



HAL
open science

Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier

Adrien Gros

► **To cite this version:**

Adrien Gros. Modélisation de la demande énergétique des bâtiments à l'échelle d'un quartier. Autre. Université de La Rochelle, 2013. Français. NNT : 2013LAROS401 . tel-01066106

HAL Id: tel-01066106

<https://theses.hal.science/tel-01066106>

Submitted on 19 Sep 2014

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

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



Université de La Rochelle – UFR Science et Technologie
Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement

THÈSE

Présentée par

Adrien Gros

Pour l'obtention du
Doctorat de L'Université de La Rochelle
Spécialité Génie Civil

**MODELISATION DE LA DEMANDE ENERGETIQUE DES BATIMENTS A
L'ECHELLE D'UN QUARTIER**

Directeur de thèse : Christian Inard
Co-directeur de thèse : Emmanuel Bozonnet

Thèse soutenue le 26 juin 2013

Devant le jury composé de :

Bozonnet	Emmanuel	Maitre de Conférences	Université de La Rochelle	Examineur
Despretz	Hubert	Ingénieur	ADEME	Examineur
Diab	Youssef	Professeur	Université Paris Est	Rapporteur
Inard	Christian	Professeur	Université de La Rochelle	Examineur
Musy	Marjorie	Ingénieure de Recherche	École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes	Rapporteur
Roux	Jean-Jacques	Professeur	INSA de Lyon	Examineur

Remerciements

Même si le travail d'une thèse est conséquent, il me semble qu'on ne souligne pas assez souvent le travail qui a été fait en amont. Bien souvent le sujet sur lequel on travaille est la continuité de recherches déjà réalisées auparavant. C'est thèse après thèse, que chaque doctorant fait avancer la recherche scientifique peu à peu. Dans mon cas, les travaux développés dans cette thèse sont la suite logique des ceux réalisés par Emmanuel Bozonnet lors de son doctorat. Je tiens donc à remercier mes deux encadrants, Emmanuel Bozonnet et Christian Inard, pour m'avoir permis de travailler sur ces thèmes de recherche et ainsi, de contribuer modestement à l'avancée de la recherche scientifique.

Je remercie les différents membres du jury d'avoir accepté de participer à ma soutenance et particulièrement Youssef Diab et Marjorie Musy pour avoir rapporté mon travail. Je remercie aussi particulièrement Hubert Desprez, qui malgré la distance et les rares fois où nous nous sommes vus, a toujours réussi à me motiver et à m'aider à approfondir mon travail.

Je remercie aussi l'ADEME, la région Poitou-Charentes et le laboratoire LaSIE pour m'avoir donné les moyens financiers et matériels pour mener à bien ce projet. Je remercie également les différents membres du laboratoire avec qui les échanges m'ont permis de découvrir le monde de la recherche et d'autres thèmes qui ne sont pas directement les miens.

Cette thèse a été réalisée en collaboration avec l'IRSTV, l'Institut de Recherche en Science et Technique de la Ville. Dans ce cadre, j'ai pu rencontrer et échanger avec de nombreux autres doctorants et chercheurs travaillant sur des thématiques proches de la mienne. Je remercie Isabelle Calmet, Julien Bouyer, Maeva Sabre et Nathalie Long pour les échanges fructueux réalisés. Je remercie particulièrement Laurent Malys dont les conseils techniques et les différents échanges ont été d'une grande aide dans l'élaboration de cette thèse.

Je remercie chaleureusement tous les doctorants, jeunes docteurs et stagiaires du laboratoire LaSIE qui ont toujours été là pour me motiver et m'encourager, et en particulier lorsque j'avais l'impression de ne pas avancer dans son travail. Merci Adrien et Alex, Jean-Louis, Mireille, Aubain, Serge, Kevin, Pierre, Imam, Yacine, Nabil, Kamilia, Abdel, Rémi, Rémy, Petra, Salah, François, Antoine, Minou, Vincent, Axel, Remon, Ahmad, Nissrine, Marie, Nazir, Ibrahim, Oscar, Max, Laurent, Valerian, Carmen, Alice, Malek, Rayan, Rabah. J'espère revoir ceux qui sont partis et à rendre l'aide que vous m'avez apporté.

Et enfin je remercie ma famille, pour le soutien sans faille qu'elle m'apporte continuellement.

Résumé

Depuis 2007, plus de la moitié de la population mondiale vit en ville. La forte densité de population et d'activité entraîne une augmentation des besoins en climatisation des bâtiments en été. L'augmentation des températures due à l'effet d'îlot de chaleur urbain est principalement liée à l'aménagement urbain et aux flux de chaleurs anthropiques causés par l'utilisation des systèmes de chauffage et de climatisation. En agissant sur l'aménagement urbain, comme la densité de construction, l'albédo de surface ou les espaces verts, le microclimat urbain peut être amélioré ; ce qui permet ainsi de réduire les besoins énergétiques des bâtiments.

Nous proposons dans ce manuscrit un modèle pour calculer les besoins énergétiques des bâtiments à l'échelle d'un quartier en prenant en compte l'interaction entre le microclimat urbain et les bâtiments.

L'objectif est de décrire d'une part les ambiances intérieures du bâtiment, telles qu'elles sont modélisées dans les codes de thermique dynamique du bâtiment, et d'autre part, l'environnement extérieur tel qu'il est modélisé dans les codes de micrométéorologie. Pour travailler à cette échelle, la description détaillée de tous les transferts thermiques à l'intérieur et à l'extérieur de chaque bâtiment n'est pas appropriée. Ainsi, un modèle réduit de bâtiment est couplé avec un modèle simplifié de microclimat urbain. Le modèle de bâtiment est basé sur la méthode des facteurs de pondération et permet de prendre en compte les gains internes, l'inertie de l'enveloppe et les échanges radiatifs et convectifs à l'intérieur du bâtiment. Il est couplé à un modèle radiatif en milieu urbain, basé sur la méthode des radiosités, et un modèle zonal tridimensionnel de la canopée urbaine. Après avoir présenté ces modèles, ils sont appliqués sur un cas d'application, à savoir le quartier Pin Sec de la ville de Nantes. Différents scénarios d'aménagement urbain sont simulés sur une année afin d'analyser l'influence de l'aménagement urbain leur influence sur les besoins énergétiques des bâtiments.

Mots-clefs : microclimat urbain, énergétique des bâtiments, modèle zonal, échelle du quartier

Abstract

Since 2007, more than half of world population lives in urban areas. The high density of population and its activity leads to an increase of building energy demand in summer. The temperature rise of densely built areas is mainly due to urban landscaping and anthropogenic heat fluxes caused by combustion flues and air conditioning of buildings. Acting on urban landscaping, like building density, surface albedo or green areas, the urban microclimate can be improved, which consequently reduces the building energy demand.

We propose in this thesis a model to compute the energy demand at the district scale taking into account the interaction between urban microclimate and building energy demand.

On the one hand, the aim is to describe the indoor thermal conditions as usually in thermal dynamic simulations; on the other hand, the external condition are modeled as they should be described in micrometeorological models. To work at this scale, the detailed description of all thermal transfers inside and outside each building is not appropriate. Thus, a reduced thermal building model is coupled with a simplified urban microclimate model. The building model is based on weighting factors method and allows taking into account the internal gains, the envelope inertia, and the radiative and convective exchanges inside the building. This model is coupled with a radiative model of a district, based on radiosity method, and a tridimensional zonal model of the urban canopy. Following the description of these models, a case study of the district Pin Sec in Nantes is presented. Different scenarios of urban landscaping are simulated over one year to assess their influences on building energy demand.

