologie urbaine

Dans ce chapitre, nous allons étudier les paramètres qui définissent le microclimat urbain. Nous allons présenter les différents types de transfert de chaleur et de masse dont l'étude constitue la base de la compréhension du microclimat urbain. Ensuite, nous allons étudier les effets radiatifs et aérodynamiques qui ont lieu dans les villes. La notion du confort thermique et les éléments du microclimat qui l'influence seront également présentés. Finalement, nous allons analyser un nombre d'études scientifiques qui ont été menées sur le domaine de la micro climatologie urbaine.

2.1 Les échelles de climatologie

Avant d'analyser les éléments du microclimat, il est important de mentionner les quatre différentes échelles d'étude en climatologie [Vinet 00, CSTB 95] :

- L'échelle global ou échelle "macro" qui se situe en quelques 10^3 kilomètres loin de la surface terrestre qui correspond aux phénomènes définitifs pour les principales variations climatiques et saisonnières.
- L'échelle régional ou l'échelle "méso" qui se prolonge jusqu'à quelques centaines de kilomètres. Les reliefs et l'emplacement de la région par rapport aux déplacements d'air affecte le climat à ce niveau.
- L'échelle locale qui se prolonge à quelques dizaines de kilomètres correspond aux changements climatiques régionaux créés par la présence d'une vallée et de la mer. C'est l'échelle des modifications de régime du vent et des brises thermiques.
- L'échelle microclimatique est limitée à quelques centaines de mètres. C'est l'échelle où l'intervention de l'homme peut impacter les conséquences climatiques.

Notre étude de la relation de la morphologie urbaine avec le climat des villes et le confort thermique des usagers s'effectue à l'échelle microclimatique.

2.2 Modes de transfert de chaleur et de masse

La compréhension des processus avec lesquels l'énergie est transférée, constitue la base d'étude et d'analyse de la climatologie urbaine. Les flux énergétiques qui ont lieu sur une surface et influencent son bilan thermique sont les suivants :

- Le flux convectif : La convection est un mode de transfert d'énergie qui implique un déplacement d'un courant d'air dans le milieu, du fait d'une différence de densité de l'air. En outre, le changement de température de l'air influence sa masse volumique, provoquant ainsi des déplacements de masses. Dans les grandes villes, le vent est un paramètre important à étudier vu que les transferts de chaleur, des polluants et d'humidité ont lieu à travers les mouvements des masses d'air.
- Le flux conductif : L'échange d'énergie par conduction est un mode de transfert thermique lié à une différence de température entre deux régions d'un même fluide ou solide, ou entre deux milieux en contact. Le phénomène de conduction se réalise sans déplacement de molécules, par opposition à la convection. Selon la loi de Fourier, la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température T. La conductivité thermique lambda, exprimée en W/m/K est le coefficient de cette proportionnalité et l'énergie transféré est exprimé par la formule (2.1).

$$\overrightarrow{\phi} = -\lambda \overrightarrow{\nabla} T \tag{2.1}$$

- Le flux de chaleur latente : La chaleur latente correspond à l'énergie échangée lors d'un changement de phase d'un corps. Elle est associée à la quantité de vapeur d'eau introduite dans l'atmosphère. Dans le milieu urbain, le flux d'énergie latente est influencé par la présence de la végétation à travers le phénomène d'évapotranspiration.
- Le flux radiatif : Le transfert d'énergie par rayonnement correspond au transfert d'énergie d'un corps à un autre par ondes électromagnétiques donc sans contact directe. L'étude des échanges radiatifs nécessite la prise en compte du rayonnement solaire, du rayonnement du ciel et du rayonnement thermique des surfaces.

2.3 Les types de rayonnement

2.3.1 Le rayonnement solaire

Le soleil, émet une énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Le rayonnement émis se compose d'un spectre continu allant des ultra-violets à l'infrarouge en passant par le visible. En traversant l'atmosphère, les gaz et les molécules absorbent certaines bandes de l'ultra-violet et de l'infrarouge. Ainsi le rayonnement solaire qui arrive à la surface de la terre comprend : 5% d'UV, 40% de lumière visible et 55% d'infrarouge, porteurs essentiels de l'énergie thermique [Bozonnet 05]. Au niveau énergétique, la constante solaire de 1350 W/m^2 est l'énergie qui arrive aux couches supérieures de l'atmosphère. L'effet de la traversée de l'atmosphère qui réfléchit, absorbe ou diffuse des parties de ce rayonnement solaire réduit considérablement la valeur qui arrive a la surface du sol. Ainsi, le flux atteignant une surface de la Terre peut avoir une valeur maximale de 900 à 1000 W/m^2. Plus précisément, le flux (W/m^2) qui atteint une surface, provient de trois composantes : la composante directe, la composante diffuse et la composante réfléchie. La figure 2.1 montre les differents effets provoqués par le passage du rayonnement solaire de l'atmosphère.

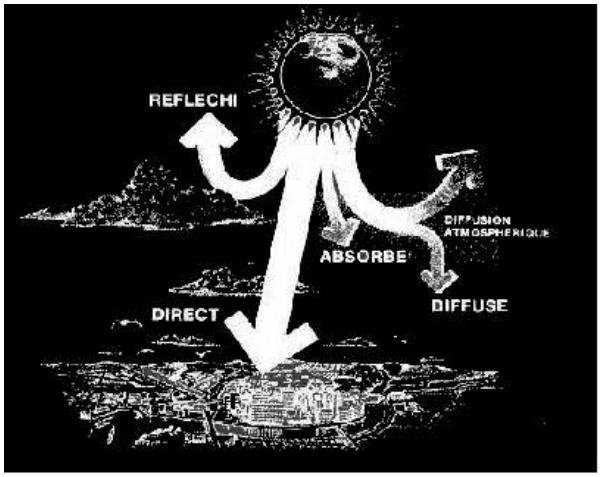


Fig. 2.1 – Le rayonnement solaire en traversant l'atmosphère.Une partie arrive directement à la surface de la Terre. Une autre partie est absorbée par l'atmosphère et les nuages. Une partie est réflechie par les nuages vers l'espaces et une autre partie est diffus par les particules de l'atmosphère vers toutes les directions [CERMA 11].

Le rayonnement solaire direct

Le rayonnement solaire direct, exprimé en W/m^2, correspond au flux solaire qui atteint directement une surface quand celle-ci est exposée au soleil. Elle dépend de la

hauteur du soleil et de l'angle d'exposition de la surface au soleil à l'instant considéré. La hauteur du soleil est l 'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal. L'angle d'incidence correspond a la l'angle avec lequel le rayon solaire frappe la surface : c'est l'angle entre la normale à la paroi et le rayon solaire à l'instant considéré.

Le rayonnement solaire diffus

La composante diffuse représente le flux, en provenance du ciel. Il résulte de la diffusion des rayons solaires par les particules de l'atmosphère et il est émis par la voute céleste. On évalue l'énergie solaire diffuse sous l'hypothèse que toutes les parties du ciel émettant le même rayonnement. Dans ce cas, seule l'inclinaison de la surface pondère le flux diffus incident. Cette hypothèse est correcte pour un ciel couvert où le flux diffus est plus important que le direct.

Le rayonnement solaire réfléchi

La composante réfléchie correspond à la partie du flux qui arrive à la surface suite aux réflexions solaires produites par l'environnement proche. Les formes urbaines qui se trouvent autour de la surface étudiée renvoient vers elle une part du flux global incident (direct et diffus). La part réfléchie dépend de l'albédo des surfaces alors que le flux intercepté par la surface dépend de son inclinaison.

Le rayonnement du ciel

Une partie du rayonnement solaire est absorbé par l'atmosphère, les océans et les continents, qui transforment une partie de l'énergie lumineuse en rayonnements infrarouges et renvoient ceux-ci vers l'espace. Ensuite, les composantes de l'atmosphère comme l'ozone, le vapeur d'eau, le gaz carbonique et d' aérosols absorbent le rayonnement de grande longueur d'onde en les émettant ensuite vers toutes les directions. La quantité du rayonnement atmosphérique de grande longueur d'onde reçu par la surface terrestre dépend de la stratification verticale de la température ainsi que des concentrations des gaz exposés [Oke 87]. La nébulosité joue également un rôle important quant à l'émission du rayonnement de grande longueur d'onde. Lorsqu'un nuage attrape les rayons infrarouges il réémet une partie de cette énergie vers l'espace et une partie vers la surface de la Terre, ce qui la réchauffe.

2.3.2 Le rayonnement thermique

Considérons un corps porté à une température T. Ce corps émet de l'énergie par sa surface sous forme de rayonnement thermique, c'est-à-dire sous forme d'ondes électromagnétiques. Cette énergie est émise suivant toutes les longueurs d'onde et vers toutes les directions. Par conséquent, le voisinage de deux surfaces de températures différentes

aura comme résultat le transfert d'énergie thermique sous forme de rayonnement électromagnétique. La densité de flux radiatifs de grandes longueurs d'onde (E) émise par un corps est définie par la loi de Stefan-Boltzmann qui s'écrit avec l'équation (2.2)

$$E = \epsilon \sigma T_{\mathrm{s}}^4 \tag{2.2}$$

- ϵ : l'émissivité
- σ : la valeur constante de Stefan-Boltzmann
- T : la température du corps

Toutefois, le calcul du bilan électromagnétique entre deux surfaces, nécessite la connaissance du facteur de forme. Plus précisément, le facteur de forme F_{12} pour deux surfaces S1 et S2 est la fraction d'énergie qui quittant la facette 1 est reçue par la facette 2. Les surfaces sont orientées d'un angle solide par rapport à leur normale et se trouvent à une distance r, est décrit avec la formule (2.3).

$$F_{12} = \frac{1}{S_1} \int_{S_1} \int_{S_2} \frac{dS_1 \cos\theta_1 dS_2 \cos\theta_2}{\pi r^2} \tag{2.3}$$

Pour le calcul de F_{12}, on tient compte des forme et orientation respectives des deux facettes ainsi que de la présence éventuelle d'obstacles entre les deux [Groleau 00].

2.4 Les effets aérodynamiques en milieu urbain

Le vent naturel a un signal fluctuant dans le temps. C'est un paramètre principal du microclimat des villes. En milieu urbain, les mouvements d'air sont fortement perturbés à cause de la présence de bâtiments qui font obstacle sous formes diverses.

Au voisinage des constructions, on peut définir deux couches atmosphériques en fonction de leur état de stabilité. La canopée urbaine et couche limite urbaine sont les deux couches dont l'étude permet d'analyser les bilans énergétiques et radiatifs ainsi que les effets aérodynamiques [Oke 87].

2.4.1 Les couches atmosphèriques près de la surface du sol

La canopée urbaine

La canopée urbaine est une couche qui correspond à la hauteur moyenne de bâtiments qui font obstacle à l'écoulement d'air dans le milieu urbain. Dans cette couche, le mouvement de masses de l'air est très perturbé et tourbillonnaire du fait de la présence de constructions. Les variations climatiques qui y ont lieu modifient l'équilibre thermique au niveau du sol. La canopée urbaine correspond à l'échelle microclimatique et elle s'étend sur une hauteur z_H.

La couche limite atmosphérique et la couche limite urbaine

La couche limite atmosphérique CLA est la couche inférieur de la troposphére de 1 à 2 km d'épaisseur. Cette couche est associée à l'échelle méso-climatique. Son épaisseur varie de quelques centaines de mètres jusque à quelques kilomètres en fonction de la vitesse du vent, de la rugosité des sols et de l'ensoleillement variable. La CLA présente une forte variation pendant le cycle diurne. Le jour, elle varie de 1 à 2 km, en fonction de l'ensoleillement et de la saison. La nuit, elle varie entre 100 et 300 m, en fonction du vent et du refroidissement en surface [CNRM 10].
La couche limite urbaine CLU, située au-dessus de la canopée urbaine fait partie de la CLA et son épaisseur est très variable puisque il dépend de la rugosité du terrain. Sa valeur est nulle aux zones rurales. Cette couche est caractérisée par des transferts d'énergie entre la surface et l'atmosphère. Les modifications qui ont lieu dans cette couche sont d'une échelle locale qui correspond au niveau d'une agglomération ou d'un ensemble de bâtiments. Les variations climatiques entrainées sont généralement identiques pour tous les points de la zone étudiée et elles varient en fonction du changement de la typologie urbaine. La figure 2.2 montre les échelles méso, locale et micro d'étude de la climatologie urbaine. L'influence des constructions sur le mouvement des masses

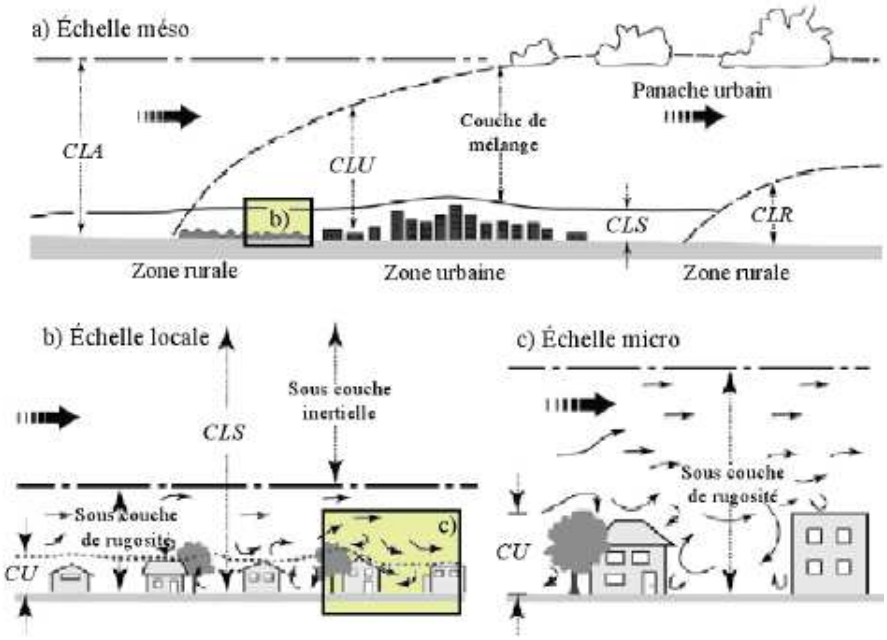


Fig. 2.2 – Représentation des échelles climatiques et atmosphériques, de l'échelle méso (a), à l'échelle locale (b) et micro (c) [Oke 06].

d'air se prolonge jusqu'une partie plus haute de la canopée urbaine. La couche limite de rugosité, nommée en anglais "roughness sublayer" est la couche qui s'étend sur une hauteur z_R. Dans cette zone l'écoulement est également perturbé, observant aussi d'écoulements secondaires verticaux ou transversaux. L'épaisseur de la couche limite de rugosité dépend de la nature des surfaces qui se trouvent au voisinage avec le sol. Dans une partie plus haute de la surface du sol, on observe la couche inertielle, nommée "Inertial sublayer" qui s'apparente à l'ensemble de la couche limite de surface pour les zones rurales [Rotach 99]. Au dessus de 1000 m de la surface terrestre, les perturbations sont plus faibles et le mouvement du vent est parallèle aux isobares. Les isobares sont des courbes qui relient tous les points de même pression atmosphérique. Sur un site où la rugosité est plus faible, la turbulence s'affaiblie [Bozonnet 05]. La figure 2.3 montre la hauteur des sous-couches dans la couche limite urbaine. En milieu urbain, la vitesse

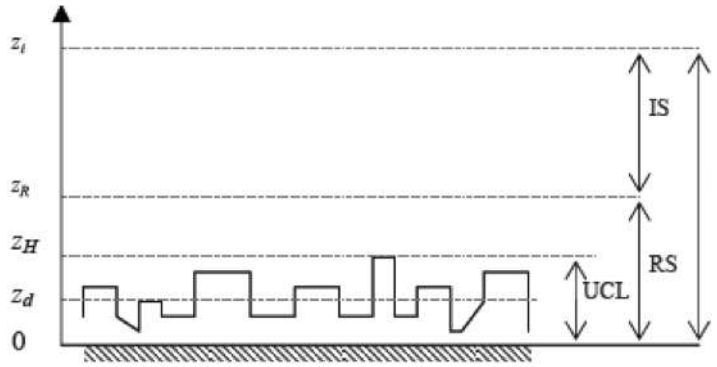


Fig. 2.3 – Répartition verticale des couches atmosphèriques à l'échelle locale. La canopée urbaine UCL s'étend sur une hauteur z_H. Dans la couche qui se trouve au dessous de la canopée, la vitesse du vent est quasiment nulle. Le calcul de la vitesse moyenne du vent est décalée d'une hauteur appelée hauteur de déplacement et la vitesse de référence U_{10} est ainsi définit pour une hauteur de 10 mètres au dessus de la hauteur z_d.La couche limite rugueuse RS s'étend au dessus de la canopée, sur une hauteur z_R. Dans cette zone l'écoulement est fortement perturbé. Dans une partie plus haute de la surface du sol, on observe la couche inertielle IS [Rotach 99].

moyenne du vent est calculée selon les Eurocodes. Le paramètre qui joue un rôle très important quant au calcul de la vitesse en milieu urbain est la rugosité. Elle dépend de l'homogénéité du terrain, des formes qui font obstacle aux écoulements ainsi que de la distance sur laquelle ces deux conditions s'appliquent. Le calcul de la longueur de rugosité est difficile puisque il faut prendre en compte plusieurs paramètres hétérogènes. L'Eurocode propose un nombre de valeurs qui correspondent aux différentes sites d'étude. Ces valeurs sont montrées dans l'annexe C.

2.4.2 Description de l'écoulement autour de bâtiment

La présence d'un édifice perturbe le mouvement de masses d'air. Trois zones de perturbation apparaissent : sur la façade au vent, on observe une zone de suppression et un vortex turbulent du à l'écoulement qui descend sur la face. Sur la façade sous le vent, on observe une zone de dépression turbulente qui s'étire dans la cavité de basse pression. Sur les cotés et la partie supérieure, on observe un décollement et une zone turbulente [Bozonnet 05]. Plus précisément, la figure 2.4 montre le contournement d'un bâtiment à un profil vertical de vitesse moyenne. Les différentes zones qu'on observe sont les suivantes :

1. point de séparation
2. rouleau tourbillonnaire
3. zone tourbillonnaire latérale
4. gradient vertical de vitesse

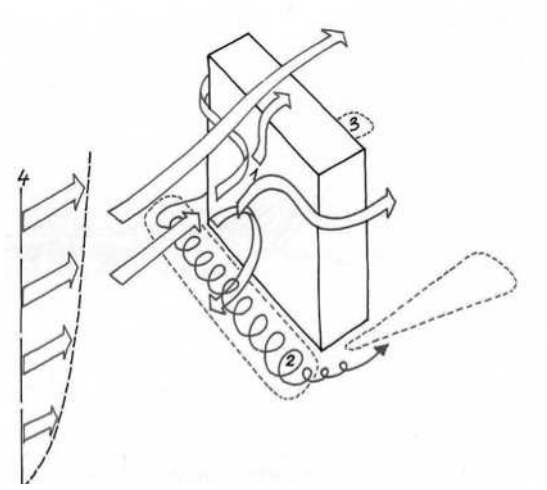


Fig. 2.4 – Ecoulements autour d'un bâtiment [Gandemer 76].

2.4.3 Description de l'écoulement dans une rue

L'analyse d'écoulement du vent dans une rue nécessite l'utilisation d'un indicateur géométrique qui est défini comme le rapport de la hauteur moyenne des bâtiments sur la largeur de la rue. La caractérisation des différents régimes d'écoulement dans une rue peut être réalisée en fonction du rapport Hauteur/Largeur (H/L). Si les bâtiments sont bien séparés avec un rapport $H/L < 0.5$, les écoulements n'interagissent pas. En diminuant l'espacement entre les bâtiments, les écoulements commencent à interagir et

les sillages sont perturbés. La combinaison de la hauteur, de l'espacement et de densité amène d'un régime de rugosité isolé (*isolated roughness*) à un écoulement d'interférence de sillage (*wake interference flow*). Ce régime est caractérisé par des écoulements secondaires dans l'espace du canyon. Lorsque le rapport H/L et la densité sont encore plus élevés, un vortex stable s'établit dans la rue canyon ainsi qu'un régime d'écoulement rasant [Oke 88]. La figure 2.5 montre les regimes d'écoulements aérauliques dans la rue.

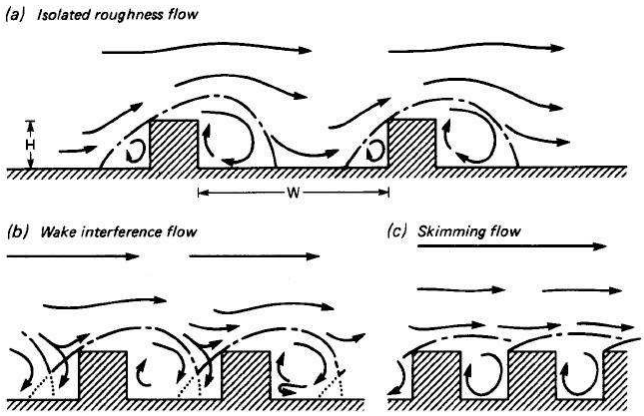


Fig. 2.5 – Regimes d'ecoulements aérauliques dans la rue. Le régime de rugosité isolé (a) correspond au cas où les écoulements n'interagissent pas. En diminuant l'espacement entre les bâtiments, les écoulements commencent à interagir et les sillages sont perturbés, ce qui provoque régime de rugosité isolé(b). Lorsque le rapport H/L et la densité sont encore plus élevés régime d'écoulement rasant (c) s'établit dans la rue canyon. [Oke 88].

2.4.4 Les effets aérauliques en milieu urbain

Dans le milieu urbain, l'écoulement du vent interagit avec les formes urbaines perturbant ainsi son mouvement. Les principes d'écoulement d'air en milieu urbain sont assez bien étudiés pour certaines configurations géométriques. Nous allons présenter les effets aérauliques qui pourront se retrouver pendant les simulations que nous envisageons de réaliser.

Effet Wise

Création de rouleau tourbillonnaire devant un bâtiment élevée lorsque celui-ci voisine avec un bâtiment plus petit, implanté parallèlement. L'effet Wise est très gênant pour les piétons du fait de la forte composante verticale de la vitesse du vent dans la zone critique.

Effet de coin

Il s'agit d'un phénomène d'accélération localisée, à l'angle d'un bâtiment. L'augmentation de la vitesse du vent est entrainée par le gradient très élevé de la pression entre la façade exposée et celle qui se situe en dépression. L'effet de double coin est un phénomène induit de l'effet de coin. La configuration de l'effet de double coin ou passage entre 2 immeubles est créé à partir de 2 bâtiments placés longitudinalement et séparés par un passage. La zone d'espacement entre les 2 formes est très critique du point de vue de l'inconfort et elle peut même se prolonger à l'arrière des bâtiments [Reiter 07].

Effet de barre

l'effet de barre est caractérisé par une déviation en vrille de l'écoulement au passage d'une barre pour une incidence voisine de 45°. Le phénomène existe si la hauteur moyenne h de la barre est < 25 m et la longueur minimum l de la barre est > 8 h.

Effet de canalisation

L'effet de canalisation apparait lorsqu'un ensemble construit forme un couloir. Une canalisation n'est pas une cause de gêne en soi. Elle n'agit que si elle est associée à une anomalie aérodynamique qu'elle transmet sur toute sa longueur. L'association de phénomènes de canalisation et de Venturi peut être une source de gène importante. La figure 2.6 montre certains effets aérodynamiques qui ont lieu dans le milieu urbain.

Effet Venturi

Le rétrécissement du passage amene à l'augmentation de la vitesse du vent, pour un débit identique. La zone critique du confort se situe à l'étranglement.

2.5 La notion du confort thermique dans les espaces extérieurs

Le confort de l'individu résulte en partie de l'ambiance thermique. Il s'agit d'une notion complexe et globale puisque plusieurs paramètres interagissent et influencent son évaluation. Son étude nécessite la prise en compte de facteurs objectifs ainsi que subjectifs. L'ambiance thermique est significativement déterminée par les éléments du microclimat. Néanmoins, en dehors des conditions microclimatiques, il existe certains facteurs physiologiques et psychologiques qui jouent un rôle également important sur le confort des individus en extérieur. En effet, une approche uniquement quantitative est insuffisante pour décrire les conditions de confort à l'extérieur. C'est l'adaptabilité

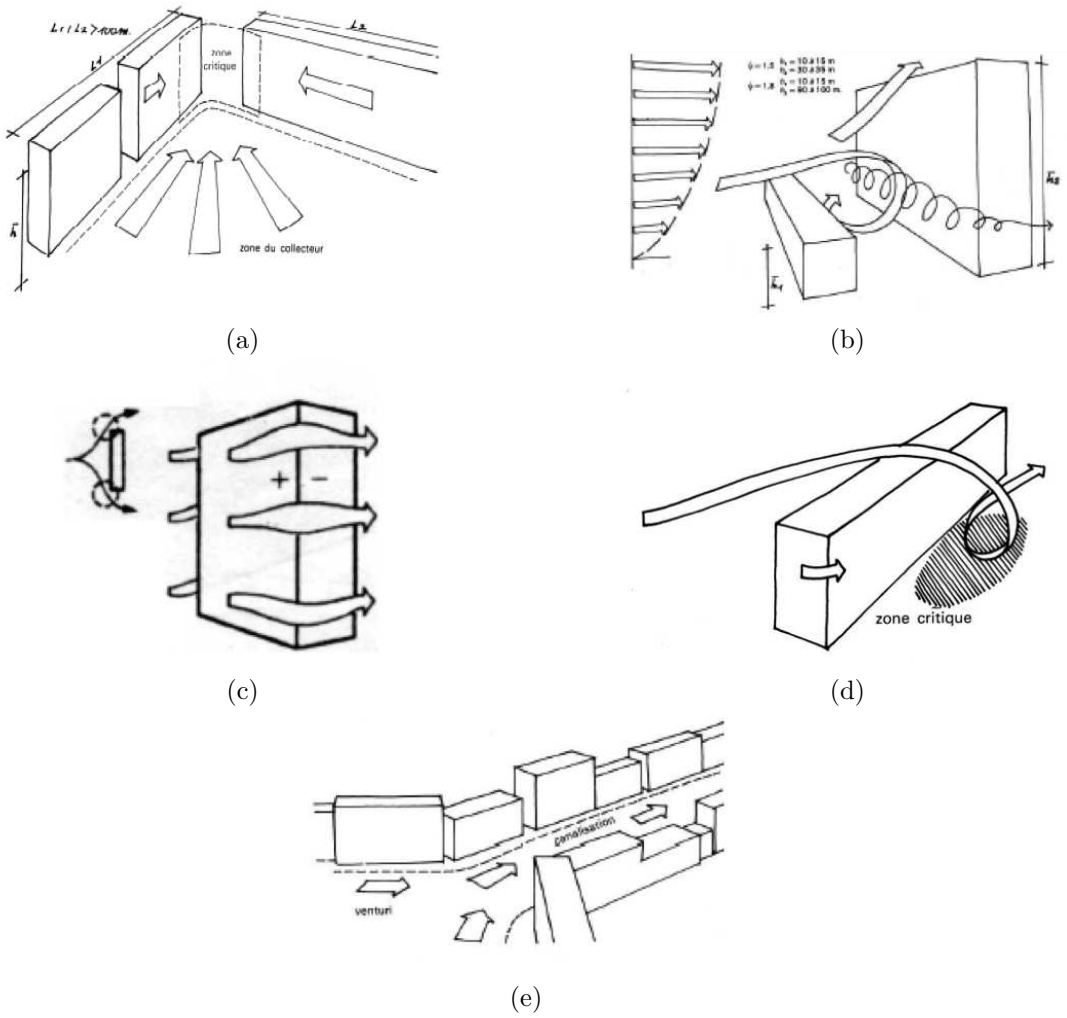


Fig. 2.6 – Représentation graphique des effets aérodynamiques dans le milieu urbain. L'effet de Venturi (a) corresond à l'augmentation de la vitesse du vent du fait de rétrécissement du passage. L'effet Wise (b) correspond à la création de rouleau tourbillonnaire devant un bâtiment élevée lorsque celui-ci voisine avec un bâtiment plus petit.L'effet de coin (c) est un phénomène d'accélération localisée, à l'angle d'un bâtiment. L'effet de barre (d) est caractérisé par une déviation en vrille de l'écoulement au passage d'une barre et l'effet de canalisation (e) apparait lorsqu'un ensemble construit forme un couloir [Gandemer 76].

psychologique, dépendante du temps de l'exposition, des espérances et du control personnel qui a un impact important sur l'évaluation de sensation thermique. Comprendre la manière dont ces notions interagissent peut être une aide à la conception de la planification et des formes du milieu urbain [Nikolopoulou 03]. L'adaptabilité des usagers en espaces extérieurs est le sujet de plusieurs recherches scientifiques. Un modèle a été développé à partir d'une étude de neuf mois qui visait à évaluer le comportement physiologique de 649 individus, exposés aux conditions climatiques extérieurs variables. Les chercheurs ont abouti à la conclusion que les usagers s'adaptent aux conditions extérieurs en fonction des vêtements et du choix d'où ils s'installent ainsi que de la durée de leur exposition. En plus, la vitesse maximale de l'air a été trouvée comme le paramètre qui influence le plus l'adaptabilité tandis que la température de l'air ambiante a un impacte négligeable sur l'adaptabilité. L'enjeu pour les planificateurs urbains est alors de crées des espaces urbains dont les conditions microclimatiques influence le confort thermique de manière à ce que les piétons puissent le tolérer [Walton 07]. En outre, le taux d'activités humaines menés à l'extérieur est influencé par le confort thermique ressenti par les individus. Autrement dit, l'intensité des activités ainsi que la durée sont dépendantes de niveau d'inconfort et de gène. Pendant l'été, la haute température ainsi que le rayonnement solaire directe vont décourager les individus de se balader dans les espaces ouvertes sans protection solaire. Contrairement, en hiver, la vitesse de l'air combinée à la température basse va encourager les piétons à chercher des espaces ensoleillées [Givoni 03].