Keywords: urban microclimate, buildings energy needs, zonal model, district scale

Table des matières

NOMENCLATURE	3
INTRODUCTION GENERALE	7
CHAPITRE I. ÉTAT DE L'ART SUR L'INTERACTION CLIMAT URBAIN ET BATIMENT	11
I.1 Contexte et enjeu.....	12
I.1.1 Le bâtiment.....	12
I.1.2 La ville	14
I.2 Impact du milieu urbain sur les besoins énergétiques des bâtiments	16
I.2.1 L'effet d'îlot de chaleur urbain	16
I.2.2 Impact des matériaux.....	18
I.2.3 Impact de la morphologie urbaine.....	20
I.2.4 Impact des apports anthropiques.....	21
I.2.5 Impact des végétaux.....	21
I.3 Les outils de simulation des besoins énergétiques des bâtiments	22
I.3.1 Outils à l'échelle du bâtiment.....	23
I.3.2 Outils à micro-échelle climatique.....	25
I.3.3 Outils à l'échelle climatique locale	30
I.4 Présentation de la présente étude.....	33
I.4.1 Objectif.....	33
I.4.2 Quartier d'étude retenu.....	35
CHAPITRE II. MODELISATION DES ECHANGES RADIATIFS EN MILIEU URBAIN	37
II.1 Éclaircissement de la voûte céleste	38
II.1.1 Éclaircissement courte longueur d'onde.....	38
II.1.2 Éclaircissement de grande longueur d'onde.....	43
II.2 L'accès au rayonnement solaire en milieu urbain	46
Modélisation des mutli-réflexions en milieu urbain.....	50
II.2.1 Facteur de forme	50
II.2.2 Modélisation des échanges radiatifs de grande longueur d'onde.....	51
II.2.3 Calcul des multi-réflexions avec la méthode des radiosités	52
II.2.4 Calcul des multi-réflexions avec la méthode des enceintes fictives.....	56
II.3 Développement d'une méthode de calcul radiatif adaptée	58
II.3.1 Modèle géométrique	59
II.3.2 Calcul du rayonnement solaire direct et diffus	62
II.3.3 Calcul du rayonnement solaire total	63
II.3.4 Éclaircissement de grande longueur d'onde.....	64
CHAPITRE III. MODELISATION COUPLEE DU MICROCLIMAT URBAIN ET DES BESOINS ENERGETIQUES DES BATIMENTS.....	67
III.1 Modélisation thermoaéraulique du microclimat urbain.....	68
III.1.1 Modélisation aéraulique en milieu urbain.....	70
III.1.2 Présentation de l'outil QUIC.....	76
III.1.3 Développement d'un modèle thermoaéraulique urbain basé sur la méthode zonale.....	77
III.1.4 Maquette numérique	85
III.2 Bilan thermique des surfaces	86
III.2.1 Densité de flux convectif	87
III.2.2 Densité de flux conductif.....	88
III.2.3 Modèle de sol.....	94

III.3	Modèle thermique de bâtiment	96
III.3.1	Bilan thermique d'un local	96
III.3.2	Méthode des facteurs de pondération.....	103
III.4	Couplage complet.....	112
CHAPITRE IV. ÉTUDE DES BESOINS ENERGETIQUES DU QUARTIER PIN SEC.....		115
IV.1	Description du quartier d'étude	116
IV.2	Paramètres de simulation	117
IV.2.1	Description des maquettes numériques.....	117
IV.2.2	Définition des différents scénarios de simulation.....	118
IV.2.3	Les données météorologiques	121
IV.2.4	Les données d'occupation et d'usage	122
IV.3	Analyse des résultats	124
IV.3.1	Résultats préliminaires	124
IV.3.2	Impact des performances de l'enveloppe des bâtiments.....	133
IV.3.3	Impact des aménagements extérieurs.....	137
IV.3.4	Impact des scénarii climatiques extrêmes.....	143
IV.3.5	Synthèse des résultats.....	147
CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....		151
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		155

Nomenclature

Caractères grec

a_i		Absorptivité de courte longueur d'onde pour la paroi i
β	rad	Angle d'inclinaison d'une surface avec l'horizon
ε_i		Émissivité de grande longueur d'onde de la surface i
ρ	kg / m ³	Masse volumique de l'air sec
$\rho_{CLO,Fi}$		Réfectivité courte longueur d'onde de la surface fictive Fi
$\rho_{CLO,i}$		Réfectivité courte longueur d'onde de la surface i
$\rho_{GLO,i}$		Réfectivité grande longueur d'onde de la surface i
ξ	rad	Angle d'incidence du rayonnement solaire
ξ_z	rad	Angle zénithal du soleil
$\varphi_{ce,i}$	W/m ²	Densité de flux échangée par convection entre l'air extérieur et la paroi i
$\varphi_{ci,i}$	W/m ²	Densité de flux échangée par convection entre la surface i et l'air intérieur
$\varphi_{pe,i}$	W/m ²	Densité de flux échangée par conduction à travers la paroi i (surface intérieure)
$\varphi_{pi,i}$	W/m ²	Densité de flux échangée par conduction à travers la paroi i (surface intérieure)
Δt	s	Pas de temps
$\Phi_{k,n}$	W	flux de chaleur entrant dans la zone k par l'interface n

Caractères latin

MINUSCULES

a_{sol}	m^2/s	Diffusivité thermique du sol.
$h_{i,i}$	W/m^2K	Coefficient d'échange convectif superficiel de la paroi i (surface intérieure)
$h_{e,i}$	W/m^2K	Coefficient d'échange convectif superficiel de la paroi i (surface extérieure)
u	m/s	Composante de la vitesse selon la direction x
v	m/s	Composante de la vitesse selon la direction y
w	m/s	Composante de la vitesse selon la direction z

MAJUSCULES

C_i	$J/kg.K$	Capacité calorifique massique de la paroi i
C_p	$J/kg.K$	Capacité calorifique de l'air
E_n	W/m^2	Eclairement normal direct
$E_{CLO,dr,i}$	W/m^2	Eclairement solaire direct reçu par la surface i
$E_{CLO, dr, b}$	W/m^2	Eclairement solaire direct reçu par une surface horizontale
$E_{CLO,df,i}$	W/m^2	Eclairement solaire diffus reçu par la surface i
$E_{CLO,df,i}$	W/m^2	Eclairement solaire diffus reçu par une surface horizontale
$E_{CLO,s,i}$	W/m^2	Eclairement solaire réfléchi par le sol et reçu par la surface i
$E_{CLO,AR,i}$	W/m^2	Eclairement solaire reçu par la surface i après les réflexions par l'environnement
$E_{CLO_e,i}$	W/m^2	Eclairement solaire émis par l'environnement extérieur et reçu par la surface i extérieur

$E_{CLOi,i}$	W/m ²	Eclairement solaire reçu par une surface intérieure i d'un local
$E_{GLOe,i}$	W/m ²	Eclairement de grande longueur d'onde émis par l'environnement extérieur et reçu par une surface i
$E_{GLOi,i}$	W/m ²	Eclairement de grande longueur d'onde reçu par une surface intérieure i d'un local
$E_{s,p}$	W/m ²	Eclairement solaire reçu par le plancher
F_{ij}		Facteur de forme de la surface i vers la surface j
$FP_k^i(n)$		Température de surface de la paroi i générée par une sollicitation unitaire k , n pas de temps après la sollicitation
N_n		Nombre d'interfaces composant une zone thermoaéraulique
Q_n	kg/s	Débit traversant l'interface n
S_i	m ²	Surface de la paroi i
$S_{i,k}$	m ²	Surface d'échange entre la paroi i et la zone k
T_a	° C	Température d'air
T_e	° C	Température d'air extérieur
$T_{e,i}$	° C	Température d'air de la zone i
$T_{s,i}$	° C	Température de surface intérieure de la paroi i
$T_{s,e,i}$	° C	Température de surface intérieure de la paroi i
N_p		Nombre de parois en contact avec l'extérieur composant un local

Introduction générale

Dans l'antiquité, la conception des bâtiments et l'organisation des villes étaient réalisées pour pouvoir être adapté au climat local. Ainsi « De architectura », le traité d'architecture écrit par Vitruve et dédié à l'empereur Auguste, a été utilisé comme règle générale pour construire et organiser les villes méditerranéennes, en définissant notamment l'orientation en fonction des vents dominants.

Plus récemment, le développement des systèmes de traitement d'ambiance (chauffage, climatisation et ventilation) a permis de s'affranchir de ces contraintes climatiques en contrôlant les conditions intérieures du bâtiment pour augmenter le confort des occupants. Cependant l'augmentation du coût des ressources énergétiques a poussé à réduire les consommations de ces systèmes. C'est ainsi qu'à partir des années 70 de nombreux outils de simulation thermique du bâtiment ont été conçus pour la prédiction des consommations énergétiques des bâtiments (Guignard 2010).

A l'heure actuelle ces outils sont largement utilisés par les professionnels. Les plus simples permettent de réaliser les calculs réglementaires et les plus élaborés d'optimiser la conception des bâtiments en étudiant l'impact de l'orientation, des systèmes de ventilation ou de l'isolation sur leurs performances énergétiques. Ces outils ont ainsi largement contribué à maîtriser la demande énergétique des bâtiments.

L'augmentation des performances informatiques a contribué à développer des outils de plus en plus précis prenant en compte les caractéristiques du bâtiment et les phénomènes physiques présents. Pourtant, aujourd'hui, alors que la description des conditions intérieures des bâtiments est très élaborée, celle des phénomènes extérieurs reste très limitée en utilisant des valeurs moyennes issues de fichiers météorologiques standards.

Cependant, les performances énergétiques des bâtiments doivent encore être améliorées pour répondre aux nouvelles contraintes environnementales et à la raréfaction des ressources énergétiques. Il est donc devenu nécessaire de décrire avec de plus en plus de précision

l'environnement extérieur. En ville, celui-ci se présente comme un milieu complexe, caractérisé par des conditions microclimatiques particulières. Pour prédire les besoins énergétiques des bâtiments en milieu urbain, il devient alors indispensable de développer la description des phénomènes non seulement dans le bâtiment, mais aussi à l'échelle d'un quartier ou d'une ville. Ceci se traduit par la modélisation d'une part des phénomènes thermiques dans le bâtiment, et d'autre part des phénomènes microclimatiques autour du bâtiment. La recherche dans ce domaine doit donc mener à développer des outils d'aide à la conception pour les différents acteurs de la construction et de l'aménagement de la ville qui tiennent compte de la conception interne des bâtiments et de leurs interactions avec l'environnement extérieur et le microclimat.

Nous proposons dans cette thèse de développer un modèle permettant de réaliser la simulation annuelle des besoins énergétiques des bâtiments à l'échelle d'un quartier, en prenant en compte l'interaction entre le microclimat et les bâtiments.

Dans le premier chapitre, après avoir exposé les enjeux du bâtiment et de la ville, nous présenterons les différents paramètres du milieu urbain pouvant influencer les consommations énergétiques des bâtiments. Ensuite, nous présenterons les différents outils existants permettant la simulation des besoins énergétiques des bâtiments à l'échelle de un ou plusieurs bâtiments. Cet état de l'art permettra alors de nous positionner par rapport à ces modèles et d'expliquer les choix qui ont été pris pour le développement du modèle retenu dans cette thèse.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons, dans un premier temps les différents modèles permettant le calcul des échanges de courte et grande longueurs d'ondes en milieu urbain. Ceux ci permettent de calculer le rayonnement de courte et grande longueurs d'onde provenant de la voûte céleste et de l'environnement urbain. Nous expliciterons les modèles numérique et géométrique retenus pour permettre de calculer de manière simplifiée les échanges radiatifs à l'échelle d'un quartier.

Dans le troisième chapitre, nous expliquerons quel type de modélisation nous avons adapté pour calculer les besoins énergétiques des bâtiments à l'échelle d'un quartier. Après avoir présenté comment modéliser les écoulements aérauliques en milieu urbain à l'aide des modèles empiriques, nous développerons une méthodologie de modélisation les champs de température en milieu urbain à partir d'un modèle de type zonal. Ensuite, nous présentons le modèle thermique de bâtiment basé sur la méthode des facteurs de pondération, qui est utilisé pour travailler à l'échelle du quartier. Et finalement nous présentons un modèle numérique et géométrique tridimensionnel permettant le couplage de la simulation du microclimat urbain avec les besoins énergétiques des

bâtiments.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous appliquerons le modèle élaboré dans cette thèse sur le quartier Pin Sec à Nantes. Nous présentons les différentes simulations qui ont été réalisées sur une durée d'un an, en modifiant les caractéristiques thermiques des bâtiments (isolation et vitrage), les caractéristiques de l'environnement urbain (végétation ou albédo) ou les caractéristiques climatiques (scénario climatique standard ou extrême). Pour chaque simulation les résultats sont donnés en termes de besoins énergétiques et du microclimat engendré par l'environnement urbain. L'analyse des résultats permettra de mettre en évidence :

- les différents phénomènes physiques intervenants,
- l'influence du microclimat sur les besoins énergétiques ainsi que l'influence des bâtiments sur le microclimat,
- l'intérêt du couplage entre modélisation thermique des bâtiments et modélisation du microclimat urbain.

Chapitre I.

État de l'art sur l'interaction climat urbain et bâtiment

Le développement non contrôlé des villes, a mené à l'apparition de phénomènes microclimatiques particuliers dont d'îlot de chaleur urbain qui en est le plus représentatif. Ces conditions entraînent l'augmentation des besoins de climatisation en été, alors que les problématiques environnementales actuelles nécessitent de réduire nos consommations énergétiques. Il est donc nécessaire d'organiser convenablement l'aménagement des villes et la construction des bâtiments en prenant en compte l'interaction du climat urbain avec les bâtiments afin de contribuer au développement durable de nos sociétés.

Après avoir introduit les enjeux associés au développement de la connaissance sur l'interaction entre microclimat urbain et besoins énergétiques des bâtiments, nous présenterons les différents paramètres influant sur cette interaction. L'analyse des différents outils existant pour modéliser l'interaction, permettra de nous positionner et de préciser les objectifs de cette étude.

I.1 Contexte et enjeu

I.1.1 Le bâtiment

Au niveau national et international, les problématiques environnementales, telles que le réchauffement climatique et l'épuisement des ressources d'énergies fossiles ont mené les différents états à se concerter afin de mettre en œuvre des solutions permettant un développement durable de nos sociétés. En 1997, lors du protocole de Kyoto, les pays industrialisés se sont engagé à réduire de 5,2% les émissions de gaz à effet de serre par rapport à leur niveau de 1990 et ceci pour la période 2008-2012. En France, il s'en est suivi la mise en place du plan Climat 2004 puis les lois Grenelle, issus du Grenelle de l'Environnement, qui préconisent une division par 4 des émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050. Cette mesure se traduit par l'amélioration de l'efficacité des modes de production, en produisant autant de richesse qu'actuellement mais en utilisant moins de matières premières et d'énergie. Au niveau européen, en 2008, les différents états ont adopté le plan Climat consistant à augmenter d'ici 2020 l'efficacité énergétique de 20%, à réduire de 20% les gaz à effet de serre, et à augmenter la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique totale de 20%.

En France, le secteur du bâtiment consomme en moyenne 250kWh/m²/an pour le chauffage, la production d'eau chaude, l'éclairage, ou encore la climatisation. C'est donc le plus gros consommateur d'énergie parmi tous les secteurs économiques, avec 70 millions de tonnes d'équivalent pétrole (Commissariat général au développement durable, 2012a) soit 43 % de l'énergie finale totale. En 2007, 66 % de l'énergie consommée par le secteur résidentiel-tertiaire est consacrée au chauffage (46 Mtep), 14 % à l'eau chaude sanitaire et la cuisson et 20% à l'électricité spécifique (éclairage, climatisation...)¹. En France, l'accroissement du parc des bâtiments (entre 300 000 et 400 000 logements neufs par an d'ici 2030 (Commissariat général au développement durable, 2012b)), l'augmentation des exigences de confort, l'augmentation des surfaces moyennes occupées et la diffusion de nouveaux besoins à forte consommation électrique (électroménager, climatisation, multimédia...) ont mené à une augmentation de 30% des consommations énergétiques dans les logements et les bureaux ces 30 dernières années. La consommation unitaire moyenne d'électricité spécifique a ainsi plus que doublé depuis 1973, passant de 14 kWh/m² à 29 kWh/m² en 2005. Cette énergie consommée entraîne l'émission de 120 millions de tonnes de CO₂ représentant 25 % des émissions nationales.

Le bâtiment est donc un acteur clef pour résoudre les problématiques environnementales. Pour

¹ <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr>

parvenir à respecter les engagements de la France il est nécessaire de parvenir à une consommation moyenne d'énergie primaire de l'ordre d'une centaine de kWh/m² en 2050 pour l'ensemble des bâtiments en service, dont environ 50 kWh/m² d'énergie primaire pour les usages de chauffage de locaux et de l'eau chaude sanitaire. Suite aux réflexions menées par le Grenelle Environnement, les exigences de la réglementation thermique ont été renforcées pour que l'ensemble des bâtiments neufs construits à partir de 2020 soit des bâtiments à énergie positive, produisant sur l'année plus que ce qu'il consomme, (Figure 1) (Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement, 2011). Ce dernier objectif nécessite le développement de l'utilisation des sources d'énergies alternatives et renouvelables dans le bâtiment.