Par conséquent, le confort thermique résulte d'une interaction complexe entre les paramètres microclimatiques et les paramètres relatifs à l'individu. Son évaluation nécessite tout d'abord la connaissance de quatre paramètres microclimatiques [Vinet 00].

- La température moyenne radiante
- La vitesse de l'air
- La température de l'air
- L'humidité de l'air

La température moyenne radiante est un paramètre critique en ce qui concerne l'évaluation du confort thermique en espaces extérieurs. Elle intègre les flux de courte et de grande longueur d'onde absorbés par le corps humain, influençant ainsi son bilan énergétique. La T_{mrt} est le facteur clé quant au calcul d'indices de confort puisque elle a un impact important sur le bilan thermique de l'homme [Toudert 06].

En milieu extérieur, la vitesse du vent est difficile à contrôler. Dans un site urbain, des zones calmes peuvent jouxter des zones d'écoulement tourbillonnaires. Les gradients d'écoulement ressentis surtout aux zones voisines aux constructions de grande hauteur, sont perçus comme une gêne importante. De plus, le bilan énergétique est perturbé pour des vitesses du vent importantes. Les mouvements d'air modifient les échanges dus à la convenction entre le corps humain et son environnement. Par conséquent, des sensations de froid peuvent être perçues par l'individu. Par contre, ces notions dépendent

fortement du niveau d'activité ainsi que du climat et de la saison [Laravoire 05]. Le bilan énergétique est perturbé pour de vitesses du vent importantes. D'un point de vue thermique, l'air reste agréable pour une vitesse jusqu'à 0.15 m/s en hiver et 0.2 m/s en été. A partir de ces seuils, des perturbations peuvent apparaitre. Il faut aussi signaler que pendant les jours très chauds, des vitesses du vent jusqu'à 1.5m/s peuvent être perçues comme acceptables. Les vitesses supérieures de 4 m/s accentuent les échanges convectifs et perturbent le bilan thermique. De plus, les grandes vitesses provoquent la perturbation du mouvement, des vêtements, l'irritation des yeux, entrainant ainsi l'inconfort pour les usagers d'espaces extérieurs [Thellier 89]. Les apports du rayonnement solaire, la température de la voute céleste ainsi que les phénomènes naturels comme la pluie et la neige sont des facteurs à prendre en considération quant à l'évaluation du confort thermique en extérieur. Les variations du rayonnement solaire ont comme résultat les pertes ou les gains de chaleur cutanée. Les échanges radiatifs du corps humain avec son environnement résultent à l'augmentation ou à la diminution de la température cutanée. En cas d'inconfort, l'individu peut réagir physiologiquement par la régulation des vêtements [Ait-Ameur 02]. Il est à signaler que la sensation thermique dépend également de paramètres liés à l'individu. Il s'agit des paramètres assez difficiles à évaluer puisque ils sont plutôt subjectifs et ils se varient en fonction de caractéristiques personnelles. Les facteurs qui sont relatifs à l'individu sont les suivants :

- Les mécanismes de thermorégulation
- Le métabolisme
- Les vêtements

La thermorégulation physique du corps s'effectue selon différents modes : principalement par convection, rayonnement et évaporation et dans une plus petite mesure par conduction et respiration. En général, les exigences au confort thermique en espace interieur sont caractérisées par les seuils suivants [CERTU 03] :

- en hiver : $T_{\text{air}} \sim 20°\text{C}$ pour un taux d'humidité H=40-60%
- en été : $T_{\text{air}} \sim 25°\text{C}$ si $T_{\text{ext}} < 30°\text{C}$
- en été : $T_{\text{air}} = T_{\text{ext}} + 5$ si $T_{\text{ext}} > 30°\text{C}$

L'humidité relative représente le pourcentage de vapeur d'eau contenu dans l'air par rapport à la quantité maximum que cet air pourrait contenir avant de se condenser. Plus la masse d'air est chaude, plus elle peut absorber de vapeur d'eau. Deux masses d'air qui ont des températures différentes vont contenir une quantité de vapeur d'eau différente. Cela explique le fait que, pour une humidité relative de 60%, l'individu ressent inconfort de 30°C alors qu'il ne fait que 20°C. Le corps humain support difficilement une humidité relative élevée puisque elle empêche la transpiration naturelle du corps. Par conséquent, il ne peut pas se rafraichit. L'augmentation d'humidité d'un taux de 10% résulte en une élévation de la température de l'air ressentie par l'individu [Balandraux 07, CERTU 03].

2.6 Les études sur la micro climatologie urbaine et le confort thermique

La ville est très souvent étudiée à travers l'analyse des rues canyons puisque il s'agit d'un élément "clé" du tissu urbain. Les caractéristiques principales de la morphologie d'une rue sont la largeur, la longueur, la hauteur des bâtiments ainsi que les propriétés des matériaux des façades. Elle peut être définit comme une unité géométrique de longueur infinie qui peut être traité en 2D. Les études sur les rues canyons ont mis en évidence différents types d'écoulement selon les configurations géométriques, caractérisées par le rapport de la largeur de la rue (L) à la hauteur des bâtiments (H) [Vinet 00].

Les paramètres géométriques des rues comme l'orientation et le rapport Hauteur/Largeur ont une influence directe sur les paramètres microclimatiques et par conséquent, sur le confort thermique en espaces extérieurs. En climat chaud et aride, il a été montré que la température de l'air diminue avec l'augmentation du rapport H/L et elle n'est pas très influencée par le changement d'orientation. Les flux d'énergie solaire direct et diffus ainsi que la durée d'ensoleillement dépendent de l'orientation. La durée d'insolation diminue avec l'augmentation du rapport H/L. La combinaison d'orientation Nord-Sud avec un rapport $H/L > 2$, amène aux conditions thermiques confortables [Toudert 06]. Dans le même esprit, une étude a été menée à Maroc. L'analyse de deux rues canyons avec des rapports H/L très différentiés a mis en évidence que la hauteur des édifices et leur espacement influence le taux de rayonnement solaire directe qui arrivent aux surfaces du projet. Il influence également les flux de grande longueur d'onde qui sort vers le ciel.

Les formes urbaines ont aussi un impact sur les écoulements de vent dont la vitesse est affaiblie pour un rapport H/L élevé. Le piégeage des rayons infrarouge en relation avec la mauvaise ventilation de la rue accentue l'effet d'îlot de chaleur et l'inconfort thermique des piétons [Johansson 06]. La modification des paramètres microclimatiques a des retombées directes sur la sensation thermique des usagers en espaces extérieurs. Des chercheurs ont mis en évidence la relation de la géométrie entre la rue et les paramètres liés au climat et au confort thermique en espaces extérieures. L'analyse vise à étudier l'impact des différentes orientations et des différents rapports H/L sur la sensation thermique en extérieur ainsi que sur l'accessibilité au soleil. L'indice de confort utilisé est la Température Equivalente Physiologique (PET). Il est défini comme la température de l'air à laquelle, dans un local typique, le bilan énergétique du corps humain est équilibré avec les mêmes températures internes et de la peau et le même taux de sueur que ceux calculés pour les conditions extérieures [Hoppe 02]. L'indice PET est présentée dans l'annexe D.

Il a été montré que les conditions thermiques sont très confortables lorsque le rapport H/L égal à 4 et l'orientation est Nord-Sud, avec une exception pour le pic noté à 13 heures. Pour le même rapport, l'orientation Est-Ouest présente de bons résultats

de PET entre 11 et 14 heures [Toudert 06].

Neanmoins, en milieu urbain la rue a rarement la morphologie typique de la rue canyon. Des nouvelles formes, dérivées de la forme continue ont été étudiées : le profil avec des galeries, la forme asymétrique qui a une grande accessibilité au soleil et la forme assymétrique surplombante. Ces nouvelles formes ont été comparées avec la forme de référence afin d'étudier la relation de leur géométrie avec les conditions microclimatiques et le confort thermique en espaces extérieurs. Les chercheurs ont analysé les effets du profil vertical d'une rue, les formes asymétriques avec une grande ouverture vers le ciel ou avec des façades surplombantes, l'utilisation des galeries et d'autres dispositifs pour créer l'ombre. L'étude a été menée pour différentes orientations et le confort thermique a été évalué en fonction de l'indice de confort PET. Les résultats de l'analyse ont montré que le profil asymétrique implique des conditions beaucoup plus stressantes thermiquement que la rue typique, sauf très tôt le matin du fait de la grande ouverture vers le ciel. A l'égard des façades surplombantes, elles sont plus efficaces quant au confort thermique, pour les orientations Nord-Sud et Nord-ouest-Sud-est. En plus, l'utilisation des galeries génèrent des conditions confortables pour les orientations Nord-Sud et Nord-ouest-Sud-est. Les surfaces qui sont couvertes sont en général moins stressantes thermiquement que celles d'une rue non couverte [Toudert 07]. La figure 2.7 montre les profils de rue analysées par les chercheurs.

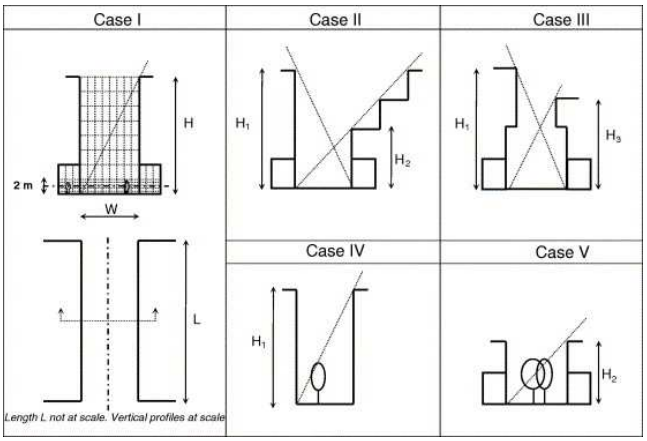


Fig. 2.7 – Différents profils de rue : rue canyon (*case I*), profil de galeries(*case II*), forme asymétrique surplombante (*case III*), rue canyon plantée d'arbres (*case IV*), (case *V*) [Toudert 07].

Un grand nombre d'études sur le microclimat urbain a été réalisé en utilisant comme indicateur morphologique le Facteur de Vue du Ciel. La valeur de FVC varie alors en fonction de la géométrie des structures urbaines et surtout selon la géométrie de rues. La connaissance de sa valeur est importante quant à la modélisation du microclimat et à la planification urbaine [Zrepa 09]. Plusieurs chercheurs ont lié le facteur de vue du

ciel avec l'effet de l'îlot de chaleur urbain. La différence de la température entre l'espace urbain et l'espace rural voisine,($\Delta T_{\max}$), peut s' exprimer en fonction du FVC, pour n'importe quelle géométrie de rue. La différence de température peut être expliquée par la morphologie urbaine qui accentue les inter-réflexions et l'absorption de rayonnement solaire lorsque le FVC est diminué [Oke 88]. Les indicateurs FVC et H/L sont directement liés.

$$\mathrm{FVC} = \cos(\arctan \frac{2}{H/L}) \tag{2.4}$$

Plus précisément, le rapport Hauteur/Largeur correspond au FVC, mesuré au centre de la rue et au niveau du sol et il exprimé avec l'équation (2.4). Lorsque la valeur du FVC diminue, cela signifie que les bâtiments créent des ombres à travers leurs volumes et leur hauteur. L'effet d'ombrage sur les paramètres microclimatiques a été étudié à partir de mesures in situ et en utilisant comme indicateur morphologique le Facteur de Vue du Ciel. Dans une étape suivante, le confort thermique en espaces extérieurs a été évalué en fonction de l'indice PET. Les calculs ont été réalisés à Taiwan, pour sept points dont le FVC est variable pour les quatre saisons de l'année. En parallèle, les fréquences d'inconfort dû à la chaleur ($F_{\mathrm{PET}} \geq 30$) et au froid ($F_{\mathrm{PET}} \leq 26$) ainsi que la fréquence de confort ($F_{26} \leq \mathrm{PET} \leq F_{30}$)ont été calculé.
L'analyse de fréquences calculées et le FVC a amené aux résultats suivants. La corrélation entre le FVC et le ($F_{\mathrm{PET}} \geq 30$) est positive. Les zones où il n'y pas d'ombre ont des températures ambiantes très élevées. La corrélation entre FVC et $F_{\mathrm{PET}} \leq 26$ est négative puisque les endroits étant protégés par le rayonnement solaire ont une température ambiante fraîche. Finalement, la corrélation entre FVC et $F_{26} \leq PET \leq F_{30}$ est négative pendant l'hiver et positive pendant les autres saisons [Hwang 11].

Un nombre d'expériences a été mené sur une rue canyon profond à Athènes, pendant la période estivale. Le but de l'étude était d'analyser les écoulements du vent ainsi que les échanges thermiques dans les rues canyons afin d'évaluer le potentiel de ventilation naturelle dans le milieu urbain. Il a été montré que dans une rue canyon profonde, la ventilation naturelle est réduite de 82% en comparaison avec un site sans obstacles. Cette diminution importante est expliquée par la réduction de la vitesse du vent due aux formes urbaines. L'élévation de la température des façades à cause du rayonnement solaire résulte des flux de chaleur locaux, perpendiculaires aux façades. Il a été aussi montré que la stratification verticale de la vitesse du vent est faible au milieu de la rue canyon. La vitesse verticale du vent n'est augmentée que pour les points hauts de la rue. De plus, la vitesse du vent était plus importante au centre de la rue que près de façades [Georgakis 06]. Il est important de signaler que le régime d'écoulement et la vitesse du vent sont dépendants de la densité du bâti et l'aménagement urbain. Les chercheurs ont montré que la présence des bâtiments avec des hauteurs non uniformes conduit à l'augmentation du potentiel de la ventilation naturelle [Givoni 92]. Dans les quartiers urbains, le rapport H/L de rues canyons doit avoir une valeur proche de 0.65 afin d'assurer la protection contre la vitesse du vent ainsi que le confort des

usagers [Oke 88].

L'albédo, comme indicateur morphologique, est un paramètre largement étudié pour son rôle en relation avec l'îlot de chaleur urbain. Plus l'albédo augmente, moins les radiations solaires sont absorbées et stockées par une surface.

L'utilisation des matériaux de haut albédo pourrait être une proposition quant à lutte contre l'augmentation de température en milieu urbain. La haute réflectivité aura pour conséquence la réduction de la quantité d'énergie solaire absorbée par les surfaces de bâtiments et de structures urbaines. Ainsi, la température des enveloppes ne s'élèvera pas fortement et les surfaces urbaines restent plus froides. Il est à signaler que les recherches ont montré que la température de l'air à l'intérieur des édifices, pendant une journée d'été, peut être abaissée de 4°C en changeant l'albédo des surfaces de 0.25 à 0.40 dans les climats chauds d'attitudes moyennes [Taha 97].

Une étude menée à Hong Kong a analysé l'influence des variables morphologiques sur l'intensité de l'effet d'îlot de chaleur journalière. L'analyse a été menée pour trois régions, de morphologies différentes. Après avoir sélectionné un nombre d'indicateurs morphologiques, les chercheurs ont étudié leur impact sur la différence de température entre la station météo et le point de mesures in situ, qui correspond à l'intensité d'îlot de chaleur journalière. Il a été montré qu'une augmentation de 1% d'albédo peut diminuer de 8.8% l'intensité d'îlot de chaleur pendant la journée. En outre, la diminution du facteur de vue du ciel de près de 1% amène à une atténuation importante de l'effet de 2.6%. En plus, la ventilation naturelle en combinaison avec l'effet d'ombrage entraine la diminution de température maximale journalière. La prise en compte de ces indicateurs morphologiques quant à la planification urbaine peut aider à l'atténuation du phénomène ainsi qu'à l'amélioration de sensation thermique en espace extérieur [Giridharan 04].

On constate ces dernières années une évolution de la recherche sur la relation entre la forme urbaine, la morphologie, les matériaux et le microclimat urbain L'analyse morphologique à travers des indicateurs spécifiques amènera à une analyse approfondie du microclimat au milieu urbain et dans l'étape suivante à l'étude du confort thermique en espaces extérieures. En effet, la nature du confort thermique dépend directement des conditions qui caractérisent le microclimat de la ville.

CHAPITRE 3

Les indicateurs retenus

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'ensemble des indicateurs retenus pour notre analyse. Nous allons préciser leur définition et leurs valeurs de référence. Leur évaluation nous permettra de caractériser la morphologie des éco-quartiers Tripode, Bottière Chénaie et Lyon-Confluence.

3.1 Critères et Indicateurs proposés

Le milieu urbain consiste en une forme complexe qui représente la réalité sociale et économique de chaque époque. Les paysages et les formes urbaines correspondent aux conditions historiques, politiques, culturelles et surtout architecturales dans lesquelles la ville a été créée et a pris de l'ampleur. La morphologie urbaine peut être définie comme la forme tridimensionnelle créée par un ensemble d' édifices, y compris les espacements entre eux. Elle combine la notion de la géométrie urbaine avec les matériaux des surfaces [Allain 04]. Le développement urbain, qui s'est accéléré les dernières décennies, entraine la modification des conditions microclimatiques. La géométrie urbaine et les activités humaines réalisées dans le milieu urbain interagissent avec les paramètres microclimatiques (rayonnement solaire, écoulements du vent, température de l'air et de surface), transformant ainsi le climat de villes. Les bilans thermiques et énergétiques des surfaces urbaines sont aussi modifiés entrainant ainsi un impact direct sur le confort des piétons en espaces extérieurs [Dimoudi 03]. Du fait de la forte liaison entre morphologie urbaine et conditions microclimatiques, il s'avère pertinent que les planificateurs urbains proposent des formes urbaines cohérentes avec le climat local de la région étudiée [Musy 08]. Notre étude vise à analyser la morphologie du milieu

urbain ainsi que d'étudier les interactions entre les formes urbaines et les conditions microclimatiques. Nous souhaiterons également examiner l'impact de ces interactions sur le confort thermique des usagers dans les espaces extérieurs. En outre, les conditions climatiques, le confort thermique et les formes urbaines sont trois domaines importants quant à l'amélioration de la qualité environnementale de la ville. Afin d'analyser la dimension morphologique en relation avec le climat, il est nécessaire d'utiliser un nombre d'indicateurs. Ces descripteurs de forme vont permettre d'étudier la géométrie urbaine en fonction de ses performances environnementales. A travers l'étude des facteurs morphologiques il est possible de qualifier et de quantifier les caractéristiques des formes urbaines [Golany 96].

Dans ce chapitre, nous allons ainsi présenter un certain nombre de descripteurs géométriques, morphologiques morpho-climatiques et physiques, dont le calcul nous permettra d'étudier la morphologie des quartiers urbains. Leur objectif est de quantifier et de qualifier les éléments de l'espace et d'expliquer la complexité de configurations spatiales. Les indicateurs proposés sont définis à l'échelle "micro". Nous nous intéressons aux variations climatiques qui ont lieu au sein de la canopée urbaine.

3.1.1 Les Indicateurs géométriques

Le facteur de vue du ciel

Le Facteur de Vue du Ciel FVC et un paramètre sans dimension qui correspond à l'angle solide sous lequel le ciel est vu d'un certain point ce qui montré sur la figure 3.1. Il dépend du rapport géométrique des surfaces et varie en fonction de dimensions urbaines (hauteur de constructions, distance entre les façades). Le FVC vaut 1 au cas où aucun obstacle n'empêche la vue (champ isolé) alors qu'il diminue quand la vue est obstruée [Oke 88].

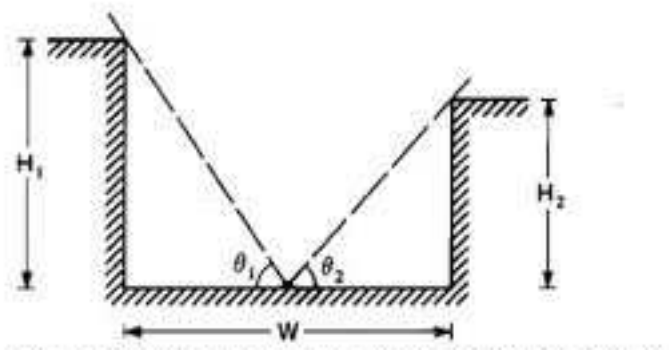


Fig. 3.1 – Angle solide de vue d'une rue canyon asymétrique. L'angle solide égale à $180° - \theta_1 - \theta_2$ [Oke 88].

En ce qui concerne les valeurs de référence, des études ont été menées par les chercheurs afin de mesurer le facteur de vue de ciel sur trois types des tissus urbains. Le premier type est un bloc de maisons traditionnelles avec une un patio au centre de la maison. Le deuxième type de tissus urbain (pavillon I) correspond à un bloc central dont la hauteur des maisons est de 9 m. Le troisième prototype (pavillon II) correspond à l'intégration de quatre parcelles de cour urbaine en un seul bloc. Les résultats du FVC mesuré pour les trois prototypes et montrés sur la figure 3.2 sont classés par ordre croissant : la cour (figure 3.2 à gauche) (0.13), le pavillon I (figure 3.2 au milieu) (0.23) et le pavillon II (figure 3.2 à droite) (0.48).

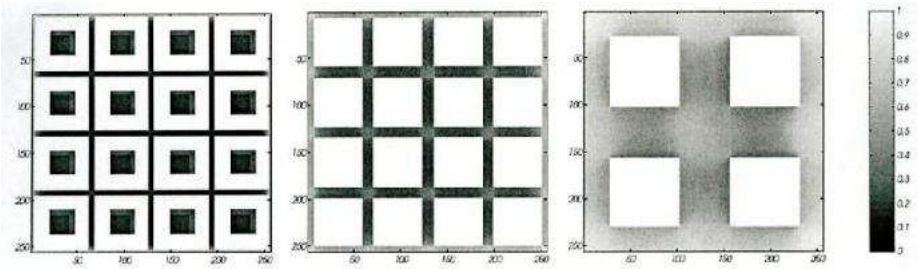


Fig. 3.2 – Calcul du facteur de vue du ciel pour les trois types de quartier proposés : l'image à gauche correspond à un bloc de maisons traditionnelles avec une un patio au centre de la maison. L'image au milieu de tissus urbain correspond à un bloc central dont la hauteur des maisons est de 9 m. L'image à droite correspond à l'intégration de quatre parcelles de cour urbain en un seul bloc [Ratti 03].

3.1.2 Les indicateurs morphologiques

La compacité

L'indicateur de compacité évalue la surface de l'enveloppe extérieure d'un bâtiment qui est exposée aux effets climatiques extérieurs. Nous allons calculer deux indicateurs pour la caractériser : la compacité utile et la compacité nette. L'indicateur de compacité utile, C_{ut}, exprime la valeur de la surface d'échange de l'enveloppe des bâtiments rapportée au m^2 de plancher. Il peut prendre des valeurs comprises entre 0.5 et 1.3 pour des configurations courantes de bâtiments. La surface d'enveloppe est constituée des façades verticales exposées aux conditions extérieures. Plus C_{ut} est faible, plus les constructions sont compactes et donc moins elles subissent les effets externes [Adolphe 01]. Enfin,la compacité s'écrit (3.1).

$$C_{\mathrm{ut}} = \sum_{i}^{N} \frac{A_{\mathrm{ext},i}}{S_{\mathrm{pl},i}} \tag{3.1}$$

avec :

– A_{ext} : la surface exterieure d'enveloppe non contigue d'un batiment
– S_{pl} : la surface de plancher
– N le nombre des bâtiments du projet

La compacité sera calculée pour chaque bâtiment du quartier. Dans une étape suivante, la compacité du quartier sera la valeur moyenne des compacités calculées. Son évaluation est également une mesure de la surface d'échange entre l'intérieur et l'environnement extérieur. Le coefficient de compacité nette est défini comme la somme pour un tissu urbain du coefficient de compacité des bâtiments. Il correspond au rapport entre la surface d'enveloppe extérieure non contiguë du bâtiment, et son volume élevé à la puissance $\frac{2}{3}$ selon [Traisnel 86]. Il s'éxprime en utilisant l'équation (3.2).

$$C_f = \sum_{i}^{N} \frac{A_{\text{ext},i}}{V_i^{\frac{2}{3}}} \tag{3.2}$$

avec :
– A_{ext} : la surface extérieure d'enveloppe non contigue d'un bâtiment
– V : le volume du bâtiment
– N :le nombre des bâtiments du projet

Le coefficient de compacité moyenne noté Cf est donc la valeur moyenne de la compacité nette de chaque bâtiment (en tenant compte des adjacences entre bâtiments). Son ordre de grandeur est entre 1 et 8 avec une valeur moyenne égale à 4.

La densité d'occupation du bâti et la densité volumique

La densité d'occupation du bâti correspond à l'emprise des bâtiments sur le sol du parcellaire. Elle prend en considération la surface du sol qui est utilisé par les constructions du milieu urbain [Musy 06]. Cet indicateur correspond au rapport entre la surface des planchers et la surface totale du terrain. En ce qui concerne l'ordre de grandeur, il est compris entre 10 et 80%, en moyenne 30% sur échantillonnage variantentre centre urbain et périphérie. Les valeurs de référence sont très opposées entre les quartiers modernes, où l'emprise au sol est faible, aux périmètres anciens où les constructions ont une emprise importante sur le sol [Adolphe 01]. La densité d'occupation du bâti peut être obtenue avec l'équation (3.3).

$$D_s = \frac{1}{A_s} \sum_{i}^{N} A_{\text{p},i} \tag{3.3}$$

avec :
– A_p :la surface de plancher du bâtiment i
– A_s :la surface totale du quartier étudié
– N :le nombre des bâtiments au sol

La densité volumique représente la relation entre la volumétrie construite et la surface du territoire qui correspond au projet de l'urbanisation [Musy 06]. Elle s'écrit avec la fomule (3.4).

$$D_v = \frac{V_b}{A_s} \tag{3.4}$$

avec :
- V_b :le volume cumulé des bâtiments (m^3)
- A_s :la surface totale du quartier étudié (m^2)

Ces deux indicateurs de densité rendent compte de l'occupation de constructions ainsi que de la volumétrie construite. Leur calcul permet d'évaluer la consommation d'espace quant au projet urbain. L'intérêt de ces indicateurs est de lier les formes urbaines aux questions environnementales et climatiques [Musy 06].

La répartition de surfaces minérales dans le tissu urbain : la minéralisation

Le calcul de l'indicateur de minéralisation fait référence à la distribution des espaces végétaux et minéraux au sein du projet urbain. Plus précisément, il s'agit du rapport de la surface non affectée aux espaces d'eau ou aux espaces verts, à la surface totale. La surface affectée aux espaces verts est la surface plantée au sol pour les pelouses, massifs plantés, buissons, ou jardins. Cet indicateur, combiné avec les indicateurs de densité exposés précédemment, donne les caractéristiques internes du tissu urbain ainsi que du type de surfaces. En ce qui concerne son ordre de grandeur, il se situe entre 30% et 100% et en moyenne 65%, sur des sites variant entre centre urbain et périphérie. Quant aux valeurs de référence, elles sont très opposées entre les quartiers situés en centre ville (100%) et les ensembles modernes (moins de 30%). Le calcul de cet indicateur nous permettra d'étudier l'impact de la végétation et de la minéralisation sur les conditions microclimatiques. En outre, la répartition des surfaces naturelles a des retombées sur le bilan énergétique des surfaces [Adolphe 01]. La minéralisation est calculée selon l'équation (3.5).

$$M = \frac{S_t - (S_v + S_e)}{S_t} \tag{3.5}$$

avec :
- S_t :la surface totale du quartier étudié
- S_v :la surface affectée aux espaces verts
- S_e :la surface affectée aux espaces d'eau

La porosité

La porosité d'un quartier urbain est traduite par le rapport des volumes utiles ouverts à l'ensemble des volumes du tissu urbain considéré. Son ordre de grandeur est

entre 5% et 50% avec 35% comme valeur moyenne. Les valeurs de référence sont très variées en fonction du tissu urbain. Les centres historiques peuvent être caractérisés par une très faible porosité ($\leq 10\%$) alors que les quartiers urbains récents et les villes coloniales ont une porosité élevée ($\geq 35\%$). La porosité est calculée avec l'équation (3.6).

$$P = \frac{\sum_i \pi r_{\mathrm{h},i}^2 L_i}{\sum_i V_i + \sum_j V_j} \tag{3.6}$$

avec :
- L_i :la longueur de l'espace ouvert i
- $r_{\mathrm{h},i}$:le rayon hydraulique de l'espace ouvert i
- V_j :le volume moyen de l'espace bâti j
- V_i :le volume moyen d'un espace ouvert i

Le $r_{\mathrm{h},i}$ est calculée en utilisant l'equation (3.7).

$$r_{\mathrm{h},i} = \frac{hl}{h+l} \tag{3.7}$$

La valeur h est la hauteur de la canopée dans la rue considérée (hauteur moyenne des bâtiments qui la bordent) et l est la largeur moyenne de la rue. Quant au projet urbain, la porosité correspond aux axes de transport, ou les espaces ouverts parmi les volumes des constructions [Adolphe 02].