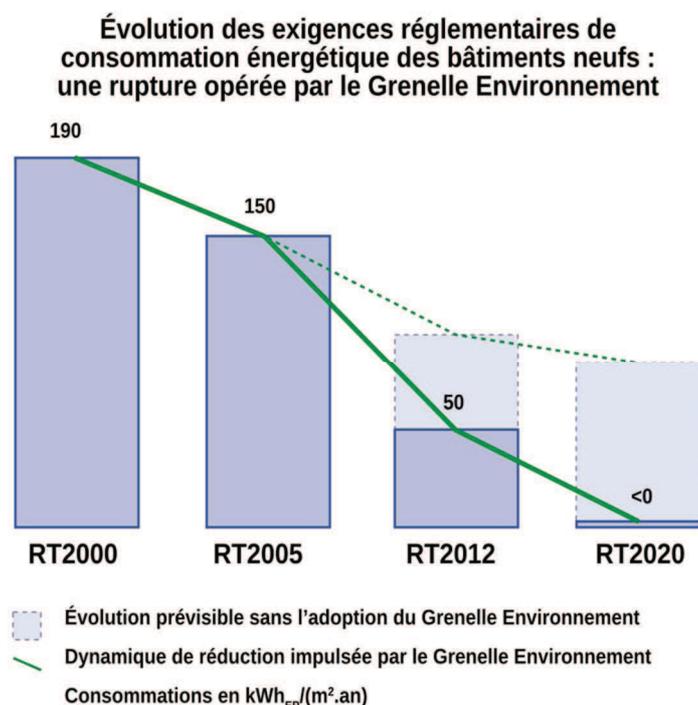


Figure 1: Influence du Grenelle Environnement sur les exigences de la Réglementation Thermique (Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement 2011)

Depuis le premier choc pétrolier de nombreux efforts en matière de maîtrise et de gestion de l'énergie dans le cadre bâti ont été réalisés pour réduire les besoins en chauffage ou climatisation. Le choix des systèmes de traitement d'ambiance ainsi que les matériaux constituant l'enveloppe a alors une importance majeure pour constituer des bâtiments peu énergivore et confortable à vivre. La prédiction numérique du comportement thermique des bâtiments a été développée pour pouvoir comparer différentes variantes de ces choix et pour déterminer lesquelles sont les plus pertinentes. Cette recherche a permis l'élaboration de nombreux outils d'aide à la décision pour pouvoir aider les différents acteurs de la construction à réaliser des bâtiments sains et peu

énergivore. Pour répondre aux objectifs ambitieux des politiques énergétiques françaises et européennes en termes de consommation énergétique et de systèmes énergétiques utilisés, il est nécessaire d'améliorer la précision des modèles utilisés dans ces outils. De plus, la généralisation des bâtiments à très faible consommation énergétique implique une plus grande sensibilité des résultats aux conditions limites. Traditionnellement des données standards issues de la station météorologique la plus proche sont utilisées pour représenter l'environnement extérieur afin de calculer les besoins énergétiques des bâtiments. Ces données fournissent pour une année complète et pour un pas de temps donné, le plus souvent horaire, des données de température d'air extérieur, d'ensoleillement, de rayonnement de grande longueur d'onde, de vitesse et d'orientation du vent et d'humidité (Bertolo et Bourges, 2002). En fonction du contexte dans lequel est construit le bâtiment, les données utilisées pour la simulation thermique du bâtiment peuvent être fortement différentes des conditions microclimatiques locales. Une description de plus en plus détaillée des phénomènes intérieurs et extérieurs au bâtiment est alors nécessaire et plus particulièrement dans le cas des milieux urbains où le milieu influence considérablement les conditions climatiques.

I.1.2 La ville

Depuis 2007, plus de la moitié de la population mondiale vit en ville, cette proportion atteignant 80% dans les pays développés. D'ici 2030, 60% de la population mondiale sera urbaine (Kamal-Chaoui et Robert, 2009). Les zones urbaines concentrent la grande majorité du capital (logements, infrastructures de transport) et des activités économiques, ce qui a amené la plupart de la population à s'en rapprocher, d'où un développement toujours plus important de ces zones. Une urbanisation de l'espace non contrôlée des villes peut mener à un étalement urbain excessif, réduisant alors la préservation des espaces naturels et agricoles. La densification des villes apparaît comme une solution pour réduire la dégradation des espaces naturels due au développement des villes. Cette densification est présentée comme permettant de limiter le coût des infrastructures, réduire les consommations énergétiques dues au transport et au chauffage ainsi que favoriser la mixité sociale (Calvet, 2010; Traisnel, 2001). Si la ville dense a un certain avantage, elle peut également être associée à une réduction de la qualité de la vie (pollution, bruit...) et donc être mal perçue par les citoyens (Marry, 2008; SOFRES, 2007). S'il est nécessaire de densifier les villes afin de préserver les ressources naturelles, il faut aussi veiller à rendre ces espaces attractifs et agréables pour ses occupants.

Les villes ont des microclimats particuliers se traduisant notamment par une élévation des températures par rapport aux zones rurales. Ce phénomène rend particulièrement sensibles les

villes aux phénomènes de canicule. Ainsi, lors de la canicule de 2003, la vague de chaleur qui a touché l'Europe a provoqué plus de 70 000 morts, dont la plupart en milieu urbain. Avec le réchauffement climatique les vagues de chaleur risquent d'être de plus en plus nombreuses et intenses. C'est donc en ville que la manifestation du changement climatique devrait être la plus dure à supporter. Afin d'anticiper ces phénomènes, il est nécessaire d'organiser le développement et l'aménagement des villes pour les rendre agréables à vivre malgré le changement climatique.

Le gouvernement français a lancé en octobre 2008 le plan d'action ville durable visant à favoriser l'émergence d'une nouvelle façon de concevoir, construire et gérer la ville. Le lancement du concours EcoQuartier, le projet des Ecocités, l'appel à projets transports collectifs et le plan nature en ville étant les principales initiatives de ce plan. Le concours EcoQuartier vise à travailler à l'échelle du quartier. Cette échelle est alors présentée comme la bonne échelle pour réinventer la ville, permettant de structurer les filières et d'organiser la concertation. Le bâtiment n'est plus alors considéré comme isolé mais comme faisant partie d'un ensemble. Il est alors nécessaire de prendre en compte les différentes interactions présentes dans le quartier pour pouvoir analyser les solutions permettant de rendre les performances du quartier plus durables. Cette approche a été utilisée lors de la construction du village solaire à Lykovrissi en Grèce. L'agencement et la forme des bâtiments ont été étudiés afin de favoriser l'utilisation de l'énergie solaire passive.

Le développement de la connaissance sur l'interaction climat-énergie à l'échelle d'un groupe de bâtiment contribue à maîtriser et à améliorer les consommations énergétiques ou le confort des habitants d'un quartier. La modélisation des différents phénomènes physiques mise en jeu peut permettre de tester différentes hypothèses d'aménagement urbain, contribuant à la prise en compte de l'environnement dans la politique d'aménagement urbain. Lors de la création d'un nouveau quartier d'affaire à Tel Aviv, la simulation de l'ensoleillement et des écoulements aérauliques a été utilisée d'une part pour déterminer les conditions de confort dans le nouveau quartier, mais aussi afin de vérifier que les droits d'ensoleillement soient maintenus et que les vents permettent une bonne ventilation pour les bâtiments existants (Capeluto et al., 2003). Lors de la réhabilitation d'un quartier de Sheffield en Angleterre, les microclimats induits par différentes solutions d'aménagement ont été modélisés pour déterminer lesquelles permettent d'accéder aux températures extérieures les plus agréables en période estivale (Pattacini, 2012). En élargissant l'échelle de modélisation au delà de celle du bâtiment, il n'est plus traité comme un système isolé mais comme faisant partie d'un tout, permettant ainsi l'étude de l'interaction entre le bâtiment et son environnement. Il est alors possible de travailler à l'échelle du quartier pour étudier non seulement l'interaction d'un bâtiment avec son environnement, mais aussi étudier le

quartier dans son ensemble. Les impacts de différentes solutions techniques, architecturales ou d'aménagement urbain peuvent être étudiés sur un ensemble de bâtiments pour mutualiser les moyens et augmenter l'efficacité des performances énergétiques globales du quartier et individuelle des bâtiments.

Nous avons vu dans cette section l'utilité du développement de la connaissance des phénomènes physiques dans le bâtiment et au niveau d'un quartier. La recherche dans ce domaine doit mener à développer des outils d'aide à la conception pour les différents acteurs de la construction et de l'organisation de la ville. Nous proposons de présenter dans la section suivante les différents phénomènes présents en milieu urbain et influençant les performances énergétiques des bâtiments.

I.2 Impact du milieu urbain sur les besoins énergétiques des bâtiments

Le milieu urbain est un milieu complexe. Nous décrivons dans cette section les différents paramètres ayant une influence sur les besoins énergétiques des bâtiments : l'îlot de chaleur urbain, les matériaux, la morphologie et la végétation.