3.1.3 Les indicateurs physiques

L'albédo moyen

Pendant l'étude bibliographique, nous avons présenté plusieurs recherches qui ont mis en évidence la contribution de l'albédo sur l'augmentation de l'intensité de l'effet d'îlot de chaleur. Du fait de l'importance de ce paramètre, nous allons calculer l'albédo moyen des trois éco-quartiers choisis pour notre étude. Sa valeur correspond au flux d'énergie solaire réflechie par l'ensemble des surfaces du projet et envoyé vers le ciel. Ce flux dépend de l'albédo individuel de chaque façade ainsi que des inter-reflexions parmi les façades du projet. La morphologie du quartier et les propriétés lumineuses des matériaux de construction sont les paramètres qui influencent le flux d'énergie solaire qui sera reflechie et émis vers le ciel. Nous allons calculer l'albédo moyen dans le logiciel Solène. Le processus de son évaluation est décrit dans le chapitre 4.

La durée d'ensoleillement

La durée d'ensoleillement D, exprimée en minutes, représente, pour une date donnée la durée pendant laquelle un élément de surface du sol reçoit directement de rayonne-

ment solaire direct. On peut également calculer, sur le site étudié, la durée moyenne d'ensoleillement. Sa valeur sera égale à la valeur moyenne des durées d'ensoleillement pondérées par les surfaces élémentaires. Le calcul de cet indicateur nous permettra de localiser les points du projet qui sont largement exposés au soleil et par conséquent ils sont inconfortables pour l'implantation de certains équipements [Musy 06]. Le calcul de la durée d'ensoleillement sera effectué à travers des simulations sur Solène. Dans le chapitre suivant, nous allons détailler son calcul.

3.1.4 L'indicateur morpho-climatique "Surface totale pondérée de Facteur de Vue du Ciel (FVC)"

Les indicateurs morpho-climatiques sont des descripteurs qui combinent la morphologie urbaine avec les performances climatiques et environnementaux des formes urbaines. L'indicateur morpho-climatique que nous allons appliquer à notre étude est exprimé en fonction de visibilité vers le ciel et plus spécifiquement, en fonction du FVC. Pour une façade donnée, plus important est le FVC, plus grand est le taux d'énergie diffus apporté sur cette façade. La quantité d'énergie reçue, en relation avec les propriétés thermiques et lumineuses des surfaces aura un impact sur la température des surfaces du projet. L'indicateur retenu, nommé en anglais *total weighted façade area of SVF* est calculé pour les façades qui ont la même orientation avec l'équation (3.8).

$$A_{\mathrm{FVC}} = \frac{\mathrm{FVC}_i}{\mathrm{FVC}_{\mathrm{unobs}}} dA_i \tag{3.8}$$

Avec : FVC_i le facteur de vue du ciel pour l'élement i calculé sur Solene et dA_i la surface de l'élement i. Le $\mathrm{FVC}_{\mathrm{unobs}}$ correspond au facteur de vue du ciel d'une surface sans masque. Pour une surface verticale, il égale à 0.5 parce qu'une surface verticale sans masque voit la moitié du ciel [Huang 10]. Le calcul de ces indicateurs au sein de quartier urbain va nous permettre d'étudier son morphologie ainsi que d'évaluer son impact sur le microclimat urbain.

CHAPITRE 4

Application au cas des éco-quartiers

Dans ce chapitre nous allons présenter les trois sites d'étude : L'éco-quartier Tripode, l'éco-quartier Bottière Chénaie et l'éco-quartier Lyon Confluence. Nous allons analyser les trois projets urbains en fonction des indicateurs morphologiques, géométriques, physiques et morpho- climatiques exposées précédemment. Nous allons effectuer une analyse des résultats obtenus afin de comparer et de caractériser la morphologie de trois tissus. En tenant de compte de l'analyse bibliographique sur les études déjà faites, nous allons discuter l'impact des géométries étudiées sur le microclimat urbain et le confort thermique en espace extérieur.

4.1 Présentation des trois projets urbains

4.1.1 L'éco-quartier Tripode

Introduction

L'éco-quartier Tripode est un de plus grands projets de réaménagement sur l'île de Nantes. Il repose sur la construction d'immeubles de sept à dix étages en lieu et place de la tour du Tripode. Les îlots A et B appartiennent au projet dont l'îlot B est déjà achevé. L'ensemble du projet sera fini en décembre 2012. Le projet d'aménagement du quartier de Tripode repose sur des principes d'urbanisation et d'architecture moderne, centrés également sur la conception durable. Les caractéristiques principales du site sont les suivantes [SAMOA 11] :

- Création des espaces publics qui donnent la priorité aux piétons et aux cyclistes
- Présence de l'eau avec la création de bassins et de jardins d'eau
- Ouverture sur la Loire

– Multiplicité des parcours et des usages
– Segmentation d'îlots fonciers trop grands pour que les usagers puissent se déplacer à pied

Présentation du site

L'îlot A, de près de 46000 m^2 de SHON * se compose de douze immeubles de sept à dix étages : bureaux, logements et activités. Parmi eux, 5 lofts sont aussi construits. Le nouveau quartier s'organise autour d'un bassin d'eau dont la surface est 800 m^2. L'îlot A que nous allons étudier est caractéristique d'un îlot ouvert. L'îlot ouvert se différencie de l'îlot commun par sa forme, qui permet de traverser entre les constructions. Il s'agit d'une proposition théorisée par l'architecte et urbaniste Christian de Portzamparc. Les immeubles sont autonomes mais à la fois connectés par un plan virtuel de la paroi qui unifie simplement les ensembles volumétriques. Les bâtiments sont aménagés de telle manière, que le maximum de lumière naturelle entre, y compris dans les bureaux [SAMOA 11]. Le plan masse du projet est représenté sur l'image 4.1. Les espaces verts ainsi que des bassins d'eau sont fortement présents au sein du projet. La répartition des bâtiments de bureaux et de logements est représenté sur l'image 4.2. L'image 4.3 montre le modèle géométrique 3-D du site, créé sur le logiciel Gambit [Fluent 04].

Fig. 4.1 – Plan masse du projet Tripode [de Portzamparc 07].

*. Surface Hors Oeuvre Nette

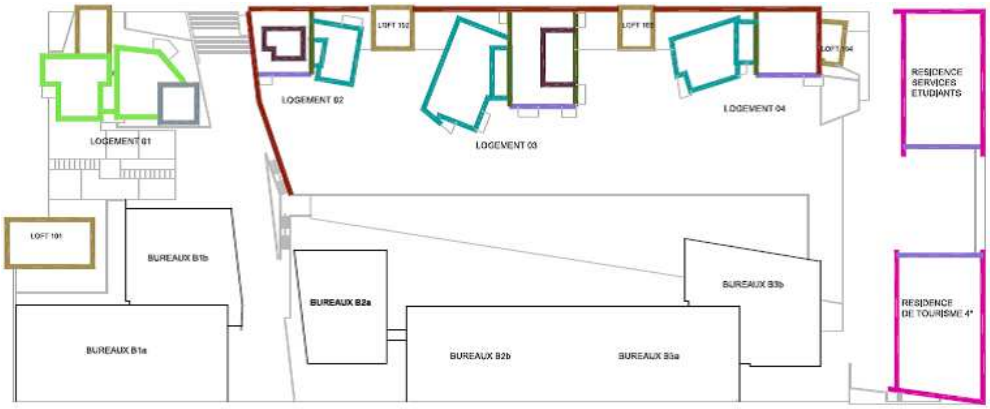


Fig. 4.2 – La répartition des bâtiments de bureaux et de logements. Les bureaux sont situés vers l'Ouest et les logements vers l'Est et le Nord. Les deux résidences de service étudiant et tourisme se trouvent en partie sud du terrain [de Portzamparc 10].

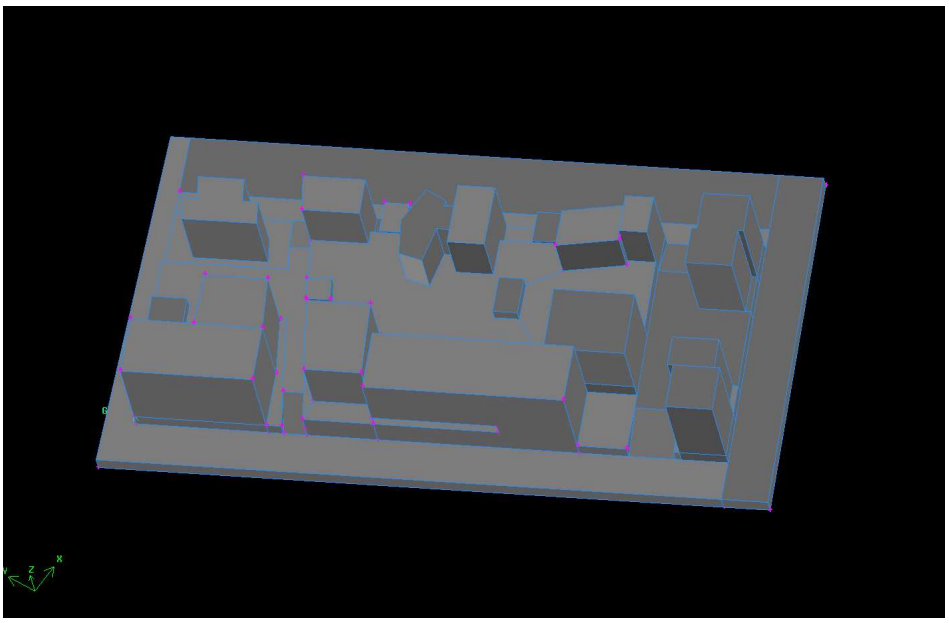


Fig. 4.3 – Le modèle géométrique 3-D d'éco-quartier Tripode, créé sur le logiciel Gambit [Fluent 04].

Les immeubles de logements et les deux residences de services étudiants et tourisme se trouvent respectivement aux parties est et sud. Les bureaux sont situés vers l'ouest, parallèlement à l'axe de l'avenue du General de Gaulle. Les bureaux qui sont amenagés du coté boulevard font face aux bruits de circulation favorisant ainsi la tranquillité et le confort accoustique des logements. De plus, Il n'y a aucune mitoyenneté entre chaque immeuble ce qui en fait un îlot ouvert. Les matériaux de construction sont très variables. Leurs propriétés thermiques et lumineuses variées vont jouer un rôle sur le microclimat, ce qui nous intéresse également dans le cadre de notre étude.

Les édifices du quartier ont obtenu la caractéristique 'BBC'. La norme BBC définit le niveau de performance exigé par un Bâtiment de Basse Consommation énergétique. L'objectif est de diminuer la consommation en énergie des logements afin de diminuer les gaz à effet de serre émis.

La nature des revêtements des façades

Les matériaux de construction utilisés sont très variés. Du béton matricé à l'aluminium, les surfaces du projet sont différentiées, ce qui rend la morphologie du projet assez complexe. Nous allons présenter les différents matériaux utilisés ainsi que les propriétés lumineuses dont la valeur est nécessaire pour l'élaboration de simulations. La figure 4.4 représente la répartition des matériaux pour chaque façade du projet.

- $L1$: 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 en peinture blanche.
- $L3$: Pour les logements 2, 3 et 4, les façades Ouest des bâtiments perpendiculaires au bassin sont en 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 extérieur.
- $L6$: Pour les logements 2, 3 et 4, les façades sud qui sont perpendiculaires au canal sont en béton lisse en 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, les plus grandes surfaces sont construites en principe de voile percé . Les tôles d'aluminium sur allèges de béton sont en alternance avec de vitrages émaillés de différentes teintes. La façade Est des bâtiment 2 et 3 des bureaux sont en vitrage.

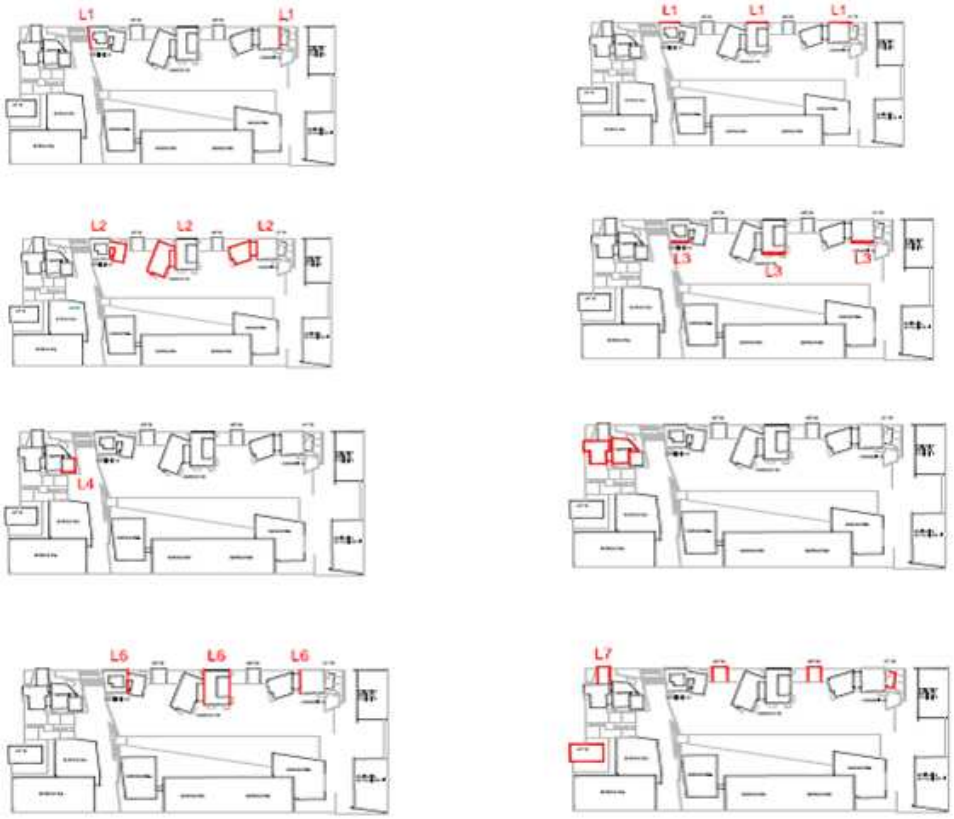


Fig. 4.4 – La répartition des matériaux pour les façades du projet Tripode [de Portzamparc 10].

Les matériaux de construction sont montrés en detail dans l'annexe B. La figure 4.5 montre une façade de bureaux construite en voile percé.

Fig. 4.5 – La nature des revêtements des façades de bureaux de Tripode : principe 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 [SAMOA 11].

En ce qui concerne les toitures du projet, la nature de leur surface est la suivante :
- Les toitures des logements 1 et 4 sont couvertes des panneaux photovoltaïques
- Les toitures des logements 2 et 3 et des bureaux 2 et 3 sont partiellement accessibles ou végétalisees. La partie accessible est en dalle béton et la partie végétale est couverte de sedum.
- Les toitures des bureaux 1a et 1b ainsi que les toitures des résidences de tourisme sont végétalisées en sedum.

Pour les cas des logements 2 et 3 et des bureaux 2 et 3 , étant donnée qua la partie en béton est plus importante, nous avons négligé pour ces surfaces la présence de la végétation pendant la simulation.

Calcul d'albédo des façades et des toitures

Le tableau 4.1 présente les valeurs d'albédo des façades et des toitures du projet. Les valeurs on été obtenues à partir d'une base de données des caractéristiques physiques et solaires des matériaux.

Afin de calculer l'albédo de chaque surface, nous utilisons une équation pour déterminer une valeur intermédiaire qui sera ensuite introduite comme donnée initiale sur Solène. Le processus suivi afin de définir l'albédo d'une façade est la suivante : l'albédo total d'une surface égale à l'albédo du premier matériau multiplié par son pourcentage d'occupation dans la façade plus l'albédo du deuxième matériau multiplié par son

pourcentage d'occupation. En ce qui concerne la taille des fenêtres, on prend une valeur moyenne de 1.5 m largeur et 1.85 m de hauteur. La surface de chaque fenêtre est ainsi 2.8 m^2. A l'égard du pourcentage d'occupation des vitrages dans les façades, on utilise une valeur moyenne de 35% pour les édifices des logements et 20% pour les bâtiments des bureaux.

Tab. 4.1 – Calcul d' albédo des surfaces du projet Tripode. L'albédo total d'une surface égale à l'albédo du premier matériau multiplié par son pourcentage d'occupation dans la façade plus l'albédo du deuxiéme matériau multiplié par pourcentage d'occupation.

Description de facades	Pourcentage [%] de vitrage	Albédo individuelle	Albédo totale
Vitrage Béton matrice	35	0.08 0.35	0.26
Vitrage simple Peinture blanche	35	0.08 0.82	0.56
Vitrage simple Peinture colorée jaune	35	0.08 0.77	0.53
Facade vitrée Occultations en bois	35	0.08 0.40	0.29
Vitrage simple Enduit coloré sombre moyen (vert)	35	0.08 0.21	0.17
Vitrage simple Tôles aluminium	20	0.08 0.85	0.70
Vitrage simple Enduit Coloré vert clair	20	0.08 0.50	0.42
Panneaux photovoltaiques		0.05	
Enduit coloré blanc		0.82	
Terrain Vegetalisé		0.33	
Bardage Metallique		0.80	

4.1.2 L'éco-quartier Bottière Chénaie

Introduction

La construction du quartier Bottière Chénaie est un grand projet d'aménagement urbain à l'Est de Nantes. Il accueillera 3500 nouveaux habitants. Il est constitué de 24 îlots de configurations différentes. Un certain nombre de bâtiments est réservé pour l'implantation de 25% de logement sociaux. Notre étude sera centrée sur l'analyse de l'îlot 2 nommé "la Sécherie", conçu par l'agence d'architecture Boskop. Il se situe le long de la rue de la Sécherie, prolongée jusqu'à la rue de Collines. Le plan masse de l'îlot étudié ainsi que le plan du projet entier sont montrés sur la figure 4.6. L'image 4.7 montre le modèle géométrique 3-D d'éco-quartier de Bottière Chénaie, créé sur le logiciel Gambit [Fluent 04].

Fig. 4.6 – Le plan masse de l'îlot 2 et plan masse du projet entier de Bottière Chénaie [Nantes 08].

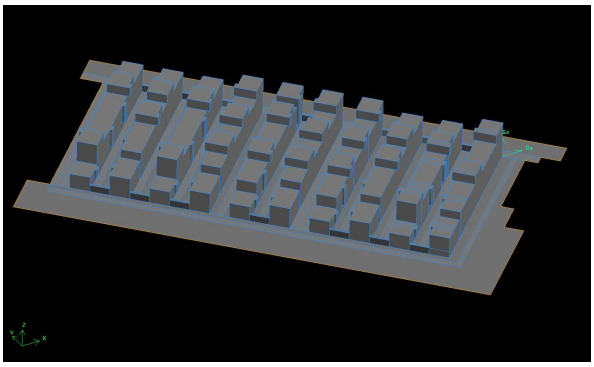


Fig. 4.7 – Le modèle géométrique 3-D d'eco-quartier Bottière Chénaie, créé sur le logiciel Gambit [Fluent 04].

Présentation du site

L'îlot 2 du projet Bottière Chénaie, de 4.807 m^2 de SHON se compose de 10 barres d'immeubles de logement de deux à trois étages. Ses axes principaux sont orientées Nord-est et Sud-ouest. Au nord, le projet se limite par la rue de Sécherie. Le plan du site étudié est ainsi caractérisé par des bandes bâties en alternance avec des bandes végétales et des passages publiques. La longueur de chaque bande est 55 m et sa largeur de 4.6 m. Les architectes ont prévu la création de 55 logements collectifs sociaux. L'objectif du projet est la densification de l'habitat individuel de manière horizontale. Les logements offerts ont des tailles différentes afin de répondre aux exigences différentes des usagers. Les logements se composent de pièces de 15 m^2. La position de chaque pièce ainsi que les couleurs en extérieur sont différentes. L'accès aux logements est effectué par des passages étroits et par des escaliers [Nantes 08].

La présence de végétation dans le projet est assez importante. Les petits jardins familiaux ont été considérés par les architectes comme une partie principale de l'habitat. Chaque logement conserve une vue sur les jardins. En outre, des espaces végétalisés privés ainsi que les toitures vertes font partie du quartier. La figure 4.8 montre la vue Sud-est du quartier et les passages piétons.

Fig. 4.8 – Vue Sud-est du projet de Bottière Chénaie et vue des espaces de circulation des usagers [Zimny 04].

Nature des revêtements des façades

Le principal matériau de construction de ce projet est le béton. Les façades extérieures sont de couleurs différents et plutôt claires. Les bandes bâties sont colorées en alternance de gris, jaune, vert et bleu clair. La face du projet, situé au long de la rue de

Sécherie est de teinte grise et blanche. Les voies de circulation des piétons sont en béton et comprennent la présence des petits espaces verts. En ce qui concerne les toitures, un certain nombre sont végétalisées. Les autres sont colorées en enduit colorée clair. A l'égard du pourcentage d'occupation des vitrages dans les façades, on utilise une valeur moyenne de 15% pour les édifices des logements.

Calcul d'albédo des façades et des toitures

Nous allons calculer les valeurs d'albédo des surfaces en suivant la méthodologie présentée pour le quartier Tripode. On va définir une valeur moyenne d'albédo de chaque façade, tout en tenant compte de la présence des fenêtres. Le tableau 4.2 résume les valeurs d'albédo pour les façades verticales et horizontales du quartier.

Tab. 4.2 – Calcul d'albédo des surfaces du projet Bottière Chénaie. L'albédo total d'une surface égale à l'albédo du premier matériau multiplié par son pourcentage d'occupation dans la façade plus l'albédo du deuxiéme matériau multiplié par pourcentage d'occupation.

Description de facades	Pourcentage [%] de vitrage	Albédo individuelle	Albédo totale
Vitrage Peinture blanche	15	0.08 0.82	0.71
Vitrage simple Peinture colorée jaune	15	0.08 0.77	0.67
Vitrage simple Peinture grise	15	0.08 0.25	0.22
Vitrage simple Peinture vert	15	0.08 0.50	0.44
Enduit coloré blanc Terrain Vegetalisé		0.82 0.33	

4.1.3 L'éco-quartier Lyon Confluence

Introduction

Le projet Lyon Confluence est un de plus grands projets d'aménagement urbain qui a lieu sur la ville de Lyon et il s'étend sur 150 hectares. Il est localisé au sud de la presqu'île dessinée par la rencontre de la Saône et du Rhône. Les îlots construits vont accueillir des bâtiments des logements, des commerces, des bureaux et des loisirs. Le projet comprend également la mise en place d'infrastructures lourdes en termes de transports. 60% de la surface totale du sol est consacrée aux espaces publics. La réalisation du projet Lyon Confluence est décomposée en deux phases. La première phase est achevée et elle se compose des îlots A, B et C [Lyon 09]. Les trois îlots dont la morphologie sera étudiée, font partie de la deuxième phase qui se compose de 12 îlots. La planification urbaine est confiée au paysagiste Michel Desvigne. La caractéristique la plus importante de cette phase est la forte présence végétale. Afin de laisser une large place aux espaces verts, l'habitat et les bureaux seront densifié d'une manière plutôt verticale qu'horizontale. Les immeubles seront de toutes tailles afin de permettre l'accessibilité à la lumière et au soleil. Les îlots analysés sont semi ouverts. La figure 4.9 montre la localisation du projet ainsi que la répartition des deux phases de construction. La figure 4.10 montre l'aménagement urbain des nouveaux îlots qui appartient la deuxième phase de construction. En outre la figure 4.11 montre le modèle géométrique 3-D d'eco-quartier Lyon Confluence, créé sur le logiciel Gambit [Fluent 04].

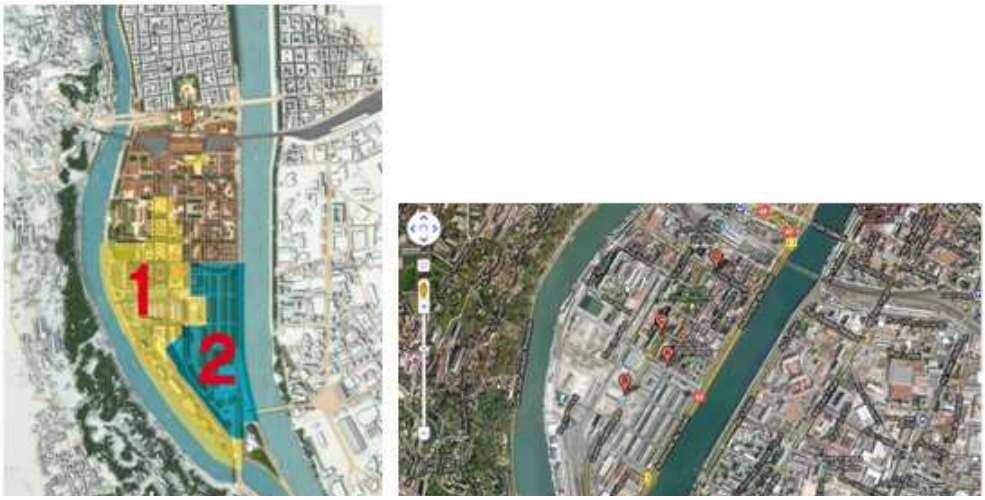


Fig. 4.9 – Localisation du projet Lyon Confluence au sud de la presqu'île dessinée par la rencontre de la Saône et du Rhône. Répartition des deux phases de construction [Lyon 09].

Fig. 4.10 – Aménagement urbaine du site étudié. Le long de voies piétonnes il y aura une range d'arbres d'une hauteur de 15 mètres. Les cœurs des îlots sont des parcs plantés d'arbres plus petits de 12 mètres. Les voies périphériques de desserte des îlots sont pavées de grès pour une utilisation piétonnière [Lyon 09].

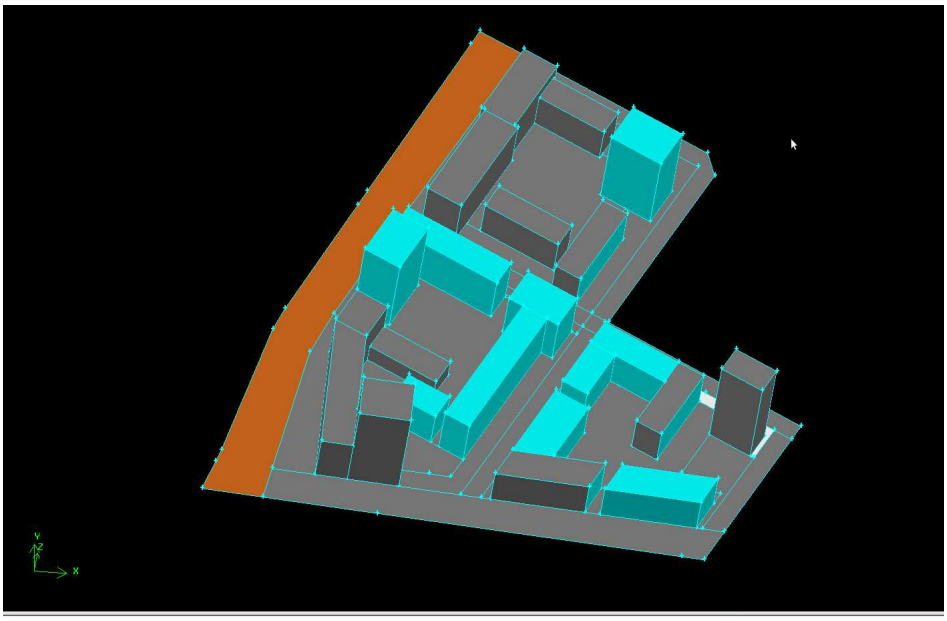


Fig. 4.11 – Le modèle géométrique 3-D d'eco-quartier Lyon Confluence, créé sur le logiciel Gambit [Fluent 04].

Calcul d'albédo des façades et des toitures

Nous allons calculer les valeurs d'albédo des surfaces en suivant la méthodologie présentée pour les deux autres quartiers. On va définir une valeur moyenne d'albédo de chaque façade, en tenant compte que la surface des fenêtres est 25% de la surface totale de la façade. Le tableau 4.3 résume les valeurs d'albédo pour les façades verticales et horizontales du quartier de Lyon Confluence.

Tab. 4.3 – Calcul d'albédo des surfaces du projet de Lyon Confluence. L'albédo total d'une surface égale à l'albédo du premier matériau multiplié par son pourcentage d'occupation dans la façade plus l'albédo du deuxiéme matériau multiplié par pourcentage d'occupation.

Description de facades	Pourcentage [%] de vitrage	Albédo individuelle	Albédo totale
Vitrage Peinture blanche	25	0.08 0.82	0.64
Vitrage simple Peinture colorée jaune	25	0.08 0.77	0.60
Vitrage simple Aluminium	25	0.08 0.85	0.66
Vitrage simple Peinture vert	25	0.08 0.50	0.40
Béton		0.35	
Pelouse		0.33	
Espace vert au coeur d'îlot		0.15	
Grès		0.46	

Nature des revêtements des façades

Du fait d'absence des données sur les matériaux de construction, nous avons reposé notre calcul sur les études déjà faites pour la première phase du projet de Lyon Confluence. En ce qui concerne l'aménagement urbain, nous émettons l'hypothèse que les parcelles non bâties (parcs et cœurs des îlots) sont végétalisées et plantées d'arbres. Plus précisément, au long de voies piétonnes il y aura une rangée d' arbres d'une hauteur de 15 mètres. Les cœurs d'îlots seront des parcs plantés des arbres d'une hauteur

de 12 mètres. Leur répartition sera telle que la luminosité de l'espace et des cheminements ne soit pas altérée. Les parcs des arbres seront modélisés sur Solène comme des volumes continus, occupés par le feuillage sur les zones plantés. Les voies périphériques de desserte des îlots sont pavées de grès pour une utilisation piétonnière [Bouyer 09]. En ce qui concerne les revêtements des façades, notre choix repose sur les matériaux qui sont déjà utilisés pour l'îlot B, construit pendant la première phase du projet de Lyon Confluence. Il s'agit des matériaux de haute réflectivité. Plus précisément, nous émettons les hypothèses suivantes :

- Les façades verticales des 4 grandes tours et des barres isolées sont à cassettes en aluminium laqué, en teinte claire.
- Les façades verticales des autres bâtiments du projet sont en peinture minérale colorée en teinte jaune et vert clair.
- Les toitures des tours sont végétalisées. Les toitures des autres édifices sont des toitures terrasses, en béton.
- L'emprise de la surface des fenêtres est 25% de la surface totale.

4.2 Les logiciels utilisés

Nous avons donné les caractéristiques architecturales principales des trois quartiers. Nous allons ensuite présenter les logiciels utilisés dans le cadre de notre analyse. Enfin, nous allons détailler l'évaluation des indicateurs choisis en relation avec les conditions microclimatiques et le confort thermique en espace extérieur. L'évaluation des indicateurs sera effectué en utilisant le logiciel Solène et le logiciel Gambit. Gambit est un logiciel édité par la société ANSYS. Les maquettes géométriques ont y été crées obtenant ainsi une vue du site en 3D. Les fonctions sur l'interface du logiciel nous permettent d'effectuer le maillage des géométries des trois projets. Nous avons ensuite utilisé une procédure externe afin d'extraire le maillage surfacique sur le logiciel Solène. Les fonctions du logiciel Gambit nous permettent d'obtenir des informations importantes sur les surfaces comme la longueur des axes du projet, l'emprise au sol et la volumétrie des édifices [Fluent 04].

Le logiciel Solène, développé par le laboratoire CERMA, est un outil numérique qui permet l'étude des paramètres solaires, lumineux et radiatifs des projets architecturaux et urbains. Ses fonctions peuvent nous aider à répondre aux questions d'ensoleillement du site en définissant la durée d'ensoleillement et les trajectoires solaires pendant une journée de simulation. De plus, Solène permet de répondre aux questions énergétiques en évaluant les flux d'énergie solaire direct et diffus ainsi que l'énergie solaire due aux inters-réflexions entre les surfaces. Le logiciel Solène peut aussi répondre aux questions de rayonnement des grandes longueurs d'onde permettant de réaliser le bilan thermique et d'évaluer les températures des surfaces. Il est aussi possible d'évaluer l'éclairement naturel d'un site à partir de modèles de luminance de ciel et du calcul de son ouverture

vers le ciel [Miguet 96, Groleau 00]. Un projet créé sur Solène comporte l'ensemble des objets contenus sur une commande appellée contexte d'affichage ainsi que les résultats issus des simulations. Plus spécifiquement, le projet se compose des éléments suivants :

- La géométrie : Elle contient l'ensemble de volumes 3D qui définissent l'environnement urbain du projet. Chaque géométrie se compose d'un ensemble de faces planes disjointes. Chaque face est constituée d'un ensemble de polygones (mailles) qui ont été déjà créés dans le logiciel Gambit. La triangulation est faite sur une maille de l'ordre d'un mètre. Les polygones de face de la géométrie possèdent un certain nombre de descripteurs qui les caractérisent. Les géométries que nous envisageons à étudier ont été importées sur Solène et elles sont enregistrées au format du *.cir*
- Le ciel : La définition du ciel est indispensable afin d'évaluer le flux d'énergie diffuse ainsi que l'éclairement naturel du site. Un ciel est définit comme un hémisphère discrétisé géodésiquement en facettes triangulaires. Chaque facette triangulaire est considérée comme un émetteur isotrope d'énergie.L'évaluation de flux solaire diffus nécessite également la définition du modèle de radiance et de luminance du ciel. Ces deux modèles sont définis en fonction de la date de simulation. La figure 4.12 montre la forme du ciel sur Solène.
- Les descripteurs : Il s'agit de valeurs qui donnent des informations supplémentaires aux contours des faces. Les descripteurs sont généralement produits par les différentes simulations appliquées aux géométries. Il existe également certaines opérations qui aident à la création de nouveaux descripteurs. Les valeurs des descripteurs peuvent être globalisées au niveau des faces ainsi qu'au niveau de géométrie.
- Le repère géométrique : Dans Solène, le repère $Oxyz$ utilisé pour les géométries est fixe. L'axe Oz correspond à l'axe vertical, le plan horizontal est le xOy et l'axe $0y$ définit la direction Nord. Il est nécessaire que ces conventions soient respectées pendant les simulations.

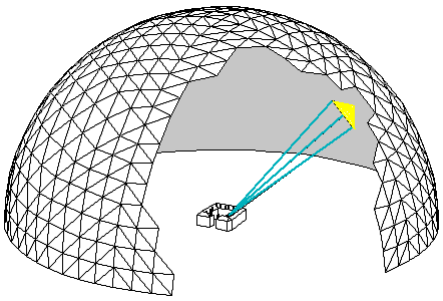


Fig. 4.12 – Définition du ciel sur Solène comme un hémisphère discrétisé géodésiquement en facettes triangulaires [Miguet 96].

Avant de lancer les simulations, nous avons définit les propriétés solaires des matériaux (albédo et coefficient d'absorption) dans la basse de matériaux du projet selon les résultats des tableaux 4.1 4.2 et 4.3. Ensuite, nous avons défini la latitude du site étudié qui est 47° Nord pour Nantes et 45° pour Lyon. La journée de simulation est le 19 juillet. La date a été choisie en fonction des données météorologiques de dix dernières années pour un période des trois mois, du 1ère juin jusque le 31 août. Plus précisément, la valeur moyenne de la température, de la vitesse de l'air et du rayonnement global ont été définis selon les données météorologiques. Ensuite, les dates dont la température, la vitesse de l'air et le rayonnement ont un écart de 15%, de 20% et de 25% ont été définies. La date de 19 juillet est celle-ci qui se répète pour les trois cas.

4.3 Analyse géométrique des trois projets

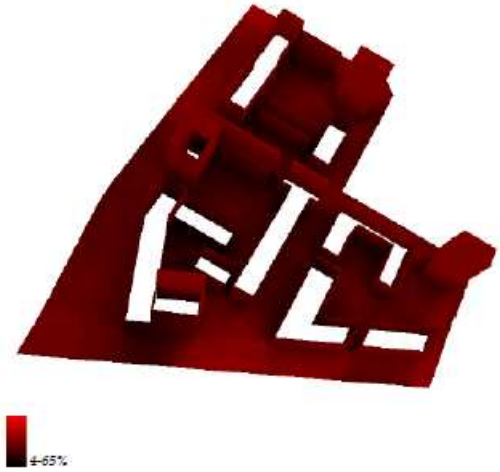
4.3.1 Évaluation du Facteur de Vue du Ciel

Le calcul du FVC est développé sous forme d'un exécutable automatique sur l'interface du logiciel Solène. La simulation d'éclairement nous donne comme résultat le pourcentage du ciel visible au niveau de chaque élément de maillage. On peut globaliser le descripteur au niveau de façade ou au niveau de géométrie. Dans le cadre de l'analyse géométrique nous nous intéressons à calculer le FVC au niveau de l'ensemble de la géométrie. Sa valeur est la moyenne calculée à partir de l'ensemble des éléments du maillage. Il est important de signaler que l'intégration des toitures peut ne pas avoir de signification si on s'intéresse au facteur de vue du ciel en relation avec le confort des usagers. Les façades verticales des édifices et la surface du sol sont les éléments signifiants du projet qui seront pris en considération quant au calcul du FVC. Exprimé en pourcentage, sa valeur se situe entre 0–100%. Plus le FVC est petit, plus la vue vers le ciel est obstruée . La définition de l'ouverture du projet vers le ciel nous permettra, dans un premier temps, d'évaluer l'accessibilité du projet au flux solaire diffus, en provenance du ciel étant donné que l'énergie diffuse qui atteint les surfaces dépend de l'ouverture du projet vers le ciel [Oke 88]. D'autre part, la valeur du FVC aura un impact sur le flux d'énergie global reçu par une surface. Les études scientifiques ont montré une corrélation positive entre l'ouverture vers le ciel et le rayonnement global réçu. De plus, pour un ciel clair, comme dans le cas de notre étude, le flux d'énergie solaire diffus est près de 10% du rayonnement global [Kakon 09]. Le flux d'énergie solaire global I_g qui arrive aux surfaces du projet est la somme du flux d'énergie solaire directe I_{dir} incidente et du flux d'énergie solaire diffus I_{dif} incidente. Il peut s'écrire avec la formule (4.1). Les resultats de la simulation pour les trois projets sont montres dans le tableau 4.4.

$$I_g = I_{\text{dir}} + I_{\text{dif}} \tag{4.1}$$

(a)

(b)



(c)

Fig. 4.13 – Représentation graphique de la répartition des valeurs du FVC pour le quartier Bottière Chénaie (a), Tripode (b) et Lyon Confluence (c) . Les images qui montrent la répartition de FVC pour chaque élément du maillage sont issus de simulation réalisé sur le logiciel Solène.

Tab. 4.4 – Évaluation du Facteur de Vue du Ciel et du flux d'énergie solaire diffus et global cumulé, pour les éco-quartiers Tripode, Bottière Chénaie et Lyon Confluence, calculés sur Solène. Les flux d'énergie pour l'ensemble de la géométrie sont calculées à partir de les éléments du maillage. Pendant le calcul le FVC des toitures et les flux d'énergie solaire qui arrivent à leur surface ne sont pas prise en compte puisque on s'interesse au facteur de vue du ciel en relation avec le confort des usagers.

Projet	FVC [%]	Flux d'énergie solaire cumulé [Wh/m^2]	
		diffus	global
Bottière Chénaie	32.60	355.70	3076
Tripode	38.25	417.5	3400
Lyon Confluence	32.40	320.00	2900

Le quartier Bottière Chénaie a une valeur de FVC qui égale à 32.6%. Au niveau de passage piéton l'ouverture vers le ciel baisse significativement et elle est près de 18.5%.Par contre, le FVC de Tripode égale à 38.25% et le cœur de l'îlot a une ouverture vers le ciel de 35%. Le quartier Lyon Confluence a une valeur de FVC égale à 32.4% au niveau de l'ensemble de la géométrie. Cette valeur est près de celle de Bottière Chénaie. Aux passages piétons et aux cœurs des îlots l'ouverture vers le ciel a une valeur moyenne de 29%. A Lyon Confluence le volume des grands tours qui se situent juste à coté des îlots analysés provoquent des masques importants sur les surfaces du projet et il influence également l'ouverture vers le ciel de chaque élément du projet.

Plus le FVC est grand , plus les flux d'énergie solaire diffus et global réçus par la géométrie sont importants. En effet, les résultats nous montrent que le flux d'energie solaire diffus et global est supériur pour le quartier Tripode que pour Bottière Chénaie et Lyon Confluence. De plus, les flux d'énergie solaire sur le projet Bottière Chénaie et de Lyon Confluence sont presque les mêmes étant donné que l'ouverture vers le ciel de deux projets varie faiblement.

Le décalage du FVC entre les trois projets résulte de leur morphologie différente. Bottière Chénaie se compose des bandes etroites dont l'espacement est petit par rapport à leur longueur (longueur de 55m, espacement de 4.6m). Les édifices sont près l'un de l'autre obstruant ainsi la vue vers le ciel. Les morphologies de Bottière Chénaie et de Lyon Confluence sont différentes mais leur FVC varie faiblement. Les îlots de Lyon Confluence se composent des formes rectangulaires de toutes les tailles. Les espacements parmi les immeubles sont petits en comparaison avec la hauteur importante des édifices. L'ouverture vers le ciel est ainsi obstruée pour la plupart des surfaces du projet. On pourrait alors dire que même si la configuration urbaine de deux projets est différente, c'est la relation entre la hauteur des bâtiments et leur espacement qui influence la valeur du FVC. Au contraire, le quartier Tripode est un îlot ouvert dont les

bâtiments sont bien séparés avec des espacements plus importants par rapport à Bottière Chénaie.L'aménagement spatial différent explique ainsi le fait que Tripode reçoit 18% et 30% respectivement plus de flux d'énergie diffus en comparaison avec Bottière Chénaie et Lyon Confluence.

La valeur de l'ouverture d'un quartier vers le ciel influence son intensité d'îlot de chaleur. Une augmentation de 10% de son FVC amene d'une part à une augmentation d'îlot de chaleur journalière de 2.1% et d'autre part à une diminution de l'intensité d'îlot de chaleur nocturne de 0.3%. Le rayonnement solaire reçu par les surfaces d'un quartier est le paramètre qui influence significativement la température de l'air du site [Kakon 09]. Cependant, il est important de signaler que la température de l'air ambiante est aussi influencé par la ventilation du site. Il faudra alors croiser les deux paramètres climatiques afin d'étudier leur impact sur l'intensité d'îlot de chaleur urbain.

4.4 Analyse morphologique des trois projets

Les indicateurs morphologiques qui vont nous servir à l'étude de la morphologie de trois quartiers sont la compacité, la densité surfacique et volumique et la minéralisation.

4.4.1 Évaluation de la compacité

Nous allons évaluer l'indicateur de compacité dans le cadre de la caractérisation morphologique des quartiers. Etant donnée que cet indicateur nous informe de la surface exposée à l'environnement extérieur , il est nécessaire pour l'étude des performances énergétiques du bâtiment. Plus précisément, la forte compacité se traduit par une limitation de la surface de déperdition et par conséquent, nous constatons une réduction des demandes énergétiques. La forte compacité a comme résultat la réduction de la surface réceptrice du rayonnement solaire [Bouyer 09].

Au sein de notre étude, son calcul servira à distinguer les trois sites d'étude selon leur exposition aux effets aérauliques et au rayonnement solaire. Nous allons calculer deux indicateurs liés à la compacité : la compacité nette C_f et la compacité utile C_{ut} [Adolphe 01]. L'indicateur de compacité utile représente le rapport entre la surface de l'enveloppe non contigüe d'un ensemble des bâtiments et sa surface cumulée de plancher. Il est sans unité et il peut prendre des valeurs comprises entre 0.5 et 1.5. La compacité a été calculée pour chaque bâtiment séparément. La compacité du projet résulte comme la valeur moyenne de la compacité obtenue pour chaque édifice. Plus C est faible, plus les constructions sont compactes et moins elles subissent les effets de l'environnement externe. Afin de calculer cet indicateur, il est nécessaire d'évaluer les paramètres suivants : la surface extérieure d'enveloppe non contigüe de chaque bâtiment et la surface de son plancher. Ces éléments sont évalués sur Gambit. La hauteur de chaque étage est considéré à 3 m. Le calcul de la compacité nette C_f

nécessite également la volumétrie des immeubles. Il sera calculé pour chaque édifice. Il correspond au rapport entre la surface d'enveloppe extérieure non contigüe du bâtiment et son volume élevé a la puissance 2/3. Le coefficient de compacité sera ainsi la valeur moyenne des compacités de chaque bâtiment. L'intérêt de ce coefficient par rapport au plus traditionnel facteur de forme (A_{ext}/V) est de ne pas donner un poids hégémonique aux grands bâtiments par rapport aux petits, ce qui obligerait lors du calcul du facteur de forme moyen pour un tissu donné à pondérer sa valeur par la surface de plancher [Adolphe 01]. L'indicateur de la compacité nette est plus représentatif quant à l'étude de l'impact des formes urbaines sur le microclimat. Elle dépend de la surface de l'enveloppe et du volume du bâtiment sans prendre en compte le nombre d'étages. A travers son calcul on pourra ainsi évaluer le taux du rayonnement solaire reçu par les surfaces extérieures des trois projets. Le tableau 4.5 montre les valeurs obtenues pour les trois éco-quartiers. Les valeurs obtenues pour les trois projets se

Tab. 4.5 – Calcul de la compacité nette C_f et de la compacité utile C_{ut} pour le projet Tripode, Bottière Chénaie et Lyon Confluence. L'évaluation de la surface de l'enveloppe extérieure a été effectuée sur Gambit.

Projet	C_f	C_{ut}
Bottière Chénaie	6.80	1.30
Tripode	5.19	0.84
Lyon Confluence	5.90	0.80

trouvent dans l'ordre de grandeur proposé [Adolphe 02]. Les valeurs de Bottière Chénaie approchent les valeurs maximales proposées. L'indicateur de la compacité utile est faiblement différent pour le quartier de Tripode et de Lyon Confluence et la différence peut être négligeable. En regardant l'indicateur de la compacité nette, il s'avère que le quartier Tripode est plus compact par rapport au quartier Bottière Chénaie et Lyon Confluence. La surface cumulée de l'enveloppe des immeubles de Tripode exposée au rayonnement solaire sera ainsi inferieure à la surface de deux autres projets. Cependant, il est important de signaler que malgré sa faible compacité, Tripode risque de subir des effets aérauliques plus importants que Bottière Chénaie du fait des formes bâties isolées qui y existent. La présence de hauts édifices isolés, comme les grands bâtiments des résidences, en relation avec les grands espaces ouverts, peut entrainer des effets tourbillonnaires au pied des bâtiments ainsi qu'au cœur du quartier. Ces problèmes de gène pourraient également apparaitre au sein du projet de Lyon Confluence puisque il y a un nombre des tours isolés, sensibles aux effets tourbillonnaires. Nous allons expliquer ces risques pendant la présentation de l'indicateur de porosité.

4.4.2 Évaluation de la densité surfacique et de la densité volumique

La densité surfacique D_s correspond au coefficient d'emprise au sol du projet urbain. Sa valeur est sans unité et son ordre de grandeur et de 10% à 80% [Adolphe 02]. Plus la densité est forte, plus les constructions occupent le terrain et plus le quartier est dense. La densité volumique D_v, exprimée en mètres, représente le volume construit rapporté au territoire du projet [Musy 06]. Le calcul de ces deux descripteurs nous aidera à évaluer l'occupation des constructions sur le terrain. Leur définition nécessite l'évaluation de l'emprise au sol du projet et la volumétrie des édifices. Le tableau 4.6 montre les résultats obtenus pour les trois éco-quartiers :

Tab. 4.6 – Évaluation de la densité surfacique D_s qui correspond au coefficient d'emprise au sol du projet et de la densité volumique D_v qui représente le volume construit rapporté au territoire du projet. L'évaluation des surfaces nécessaires pour leur calcul est réalisée avec le logiciel Gambit.

Projet	D_s	D_v [m]
Bottière Chénaie	0.49	4.70
Tripode	0.38	9.74
Lyon Confluence	0.42	9.05

Les valeurs obtenues se situent dans l'ordre de grandeur proposé par les sources bibliographiques [Adolphe 01, Musy 06]. A l'égard de la densité volumique, celle-ci est supérieure pour Tripode. Lyon Confluence a également des grands volumes construits et sa densité volumique est 92% supérieure de Bottière Chênaie. Ensuite, la densité de Lyon Confluence est faiblement inferieure de 7.5% de celle de Tripode. Les deux projets se composent des volumes dont la taille est significativement supérieure à ceux de Bottière Chénaie.

Nous avons évalué la densité volumique en relation avec les indicateurs de compacité exposés précédemment. Nous rappelons que plus la compacité est faible, moins les surfaces du projet subissent les effets de l'environnement extérieur. La figure 4.14 montre la relation entre la compacité et la densité volumique pour les trois cas étudiés. Nous en deduisons que la compacité du projet est liée à la densification volumique. De plus, c'est la compacité nette qui est plutôt favorisée par l'augmentation des volumes. Cet indicateur ne prend en compte que la surface extérieure et le volume sans être influencé par le nombre des planchers à l'intérieur des immeubles. Plus les volumes des constructions augmentent, plus la compacité nette du projet devient faible. Les projets Lyon Confluence et Tripode se composent des volumes des tailles importantes.

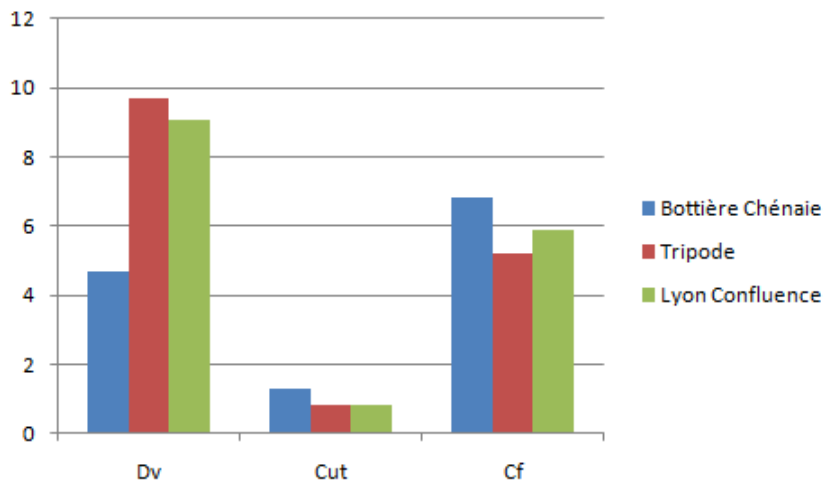


Fig. 4.14 – Évaluation de la densité volumique en relation avec les indicateurs de compacité C_{ut} et C_f. Plus la densité volumique augmente, plus la compacité nette diminue. L'indicateur C_f est plus influencé par la variation de la densité volumique que l'indicateur C_{ut}.

La densification des quartiers d'une manière plutôt verticale qu'horizontale favorise la compacité nette vu que l'indicateur C_f est plus faible.

En ce qui concerne la densité surfacique, il s'avère que Bottière Chénaie est le plus dense entre les trois projets. Son emprise au sol est de 29% et 22.5% plus importante que ceci de Tripode et de Lyon Confluence respectivement. En effet, l'objectif de ce projet est la densification de l'habitat individuel d'une manière horizontale, ce qui explique la densité surfacique plus élevée. Par contre, Tripode et Lyon Confluence se développent d'une manière plutôt verticale ayant ainsi une emprise au sol moins importante.

Pour les trois sites étudiés, la densification horizontale a un impact sur l'ouverture du projet vers le ciel. Le champ de vision est plus faible pour le quartier Bottière Chénaie que pour Tripode. L'implantation des bandes bâties d'une manière dense et horizontale diminue l'ouverture de l'ensemble du projet vers la voute céleste. En outre, malgré sa faible densité surfacique, le FVC de Lyon Confluence ne varie pas fortement de celui de Bottière Chénaie. Comme nous avons déjà noté, la hauteur des volumes est importante par rapport à leur espacement, ce qui empêche la vue de la géométrie vers le ciel. Il s'avère alors que la configuration urbaine de Tripode favorise l'augmentation de la vue vers le ciel. La densification verticale en relation avec l'espacement suffisant entre les édifices rend la géométrie plus ouverte vers le ciel. La figure 4.15 montre la relation entre l'emprise au sol et le FVC.

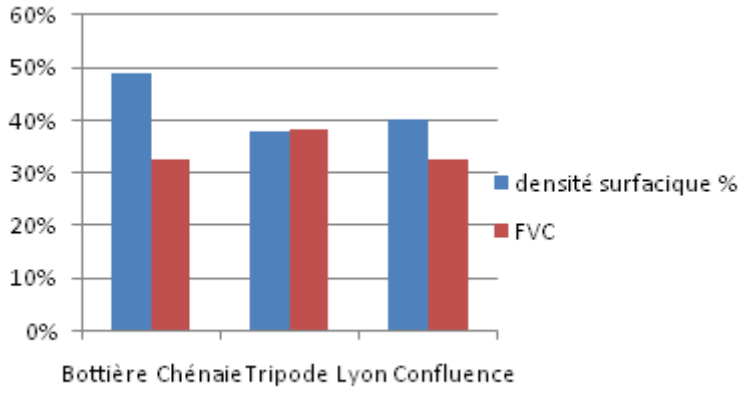


Fig. 4.15 – Évaluation de la densité surfacique en relation avec le FVC. La densité surfacique et le FVC sont exprimés en pourcentage. Plus la densité surfacique augmente, plus le FVC diminue. Le FVC de Lyon Confluence ne varie pas fortement de ce de Bottière Chénaie. Malgré sa faible densité surfacique la hauteur des volumes est importante par rapport à leur espacement, ce qui empêche la vue de la géométrie de Lyon Comfluence vers le ciel.

4.4.3 Évaluation de la minéralisation

Le calcul de cet indicateur nous permettra d'évaluer la présence des surfaces minérales au sein des deux projets. Il s'agit des surfaces qui ne sont pas affectées aux espaces d'eau ou aux espaces verts. Le calcul des surfaces vertes et minérales est réalisé avec le logiciel Gambit, en mesurant leur emprise sur la maquette numérique. Comme espace vert on prend en compte la surface plantée au sol pour les pelouses, les massifs plantés, les buissons et les jardins. Pour les arbres on considère la surface du cylindre qui circonscrit l'arbre, et qui est proportionnel au diamètre du tronc [Adolphe 01]. Nous avons projeté les surfaces des arbres au sol. En ce qui concerne le quartier de Bottière Chénaie nous avons négligé la présence des arbres vue qu'ils sont très petits et leur feuillage n'est pas encore développé. Les parcs des arbres a Lyon Confluence seront modélisés sur Solène comme des volumes continus, occupés par le feuillage sur les zones plantés. Le tableau 4.7 montre les valeurs de cet indicateur pour les trois projets. Selon sa définition (3.5), l'indicateur de minéralisation correspond au rapport de la surface non affectée aux espaces d'eau ou aux espaces verts, à la surface totale. Une surface minéralisée est ainsi la partie du sol recouverte de matière minérale comme le pavé, le béton, le gravier, etc. Ainsi, une valeur de 100% correspond à un projet dont les surfaces vertes et les espaces d'eau sont nulles. Les valeurs obtenues pour les projest Tripode, Bottière Chénaie et Lyon Confluence sont comprises dans l'ordre de grandeur proposé par la bibliographie [Adolphe 02]. Les plans masses des quartiers modernes sont caractérisés par une minéralisation de prés de 50%.

Tab. 4.7 – Évaluation de la minéralisation pour les éco-quartiers Tripode, Bottière Chénaie et Lyon Confluence. La valeur de la minéralisation correspond au rapport de la surface non affectée aux espaces verts ou aux espaces d'eau, à la surface totale. Elle est exprimée en pourcentage. L'évaluation des surfaces vertes et les espaces d'eau a été effectuée sur Gambit.

Projet	Minéralisation [%]
Bottière Chénaie	58
Tripode	50
Lyon Confluence	42

Selon les résultats, il s'avère alors qu'à Tripode, les surfaces non affectées aux espaces verts et aux espaces d'eau couvrent 50% de sa surface totale. A Bottière Chenaie, la surface minérale couvre 58% de sa surface totale. A Lyon Confluence, 42% de sa surface totale est minérale. Par conséquent le taux de végétation est plus important pour le projet de Lyon Confluence puisque 58% de sa surface est couverte par la pelouse et les parcs des arbres. L'image 4.16 montre la relation entre la densité surfacique et le taux des surfaces minérales au sein de trois projets étudiés.

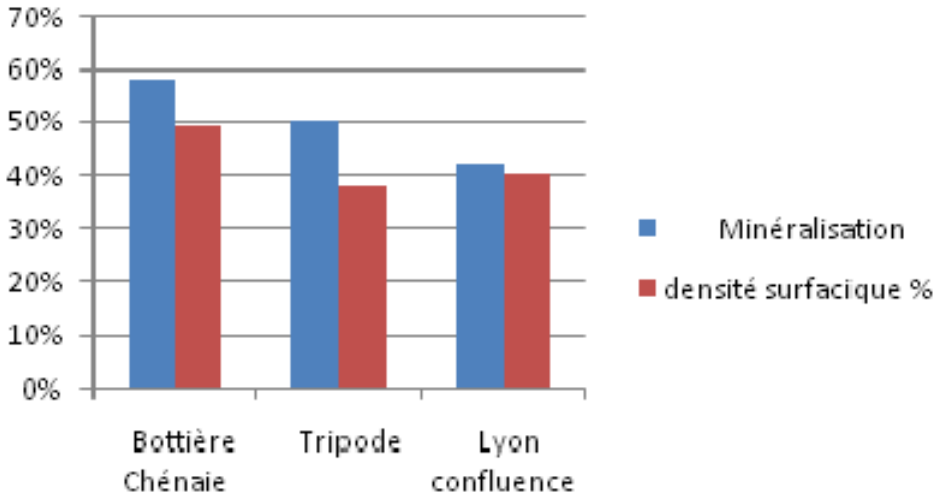


Fig. 4.16 – Relation entre la densité surfacique et le taux des surfaces minéralisées au sein de Tripode, de Bottière Chénaie et de Lyon Confluence. La densité surfacique favorise l'augmentation des surfaces minéralisées, non affectées aux espaces verts et aux espaces d'eau. La conception de Lyon Confluence préconise la densification tout en laissant une large place à la nature. C'est pour ce raison que Lyon Confluence a un taux de minéralisation inferieur de Tripode, malgré la faible différence de leur densité surfacique.

L'éco-quartier Bottière Chenaie est le plus dense parmi les trois cas étudiés. La plus grand partie de sa surface est couverte par des matériaux minéraux, non affectées aux espaces verts et aux espaces d'eau. Les jardins privés et la pelouse autour des constructions couvrent 42% de sa surface totale. Ensuite, la densité surfacique de Tripode n'est que 5% inferieure que celle de Lyon Confluence. Cependant, les surfaces minérales sont supérieures à Tripode par rapport à Lyon Confluence. La conception initiale de la deuxième phase de Lyon favorise la forte présence des espaces verts. De plus, nous avons émis l'hypothèse que l'intérieur des îlots et les de voies piétonnes sont plantés et végétalisés. Le projet préconise la densification tout en laissant une large place à la nature. C'est pour ce raison que Lyon Confluence a un taux de minéralisation inferieur à Tripode, malgré la faible différence de leur densité surfacique. Un nombre de campagnes de mesures a été réalisé sur différentes sites urbains dans le but de définir l'impact des surfaces minérales sur le microclimat. Il a été montré que la minéralisation influence fortement la température d'air et la température moyenne radiante, surtout dans les espaces qui ont une large ouverture vers le ciel. L'énergie solaire globale incidente est emmagasinée par les surfaces minérales dont l'albédo est souvent faible. La chaleur accumulée est ensuite, réémise vers l'environnement, augmentant ainsi la température de l'air à travers des effets convectifs [Adolphe 01].