I.2.1 L'effet d'îlot de chaleur urbain

Le microclimat urbain se caractérise principalement par une différence de température entre les zones urbaines, généralement plus denses, et les zones rurales ou suburbaines. La répartition spatiale des températures forme le plus souvent une zone concentrique centrée sur un pic de chaleur au cœur de l'agglomération (Figure 2). Ce phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) est caractérisé par la différence maximale de température entre la ville et les campagnes avoisinantes (Oke 1987).

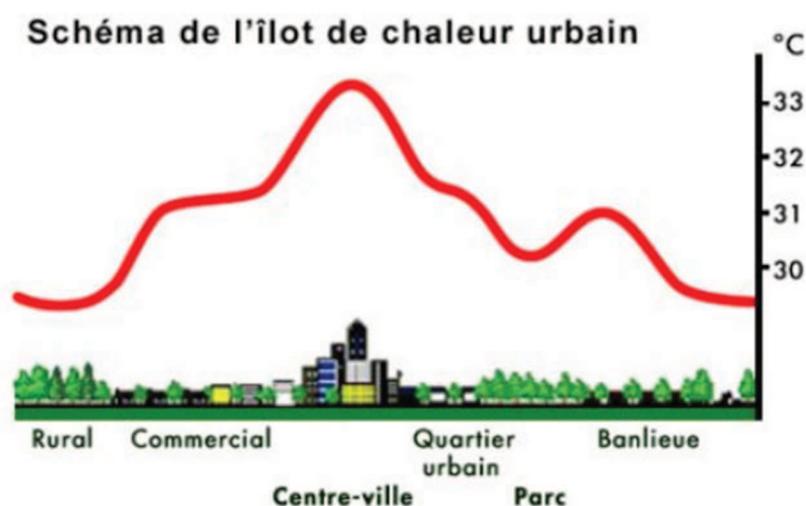


Figure 2: Représentation du phénomène d'îlot de chaleur urbain

L'effet d'îlot de chaleur urbain, qui se caractérise par une augmentation des températures du centre-ville par rapport à celles de la banlieue, est le phénomène le plus caractéristique du microclimat urbain. Oke évoque différents facteurs responsables de cet effet (Oke, 1987) :

- absorption accrue du rayonnement de courte longueur d'onde due à la géométrie et à l'effet combiné de la surface et des inter-réflexions,
- augmentation du rayonnement de grande longueur d'onde de la voûte céleste due à la pollution atmosphérique,
- pertes réduites par rayonnement de grande longueur d'onde dues au faible degré d'ouverture vers la voûte céleste,
- sources de chaleur anthropiques,
- augmentation du stockage de chaleur due à la forte inertie des matériaux constituant le milieu urbain,
- diminution de l'évapotranspiration due à la faible végétalisation des surfaces urbaines,
- diminution des transferts thermiques par convection induite par les faibles vitesses d'air.

L'intensité de l'îlot de chaleur urbain est fortement liée à l'urbanisation des territoires. En comparant avec des mesures sur plusieurs villes américaines datant d'avant 1940, Akbari (Akbari et al., 2001) explique que l'augmentation de la différence de température entre ville et campagne, pouvant atteindre plus de 2°C pour Los Angeles, est due à l'accroissement des zones urbaines. L'ICU semble être intensifié par la taille et la morphologie des villes. Oke (Oke 1987) a établi une relation entre l'intensité de l'ICU et le rapport d'aspect des rues d'une ville, à savoir le rapport entre la hauteur moyenne et la largeur moyenne des rues, qu'il étudie pour plusieurs villes américaines et européennes. En plus d'avoir une variabilité spatiale, l'ICU peut aussi fortement varier dans le temps. Au cours d'une journée, l'ICU atteint son maximum généralement 3 à 5 heures après la tombée de la nuit. Il est plus développé pendant la saison la plus chaude de l'année (Arnfield, 2003).

En modifiant les températures en milieu urbain, l'ICU a une influence majeure sur les consommations énergétiques des bâtiments. Santamouris a effectué des mesures de température et d'humidité dans différents quartiers d'Athènes en Août 1996 afin de calculer les besoins en climatisation des bâtiments selon le quartier de la ville (Santamouris et al., 2001). Il a ainsi montré que les besoins énergétiques des bâtiments peuvent être doublés pour les zones du centre de la

ville (Figure 3), d'où l'importance des données météorologiques utilisées dans la simulation thermique des bâtiments.



Figure 3 : Valeurs des besoins en climatisation de la ville d'Athènes pour le mois d'août 1996 en kWh/m² (Santamouris et al., 2001)

I.2.2 Impact des matériaux

Les matériaux constituant les revêtements des sols et des façades ont une grande influence sur le microclimat urbain. Les milieux urbains ayant une forte composante minérale ont tendance à absorber une grande partie du rayonnement solaire pour stocker cette énergie et la réémettre plus tard. Ceci explique le fait que l'ICU est plus intense la nuit, lorsque les surfaces minérales de la ville réémettent la chaleur stockée durant la nuit, alors que le milieu rural, principalement végétal stocke moins de chaleur.

En travaillant sur les propriétés thermiques et radiatives des matériaux utilisés en ville, il est possible de réduire cet effet. Les revêtements de couleur claire sont utilisés depuis longtemps pour réduire l'intensité des températures estivales en milieu méditerranéen. La forte réflectivité solaire de ces matériaux et la forte émissivité dans le domaine infrarouge réduit le stockage de chaleur par les surfaces minérales. A l'échelle d'un fragment urbain, l'albédo représente la réflectivité moyenne d'un ensemble de surfaces hétérogènes ou non planes. Différentes valeurs de l'albédo ont été mesurées pour caractériser différents types de ville. Pour les villes américaines et européennes l'albédo est compris entre 0,15 et 0,30, alors que pour les villes nord africaines, il est compris entre 0,45 et 0,60. Une ville ayant un albédo plus élevé absorbe une plus faible

quantité d'énergie solaire et a donc tendance à réduire l'effet d'ICU. L'utilisation de simulations climatiques par Taha a montré que la température de l'air l'après-midi en été peut être abaissée de plus de 4°C en augmentant l'albédo de 0,25 à 0,40 pour les latitudes typiques moyennes des climats chauds (Taha, 1997) .

Une étude expérimentale a été réalisée sur 93 matériaux couramment utilisés pour les revêtements urbains des sols et des façades (plaques de marbre, mosaïques et pierres) (Doulos et al., 2004). Des mesures de température par thermographie infrarouge ont été réalisées sur des échantillons exposés à l'ensoleillement. Des différences de température pouvant atteindre 25°C entre différents matériaux ont pu être relevées (Figure 4).

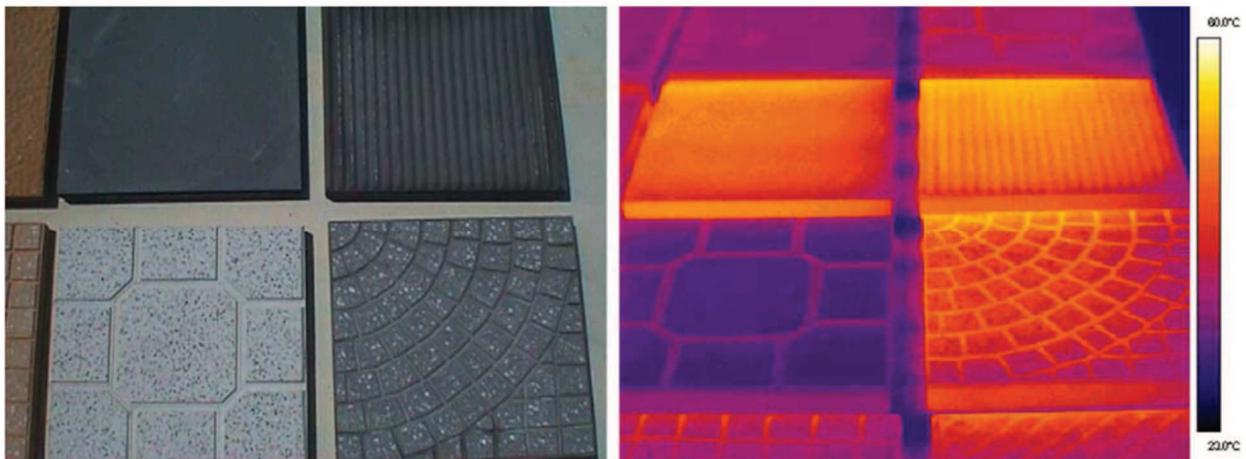


Figure 4: Thermographie infrarouge des revêtements utilisés dans l'étude de (Doulos et al., 2004)

Cette étude avait pour but de comparer les différents matériaux du point de vue de la couleur, de la rugosité et des dimensions. Pour les matériaux clairs, ils relèvent que l'écart maximal entre la température d'air et la température de surface est de 6,9°C tandis que pour les matériaux foncés cet écart varie entre 10,2°C et 15,5°C. Les surfaces rugueuses et sombres absorbent plus de rayonnement solaire que les surfaces lisses, planes et claires et atteignent donc une température plus élevée. La texture joue également sur la température de surface : les surfaces lisses et planes sont moins chaudes que celles qui sont rugueuses et courbées. Par contre, la taille de la surface et son épaisseur ne semblent pas induire de différences significatives pendant la journée. Les matériaux hétérogènes ont une distribution de la température non uniforme du fait de l'hétérogénéité de la couleur et de la rugosité.