La contribution de la végétation à l'amélioration des ambiances repose sur le phénomène d'évapotranspiration et d'ombrage. L'évapotranspiration est l'effet combiné de l'évaporation et de la transpiration. L'évapotranspiration correspond à la quantité d'eau qui transférée du sol vers l'atmosphère par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des plantes. La transpiration est le processus qui correspond l'évaporation d'eau par les feuilles et la reprise d'eau à partir des racines dans le sol. La transpiration favorise le rafraîchissement des plantes. Au cours du processus naturel d'évapotranspiration de la vapeur d'eau, l'air ambiant se refroidit en cédant une partie de sa chaleur pour permettre l'évaporation. De plus, le feuillage des arbres empêche le rayonnement incident d'atteindre la surface du sol affaiblissant ainsi la quantité d'énergie thermique ensuite restituée par les matériaux. Il s'avère alors que la présence des espaces verts joue un rôle très important sur le microclimat urbain et l'ambiance thermique au sein du quartier [Barradas 98].

De plus, la présence du bassin d'eau peut avoir un effet positif sur la lutte contre l'îlot de chaleur. Pendant le jour de simulation, les apports solaires à la surface du bassin peuvent atteindre des valeurs très élevées. Une petite partie de ces apports est réfléchie du fait de l'albédo réduit de l'eau qui est de 3%. Par contre l'énergie solaire absorbée par l'eau n'augmentera pas sa température. On constate un phénomène simultané de transfert de chaleur et de masse. Le phénomène de diffusion qui a lieu entre la surface du bassin et l'air entraine un changement de phase de l'eau liquide en vapeur d'eau. Le vapeur d'eau sera assimilé par l'air. Le changement de phase nécessite une importante quantité d'énergie (2450 kJ pour évaporer 1kg d'eau). Lors de l'évaporation

d'une zone d'eau, une grande partie des apports solaires est ainsi perdu sous forme de chaleur latente. Il faut également noter que le flux de chaleur sensible ente l'air chaud et l'eau peut atténuer l'effet positif du processus exposé précédemment. Le résultat sera une température équilibrée entre la température de feillage et la température de l'air [Vinet 00].

4.4.4 Évaluation de la porosité

Le calcul de porosité d'un quartier urbain correspond à l'évaluation du rapport des volumes utiles ouverts à l'ensemble des volumes du tissu urbain considéré [Adolphe 02]. Sa valeur dépend ainsi de la configuration spatiale du milieu urbain. Pour évaluer cet indicateur il a fallu tout d'abord définir la longueur de chaque espacement du projet. Ensuite, nous avons défini les volumes des édifices ainsi que le volume des ouvertures du projet. Enfin nous avons défini le rayon hydraulique pour chaque espacement qui caractériser la forme de l'espacement. Le rayon hydraulique dépend de la hauteur moyenne des bâtiments dans la rue considérée et de la largeur moyenne de la rue. Les

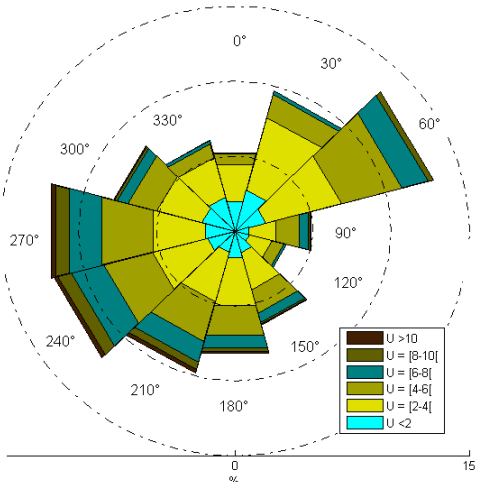


Fig. 4.17 – La rose des vents de Nantes pour les années 1997–2007. Les vents dominants sont de direction Ouest et Sud-ouest(secteurs 220°–270°).Les différentes couleurs de la rose des vents correspondent aux différentes vitesses d'écoulement [Sabre 11].

espaces ouverts du projet, en relation avec leur configuration spatiale vont influencer les écoulements du vent. Avant présenter les valeurs de porosité, nous allons donner des informations sur le régime de vent à Nantes. L'image 4.17 est la rose des vents de Nantes pour les années 1997–2007, issu de la station météorologique de Nantes. Elle donne des informations sur la direction des vents qui arrivent à Nantes. On obtient aussi

des informations sur les fréquences de chaque direction et la vitesse des écoulements. Afin d'interpréter les données du schéma, il faut aussi savoir qu'un vent de 180° vient du Sud et un vent de 270° vient d'ouest. Ainsi, selon les données météorologiques, les vents dominants à Nantes sont de direction Ouest et Sud-ouest. Leur fréquence d'apparition est plus importante par rapport aux autres directions. De plus, le secteur de 60° qui correspond à un vent Nord-est a aussi une fréquence importante. Les vents du Nord, du Sud et du Sud-est ont une faible fréquence. La rose des vents fait apparaître deux directions des vents dominants pour la ville de Lyon aux secteurs Nord et Sud, ce qui est montré sur l'image 4.18. Les vents de directions Nord-ouest ont une fréquence importante. Selon les données de la station météo de Lyon-Bron, les vents Nord sont plus fréquents que les vents du Sud sauf les mois de Mars et de Décembre. La vitesse moyenne annuelle est de 3 m/s d'après les statistiques de 1951–1960. Pendant les mois d'été, elle reste inferieure de 3 m/s. Elle varie entre 3 m/s et 4 m/s pendant l'hiver.

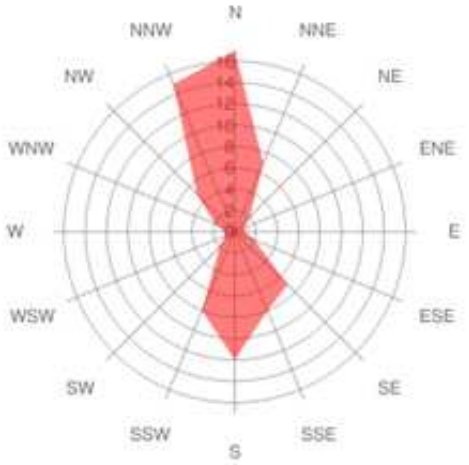


Fig. 4.18 – La rose des vents de Lyon selon des statistiques basées sur les obsérvations entre 11/2000–06/2011. La rose des vents fait apparaitre les vents dominants aux secteurs Nord, Nord-ouest et Sud [Kaufmann 11].

Les trois quartiers sont orientés différemment. Nous avons calculé la porosité pour les directions perpendiculaires aux axes des projets. Plus précisément, en ce qui concerne Tripode, nous avons calculé la porosité pour les directions Ouest et Sud. Pour le quartier Bottière Chénaie, nous avons effectué le calcul de porosité sur la direction, Sud-ouest, Nord-est et Sud-est. Pour le projet Lyon Confluence, nous avons calculé l'indicateur pour les directions Nord-est, Nord-ouest, Sud-ouest et Sud-est. Le tableau 4.8 montre les résultats de porosité pour les trois quartiers.

Les sources bibliographiques indiquent un ordre de grandeur de porosité entre 5% et 50% avec une valeur moyenne de 35% [Adolphe 02]. Les valeurs obtenues sont ainsi

Tab. 4.8 – Évaluation de l'indicateur de porosité pour l'éco-quartier Bottière Chénaie,Tripode et Lyon Confluence et pour des directions du vent differentes.

Projet	Direction	Porosité [%]
Tripode	O	20
	S	37
Bottière Chénaie	SE	0
	SO	35
	NE	35
Lyon Confluence	SE	20
	SO	18
	NE	23
	NO	14

comprises dans cet ordre et elles approchent la valeur moyenne. Il est intéressant de noter que Bottière Chénaie a une porosité nulle sur la direction Sud-est. Cette valeur est expliquée parce que le projet est fermé vers cette direction. Il n'y a pas des espaces ouvertes sur la face Nord-est et par conséquent le vent qui y arrive est bloqué par les surfaces des bâtiments. Il y a deux probables scénarios en ce qui concerne le vent qui arrive de cette direction. L'écoulement du vent qui arrive de cette direction passera au-dessus de l'îlot sans provoquant des effets tourbillonnaires aux vois de circulation des piétons. Le deuxième scénario est que le vent circlulera dans les espaces entre les formes bâties provoquant des effets tourbillonaires. Les paramètres qui vont influencer le mouvement des masses d'air sont d'une part la vitesse du vent et d'autre part le rapport H/L des espaces de circulation. La simulation aéraulique est le processus indispensable afin de repondre à cette question.

La porosité calculée sur la direction Sud-ouest est de 35%. L'axe de circulation des piétons est orienté vers cette direction. Selon la rose des vents, les vents dont la fréquence est très importante viennent également du Sud-ouest. Par conséquent, l'écoulement d'un vent de cette direction sera canalisé et il va circuler dans les passages piétons, ventilant ainsi le cœur du quartier. En général, une canalisation parallèle au vent dominant n'introduit pas des zones de survitesse importantes. Par contre, on risque d'avoir des vitesses élevées si les conditions météorologiques ou l'implantation en site urbain favorisent les fortes vitesses du vent. De plus, une canalisation linéaire devient une cause de survitesse si elle est également associée avec l'effet Venturi [Reiter 07].

Dans le cadre de notre étude, selon les données météorologiques, le vent n'a pas

une vitesse élevée pendant la journée de simulation. Les conditions météorologiques ne provoquent pas ainsi des fortes vitesses sur le site étudié. La canalisation linéaire va favoriser la ventilation naturelle du cœur de l'îlot diminuant ainsi le risque d'inconfort des usagers. Par opposition, il faut noter que pendant la période hivernale, la canalisation pourra provoquer des problèmes de gêne aux usagers. Plus précisément, les vitesses des écoulements qui vont arriver aux surfaces du projet seront plus fortes en hiver qu'en été. La face Sud-ouest du projet n'est pas protégée des fortes vitesses puisque il n'y pas d'autres construction pour faire obstacle aux écoulements. En outre, la création de l'étranglement du passage à partir des bâtiments du projet va provoquer l'effet Venturi. La canalisation des écoulements de forte vitesse en combinaison avec l'effet Venturi provoquera des survitesses engendrant ainsi une source de gêne pour les piétons. Le vent qui vient du Nord-est va provoquer les mêmes effets aérauliques puisque la configuration du projet est exactement la même pour cette direction ainsi que le taux de porosité calculée.

En ce qui concerne le quartier Tripode, la porosité calculée pour la direction ouest, qui est également la direction des vents dominants, égale à 20%. La porosité du projet pour la direction Sud égale à 38%. Elle est presque la double de la porosité Ouest. L'îlot a ainsi moins d' ouvertures sur la face orientée vers les vents dominantes. Les grandes façades des bureaux, situés vers l'Ouest vont faire obstacle aux écoulements du vent. Ainsi, la vitesse du vent au cœur de l'îlot sera affaiblie. Cette configuration pourra diminuer la potentiel de ventilation naturelle au cœur de l'îlot diminuant ainsi la rafraîchissement d'air. A l'égard du projet Lyon Confluence, les principaux axes du projet ne sont pas orientés selon la direction des vents dont la fréquence est importante (directions Nord et sud). En général, les ouvertures du projet vers toutes les directions sont petites par rapport aux dimensions des édifices. Les ouvertures les plus importantes sont celles des vois piétons qui permettent la circulation parmi les îlots. La porosité calculée pour la direction Nord-ouest a une faible valeur de 14%. Selon la rose des vents montrée sur la figure 4.18, cette direction est également une direction dont la fréquence des vents est importante. Etant donné que la configuration des immeubles forment des petits espacements, nous aboutissons au fait que le projet sera protégé par des écoulements dominants qui viennent du Nord-ouest. Le fait que les bâtiments font obstacle aux écoulements du vent pourra être négatif quant au refroidissement du quartier pendant l'été. Par opposition, il y aura un effet positif pendant le période hivernal étant donné que la vitesse du vent est plus forte. Pour les directions Sud-est et Sud-ouest la porosité est faiblement supérieure étant donné que les fréquences des écoulements qui viennent de ces direction est plus faible que cette de Nord-ouest.

Par opposition au quartier Bottière Chénaie, le projet Tripode et Lyon Confluence se composent de formes bâties isolées, dont les dimensions sont importantes. Au sein de ces deux projets, il y a un nombre d'immeubles dont la hauteur est importante et oriéntées vers la directions des vents dominantes. On risque ainsi d'avoir un rouleau

tourbillonnaire au pied de la face au vent. Il s'agit d'un effet particulièrement désagréable en raison des directions verticales que peut avoir l'écoulement dans le tourbillon. De plus, la présence des grands volumes isolés favorise l'apparition de l'effet de coin qui se traduit par un écoulement fort aux angles des constructions [de Virel 09]. Un nombre de mesures peut être mis en place afin de limiter les effets aérauliques qui peuvent perturber le confort des piétons. Prévoir des éléments poreux prés des angles des bâtiments élevés peut être une solution afin de limiter la vitesse de l'écoulement. La végétation ou les écrans perméables d'environ 2 m de hauteur sont des dispositifs qui aident au ralentissement de la vitesse de l'air [Reiter 07].

4.5 Analyse physique des trois projets

4.5.1 Évaluation de la durée d'ensoleillement

Les différentes configurations des trois projets influencent la distribution du rayonnement solaire directe ainsi que la durée d'accessibilité des surfaces au soleil. A Bottière Chénaie, les surfaces verticales des bâtiments qui donnent vers les espaces piétons et elles sont séparées avec un espacement de 4.6 mètres, font obstacle aux rayons solaires empêchant ainsi l'énergie solaire directe d'atteindre la surface du sol pour une longue durée pendant la journée. D'autre part, au sein de Tripode, les espacements entre les formes bâties isolées sont plus importantes et les rayons directes sont moins obstruées. Le flux d'énergie solaire direct qui arrive à la surface du sol est ainsi plus grand. A Lyon Confluence, l'implantation des parcs des arbres d'une hauteur de 12 m va empêcher les rayons solaires directs d'arriver au sol des cœurs des trois îlots. Nous avons mesuré la durée pendant laquelle les rayons solaires atteignent les surfaces du sol.

Tab. 4.9 – Évaluation de la durée d'ensoleillement pour les éco-quartiers Tripode, Bottière Chénaie et Lyon Confluence. Le calcul de la duréé d'ensoleillement est réalisé sur le niveau du sol, aux espaces de circulation des piétons, pour les 720 minutes de simulation. Les résultats obtenus correspondent à la valeur totale à partir de l'ensemble des éléments du maillage. L'évaluation de l'indicateur est réalisée sur le logiciel Solène.

Projet	Durée d'ensoleillement au niveau du sol [min]
Bottière Chénaie	190
Tripode	300
Lyon Confluence	220

La durée d'ensoleillement de Tripode est la plus grande en comparaison avec les deux autres projets. A Lyon confluence la durée d'ensoleillement des espaces piétons est inferieure de celle de Tripode de 36% est supérieure de celle de Bottière Chénaie de 15.7%. La figure 4.19 montre l'évaluation de la durée d'ensoleillement en fonction du FVC pour les quartiers Tripode, Bottière Chénaie et Lyon Confluence au niveau du sol, aux espaces de circulation des piétons.

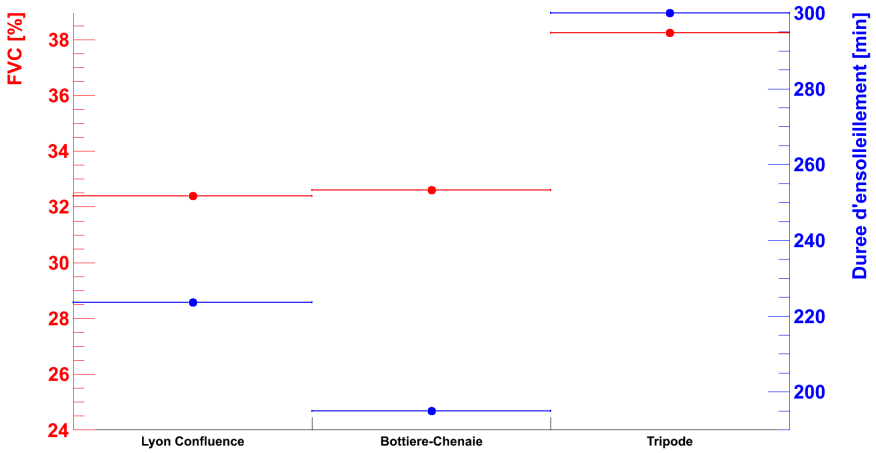


Fig. 4.19 – Relation entre la durée d'ensoleillement au niveau du sol, aux espaces de circulation des piétons et le FVC. Une faible valuer du FVC favorise la diminution de la durée d'ensoleillement au niveau du sol. La durée de simulation est 720 minutes.

La durée des simulations est 720 minutes : de 6 heures du matin jusqu'à 18 heures du soir. Pour les 12 heures de simulation, la surface du sol aux passages piétons à Bottière Chénaie reçoit du rayonnement solaire pendant 190 minutes. Pour Tripode, la durée d'ensoleillement au niveau du sol, sur les espaces de circulation est 300 minutes. La simulation a montré que le sol aux espaces piétons à Lyon Confluence devra recevoir du rayonnement direct pendant 220 minutes. Cependant, le feuillage des arbres va faire obstacle aux rayons solaires d'arriver jusqu'à la surface du sol. Les surfaces de circulation des piétons qui se trouveraient plus à l'ombre pendant la journée de simulation sont ainsi plus importantes au sein de Bottière Chénaie et de Lyon Confluence. Plus précisément, la densité surfacique en relation avec la configuration du projet Bottière Chénaie amène à la création des zones d'ombre importantes. Il s'agit des voies de circulation des pietons entre les bandes bâties étroites. Au sein d'éco-quartier Lyon Confluence la feuillage des arbres plantés creé des zones d'ombres importantes dans la cœur des îlots étudiés.

Les études scientifiques ont montré que la création des zones d'ombre est une so-

lution efficace afin de diminuer le risque d'inconfort dans les espaces extérieurs. Une faible valeur de FVC correspond aux espaces qui reçoivent moins du rayonnement solaire direct. La corrélation entre le FVC et les indices qui évaluent le confort thermique est ainsi négatif. Les endroits dont le FVC est petit sont plus frais [Hwang 11]. Les surfaces qui se trouvent dans ces zones ne vont pas présenter une forte variation de leur température, pendant la journée en comparaison avec autres surfaces qui vont reçevoir de rayonnement solaire directe pendant plusieurs minutes. Du fait de la durée limitée d'ensoleillement, l'énergie solaire emmagasinée puis réémise vers l'environnement sera également diminuée. Par conséquent, les masses d'air en voisinage avec ces surfaces ne vont pas fortement augmenter leur température du fait des effets convectifs.

4.5.2 Évaluation de l'albédo moyen

Pour un quartier urbain, l'albédo se définit comme le rapport du flux d'énergie total réfléchi vers le ciel sur le flux d'énergie global incident. Son évaluation nécessite le calcul de flux solaire global incident et de flux solaire réfléchie vers le ciel. Pour les trois éco-quartiers le calcul d'albédo moyen est réalisé avec le logiciel Solène en utilisant le processus suivant : Nous avons attribuée à chaque surface de trois projets les matériaux correspondants. L'attribution est faite selon les données des tableaux 4.1, 4.2 et 4.3. sNous avons évalué le flux d'énergie solaire direct. Le calcul des flux solaires nécessite la définition de la journée et de la durée de simulation. Les résultats obtenus nous informent du flux énergie solaire direct reçu par chaque élément de maillage. Nous pouvons globaliser les résultats au niveau des faces et au niveau des géométries. De plus, les résultats correspondent à chaque heure de simulation. Afin de savoir le flux d'énergie solaire direct qui arrive aux surfaces du projet pendant toute la journée, il est possible de créer un descripteur qui égale la somme de flux d'énergie solaire direct qui correspond à chaque heure de simulation.

Nous avons évalué le flux d'énergie solaire diffus. Dans un premier temps, son calcul nécessite la définition du ciel. Le ciel choisi se compose de 1024 faces et c'est un ciel clair. Nous avons créé le modèle de luminance en fonction de la date et des heures de simulation. Il décrit la distribution de luminance à chaque élément triangulé du ciel. Après avoir défini le ciel, nous pouvons évaluer le flux d'énergie diffus en provenance de la voute céleste qui atteint les éléments de maillage. On peut également globaliser les résultats au niveau de face et de géométrie. Enfin, nous avons calculé la valeur cumulée d'énergie diffuse, pour toute la journée de simulation.

Le flux d'énergie global résulte de l'addition des flux solaire direct et diffus. Les résultats obtenus correspondent aux flux d'énergie solaire global reçu par chaque élément de maillage. Nous avons globalisé les résultats au niveau des surfaces et de géométrie. Nous avons également créé un descripteur en calculant la somme du flux d'énergie global qui arrive aux surfaces des projets pendant la journée de simulation. La valeur du descripteur est ainsi le flux cumulé d'énergie global qui arrive à la géométrie.

Ensuite, nous avons calculé le flux d'énergie solaire après la réflexion. Plus précisément, son calcul prend en compte les composantes suivantes : la composante du flux d'énergie solaire global qui est réfléchi directement par les éléments du projet et la composante due aux inters-réflexions qui ont lieu parmi les éléments de maillage. Les éléments du maillage se comportent comme des récepteurs et des émetteurs d'énergie radiative redistribuée au ciel. L'évaluation des inter-réflexions nécessite la définition des facteurs de forme selon l'équation (2.3). La méthode de calcul des facteurs de forme effectuée sur Solène ne tient pas en compte du double intégral mais il repose sur une simplification qui considère chaque polygone comme une source ponctuelle. Le calcul des facteurs de forme est fait pour chaque paire de facettes. Pour un maillage de n mailles on a un nombre des facteurs de forme égal à n^2 [Bouyer 09]. Le facteur de forme entre deux surfaces est calculé en fonction des relations géométriques. Il dépend de leur distance et de leur orientation relative. Les résultats obtenus du simulation correspondent aux flux d'énergie solaire réfléchie par chaque élément de maillage. Nous avons globalisé les résultats au niveau des surfaces et de géométrie. Enfin, nous avons calculé la valeur cumulée du rayonnement global après la réflexion, pour toute la journée de simulation.

La partie du rayonnement qui est réfléchie vers le ciel dépend de l'ouverture du projet vers le ciel. Nous avons ainsi évalué le Facteur de Vue du Ciel pour l'ensemble de la géométrie étant donné que nous nous intéressons à la réflexion du rayonnement issue de toutes les surfaces du projet. Nous avons créé le descripteur suivant : (Facteur de vue du ciel)×(Valeur Cumulée du flux d'énergie solaire global après la réflexion). Ce descripteur représente la partie du flux d'énergie solaire réémise par la géométrie vers le ciel. Le tableau 4.10 contient les valeurs de flux d'énergie solaire global cumulé et d'énergie solaire réfléchi cumulé et d'albédo moyen, pour les trois géométries.

Tab. 4.10 – Évaluation de l'albédo moyen. Pour un site urbain, l'albédo moyen est le rapport du flux d'énergie solaire I_{r_1} cumulé, réémise vers le ciel sur le flux d'énergie solaire global incidente I_g, cumulé pour les 12 heures de simulation. Le flux d'énergie réémise vers le ciel dépend du FVC. Le calcul des flux solaires est effectué sur le logiciel Solène. En outre, I_{r_2} est le flux d'énergie global après la réflexion. Tous les flux sont mesures en unites de [Wh/m^2].

Projet	I_g	I_{r_2}	FVC [%]	I_{r_1}	Albédo moyen
Bottière Chénaie	3385.5	3600	39.9	1440	0.42
Tripode	3900	5200	44.1	2280	0.59
Lyon Confluence	3400	4300	39.6	1702.8	0.50

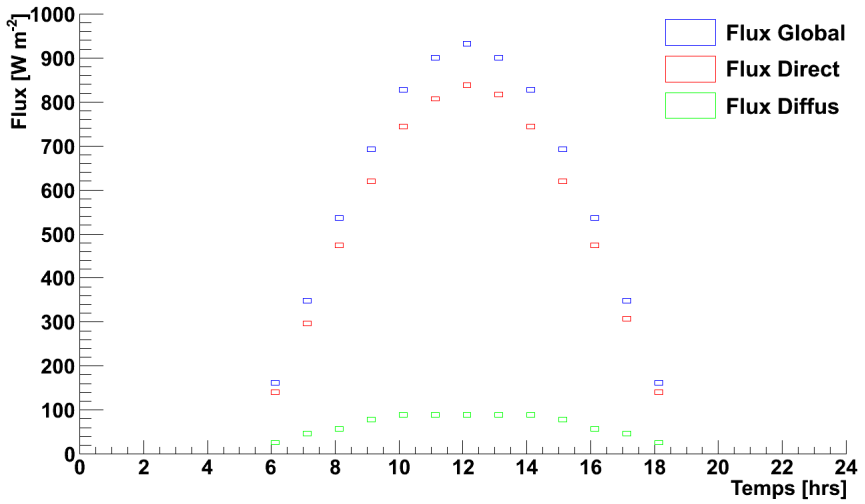
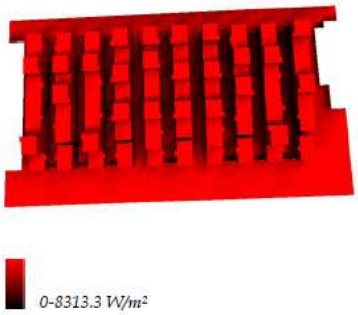


Fig. 4.20 – Évaluation de flux solaire diffus, direct et global pour un élément de maille d'une surface de toiture à Bottière Chénaie. Les valeurs représentées sont issus de simulation réalisé sur le logiciel Solène. Le simulation a été réalisé pour 12 heures. Les valeurs correspondent au flux solaire diffus, direct et global qui arrive à la surface du maille pour toutes les heures de simulation. Le flux maximal est observé le midi.

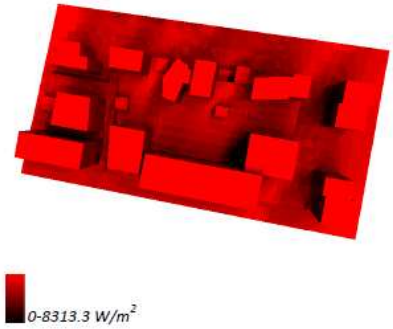
La figure 4.20 montre l'évolution temporelle de flux solaire diffus, direct et global pour un élément de maillage sur la surface d'une toiture de projet de Bottière Chénaie. Afin d'évaluer l'albédo des trois éco-quartiers, il faut calculer le rapport entre le descripteur(Facteur de vue du ciel)×(Valeur Cumulée du flux d'énergie solaire global après la réflexion) et la valeur cumulée du flux solaire global. En outre l'image 4.21 demontre graphiquement la répartition du flux d'énergie solaire globale qui arrive aux surfaces des projets.

Le flux d'énergie global incident indiqué est la valeur cumulée de flux solaire globale reçu par la géométrie pendant les 12 heures de simulation. Le flux solaire global qui arrive aux surfaces de Tripode (rayonnement directe incident+rayonnement diffus incident) est supérieur de ce de Bottière Chénaie et de Lyon Confluence. Cette différence peut être expliquée en tenant compte que son ouverture vers le ciel est supérieure par rapport aux deux autres projets ce qui augmente le flux d'énegie global qui arrive aux surfaces du quartier. Les toitures de trois projets reçoivent la plus grande partie du flux d'énergie solaire global étant donné que leurs surfaces ne sont pas significativement obstruées.

La valeur du flux d'énérgie solaire après la réflexion indiquée correspond à la valeur cumulée de ce flux pour les 12 heures de simulation. Le flux d'énergie solaire après la réflexion dépend d'une part du flux d'énergie global qui est réfléchie par les surfaces



(a)



(b)

(c)

Fig. 4.21 – Représentation graphique du flux d'énergie global incident cumulé pour les éco-quartiers Bottière-Chenaie, Tripode et Lyon Confluence. Les images sont issus de simulation sur le logiciel Solène.

et d'autre part des inter-réflexions parmi les surfaces. Plus précisement, le flux total réfléchi par un élément de surface (un maille) est égale à la réfléxion directe de l'élément augmenté de la partie réfléchie du flux provenant d'autres surfaces.

La haute valeur d'albédo des matériaux de construction favorise l'augmentation du flux d'énergie solaire global qui est réfléchie. C'est pour cette raison que le flux d'énergie après la réflexion est significativement plus grand à Tripode qu'à Bottière Chénaie et Lyon Confluence. L'utilisation des matériaux réfléchissants amène a une hausse de flux d'énergie solaire réfléchie vers le ciel. Ensuite, l'ouverture de Tripode vers le ciel est plus grande. Le rayonnement solaire globale arrive ainsi plus facilement aux surfaces du projet. D'autre part, la grande ouverture favorise l'émision du rayonnement réfléchie vers le ciel.

Le flux d'énergie global incident ne varie pas fortement entre les projets Bottière Chénaie et Lyon Confluence. Leur FVC est presque identique. Néanmoins, le flux d'énergie solaire réfléchie à Lyon Confluence est supérieur de 19.5%. Ce décalage est expliqué par la haute réflectivité des matériaux des surfaces du projet de Lyon selon le tableau 4.3. Il s'avère alors que les propriétés lumineuses sont importantes quant à l'évaluation d'albédo moyen d'un site urbain.

Nous envisageons d'étudier l'impact de l'albédo et de la ventilation naturelle des éco-quartiers Tripode et Bottière Chénaie sur l'effet d'îlot de chaleur nocturne. Tripode a la plus grande valeur d'albédo entre le trois cas analysés et Bottière Chénaie a la plus faible valeur. Les façades des deux projets reçoivent d'énergie solaire globale pendant la journée dont une partie est absorbée et ensuite réémise vers l'atmosphère. Le flux d'énergie solaire global est plus important pour Tripode puisque la taille des surfaces est significativement plus grande. Selon les résultats des simulations, le quartier de Tripode a un albédo plus important que Bottière Chénaie. Par conséquent, le flux d'énergie réfléchie sera supérieur diminuant ainsi la quantité d'énergie emmagasinée aux surfaces des constructions. L'utilisation des matériaux de haute réflectivité amènera ainsi à la diminution de l'énergie sous forme d'infrarouge émise après la couche du soleil. Une grande valeur d'albédo favorise la lutte contre l'îlot de chaleur nocturne. D'autre part, l'aménagement des bâtiments des bureaux sur la partie ouest diminue la vitesse du vent. Le cœur de l'îlot sera ainsi moins ventilé et moins rafraîchi au cas où les vents viennent d'ouest.

En ce qui concerne le quartier de Bottière Chénaie, son albédo est plus faible. La réflexion de rayons solaires qui arrivent aux surfaces du projet sera moins importante favorisant ainsi l'augmentation du stockage d'énergie solaire. Néanmoins, les axes de circulation des piétons ont la même orientation avec la direction des vents dominants. La ventilation naturelle sera ainsi facilitée diminuant le risque de surchauffe pendant la nuit. Par conséquent, malgré le plus faible albédo, la ventilation naturelle du projet va jouer un rôle important quant au refroidissement nocturne. Il est à signaler que l'inertie thermique des matériaux influence la restitution d'énergie sous forme d'infrarouge.

L'inertie thermique est la capacité d'un corps à stocker de chaleur. Plus la capacité est élevée plus le matériau pourra stocker une quantité de chaleur importante. Au sein de notre étude nous n'examinons que les propriétés lumineuses et pas les propriétés thermiques des matériaux.

4.6 Analyse morpho-climatique des trois projets

4.6.1 Évaluation de la surface totale pondérée de FVC

Le facteur A_{FVC} est un indicateur morpho-climatique qui lie l'indicateur de FVC avec les performances environnementales du projet. Son calcul nous permettra d'évaluer l'accessibilité des façades qui ont la même orientation, aux flux d'énergie solaire diffuse. Plus fort est le FVC pour une façade donnée, plus important est le flux d'énergie solaire diffus reçu. Nous avons calculé cet indicateur pour chaque orientation. Il n'est pas influencé par la variation des saisons pendant l'année. L'équation utilisée est la (3.8). Le FVC pour chaque façade est défini sur Solène. Les surfaces verticales des formes bâties ont été évaluées sur Gambit. On obtient ainsi les résultats montrés dans le tableau 4.11.

Tab. 4.11 – Évaluation de la surface totale pondérée de FVC, A_{FVC}. Calcul de l'indicateur pour les quatres directions : *Ouest*, *Est*, *Nord*, *Sud*. Les surfaces verticales des formes bâties ont été évalué sur Gambit. Le calcul du FVC pour les façades qui ont la même orientation est effectué sur le logiciel Solène.

Projet	A_{FVC} [m^2]			
	Ouest	*Est*	*Nord*	*Sud*
Bottière Chénaie	3381	3124.30	1182	1536
Tripode	4356	5015	4024	3644
Lyon Confluence	6600	8064	7300	6512

Parmi les trois projets, c'est l'éco-quartier Lyon Confluence qui a une accessibilité supérieure aux flux d'énergie solaire diffus. Plus précisément, pour les quatre directions, les valeurs obtenues pour le projet de Lyon sont significativement supérieures par rapport aux valeurs de Tripode et de Bottière Chénaie. Ce grand décalage peut être expliqué en tenant compte que la somme des surfaces verticales est beaucoup plus grande à Lyon Confluence. Par conséquent, plus de surfaces seront orientées vers chaque direction, ce qui explique la haute valeur de l'indicateur. Nous rappelons que la valeur de FVC ne varie pas fortement entre Lyon Confluence et Bottière Chénaie. Cependant, le fait que les surfaces verticales à Lyon sont fortement plus grandes a comme résultat

une augmentation des valeurs de la surface totale pondérée. De plus, l'accessibilité aux flux d'énergie diffus est plus importante pour la direction Nord et Est.

Le projet Tripode se compose d'édifices importants en ce qui concerne les volumes et les surfaces. Son FVC, est plus grand que ceci de Bottière Chénaie. Par conséquent, le taux d'énergie solaire diffus qui atteint les surfaces sera plus important pour ce quartier. Pour le quartier de Tripode, l'indicateur a une valeur augmentée pour les directions Ouest et Est. Pareil, pour le quartier de Bottière Chénaie, les résultats montrent que l'accessibilité au flux solaire diffus est également plus importante pour les directions Ouest et Est.

La figure 4.22 montre la répartition de A_{FVC} pour chaque orientation pour les deux projets. Il s'avère que pendant le jour de simulation en plein été, les façades des projets Tripode et Bottière Chénaie qui sont orientées vers l'Est et l'Ouest reçoivent la plus grande quantité de flux d'énergie diffus. En ce qui concerne Lyon Confluence, ce sont les façades Nord et Est qui reçoivent un flux d'énergie diffus important.

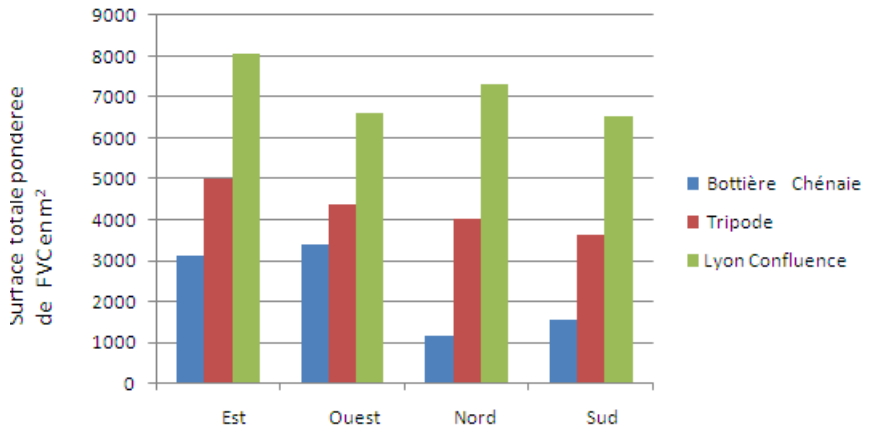


Fig. 4.22 – Évaluation de la surface totale pondérée de FVC le projet de bottière Chénaie, de Tripode et de Lyon Confluence. Répartition du facteur pour les 4 directions.

4.7 Discussion des résultats obtenus

Dans ce chapitre, nous avons évalué l'ensemble des indicateurs pour les trois éco-quartiers étudiés. Dans un second temps, nous avons analysé leurs valeurs en relation avec les conditions microclimatiques et le confort thermique des usageurs. Notre étude a fait resortir six points principaux :

- La création des grandes volumes bâtis favorise la compacité du projet. La densité volumique élevée des éco-quartiers Tripode et Lyon-Confluence a comme résultat la diminution des surfaces de l'enveloppe exposées au rayonnement solaire et

aux effets aerauliques. En fonction des propriétés thermiques des matériaux de construction, la diminution du rayonnement solaire reçu par les surfaces aura une influence sur le taux de flux d'énergie solaire stocké et puis réemis vers le ciel. Plus l'énergie solaire emmagasinée et puis restituée diminue, moins les masses d'air en voisinage avec les surfaces seront chauffées du fait de convection. La température de l'air sera ainsi moins augmentée. Néanmoins, l'augmentation de la densité volumique à travers la création des grandes volumes isolés peut provoquer des sources d'incorfort pour les usagers sur certains endroits du projet. La présence de hautes édifices isolés au sein des éco-quartiers Tripode et Lyon Confluence peut créer des effets tourbillonaires au pied des immeubles entrainant des survitesses qui peuvent provoquer l'inconfort des piètons.

- L'ouverture d'un projet urbain vers le ciel est liée avec la densité surfacique du projet. En général, plus le quartier est dense, plus le facteur de vue du ciel diminue. La forte emprise au sol à Bottière Chénaie favorise la diminution du facteur de vue du ciel du projet. Cependant, l'existence des grandes volumes bâtis au sein de Lyon-Confluence, situés près l'un de l'autre peut également obstruer la vue vers le ciel, malgré la faible emprise au sol. Le faible facteur de vue du ciel favorise la diminution du flux d'énergie solaire direct qui arrive aux surfaces du sol pendant la journée de simulation. La durée d'ensoleillement au niveau du sol sera ainsi inférieure pour les éco-quartiers Bottière Chénaie et Lyon-Confluence. Les zones d'ombre ont un effet positif sur le confort thermique des usagers pendant la période estivale. Les surfaces urbains qui sont moins exposées au rayonnement solaire vont stocker et ensuite restituer moins d'énergie sous forme d'infrarouge, en fonction de leurs propriétés thermiques. Les masses d'air qui voisinent avec les surfaces ne vont pas fortement augmenter leur température du fait des effets convectifs. Par conséquent, la température de l'air ambiante, à l'échelle de la canopée urbaine, ne sera pas fortement augmentée pour les éco-quartiers Lyon-Confluence et Bottière Chénaie diminuant ainsi le risque d'inconfort pour les piétons.

- La forte densité surfacique amène à l'augmentation des surfaces minérales, non affectées aux espaces verts ou aux espaces d'eau. L'emprise des surfaces minérales est plus important pour l'éco-quartier Bottière Chénaie, dont la densité surfacique est la plus grande parmi les trois cas étudiés. Par opposition, la forte densité volumique en relation avec la faible emprise au sol des éco-quartiers Tripode et Lyon-Confluence favorise la diminution de la minéralisation. La présence des espaces verts et des espaces affectées à l'eau contribue à l'amélioration de l'ambiance thermique de quartier. Au sein de Tripode, lors de l'évaporation d'une zone d'eau du bassin, une grande partie des apports solaires est perdue sous forme de cha-

leur latente. Le processus d'évaporation refroidit l'eau et dans un second temps, la température de l'air diminue à travers les effets convectifs. De plus, la feuillage des arbres va empécher le rayonnement direct d'arriver aux surfaces verticales du projet de Lyon-Confluence. Les façades verticales vont rester à l'ombre pour une long durée pendant la journée. Le flux d'énergie solaire émmagasiné et puis émis sous forme d'infrarouge sera ainsi plus faible et la température de l'air ambiant ne va pas fortement augmenter.

- La porosité d'un quartier urbain conditionne la pénétration du vent dans le tissu. Le mouvement d'air est un paramètre important quant au confort thermique puisque il détermine les échanges d'énergie dus à la convection entre le corps humain et l'environnement. Une grande valeur de porosité sur la direction des vents dominants aura comme résultat la canalisation des écoulements dans les passages piètons à Bottière Chénaie. La ventilation naturelle et le rafraîchissement du cœur de l'îlot sont favorisés pendant l'été. En hiver, la canalisation des écoulements dont les vitesses sont plus élevées en relation avec l'effet Venturi peut provoquer des sources de gêne importantes pour les usagers. Ensuite, la diminution des volumes ouverts sur la direction des vents dominants amène d'une part à la protection du cœur des îlots Tripode et Lyon-Confluence contre les survitesses pendant l'hiver. D'autre part,pendant l'été le risque d'inconfort augmente puisque la configuration des bâtiments fait obstacle aux écoulements des vents dominants, diminuant ainsi le potentiel de la ventilation et le rafraîchissement du quartier.

- L'évaluation de l'albédo moyen des éco-quartiers correspond au rapport entre le flux d'énergie solaire qui est réflechie par l'ensemble des surfaces du projet vers le ciel et le flux d'énergie solaire global qui arrive aux surfaces. Plus les matériaux de construction sont réflechissants, plus l'albédo moyen du quartier augmente. Ensuite, plus l'ouverture vers le ciel est importante, plus la réflexion d'énergie solaire vers le ciel est favorisé. L'albédo de l'éco-quartier Tripode est le plus important parmi les trois cas étudiés. La haute réflectivité des matériaux utilisés en relation avec le plus grand FVC du quartier favorise la réflexion d'une grande partie du flux d'énergie incident vers le ciel. Par conséquent, l'énergie solaire stockée sur les surfaces des constructions est inferiéure, ce qui empêche l'augmentation de leur température. L'émission d'énergie sous forme d'infrarouge pendant la nuit sera ainsi réduite et la température de l'air ambiante de sera pas augmentée à travers les effets convectifs. Les matériaux de construction de l'éco-quartier Lyon-Confluence ont également un albédo individuel important mais l'albédo moyen du quartier baisse du fait de son ouverture vers le ciel qui est inférieur à celui de Tripode. L' albédo moyen de Bottière Chénaie est le plus faible parmi les trois

cas du fait de l'utilisation de teintes peu réflechissantes sur une grande partie des surfaces. Au sein de ces deux éco-quartiers, on risque ainsi d'avoir des températures des parois plus élevés en rélation avec les températures des surfaces de Tripode.

– L'accessibilité au flux solaire diffus, exprimée avec l'indicateur A_{FVC} est supérieure pour les surfaces verticales de l'éco-quartier Lyon-Confluence, pour les quatres orientations. Malgré le fait que son FVC n'est pas le plus grand parmi les trois éco-quartiers, les valeurs obtenues sont toujours supérieures, ce qui peut être expliqué par le grande emprise des surfaces verticales. L'éco-quartier Bottière Chénaie a la plus faible valeur de A_{FVC} du fait des surfaces moins importants. Pour les trois cas étudiés et pour les quatres orientations, l'indicateur est significativement influencé par la taille des surfaces verticales.

Il s'avère que les critères retenus n'ont pas le même impact sur les trois éco-quartiers. La morphologie des trois projets modifie d'une manière différente les conditions microclimatiques qui sont liés avec le confort thermique des usagers.

CHAPITRE 5

Conclusion et Perspectives

Conclusion

Aujourd'hui, la population urbaine représente la plus grande partie de la population mondiale. La forte augmentation de la population des villes a eu comme résultat la modification de l'environnement urbain à travers les activités qui s'y développent. Les dernières décennies, l'étude de l'interaction entre le climat urbain et la ville est devenu une préoccupation importante. En effet, le climat des villes est influencé par la structure de milieu urbain : l'impérmeabilité des matériaux, l'augmentation du stockage solaire dans les surfaces des constructions, le freinage des écoulements du vent, la diminution des surfaces végétales et l'existence de flux anthropogéniques substantiels sont certains paramètres associés avec l'effet d'îlot de chaleur urbain. L'îlot de chaleur urbain est un phénomène qui implique une forte augmentation des températures ambiantes en centre ville en comparaison avec les zones rurales. Cette hausse des températures peut avoir de graves conséquences sur la santé et le confort thermique en espaces extérieurs ainsi que sur la consommation énergétique des édifices.

Cette étude a été réalisé dans ce contexte actuel en mettant l'accent sur l'ambiance thermique des usagers en espaces extérieurs. Nous avons étudié la morphologie des trois nouveaux quartiers en France, caractérisés comme éco-quartiers : les éco-quartiers Tripode et Bottière Chénaie à Nantes et l'éco-quartier de Lyon Confluence à Lyon. Nous avons essayé de répondre à la question de la relation entre morphologie urbaine, conditions microclimatiques et confort thermique des usagers. Notre analyse était basé sur le calcul d'un nombre d'indicateurs géométriques, morphologiques, physiques et morhpo-climatiques. Ces quatres familles des indicateurs ont été calculées pour les

trois éco-quartiers. Leur utils numériques qui ont été utilisés pour leur calcul sont les logiciels Gambit et Solène.

A travers notre étude, nous avons montré qu'il y a une forte relation entre la morphologie urbaine, exprimé par les indicateurs et le microclimat des villes. Les formes urbaines analysées, interagissent avec le climat des villes modifiant ainsi ses paramètres. Plus spécifiquement, l'augmentation de la densité volumique favorise la compacité du projet, ce qui se traduit par une diminution des surfaces exposées au rayonnement solaire. Le flux d'énérgie solaire stocké et puis reémis vers l'énvironnement sera plus faible et n'augmentera pas la température de l'air ambiant. Ensuite, une faible valeur du facteur de vue du ciel favorise la création des zones d'ombre et ainsi le flux d'énergie solaire direct qui arrive aux surfaces est diminué. L'effet d'ombrage est toujours considéré comme une solution efficace pour assurer le confort themique des usagers du fait de la diminution du flux solaire stocké et ensuite restitué sous forme d'infrarouge vers l'environnement. Il a été aussi montré que la forte densité surfacique a comme résultat la diminution des surfaces affectées aux espaces verts et aux espaces d'eau et d'autre part l'augmentation des surfaces minérales. Néanmoins, la présence de la végétation au sein d'un quartier urbain contribue à l'amélioration de la qualité d'ambiance thermique à travers le d'évapotranspiration et d'ombrage. Ensuite, la configuration des espaces ouverts conditionne la pénétration du vent dans le quartier. Une faible valeur de porosité sur la direction des vents dominants peut diminuer la ventilation naturelle et le rafraîchissement du quartier provoquant ainsi des risques d'inconfort pour les usagers pendant l'été. Nous avons aussi mis en évidence le fait que l'utilisation des matériaux de haute réflectivité contribue à l'augmentation de l'albédo moyen du quartier. La forte réflexion du flux solaire incidente a comme résultat la diminution du flux solaire absorbé et ensuite restitué par les surfaces du projets. La température de l'air ambiante ne sera pas augmenté à cause des effets convectifs.

Les résultats obtenus de notre étude ont montré que la morphologie des trois tissus urbains modifie d'une manière différente les conditions microclimatiques qui sont liés avec le confort thermique des usagers. Cependant, il ne sera pas pertinent qu'il existe un éco-quartier exemplaire en ce qui concerne le confort thermique des usagers. L'étude des trois nouveaux projets, construits selon un nombre des préoccupations environnementales, nous a permis de faire une première analyse sur la relation entre leur morphologie et les conditions microclimatiques.

Perspectives

Notre étude vise à effectuer une analyse sur la relation entre la morphologie urbaine et le confort thermique des piétons au sein des éco-quartiers Tripode, Bottière Chénaie et Lyon-Confluence. Nous avons donné les principales pistes de l'étude du confort thermique au sein des quartiers urbains. Nous avons rélalisé d'une part une

analuse quantitative en ce qui concerne la morhologie des trois éco-quartiers et d'autre part, une analyse qualitative en ce qui concerne le confot thermique des usageurs. La prochaine étape de cette recherche est d'effectuer une analyse quantitative des paramètres climatiques et du confort thermique. Cette analyse est en cours de réalisation par Khaled Athamena, doctorant au CSTB de Nantes. Plus précisément il faudra :

- Simuler et analyser les paramètres microclimatiques qui influencent le confort thermique : la température des surfaces, la vitesse et la température de l'air. L'outil de simulation est un couplage déjà validé, entre le logiciel Solène crée au CERMA et le code de mécanique des fluides, Code-Saturne crée par l'EDF.
- Croiser les résultats de l'étude morphologique avec ceux issus de simulation.
- Calculer les indices de confort thermique en espaces extérieur.

Les résultats obtenus vont servir à l'élaboration d'un guide de recommandations sur la conception des éco-quartiers pour les architectes et les ubanistes.

Une perspective issue de notre recherche est également l'étude des éco-quartiers dans un contexte d'environnement différent. L'analyse sera ainsi réalisé sous l'hypothèse que les éco-quartiers de Nantes sont implantés à Lyon ou sur une autre ville dont le climat est très différent. Cette recherche va évaluer la pertinence d'application des trois projet dans un contexte où le climat local est varié.

Annexes

ANNEXE A

Le bilan radiatif

A.1 Le bilan radiatif pour une surface horizontale

En utilisant l'équation de Stefan-Boltzmann, le bilan radiatif rapporté à une surface [Ringenbach 04], s'ecrit avec la formule (A.1).

$$R_n = (1 - a)R_g + R_A - \epsilon\sigma T_s^4 \tag{A.1}$$

avec :
- R_n : le rayonnement net en W/m^2
- σ : la valeur constante de Stefan-Boltzmann
- ϵ : l'émissivité
- R_g : le rayonnement solaire global décomposé en rayonnement direct et diffus
- R_A : le rayonnement de l'atmosphère vers la surface horizontale
- T_s : la température de la surface
- a : l'albédo de la surface

A.2 Le bilan radiatif à l'échelle urbaine

Le bilan radiatif d'un milieu urbain est calculé en ajoutant les flux incidents de courtes et de grandes longueurs d'onde [Oke 78]. Le rayonnement net pour une surface peut être calculé avec la formule (A.2).

$$R_n = (I_b + I_d)(1 - \alpha) + I \Downarrow - I \Uparrow \tag{A.2}$$

avec :
- R_n : le rayonnement net en W/m^2
- I_b : le rayonnement solaire direct à la surface de la terre de courtes longueurs d'onde
- I_d : le rayonnement solaire diffus à la surface de la terre de courtes longueurs d'onde
- α : l'albédo moyen de la ville
- $I \Downarrow$: le rayonnement atmosphérique de grande longueur d'onde absorbé par la ville
- $I \Uparrow$: le rayonnement atmosphérique de grande longueur d'onde émis par la ville

A.3 Le bilan énergétique à l'échelle de la surface

Comme le bilan radiatif, on peut définir le bilan énergétique, abordé selon différentes échelles, présentées dans cette section. Les composantes du bilan énergétique à l'échelle surfacique, sont présentées au schéma A.1.

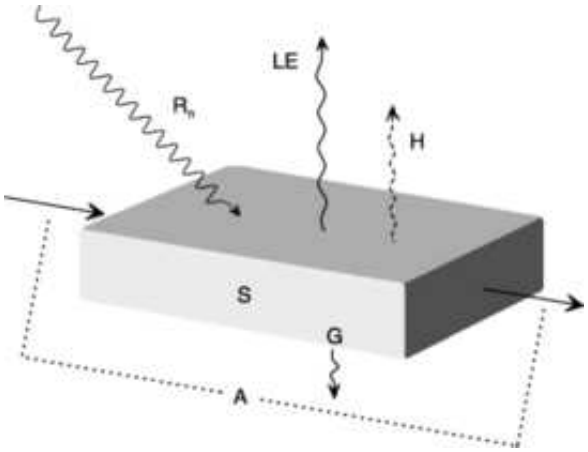


Fig. A.1 – Transfert des flux d'énergie en surface.

Le bilan peut ainsi s'écrire [Qin 02] selon l'équation (A.3).

$$R_n = H + LE + G \tag{A.3}$$

avec :
- R_n : le rayonnement net en W/m^2
- H : le flux de chaleur due à la convection, en W/m^2
- G : le flux de chaleur sensible due à la conduction, en W/m^2
- LE : le flux de chaleur latente due au phénomène d'évapotranspiration en W/m^2

A.4 Le bilan énergétique à l'échelle urbaine

Le bilan énergétique en milieu urbain est modifié du fait de changements climatiques liés à l'effet d'ilot de chaleur. Une partie de l'énergie arrivant à la surface est absorbé réchauffant ainsi le sol par conduction. Une autre partie provoque le mouvement de masses d'air du fait d'échanges par convection alors que l'évapotranspiration de plantes résulte du flux de chaleur latente. La chaleur d'origine anthropique entrainée par l'activité humaine est aussi ajoutée au bilan énergétique [Ringenbach 04]. Le bilan énergétique peut alors s'écrire (A.4).

$$R_n + F = H + LE + G \tag{A.4}$$

avec :
- R_n : le rayonnement net en W/m^2
- H : le flux de chaleur due à la convection, en W/m^2
- G : le flux de chaleur sensible due à la conduction emmagasiné aux bâtiments et au sol, en W/m^2
- LE : le flux de chaleur latente due au phénomène d'évapotranspiration en W/m^2
- F : le flux de chaleur d'origine anthropique, en W/m^2

Selon des chercheurs, la chaleur d'origine anthropique dûe à la circulation automobile, le secteur bâti et le métabolisme humain [Sailor 04]. Le terme de chaleur anthropique peut être détaillé selon l'équation (A.5).

$$F = F_V + F_B + F_M \tag{A.5}$$

avec :
- F_V : la chaleur générée par les voitures en W/m^2
- F_B : la chaleur générée par les bâtiments , en W/m^2
- F_M : la chaleur générée par le métabolisme humain, en W/m^2

En outre, l'énergie émis par la circulation des véhicules s'écrit (A.6) selon l'etude [Sailor 04].

$$F_V = D_m F(h) p_{pop} E \tag{A.6}$$

avec :
- D_m : la distance moyenne parcourue par personne et par jour, en m
- $F(h)$: la charge horaire de trafic en %
- p_{pop} : la densité de population horaire pour une région de la ville
- E : l'énergie utilisé par mètre de trajet en J/m

Bien étendu, la chaleur anthropique est différente pour chaque ville, dépendante de sa population, de nombre d'industries et des véhicules Les échanges thermiques dus à la conduction et au flux de chaleur conductif sont définis avec l'équation (A.7) [Oke 78].

$$G = -K\frac{T_2 - T_1}{z_2 - z_1} \tag{A.7}$$

avec :
- K : la conductivité thermique du sol en W/m/K
- T_1 : la température la plus basse, en un point du sol, en K
- T_2 : la température la plus haute en un point du sol, en K
- z_1 : le niveau qui correspond en T_1
- z_2 : le niveau qui correspond en T_2

Les flux de chaleur due à la convection, définit par la valeur H, s'écrit selon la formule (A.8) [Garatt 93].

$$H = \frac{pC(T_s - T_a)}{r_a} \tag{A.8}$$

avec :
- T_s : la température du sol, en K
- T_a : la température de l'air, en K
- p : la masse volumique de l'air en kg/m^3
- r_a : la résistance aérodynamique de l'air qui dépend de la vitesse de l'air et de la turbulence
- C : la capacité thermique massique en $J/kg/\mathrm{K}$

ANNEXE B

Matériaux des surfaces de Tripode

B.1 Les matériaux des surfaces des immeubles de bureaux

Dans cette partie de l'annexe nous allons présenter les principaux matériaux de construction des bâtiments des bureaux au quartier de Tripode. La figure B.1 montre la répartition des immeubles des bureaux sur le terrain du projet. La figure B.2 montre la manière avec laquelle les surfaces en principe de voile percé sont construites. Une partie de la façade est couverte par des tôles aluminium, placées sur les allèges de béton et une autre partie par des vitrages visions ou des vitrages émaillés. La figure B.3 montre la répartition des matériaux pour les surfaces Nord de l'immeuble $B1a$ et $B1b$ ainsi que la surface Nord de $B2b$. Les verres émaillés sur les allèges de béton sont en alternance avec la partie vision. Le même principe est suivi pour les façades Est du bâtiment $B2a$ est du bâtiment $B3b$ selon la figure B.4. Les surfaces des bâtiments des bureaux $F3a$, $F3b$ et $F3c$ sont couvertes avec enduit en teinte clair. Les fenetres de ces surfaces sont des dimensions 1.05 m de largeur et de 1.90 m d'hauteur.

B.2 Les matériaux des surfaces des immeubles de logement

Dans cette partie de l'annexe nous allons présenter un nombre de figures qui montrent les matériaux de construction des surfaces des logements au sein du quartier de Tripode.Les matériaux des surfaces des immeubles sont variables avec des propriétés ther-

miques et lumineuses différentes. Les figure B.5 B.7 montrent les matériaux des surfaces Est des immeubles 2,3 et 4 de logement. Les façades sont construites en béton matricé. La façade Nord du logement 2 et la façade Sud du logement 4 sont aussi en en béton matricé avec des balcons qui sont en en béton lisse B.6. Selon la figure B.8,les façades Ouest des immeubles des logements 2,3 et 4, perpendiculqires au bassin d'eau sont colorées en peinture minerale claire. Ensuite, la figure B.9 montre le revêtement des surfaces Sud de l'immeuble 1 de logement. Les surfaces sont vitrées avec des occultations en bois.Les matériaux des façades Nord, Ouest et Sud de l'immeuble du logement 1 à Tripode sont en enduit clair sur isolation extérieure, d'après la figure B.10. Les matériaux des façades des logements 2,3 et 4 qui sont perpendiculaires au canal sont montrés sur la figure B.11. Les façades sont en béton lisse en teinte grise. Au sein de quartier de Tripode, il y a aussi un nombre de lofts dont les façades sont construites en bardage métalique coloré jaune. La figure B.12 montre les surfaces des lofts, construites en bardage de type $HAIRPLAN300$.