En utilisant les matériaux appropriés, il est donc possible de réduire la température d'air et de surface. Ceci a un impact direct sur les consommations énergétiques des bâtiments. En disposant de la peinture à fort albédo (à savoir de l'ordre de 0,9) sur les toits d'une maison équipée de capteurs

de température, Akbary a cherché à calculer la réduction des besoins en climatisation induite par ce dispositif (Akbari et al., 1997 a). Les auteurs ont estimé que l'application des peintures permet une réduction d'environ 23% des besoins en climatisation.

I.2.3 Impact de la morphologie urbaine

En ville, la morphologie urbaine est un facteur pouvant impacter le microclimat urbain en créant des obstacles au vent et en modifiant fortement la distribution du rayonnement solaire. D'une part, la densité de construction occasionne souvent des phénomènes d'ombrage réduisant l'accès à la ressource solaire. D'autre part, dans les rues, le flux solaire subit plusieurs réflexions avant d'être redirigé vers le ciel (Figure 5).

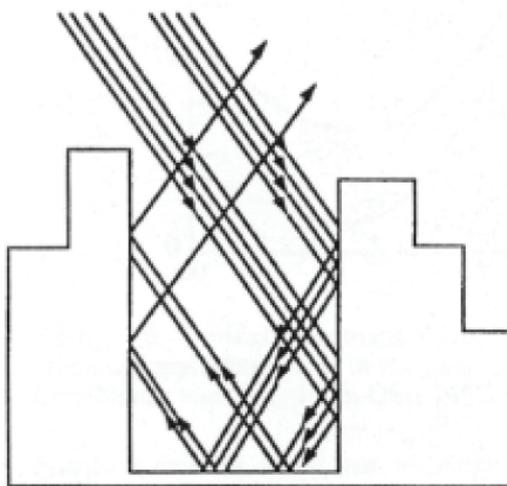


Figure 5 : Phénomène de piégeage radiatif d'après Estournel (Ringebach, 2004)

Le milieu urbain étant surtout composé de matériaux à forte inertie (béton...), une grande quantité de rayonnement solaire est stockée puis réémise sous forme de rayonnement de grande longueur d'onde. Ce phénomène appelé « piégeage radiatif » a pour effet d'augmenter la température des surfaces ainsi que la température de l'air au niveau de la rue. De plus, les bâtiments forment des obstacles à l'écoulement du vent empêchant le renouvellement d'air frais au niveau de la rue et favorisant le phénomène de surchauffe. L'intensité de ce phénomène est fortement liée à la géométrie de la rue, celle-ci peut être caractérisée par le rapport W/H , où H représente la hauteur des bâtiments et W la largeur de la rue.

Johansson a mesuré les températures d'air dans deux types de rue dans la ville de Fez au Maroc. Il s'agissait d'une rue étroite dans la vieille ville (W/H égal à 0,1) et d'une rue plus large dans la nouvelle ville (W/H égal à 1,6). En été, les températures dans les rues dans la vieille ville ne dépassent pas 32°C, alors que dans les rues plus larges les températures peuvent atteindre 41°C (Johansson, 2006). Ainsi, les rues traditionnelles, très étroites, réduisent la pénétration du

rayonnement solaire dans la rue évitant de surchauffer les parois.

I.2.4 Impact des apports anthropiques

La forte activité humaine présente en milieu urbain entraîne des rejets de chaleur qui ont tendance à réchauffer le microclimat urbain. Cette production de chaleurs anthropiques est un phénomène complexe lié à la taille et à la densité des bâtiments, au nombre d'habitants de la ville, à ses fonctions et à son industrialisation. Alors qu'en hiver, ces apports anthropiques ont un impact positif en réduisant les charges énergétiques des bâtiments, en été leur impact devient au contraire fortement négatif. L'utilisation de systèmes de climatisation pour maintenir l'intérieur des bâtiments à une température de confort acceptable entraîne des rejets de chaleur qui vont avoir tendance à réchauffer le microclimat local, ce qui a pour effet à son tour d'augmenter les puissances de climatisation et les rejets de chaleur associés. On voit alors un phénomène de rétroaction entre microclimat urbain et demande énergétique des bâtiments. Des études effectuées sur la ville de Paris ont montré que si la puissance de climatisation installée était doublée, l'îlot de chaleur urbain nocturne passerait de +0,75°C à +1,75°C (De Munck et al., 2010).

I.2.5 Impact des végétaux

La présence de végétation modifie la distribution du rayonnement solaire, la température et l'humidité de l'air. En absorbant une grande quantité du rayonnement solaire incident, les feuilles utilisent cette énergie d'une part pour produire de la chlorophylle par une réaction chimique de photosynthèse, mais aussi pour évaporer l'eau des feuilles exposées au soleil. Ce processus d'évaporation permet alors de refroidir les feuilles et l'air qui est en contact avec elles, afin de maintenir les températures de surfaces des feuilles à celle de l'air ambiant. Des mesures thermiques par imagerie infrarouge ont confirmé que les températures de surfaces des feuilles sont équivalente à la température d'air sous abri pour des conditions de rayonnement solaire très différentes (Hoyano, 1988). Ainsi sur une pergola, la différence de température de surface des feuilles situées à l'ombre ou au soleil est de l'ordre de 1°C pour un rayonnement solaire de 465 W/m², et de l'ordre de 2°C pour un rayonnement de 930 W/m² (Vinet, 2000). De la même manière les températures de surfaces des pelouses tendent à s'équilibrer avec celle de l'air (De La Torre et Serra, 1998)

D'autre part, la végétation agit comme un masque solaire permettant de réduire les températures de surface des zones ombragées. Ainsi, en ville lors de la saison chaude, par accumulation de ces deux effets, la végétation peut apparaître comme un régulateur du microclimat urbain (Musy,

2009). L'utilisation des espèces végétales à feuilles caduques pour l'aménagement des espaces urbains permet d'optimiser cette fonction de thermorégulation. En saison chaude, les masques solaires créés par la végétation permettent de réduire les températures, alors qu'en hiver, le rayonnement solaire est peu réduit, favorisant ainsi l'accès au rayonnement solaire.

En milieu urbain, l'organisation des espaces verts influence leur effet rafraîchissant. Les parcs urbains produisent des oasis de fraîcheur où la température peut être de 6°C inférieure aux zones voisines construites. La morphologie du parc a elle aussi un impact sur l'effet rafraîchissant, plus la taille et le nombre des arbres est important ou plus l'indice de surface foliaire moyen du parc est élevé, plus l'effet rafraîchissant est intense (Potchter et al., 2006; Yu et Hien, 2006). Les espaces végétalisés plus petits (plantations d'arbres dans les rues ou sur une place) permettent aussi de réduire les températures par rapport à des surfaces entièrement minérales grâce à l'ombre apportée (Musy, 2009).

En adaptant la végétation à l'effet recherché, en réduisant les températures d'air et en créant des masques solaires, l'implantation d'espaces végétalisés en ville permet de réduire les besoins de climatisation. En disposant des arbres autour de maisons équipées de capteurs de température, Akbary a déterminé expérimentalement les réductions des besoins en climatisation induites par les végétaux (Akbari et al., 1997 b). Les auteurs estiment ainsi que les arbres ont permis de réduire les besoins énergétiques d'environ 45%.