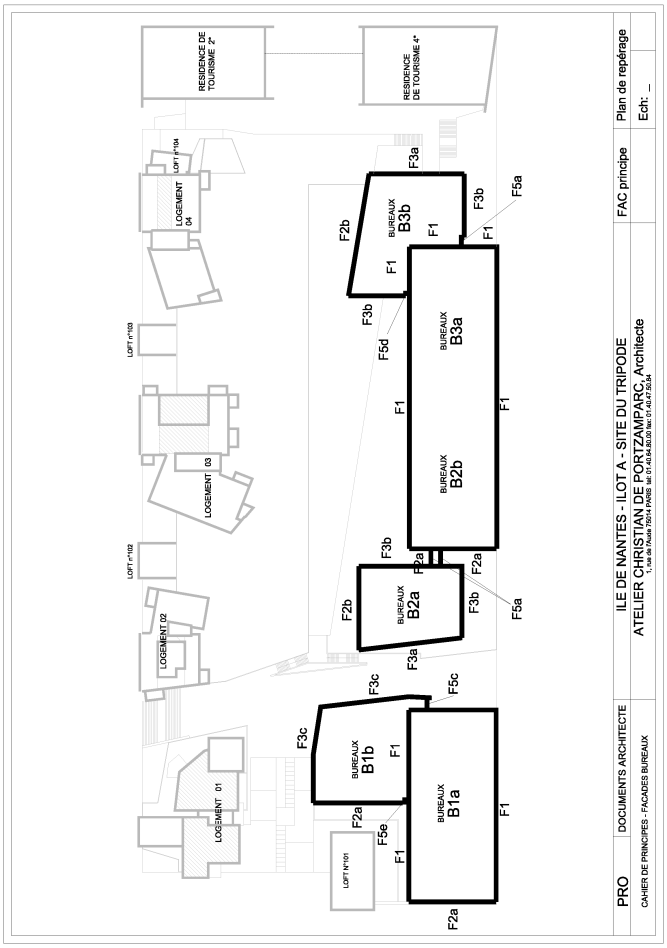


Fig. B.1 – La répartition des immeubles des bureaux sur le terrain du projet de Tripode. Ils sont situés au partie Ouest du projet [de Portzamparc 10].

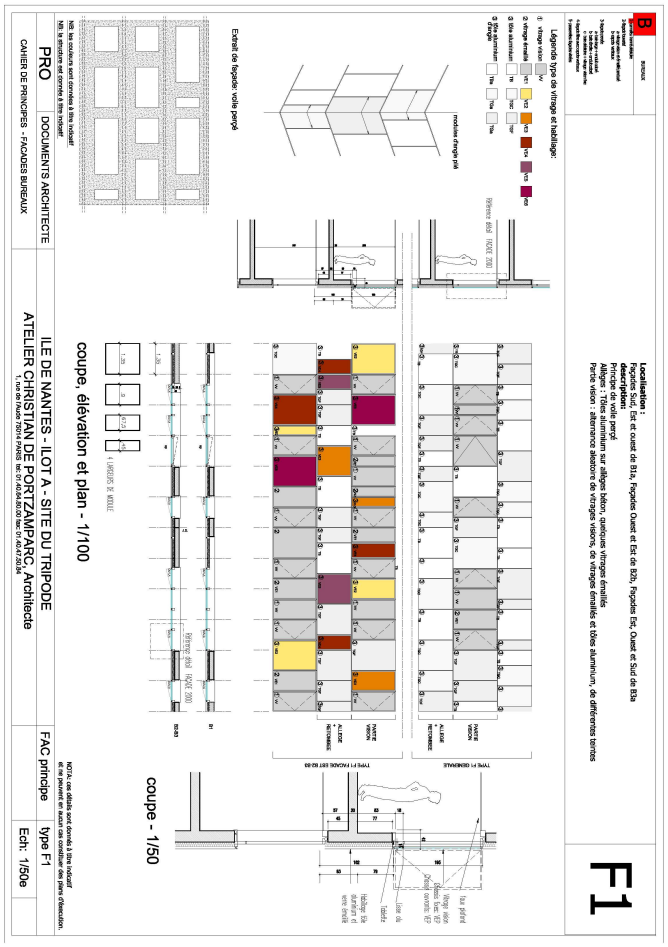


Fig. B.2 – Les surfaces des bureaux construites en principe de voile percé. Une partie de la façade est couverte par des tôles aluminium, placées sur les allèges de béton et une autre partie par des vitrages visions ou des vitrages émaillés [de Portzamparc 10].

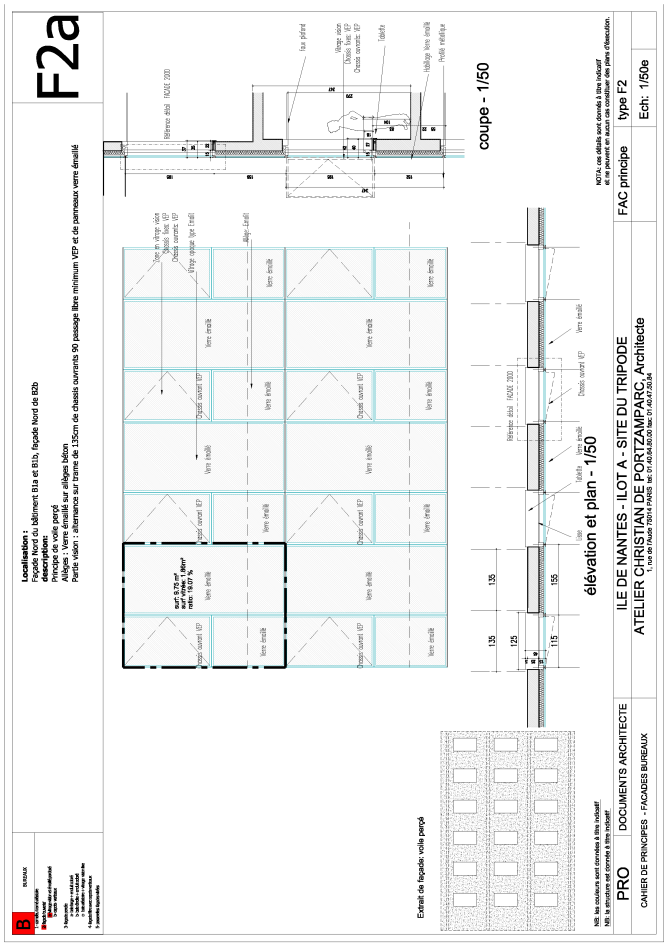


Fig. B.3 – Les matériaux des surfaces Nord de l'immeuble $B1a$ et $B1b$ ainsi que de la surface Nord de $B2b$. Les verres émaillés sur les allèges de béton sont en alternance avec la partie vision [de Portzamparc 10].

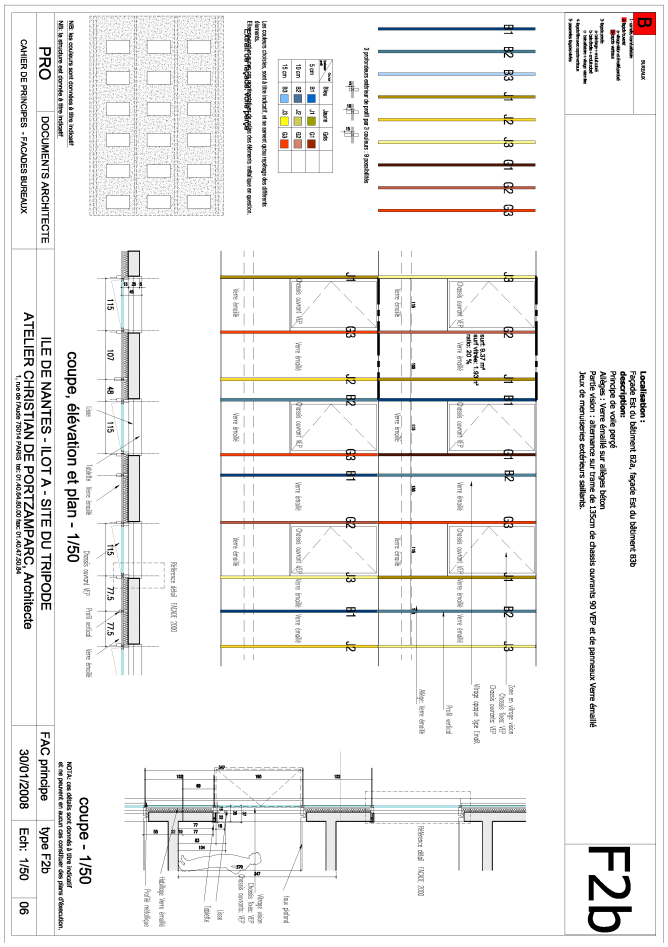


Fig. B.4 – Les matériaux des surfaces Est de l'immeuble *B2a* et *B3b*. Les verres émaillés sur les allèges de béton sont en alternance avec la partie vision [de Portzamparc 10].

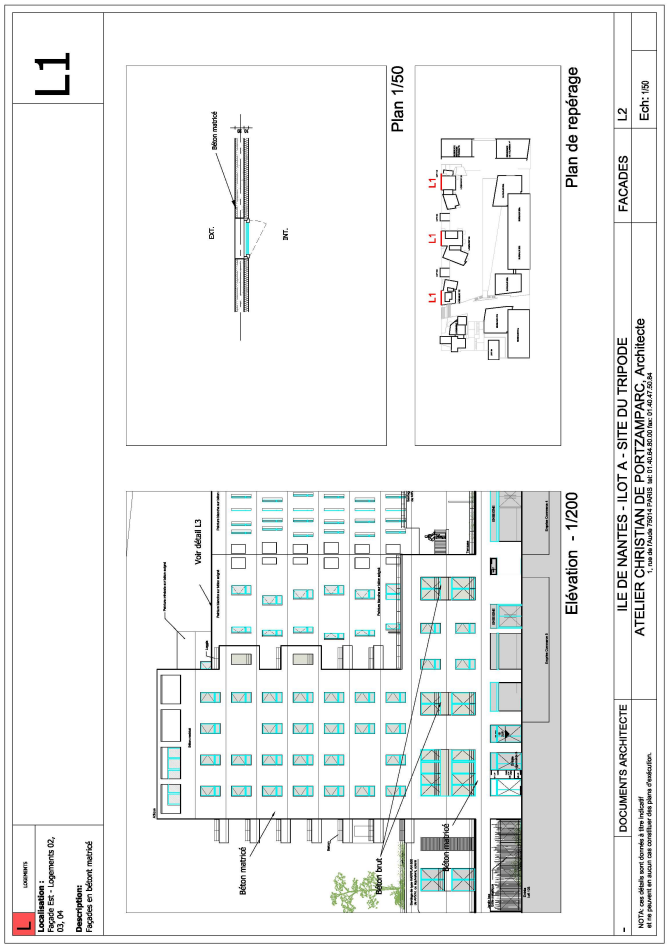


Fig. B.5 – Les matériaux des façades Est des immeubles 2,3 et 4 de logement au sein de Tripode. Les façades sont construites en béton matricé [de Portzamparc 10].

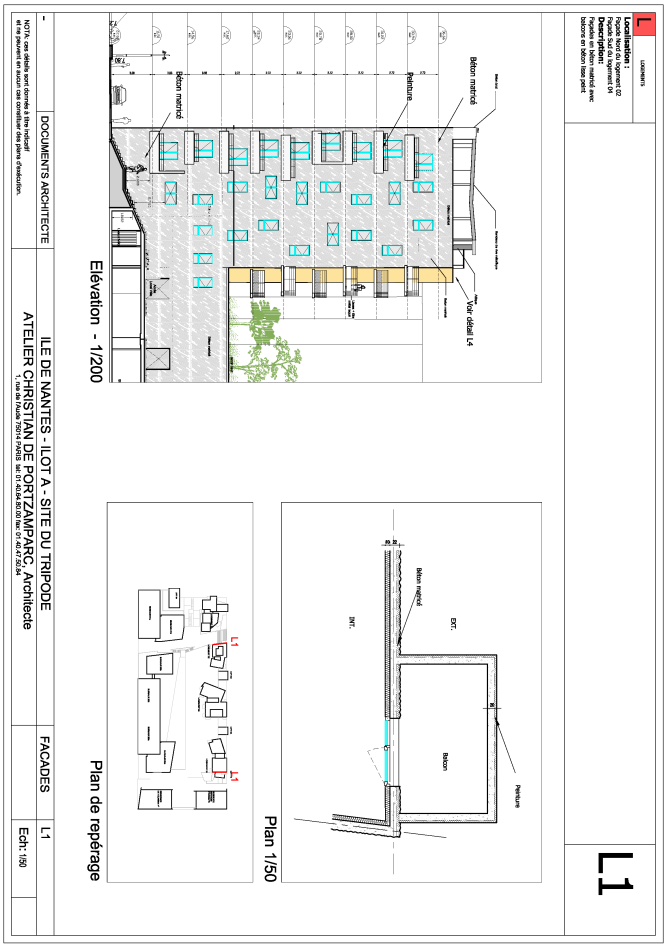


Fig. B.6 – Les matériaux de la façade Nord du logement 2 et dela façade Sud du logement 4 à Tripode. Les façades sont construites en béton matricé avec des balcons qui sont en en béton lisse [de Portzamparc 10].

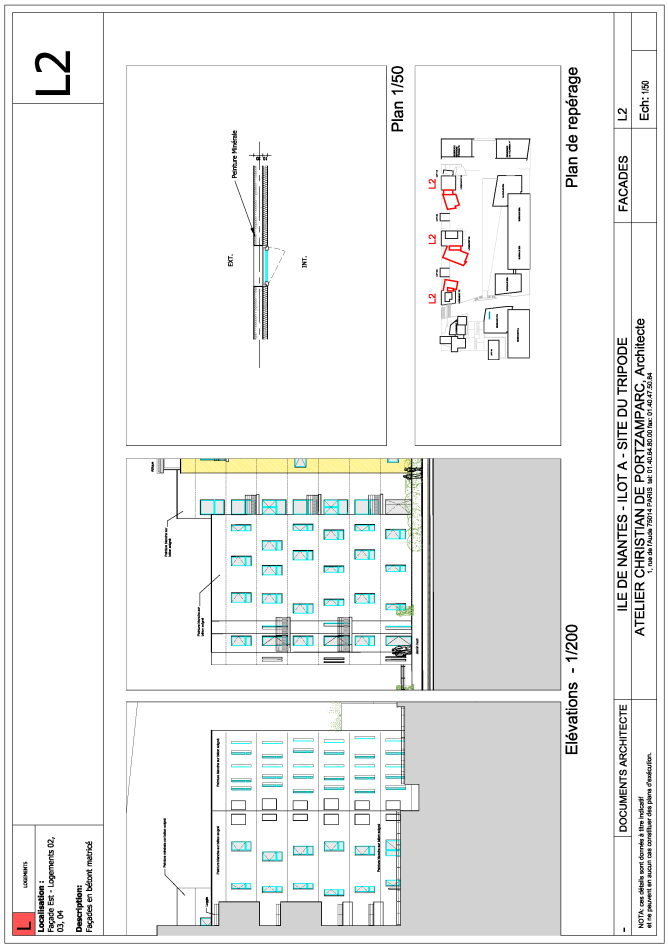


Fig. B.7 – Les matériaux des façades Est des immeubles 2,3 et 4 de logement à Tripode. Les façades sont construites en béton matricé [de Portzamparc 10].

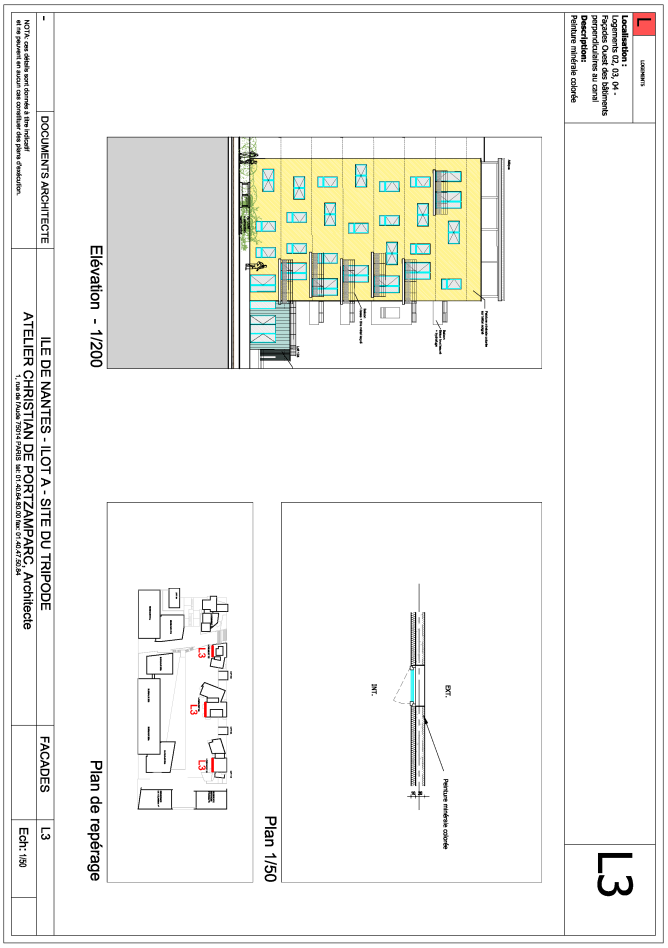


Fig. B.8 – Les matériaux des façades Ouest des immeubles des logements 2,3 et 4 à Tripode. Elles sont colorées en peinture minerale claire [de Portzamparc 10].

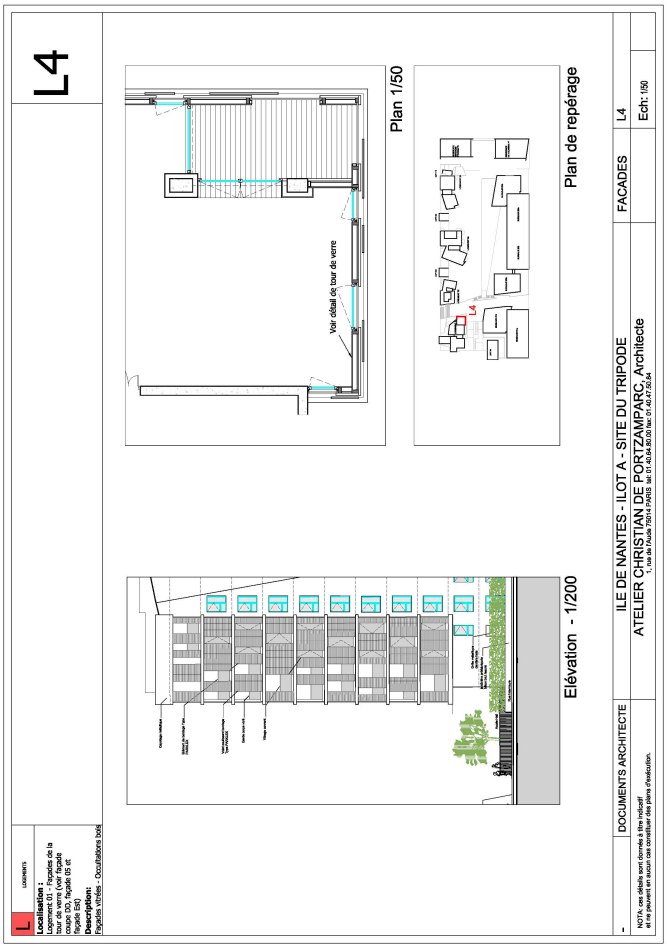


Fig. B.9 – Le revêtement des surfaces Sud de l'immeuble 1 de logement. Les surfaces sont vitrées avec des occultations en bois [de Portzamparc 10].

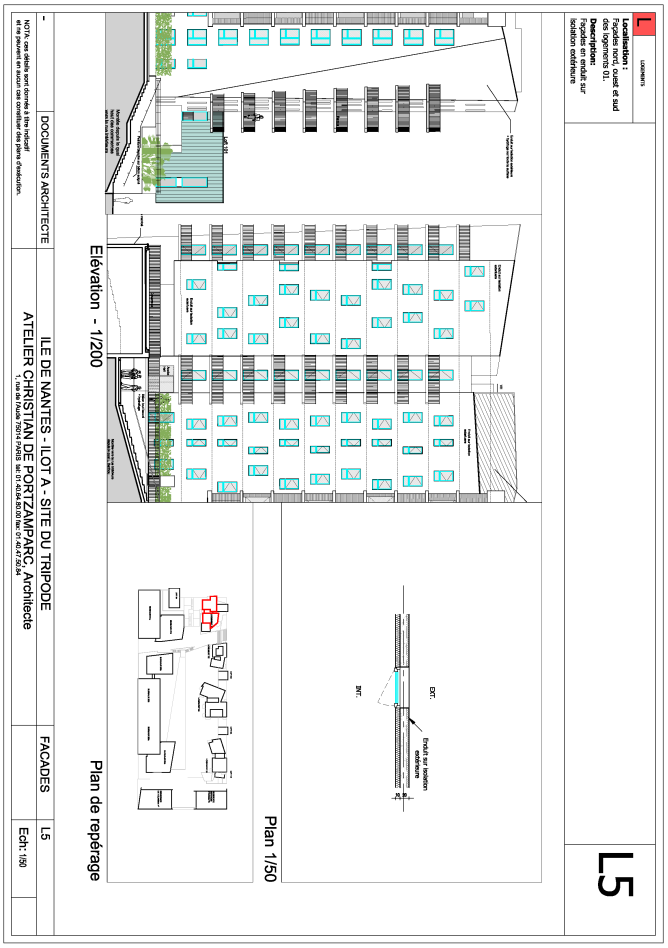


Fig. B.10 – Les matériaux des façades Nord, Ouest et Sud de l'immeuble du logement 1 à Tripode. Les façades sont en enduit clair sur isolation extérieure [de Portzamparc 10].

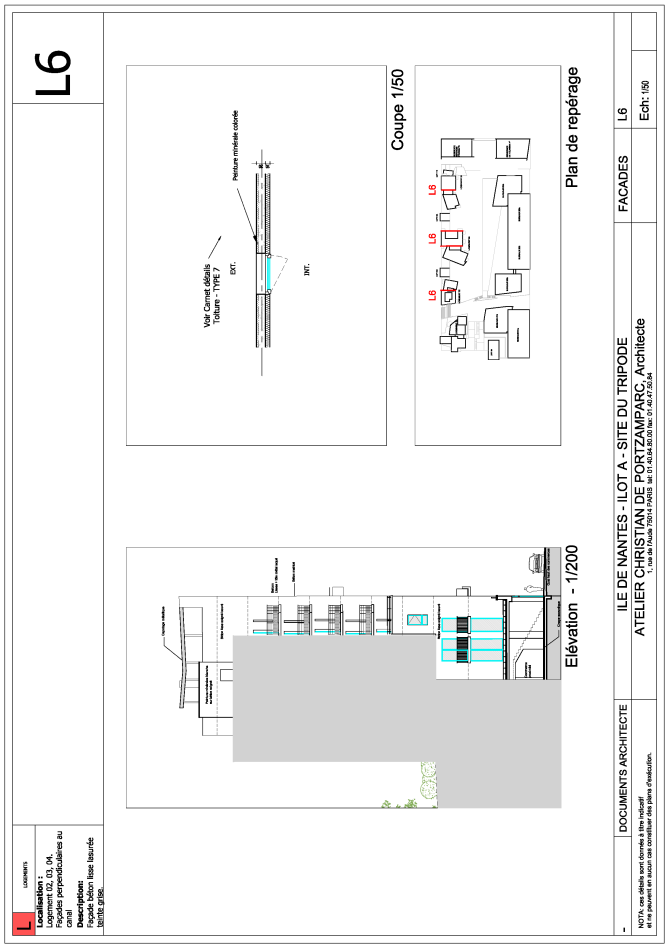


Fig. B.11 – Les matériaux des façades des logements 2,3 et 4 qui sont perpendiculaires au canal. Les façades sont en béton lisse en teinte grise [de Portzamparc 10].

Fig. B.12 – Les matériaux des façades des lofts à Tripode. Le matériau utilisé est le bardafe métalique coloré jaune [de Portzamparc 10].

B.3 Coefficient d'absorption solaire de différents matériaux

Le tableau B.1 montre le coefficient d'absorption solaire de différentes matériaux de construction qui ont été utilisés à Tripode et à Bottière Chénaie. Les nombres indiqués expriment le pourcentage de rayonnement solaire incident absorbé [Strock 65]. Le rayonnement solaire réflechi qui correspond à l'albédo a de chaque matériau est défini avec la formule (B.1)

$$a = 1 - C_a \tag{B.1}$$

avec C_a le coefficient d'absorption solaire :

Tab. B.1 – Coefficient d'absorption solaire C_a de différents matériaux. Les nombres indiqués expriment le pourcentage de rayonnement solaire incident absorbé [CERMA 11].

Grès	C_a
beige	0.54
gris	0.62
Peinture	**C_a**
Blanche	0.18
Jaune	0.33
Verte clair	0.50
verte sombre	0.88
grise	0.75
rouge vif	0.44
Matériaux divers	**C_a**
Acier galvanisé clair	0.22
Aluminium	0.15
Bois	0.60
Herbe verte	0.67
Couverture d'asphalte	0.91
Béton	0.65

B.4 Propriétés thermiques des matériaux de construction

Le tableau B.2 montre les valeurs de ces propriétés thermiques des matériaux utilisés pour la construction ainsi que pour les matériaux naturels. La capacité thermique c, exprimée en Joules/kg/K, correspond à la quantité d'énergie qu'il faut apporter à un kilo du corps pour augmenter sa température de un Kelvin, la capacité thermique volumique C est calculée en multipliant la capacité thermique avec la masse volumique, déterminée par la quantité d'énergie à apporter pour élever la température de l'unité de volume d'un corps d'un degré Kelvin. En outre, la conductivité thermique λ, correspond à la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par une unité de temps sous un gradient de température de 1 degré Kelvin par mètre. Exprimée en Watt/m/K, elle caractérise le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction. L'effusivité thermique est également une propriété thermique qui caractérise la capacité du matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Elle est calculée par (B.2).

$$E = \sqrt{\lambda \rho c} \tag{B.2}$$

Tab. B.2 – Propriétés thermiques des matériaux de construction [Pigeon 07].

Materiaux	Caracteristique	$\rho \cdot 10^{-3}$ $[kg/\mathrm{m}^3]$	$c \cdot 10^{-3}$ $[J/kg/\mathrm{K}]$	$C \cdot 10^{-6}$ $[J/\mathrm{m}^3/\mathrm{K}]$	λ $[J/\mathrm{m}^2/S^{0.5}/\mathrm{K}]$	E $[J]$
Sol sablé	sec	1.6	0.8	1.28	0.3	620
Sol argileux	saturé	2.0	1.55	3.1	1.58	2210
Tourbe	sec	0.30	1.92	0.58	0.06	190
Asphalte		2.11	0.92	1.94	0.075	1420
Beton	dense	2.40	0.88	2.11	1.51	1205
Pierre		2.68	0.84	2.25	2.19	1758
Brique		1.83	0.75	1.37	0.83	2220
Bois	dense	0.81	1.88	1.52	0.19	535
Polystyrene		0.02	0.88	0.02	0.03	25

ANNEXE C

Vitesse

C.1 Calcul de la vitesse moyenne du vent

Selon les Annexes Nationales des Eurocodes de 1991 [Laravoire 05], la vitesse instantanée du vent peut s'exprimer par l'expression (C.1).

$$U(t) = \overline{U} + U^{'} \tag{C.1}$$

Avec $\overline{U}$ la valeur moyenne de la vitesse sur la période d'observation T, et U' la fluctuation de vitesse autour de cette moyenne. La turbulence due aux forces de frottement est caractérisée par l'écart type σ de la fluctuation longitudinale de la vitesse du vent U' sur la période T, selon l'équation (C.2).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T U'(t)dt} = \sqrt{\overline{U'^2}} \tag{C.2}$$

L'intensité de turbulence s'écrit (C.3).

$$I = \frac{\sigma}{U} \tag{C.3}$$

La vitesse moyenne et l'intensité de turbulence se différentient en fonction de la hauteur. Leur distribution dépend de la rugosité du sol ainsi que de la topographie. La croissance de la vitesse de l'air avec la hauteur peut être décrite par la loi logarithmique (C.4).

$$\overline{U_z} = k_r \ln \frac{z}{z_0} \overline{U}_{\text{météo}} \tag{C.4}$$

avec :
- z : l'altitude du site, exprimée en mètres
- z_0 : le paramètre de rugosité dont la valeur dépend du site étudié
- k_r : le facteur de terrain, exprimé en fonction de la rugosité
- $\overline{U}_{\text{météo}}$: la vitesse moyenne mesurée à la station météorologique de référence à 10 m de hauteur

Le paramètre de rugosité est une caractéristique important quant à la mesure de la vitesse du vent en site urbain. Le tableau C.1 présente certaines valeurs de z_0 en fonction du site. Le facteur de terrain k_r est calculé en fonction de la valeur du z_0 [Laravoire 05].

Tab. C.1 – Parametres de rugosite de terrains.

Nature du terrain	Classe	Z_0
Mer ou zone exposée aux vents de la mer, lacs et plans d'eau parcourus par le vent sur une distance de moins de 5 km	0	0.005
Rase campagne, avec ou no quelques obstacles isolés (arbre, bâtiment, etc.) séparés les uns des autres de plus de 40 fois leur hauteur	II	0.05
Campagne avec des aies vignobles, bocage, bocage dispersé	IIIa	0.20
Zones urbanisées ou industriels bocage dense vergers	IIIb	0.5
Zone urbaines dont au moins 15% de la surface est occupée par les bâtiments de hauter moyenne supérieure à 15 m, fôrets	IV	1

ANNEXE D

Indices de confort thermique

D.1 Les indices du confort en espace extérieure

Dans le but de quantifier le confort thermique en espace extérieur, de nombreux travaux ont été réalisés en examinant les facteurs climatiques, physiologiques et psychologiques qui ont une influence le confort de l'individu. L'étude du confort thermique se traduit comme l'étude des échanges thermiques qui se produisent entre le corps humain et son environnement.

Néanmoins, il n'y a que quelques décennies que l'étude du confort en espace extérieur est devenu un sujet de recherche .L'accent était surtout mise sur les sensations thermiques à l'intérieur des édifices. A travers des études menées les derniers années, un certain nombre d'indices de confort a été établis dont le calcul permet l'évaluation de confort thermique en espace extérieur. On constate deux principales catégories des indices de confort, les empiriques et les analytiques. Les empiriques ont été développés pendant les premières approches de l'étude de confort thermique et sont beaucoup plus simples à les calculer alors que les analytiques sont basés sur la modélisation des flux et des échanges thermiques chez l'individu [Oliveira 07]. Nous allons ainsi présenter les indices analytiques les plus applicables aujourd'hui qui sont développées et utilisés pour définir le confort extérieur.

D.1.1 L'indice PMV modifié : Vote Moyen Prévisible modifié

Il existe un certain nombre d'indices de confort thermique, développés dan un première temps, pour caractériser le confort à l'intérieur des bâtiments, qui ont été ensuite

adaptés pour l'étude de confort en extérieur. L'indice PMV, élaboré par Fanger est un des ces indices. Il représente la valeur moyenne des expressions subjectives d'un groupe des personnes exposé dans la même ambiance thermique à partir de leur sensation thermique variée sur une échelle de 7 points [Fanger 70].

- -3 : froid
- -2 : frais
- -1 : légèrement frais
- 0 : confortable
- 1 : légèrement chaud
- 2 : chaud
- 3 : très chaud

Pendant le calcul on néglige les caractéristiques personnelles (âge, sexe etc.) Par contre, les paramètres qu'il faut connaitre afin de calculer l'indice PMV sont les suivantes : Température, vitesse et humidité de l'air, température moyenne radiante et rayonnement solaire. Il est recommandé d'utiliser le PMV pour des conditions environnementales d'une gamme spécifique avec :

- T_{air} entre 10°C–30°C
- V_{air} entre 0 m/s–1 m/s
- T_{mrt}=10°C–40°C
- niveau de métabolisme M=46–232W/m^2

Le facteur d'hygrométrie n'est pas pris en compte, ce qui rend le résultat moins réaliste pour certains cas de climat. Les conditions étudiées sont confortables quand le PMV se situe entre -0.5 et 0.5 [Oliveira 07]. La notion de l'hygrométrie a été ensuite introduit sur le calcul de PMV obtenant ainsi le nouveau indice PMV* applicable aux conditions climatiques chaudes et humides. Contrairement à l'intérieur, en espace extérieur, l'effet du vent ainsi que les rayons de courtes et de grandes longueurs d'onde jouent un rôle très important sur l'aspect du confort thermique et rendent les calculs significativement plus complexes. La pertinence de l'utilisation de PMV en extérieur a été contestée par les chercheurs. La réalisation d'analyses expérimentales a montré que les standards du confort à l'intérieur ne peuvent pas être directement applicables aux espaces extérieures [Hoppe 02]. L'indice PMV était modifié afin de pouvoir prendre en compte les apports solaires ainsi que l'hétérogénéité des conditions extérieures. Jendritzky a modifié l'indice de Fanger pour qu'il soit applicable aux conditions climatiques extérieures tout en tenant compte de l'influence du rayonnement solaire absorbé par une personne debout. Cette nouvelle approche est aussi connue comme $KlimaMichelModel$ et elle est significativement utilisée aujourd'hui [Matzarakis 08b, Tsuyoshi 09]. Néanmoins, il est important de signaler que le PMV modifié ne tient pas compte des mécanismes thermorégulateurs du corps humain, ce qui revient à une description des conditions de confort, faiblement réalistes [Matzarakis 08b]. En outre, le calcul du PMV modifié repose sur un modèle stationnaire. Autrement dit, l'équation PMV ne s'ap-

plique que pour les individus exposés pendant une longue période à des conditions constantes et avec une activité métabolique constante, ce qui ne correspond pas directement aux conditions thermiques réelles. Du fait de ces limitations sur l'indice PMV, il est souhaitable d'utiliser d'autres indices de confort, dits universels, qui incluent tous les mécanismes thermorégulateurs et qui décrivent d'une manière précise et réaliste l'aspect du confort thermique de l'individu dans les espaces extérieures. Ces indices sont toujours basés sur des modèles d'échanges thermiques du corps humain.

D.1.2 L'indice PET : Température Equivalente Physiologique

L'indice PET est défini comme la température de l'air à laquelle, dans un local typique, le bilan énergétique du corps humain est équilibré avec les mêmes températures internes et de la peau et le même taux de sueur que ceux calculés pour les conditions extérieures [Hoppe 02].Il est basé sur le modèle d'énergie équilibré de Munich pour les individus (MEMI) et plus spécifiquement sur l'équation (D.1) qui définit le bilan énergétique du corps humain [Matzarakis 08a].

$$M + W + R + C + E_D + E_{\text{R-E}} + E_{\text{S-W}} + S = 0 \tag{D.1}$$

avec :
- M : le niveau de métabolisme
- W : l'activité physique
- R : le rayonnement solaire
- C : le flux de chaleur dû à la conduction
- E_D : le flux de chaleur latente
- $E_{\text{R-E}}$: la somme des flux de chaleur pour le chauffage et l'humidification de l'air inspiré
- $E_{\text{S-W}}$: le flux de chaleur dû à l'évaporation de la sueur
- S : le flux d'énergie pour chauffer ou rafraichir le corps

La personne standard étudiée est caractérisée par une activité légère, métabolisme de travail de 80W à ajouter au métabolisme de base et la résistance de vêtements est de 0.9 *clo* En ce qui concerne les conditions du local typique on fait certaines hypothèses : la température de l'air est égale à la température moyenne radiante, la vitesse du vent est fixée à 0.1 m/s et la pression de vapeur d'eau est 12 hPa. Par conséquent, les paramètres nécessaires pour calculer la PET sont la température, la vitesse et l'humidité de l'air ainsi que la température moyenne radiante. En ce qui concerne la T_{mrt}, elle intègre les flux de courtes et de grandes longueurs d'onde et peut être calculée en considérant que la densité de flux radiatif moyen qui est absorbé par le corps est obtenue à partir d'une somme pondérée des flux absorbés et mesurés, pour un individu qui reste debout ou qui marche [Vinet 00].

Les flux d'énergie qui sont notés dans l'équation (D.1) sont influencés par les paramètres météorologiques. Plus spécifiquement, la température de l'air influence les

paramètres C et $E_{\text{R-E}}$, l'humidité influence les flux E_D,$E_{\text{R-E}}$, $E_{\text{S-W}}$, la vitesse de l'air influence C et $E_{\text{S-W}}$ et la température moyenne radiante est liée avec le rayonnement R. Une fois que ces paramètres sont calculés, l'indice PET peut être défini. Les charcheurs ont aussi développé le logiciel Rayman dont l'utilisation permet le calcul du PET d'une manière facile. Le calcul des indices de confort à travers ce logiciel nécessite juste la connaissance de la température, de la vitesse et de l'humidité de l'air [Matzarakis 09].

Tous les paramètres météorologiques nécessaires pour calculer l'indice doivent être définis au niveau de 1.1 m qui correspond à la 'hauteur moyenne du centre de gravité pour une personne en Europe. La température moyenne radiante a une influence importante sur le calcul du confort et ainsi que sur la valeur de PET, surtout pendant les jours d'été où les apports solaire sont plus élevés et la vitesse du vent faible. Par exemple, on pourrait noter que pendant un jour ensoleillé au mois de juin la valeur de T_{mrt} peut être 20 K plus élevée que la T_{air} alors qu'en hiver où il y a un fort écoulement du vent, la température moyenne radiante peut être jusque 15 K inférieure à celle de l'air [Matzarakis 99].

La PET est exprimée en ° C, ce qui permet à l'indice d'être assez facilement interprété par les acteurs de projets urbains, architectes, décideurs et urbanistes. En parallèle, il permet la comparaison des effets d'un environnement extérieur complexe sur le corps de l'individu, avec sa propre expérience à l'intérieur et pour ce raison-là, elle constitue un indice largement applicable aujourd'hui En plus, la PET a été recommandée par les guides allemands (VDI, 1998) quant à l'étude de la planification urbaine et des prévisions de changements du comportement thermique de climat régional [Tsuyoshi 09].

Une limitation des indices mentionés est que leur calcul est basé sur de modèles de bilan énergétique stationnaires, en supposant que les individus sont exposés pendant une longue période aux conditions climatiques extérieures. Malgré certaines limitations, les indices qui ont été mentionné ci-dessus sont utilisés depuis plusieurs années quant à l'évaluation du confort thermique en espaces extérieurs. Toutefois, aujourd'hui l'étude du confort thermique dans les espaces extérieurs est en plein essor et par conséquent les scientifiques ont définit un nouvel indice qui est capable d'évaluer et d'expliquer le comportement thermique en conditions climatiques extérieures. L'objectif est le nouvel indice baptisé UTCI, (*Universal Thermal Climate Index*) mené dans le cadre de l'activité de la Société International de la Biométéorologie. Le nouvel indice a été finalement validé en 2009 et introduit à l'étude de confort thermique dans les espaces extérieures.

D.1.3 L'indice "Universal Thermal Climate Index"

L'utilisation d'un indice universel se traduit par la caractérisation des conditions de l'environnement extérieur tout en tenant compte la biométéorologie de l'homme. L'étude da la biométéorologie humaine est définie comme l'analyse des interactions entre le corps humain et les échanges météorologiques et climatiques. Il s'agit d'in-

teractions physiologiques assez difficiles à qualifier. L'étude de la biométéorologie de l'homme ne doit pas se limiter qu'à l'environnement atmosphérique mais il faut tenir compte de l'environnement culturel que les individus ont grandis [Jauregui 97]. L'UTCI est un indice de confort extérieur qui était développé dans le but de palier les contraintes des autres indices, déjà existantes et il est basé sur un modèle dynamique de mécanisme thermorégulatrice du corps humain. Au contraire des autres indices présentés avant, l'indice UTCI a été développé en utilisant un modèle thermorégulateur dynamique et in stationnaire, dit dynamic multi-node Fiala model. Il s'agit d'un modèle applicable pour une longue ainsi que pour une courte période d'exposition, pour tous les climats, indépendant des caractéristiques personnelles et prennent en considération la possibilité de différent niveau d'isolation sur le corps humain dû à la distribution des vêtements [Brode 10].

Ce modèle permet la simulation des échanges thermiques qui ont lieu à l'intérieur du corps humain ainsi qu'entre l'intérieur et la surface, tout en tenant compte des particularités anatomiques, thermique et les propriétés physiologiques [Fiala 99]. Les donnés qu'il faut introduire dans le modèle afin d'obtenir la valeur de l'UTCI sont les paramètres météorologiques, (la température et la vitesse de l'air, la pression de vapeur d'eau et la température moyenne radiante) ainsi que des paramètres personnelles comme le niveau de métabolisme et l'isolation par les vêtements. La hauteur où l'on mesure la vitesse du vent est définie à 1.1 m en fonction de l'$ISO7726$ et on fait l'hypothèse que le vent souffle de côté à 90 degrés de l'individu qui marche. Ensuite, une activité de référence a été définie avec une vitesse de marche de 4 km/h qui est traduit par un niveau métabolique de 135W/m^2 et l'isolation par les vêtements se situe entre 0.4*clo*-2.6 *clo* [Jendritzky 02].

L'indice UTCI a été développé dans le cadre du concept de la température équivalente. Autrement dit, dans un premier temps, on définit un environnement de référence à 50% d'humidité relative, pression de vapeur d'eau inferieur à 20 hPa, température de l'air égale à la température moyenne radiante et en vitesse de l'air faible. Par conséquent, la valeur d'UTCI, pour une combinaison donnée de paramètres climatiques est définie comme la température de l'air de l'environnement de référence qui produit le même stress thermique que l'environnement étudié [Brode 10].Dans une étape suivante, la valeur de l'UTCI est calculée et en regardant l'échelle de la contrainte thermique proposée par la Commission, il est possible d'évaluer le niveau du confort thermique pour un individu en espace extérieur.

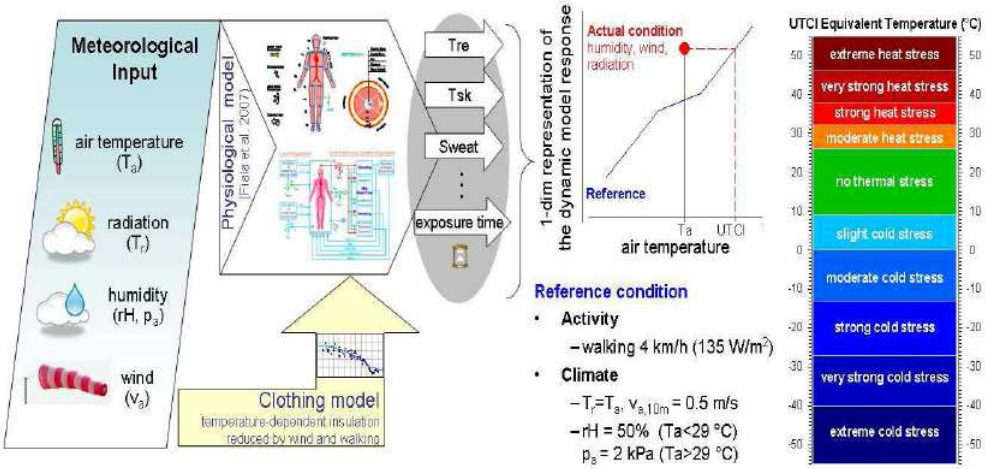


Fig. D.1 – Le processus du calcul d'UTCI [Brode 10].

Bibliographie

[Adolphe 01] L. Adolphe. *A simplified model of urban morphology : application to an analysis of the environmental performance of cities.* Planning and Design, vol. 28, pages 183–200, 2001.

[Adolphe 02] L. Adolphe, M. Maïzia, A. Lévy, A. Casal, A. Boussoualim & K. Aït Ameur. *SAGACités : Vers un Système d'aide à la Gestion des Ambiances urbaines.*, Février 2002.

[Ait-Ameur 02] K. Ait-Ameur. *Vers une méthode multicritère de caractérisation du microclimat dans les espaces publics urbains. Validation d'un système d'indicateurs morpho climatiques et d'un indicateur de confort.* Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2002.

[Akbari 92] J. Akbari, S. Davis, S. Dorsano, J. Huang & S. Winnett. *Cooling Our Communities : A Guidebook on Tree Planting and Light-Colored Surfacing.* U.S. Government Printing Office, Washington D.C., page 217, 1992.

[Allain 04] R. Allain. Morphologie urbaine. géographie, aménagement et architecture de la ville. A. Colin, Paris, 2nd edition, 2004.

[Balandraux 07] M. Balandraux. Confort thermique, température et humidité [Webpage]. 2007. Disponible sous le lien http://www.medecine-preventive.ch/fra/humidite.php [Dernière visite le 7 novembre 2011].

[Barradas 98] V.L. Barradas. *Measurements of latent heat flux in small urban park in Mexico City.* 1998. 13th Conference on Biometeorology and Aerobiology.

[Bouyer 09] J. Bouyer. *Modélisation et simulation des microclimats urbains. Étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétique des bâtiments.* Thèse de doctorat, Ecole d'architecture de Nantes, 2009.

[Bozonnet 05] E. Bozonnet. *Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments-cas des rues canyons.* Thèse de doctorat, Université de Rochelle, 2005.

[Bozonnet 06] E. Bozonnet. *Les microclimats urbains et la demande énergétique du bâti.* XXIVemes Rencontres Universitaires de Génie Civil, 2006.

[Brode 10] P. Brode, G. Jendritzky, D. Fiala & G.Havenith. *The universal thermal climate index UTCI in operational use.* 2010. Adapting to change : New thinking on comfort, Cumberland Lodge, Windsor, UK.

[CERMA 11] CERMA. Le rayonnement solaire. les aspects lumineux et énergétiques du soleil [Webpage]. 2011. Disponible sous le lien http://audience.cerma.archi.fr/index.html [Dernière visite le 7 novembre 2011].

[Cermak 95] J. Cermak, A. Davenport, E. Plate & D. Viegas. *Wind climate in cities.* pages 81–107, 1995.

[CERTU 03] CERTU. *Confort thermique.* Mémento technique du bâtiment pour le chargé d'opérations de constructions publiques, 2003.

[CNRM 10] CNRM. Description de la couche limite atmosphérique [Webpage]. 2010. Centre National de Recherches Météorologiques. Disponible sous le lien http://www.cnrm-game.fr [Dernière visite le 7 novembre 2011].

[Conti 05] S. Conti *et al.* *Epidemiologic study of mortality during the summer 2003 heat wave in Italy.* Environmental Research, vol. 98, pages 390–399, 2005.

[CSTB 95] CSTB. *Climatologie générale.* CSTB Nantes, page 50, 1995.

[de Portzamparc 07] Christian de Portzamparc. *Le projet Yléo par Christian de Portzamparc*, 2007. Disponible sous le lien http://projets-architecte-urbanisme.fr/yleo-portzamparc.

[de Portzamparc 10] C. de Portzamparc, 2010. Communication Privée, Carnet de details et typologies des façades.

[de Virel 09] Marc Dufresne de Virel. *Problématique du microclimat urbain : vent et confort Introduction à l'Aérodynamique du cadre bâti. Le vent et sa simulation à échelle réduite. Champ de vitesse dans les*

ensembles bâtis. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, 2009.

[Dimoudi 03] A. Dimoudi & M. Nikolopoulou. *Vegetation in the urban environment, microclimatic analysis and benefits*. Energy and Buildings, no. 35, pages 69–76, 2003.

[Fanger 70] P.O. Fanger. Thermal comfort, analysis and applications in environmental engineering. McGraw-Hill Book Co. New York, 1st edition, 1970.

[Fiala 99] D. Fiala, K.J. Lomas & M. Stohrer. *A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions : The passive system*. Journal of Applied Physiology, no. 87, pages 1957–1972, 1999.

[Fluent 04] Fluent. Gambit 2.2, tutorial guide [Webpage]. 2004. Fluent Incorporation. Disponible sous le lien http://vincent.chapin.free.fr/Cours%20CFD [Dernière visite le 7 novembre 2011].

[Gandemer 76] J. Gandemer & A. Guyot. *Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti*. Ministère de l'Équipement, Direction de l'Aménagement foncier et de l'Urbanisme, Paris, 1976.

[Garatt 93] J.R. Garatt. *Sensitivity of climate simulations to land surface and atmospheric boundary layer treatments a review*. Journal of climate, vol. 6, pages 419–448, 1993.

[Georgakis 06] C. Georgakis & M. Santamouris. *Experimental investigation of air flow and temperature distribution in deep urban canyons for natural ventilation purposes*. Energy and Buildings, no. 38, pages 367–376, 2006.

[Giguère 09] M. Giguère. *Mesures de lutte aux ilots de chaleur urbains*. Revue de littérature, direction de risque, 2009.

[Giridharan 04] R. Giridharan, S. Ganesan & S.S.Y. Lau. *Daytime urban heat island effect in high rise and high density residential developments in Hong Kong*. Energy and buildings, no. 30, pages 525–534, 2004.

[Givoni 92] B. Givoni. *Climatic aspects of urban design in tropical regions, Atmospheric environment*. Atmospheric environment, vol. 26, no. 3, pages 397–402, 1992.

[Givoni 03] B. Givoni, M. Noguchi, H. Saaroni, O. Pochter & Y. Yaacovand S. Becker. *Outdoor thermal comfort research issues*. Energy and buildings, no. 35, pages 77–86, 2003.

[Golany 96] G.S. Golany. *Urban design morphology and thermal performance*. Atmospheric environment, vol. 30, pages 455–465, 1996.

[Groleau 00] D. Groleau. Solène, un outil de simulation des eclairements solaires et lumineux dans les projets architecturaux et urbains [Webpage]. 2000. Disponible sous le lien https://listes.cru.fr/wiki/solenetb/ [Dernière visite le 7 novembre 2011].

[Hoppe 02] P. Hoppe. *Different aspects of assessing indoor and outdoor thermal comfort*. Energy and buildings, no. 34, pages 661–665, 2002.

[Huang 10] Yuan Huang. *Methodology of climatic design of urbain district for buildings energy efficiency*. Thèse de doctorat, Ecole d'Architecture de Nantes, 2010.

[Hwang 11] R.L. Hwang, T.P. Lin & A. Matzarakis. *Seasonal effects of urban street shading on long-term outdoor thermal comfort*. Building and environment, no. 46, pages 863–870, 2011.

[Jauregui 97] E. Jauregui. *The last Ms for* 40th *anniversary issue-aspects of human biometeorology*. International Journal of Biometeorology, no. 40, pages 58–61, 1997.

[Jendritzky 02] G. Jendritzky, A. Maarouf, D. Fiala & H. Staiger. *An update on the development of a Universal Thermal Climate Index*. 2002. 15th Conference on Biometeorology and Aerobiology.

[Johansson 06] E. Johansson. *Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot and dry climate : a study in Fez,Morocco*. Building and environment, pages 1326–1338, 2006.

[Johnston 04] J. Johnston & J. Newton. *Building green,a guide to using plants on roofs, walls and pavement*. Ecology Unit, page 95, 2004.

[Kakon 09] A. Noori Kakon & M. Nobuo. *The sky view factor effect on the microclimate of a city environment : a case of Dhaka city*. 2009. The seventh international conference of urban climate, Yokohama, Japon.

[Kaufmann 11] J. Kaufmann. Statistiques du vent et du temps lyon aéroport/satolas [Webpage]. 2011. Disponible sous le lien http://fr.windfinder.com/windstats/windstatistic_lyon_satolas.htm [Dernière visite le 7 novembre 2011].

[Laravoire 05] Jacques Laravoire *et al.* *Annexe nationale à la NF EN 1991-1-4 :2005*, 2005. Disponible sous le lien http://www.scribd.com/doc/14498865/Eurocode-NF-EN-199114.

[Lyon 09] Lyon. Rapport d'activité du projet de Lyon Confluence [Webpage]. 2009. Disponible sous le lien http://www.lyon-confluence.fr [Dernière visite le 7 novembre 2011].

[Matzarakis 99] A. Matzarakis, H. Mayer & G. Iziomon. *Application of a universal thermal index : Physiological equivalent temperature.* International Journal of Biometeorology, no. 43, pages 76–84, 1999.

[Matzarakis 08a] A. Matzarakis & B. Amelung. *Physiological Equivalent temperature as indicator for impacts of climate change on thermal comfort of humans. Seasonal forecast, climatic change and human health.* Sciences and Business Media, pages 161–172, 2008.

[Matzarakis 08b] A. Matzarakis & H. Mayer. *Dependence of the thermal urban climate on morphological variables.* Ber. Meteor. Inst. Univ. Freiburg, no. 17, pages 129–139, 2008.

[Matzarakis 09] A. Matzarakis. *Additional features of the RayMan model.* 2009. The seventh International Conference on Urban Climate. Disponible sous le lien http://www.urbanclimate.net/matzarakis/pub2009.php.

[Miguet 96] F. Miguet. *Eclairements énergétiques et lumineux en milieu urbain.* Rapport du CERMA, page 67, 1996.

[Ministère 11] Ministère. Construction, urbanisme, aménagement et ressources naturelles [Webpage]. 2011. Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement. Disponible sous le lien http://www.developpement-durable.gouv.fr/ [Dernière visite le 7 novembre 2011].

[Musy 06] M. Musy, N. Molines, T. Pham, D. Siret & D. Groleau. *ADEQUA : aménagement durable d'un quartier, Elaboration d'une méthodologie d'aide a la décision lors de la réalisation ou de la réhabilitation d'un quartier résidentiel.* Rapport final du CERMA, 2006.

[Musy 08] M. Musy, Y. Huang, G. Hégron, H. Chen & B. Li. *Towards urban design guidelines from urban morphology description and climate adaptability.* 2008. PLEA Towards zero energy building.

[Nantes 08] Nantes. Un exemple de quartier durable : Bottière chénaie [Webpage]. 2008. Nantes métropole. Disponible sous le lien http://www.nantes.fr/bottiere-chenaie-idees-neuves [Dernière visite le 7 novembre 2011].

[Nikolopoulou 03] M. Nikolopoulou & K. Steemers. *Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for design urban spaces.* Energy and Buildings, no. 35, pages 95–101, 2003.

[Oke 73] T.R. Oke. *City size and the urban heat island.* Atmospheric environment, vol. 7, pages 769–779, 1973.

[Oke 78] T.R. Oke. *Boundary Layer Climates.* London, page 372, 1978.

[Oke 87] T.R. Oke. Boundary layer climates. Methuen and co.London, 2nd edition, 1987.

[Oke 88] T.R. Oke. *Street design and urban canopy layer climate.* Energy and building, vol. 11, pages 103–113, 1988.

[Oke 06] T.R. Oke. *Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sities.* Instruments and observing methods WMO/TD, no. 81, 2006.

[Oliveira 07] F. Oliveira & S. Moreau. *Confort thermique ressenti. Analyse de campagnes expérimentales 2005–2006.* EN-CAPE 07.088 C-V0, pages 6–8, 2007.

[Pigeon 07] G. Pigeon, A. Lemonsu, V. Masson & J. Hidalgo. *De l'observation du microclimat urbain à la modélisation intégrée de la ville.* La Météorologie, vol. 62, pages 39–47, 2007.

[Qin 02] Z. Qin, P. Berliner & A. Karnieli. *Numerical solution of a complete energy balance model for simulation of heat fluxes and surface temperature under bare soil environment.* Applied Mathematics and Computation, vol. 13, pages 171–200, 2002.

[Ratti 03] C. Ratti, D. Raydan & K. Steemers. *Building form and environmental performance : archetypes, analysis and an arid climate.* Energy and Buildings, no. 35, pages 49–59, 2003.

[Rebetez 06] M. Rebetez. *La Suisse se rechauffe, effet et changement climatique*, 2006. Disponible sous le lien http://www.wsl.ch/personal_homepages/rebetez.

[Reiter 07] S. Reiter. *Elaboration d'outils méthodologiques et techniques d'aide à la conception des ambiances urbaines de qualité pour favoriser le développement durable des villes.* Thèse de doctorat, Université de Louvain, 2007.

[Ringenbach 04] N. Ringenbach. *Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine, mesures, modélisation et validation sur Strasbourg.* Thèse de doctorat, Université de Louis Pasteur, Strasbourg, 2004.

[Robitou 06] M. Robitou, M. Musy, C. Inard & D. Groleau. *Modeling the influence of vegetation and water pond on urban microclimate.* Solar Energy, vol. 80, pages 435–447, 2006.

[Rotach 99] M. Rotach. *On the influence of the urban roughness sub layer on turbulence and dispersion.* Atmospheric environment, vol. 33, pages 4001–4008, 1999.

[Sabre 11] M. Sabre, 2011. Communication Privée.

[Sailor 04] D. Sailor & L. Lu. *A top down methodology for developing diurnal and seasonal anthropogenic heating profiles for urban areas.* Atmospheric Environment, no. 38, pages 2737–2748, 2004.

[SAMOA 11] SAMOA. Ile de Nantes,Projet Yléo, Tripode A [Webpage]. 2011. Société d'aménagement de la Métropole Ouest Atlantique. Disponible sous le lien http://www.iledenantes.com/fr/projets [Dernière visite le 7 novembre 2011].

[Santamouris 01] M. Santamouris *et al.* *On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings.* Solar Energy, vol. 30, pages 201–216, 2001.

[Santamouris 11] M. Santamouris, A. Synnefa & T. Karlessi. *Using advanced cooling materials in the urban built environment to mitigate heat islands and improve thermal comfort conditions.* Solar Energy, vol. 85, 2011.

[Strock 65] C. Strock & R. Koral. Handbook of air conditioning, heating and ventilating. New York, Industrial Press, 1st edition, 1965.

[Taha 97] H. Taha. *Modeling the impacts of large-scale albedo changes on ozone air quality in the South Coast Air Basin.* Atmospheric environment, vol. 11, no. 31, pages 1667–1676, 1997.

[Thellier 89] F. Thellier. *Modélisation du comportement thermique de l'homme et de son habitat. Une approche de l'étude de confort.* Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse III, 1989.

[Toudert 06] F. A. Toudert & H. Mayer. *Numerical effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in a hot and dry climate.* Building and Environment, no. 41, pages 94–108, 2006.

[Toudert 07] F. Ali Toudert & H. Mayer. *Effects of asymmetry, galleries, overhanging façades and vegetation on thermal comfort in urban street canyons.* Solar Energy, no. 81, pages 742–754, 2007.

[Traisnel 86] J.P. Traisnel. *Architecture, Climats,Energie. Outils et Démarches Pédagogiques.* Cahiers Scientifiques et Techniques COFEDES, page 235, 1986.

[Tsuyoshi 09] H. Tsuyoshi. *Thermal comfort outdoor environment.* Global environmental research, no. 13, pages 43–47, 2009.

[Unger 04] J. Unger. *Intra-Urban relationship between surface geometry and urban heat island : Review and new approach.* Climate research, vol. 27, pages 253–264, 2004.

[Vinet 00] J. Vinet. *Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieures.* Thèse de doctorat, Ecole d'architecture de Nantes, 2000.

[Walton 07] D. Walton, V. Dravitzki & M. Donn. *The relative influence of wind, sunlight and temperatures on user comfort in urban outdoor spaces.* Building and environment, no. 42, pages 3166–3175, 2007.

[Zimny 04] L. Zimny, F. Delhay, S. Delhay, F. Ghesquière & D. Lecomte. Habitat urbain dense et individualisé à nantes. [Webpage]. 2004. Agence d'architecture Boskop. Disponible sous le lien http://actu-architecture.com/blog/2010/03/ [Dernière visite le 7 novembre 2011].

[Zrepa 09] M. Zrepa. *The Map Of Sky View Factor In The Center Of Lodz.* 2009. The Seventh International Conference on Urban Climate. Disponible sous le lien http://www.ide.titech.ac.jp/~icuc7/.