I.3 Les outils de simulation des besoins énergétiques des bâtiments

L'étude des performances énergétiques des bâtiments peut se faire efficacement grâce à la modélisation des besoins énergétiques. La définition des données climatiques de ces espaces habités, à savoir, les températures et l'ensoleillement, est alors essentielle. Le milieu urbain est à l'origine du processus thermique qui modifie localement le climat au sein de la ville, d'un quartier ou d'une rue. Ces phénomènes physiques complexes interviennent à différentes échelles (Figure 6) et leur influence doit alors être analysée si l'on souhaite définir des données climatiques pour la modélisation des besoins énergétiques des bâtiments. L'échelle méso (Figure 6, a) permet l'étude de l'impact d'une ville sur le climat local en analysant l'interaction entre la couche limite atmosphérique (CLA) et la couche limite urbaine (CLU). Pour définir comment le microclimat varie d'un bâtiment à un autre, ou d'une rue à une autre, le domaine d'étude est l'échelle micro, et plus particulièrement la couche de canopée urbaine (Figure 6, c).

décrits comme un assemblage de différents composants, les volumes d'air entourés de parois. Dans chaque sous-volume, sont définis des usages avec des scénarii d'occupation ou d'utilisation de systèmes de traitement d'ambiance. Le couplage de bilans thermiques volumiques réalisés sur les volumes d'air et des bilans surfaciques par conduction, convection et rayonnement réalisés sur les parois permettent de modéliser le comportement thermique et dynamique du bâtiment. Selon les phénomènes modélisés, la discrétisation des zones thermiques dans le bâtiment sur lesquelles sont appliqués les bilans de masse et d'énergie différent.

L'approche la plus simple, dite méthode monozone (Figure 7), consiste à représenter le bâtiment comme un volume d'air dont les propriétés physiques sont considérées comme homogènes. La part aéraulique se résume alors au calcul des infiltrations et à la prise en compte des débits d'air pour la ventilation. Cette approche est notamment utilisée dans les calculs réglementaires. Pour améliorer la description du comportement thermique du bâtiment, l'approche multizone consiste à distinguer différents sous volumes en fonction de leur utilisation correspondant généralement aux différentes pièces ou à des regroupements de pièces similaires. Ils sont apparus suite à la constatation de l'influence non négligeable des échanges aérauliques sur le comportement thermique des bâtiments. Cette dernière approche est utilisée dans la plupart des logiciels de simulation thermique dynamique du bâtiment tels que TRNSYS (Klein and et al., 2010), CODYBA (Roux, 1984), COMFIE (Peuportier et Sommereux, 1990) ou DOE-2 (Birdsall et al., 1990). Les modèles de simulation thermique dynamique des bâtiments permettent de prendre en compte l'inertie du bâtiment et d'étudier son comportement sous l'effet des différentes sollicitations extérieures (température, ensoleillement ...) et intérieures (charges internes, systèmes de chauffage ou de climatisation). Ils peuvent être utilisés pour comparer l'impact de différentes solutions architecturales et techniques sur les consommations énergétiques ou le confort des occupants d'un bâtiment sur une période annuelle.

Une discrétisation plus élevée est utilisée dans les modèles zonaux. Pour cette méthode le volume de chaque pièce du bâtiment est décomposé en sous volumes, (Figure 7), pour y appliquer des bilans de masse et d'énergie basés sur des lois empiriques. Cette approche permet alors de modéliser la stratification thermique ou la répartition de polluants dans une pièce. Cette méthode nécessitant un maillage plus fin, elle est surtout utilisée sur un nombre restreint de pièces et sur une période plus réduite pour modéliser les performances des systèmes de chauffage ou de climatisation et leur impact sur le confort des occupants.

Pour avoir une description toujours plus détaillée des phénomènes aérauliques dans le bâtiment, le maillage peut être encore plus raffiné pour pouvoir utiliser les techniques numériques de la

mécanique des fluides, (Figure 7). Ainsi, en résolvant les équations de Navier Stokes, il est possible de décrire avec précision les champs de température, de turbulence ou de vitesse. Cependant, les ressources de calcul nécessaires pour cette méthode dépassent en pratique les capacités des machines les plus courantes et est donc souvent utilisées pour des espaces restreints plutôt que l'ensemble du bâtiment, et pour des périodes de simulation réduites à savoir d'une journée à une semaine.

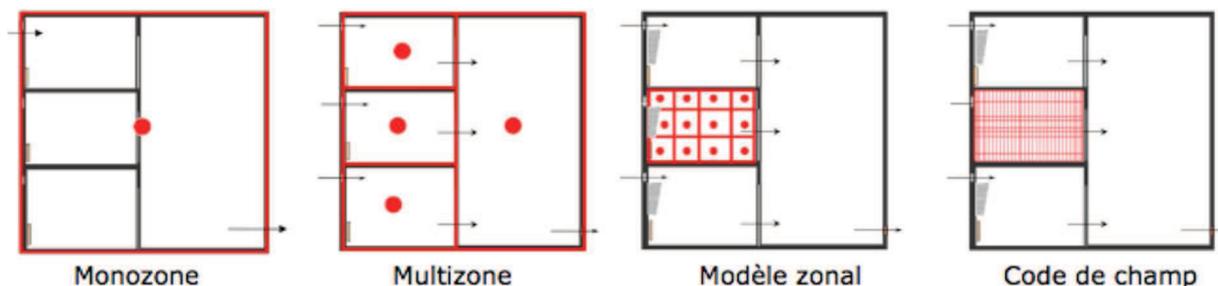


Figure 7: Représentation des différentes approches de modélisation thermique et aéraulique dans le bâtiment (Musy et al., 2011)

I.3.2 Outils à micro-échelle climatique

I.3.2.1 Outils thermoradiatifs

La modélisation des températures de surface en milieu urbain est essentiel pour calculer d'une part les besoins énergétiques des bâtiments et d'autre part les températures d'air extérieur. Les éclairissements solaire et de grande longueurs d'onde joue un rôle prépondérant dans le bilan thermique de surface. Différents modèles ont été développés pour modéliser la répartition du rayonnement solaire et les températures de surfaces en milieu urbain.

L'association de modèle de ciel et de la méthode des radiosités permet de calculer l'éclairement solaire en milieu urbain (Chapitre 2). En représentant une scène urbaine comme un ensemble de facettes triangulaires planes, l'outil SOLENE utilise ces modèles pour calculer l'éclairement solaire reçu par chacune des facettes. Chacune des parois est associée à un modèle thermique de mur permettant le calcul des températures de surface et de l'éclairement de grande longueur d'onde reçu par chaque facette. La discrétisation utilisée permet de représenter une grande diversité de formes urbaines. Il permet ainsi de calculer la répartition du rayonnement à l'intérieur d'un bâtiment (Miguet et Groleau, 2002) ou à l'extérieur à l'échelle d'une rue, d'une place ou d'un ensemble de bâtiments (Groleau et al., 2003). La comparaison entre le modèle et des mesures effectuées dans la ville de Toulouse ont permis de valider ce modèle (Hénon et al., 2011). De plus, Miguet a montré l'utilité d'un tel outil pour créer des indicateurs urbains utilisables pour les

architectes et urbanistes. Il a pu calculer pour chaque façade d'un groupe de bâtiment les gains solaires reçus (Miguet et Groleau, 2007).

Asawa a utilisé un modèle de DAO tridimensionnel pour décrire avec précision la géométrie d'un bâtiment et de son environnement. Le modèle géométrique est alors discrétisé pour réaliser sur chaque élément un bilan thermique en prenant en compte les échanges par conduction, par convection et par rayonnement de courte et grande longueurs d'onde par un modèle de différences finies (Asawa et al., 2008). À l'aide de ce modèle 3D, qui permet de définir la répartition du rayonnement de courte et de grande longueurs d'onde dans l'environnement urbain, He a pu comparer différentes configurations d'environnement urbain.

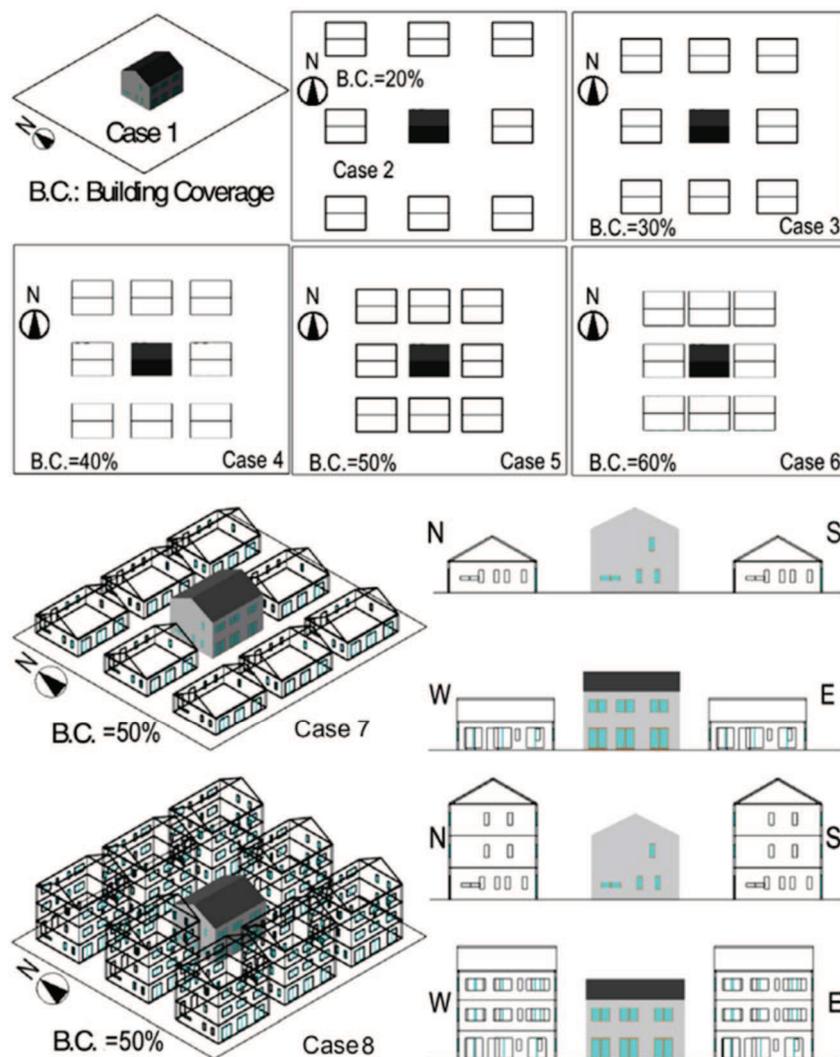


Figure 8 : Description des différents environnements urbains utilisés dans l'étude de He (He et al., 2009).

Il a ainsi étudié sous le climat de Tokyo pour une journée d'été représentative (5 août) l'impact de l'environnement urbain sur les besoins en climatisation du bâtiment pour plusieurs configurations (He et al., 2009) :

- L'ombrage résultant d'une densité de construction de 60% (soit 60% du sol occupé par des bâtiments, cas 6 de la Figure 8) induit une diminution de 29% des besoins de climatisation par rapport à un bâtiment isolé (Cas 1 de la Figure 8),
- Le fait pour un bâtiment d'être entouré de bâtiments moins haut d'un étage (cas 7 de la Figure 8) ou entouré de bâtiments plus hauts (cas 8 de la Figure 8) entraîne respectivement une augmentation de 16% et une diminution de 9% des besoins en climatisation du bâtiment central, par rapport au cas du bâtiment entouré de bâtiments de taille identique.

Toujours à partir de représentations tridimensionnelles du quartier, le modèle CitySim (Robinson, 2009) utilise un modèle thermique dynamique de bâtiment basé sur l'analogie électrique pour calculer les besoins énergétiques des bâtiments à l'échelle d'une ville ou d'un ensemble de bâtiments. Ce modèle simplifié de bâtiment associé à un calcul du rayonnement solaire en milieu urbain permet de comparer rapidement différentes formes urbaines pour optimiser l'impact de l'ensoleillement (Kämpf et al., 2010).

Les modèles numériques de terrain (MNT) permettent d'associer à chaque point du terrain une altitude. Pour une ville ce procédé a été utilisé par Ratti pour créer les maquettes tridimensionnelles de quartiers européens (Ratti et al. 2005). L'ensemble des bâtiments a été représenté par un ensemble de locaux climatisés ou chauffés de 3m de haut sur 3m de large et 6m de long. En utilisant le MNT les masques solaires engendrés par les bâtiments voisins sont définis pour chaque local permettant de calculer l'énergie solaire entrante et étage par étage. En utilisant la méthode LT (valeur Lumineuse et Thermique des vitres) (Baker et Steemers, 1996) pour pouvoir calculer les besoins énergétiques de chacun de ces locaux Ratti a réalisé une cartographie étage par étage des besoins énergétiques de quartiers de Toulouse, Berlin et Londres (Figure 9). Grâce à ce modèle, les auteurs ont pu quantifier l'impact de la structure urbaine sur la répartition de l'ensoleillement, ce qui a abouti au calcul du taux de vitrage optimal nécessaire en fonction de la hauteur ou de l'orientation du bâtiment, pour les locaux donnant sur l'extérieur

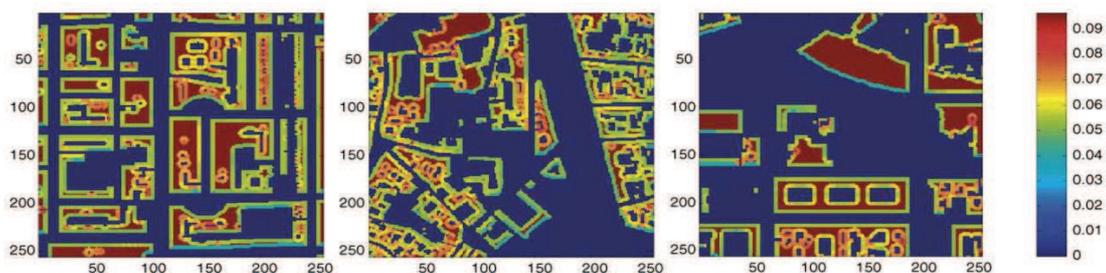


Figure 9 : Consommation d'énergie à Londres, Toulouse, et Berlin au 1er étage (hauteur 6 m); ratio de vitrage de 50% ; valeurs en kWh/m²/an (Ratti et al., 2005)

1.3.2.2 Outils thermoaérauliques

La modélisation du microclimat urbain nécessite le calcul des champs de température et des champs de vitesse de l'air en milieu urbain. Pour l'étude des différents modes de transferts dans un volume d'air, la résolution des équations de la mécanique des fluides est sans doute la technique la plus précise. En résolvant les équations de conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement il est possible de déterminer avec précision les champs de température, de vitesse, d'humidité et de la concentration en espèces chimiques d'un fluide en mouvement.

Dans le cadre de la modélisation du microclimat urbain, cette technique a permis de modéliser avec précision les champs de vitesse (Chen, 2004) et de température (Li et al., 2005) autour d'un ou plusieurs bâtiments. Elle a ainsi permis d'évaluer le confort des piétons en milieu urbain (Chen et al., 2004; Mochida et Lun, 2008), d'étudier l'impact d'espaces végétaux sur la température de l'air en ville (Yu et Hien, 2006) ou l'influence de l'environnement extérieur sur les performances énergétiques des bâtiments (He et al., 2009; Bouyer, 2009).

Par exemple, Envi-met (Bruse, 2006) est un outil tridimensionnel qui a été spécialement conçu pour l'étude du microclimat urbain. Ce modèle non stationnaire et non hydrostatique permet le calcul des flux aérauliques, des transferts de turbulence, flux radiatifs, de température et d'humidité. Une représentation détaillée des structures urbaines complexes est possible grâce à des mailles de l'ordre de 50 cm. Des modèles de végétation ont été développés en incluant les processus physiologiques d'évapotranspiration et de photosynthèse. Le sol est décrit comme un volume constitué de plusieurs couches. Ce modèle permet alors d'analyser à petite échelle l'interaction entre le microclimat urbain et les aménagements urbains. Ce modèle est spécialement conçu pour des calculs de l'ordre de 24 à 48h avec des pas de temps de 10 secondes. Cette haute résolution temporelle et spatiale ne permet donc pas de réaliser des calculs sur une année. Ce modèle a été utilisé pour être couplé avec le logiciel de simulation thermique dynamique EnergyPlus afin de calculer les besoins énergétiques d'un bâtiment situé dans la ville de Guangzhou en Chine sur 3 jours d'été et 3 jours d'hiver (Yang et al., 2012). En comparant les températures d'air extérieur calculées à l'aide du couplage avec celles de référence, Yang a relevé qu'en été les différences pouvaient atteindre près de 3°C pendant la nuit des périodes d'été. Il a ensuite comparé les besoins énergétiques pour un bâtiment isolé, donc sans couplage avec l'environnement, et en considérant l'interaction avec son environnement, pour révéler une différence de l'ordre de 16%. Yu a utilisé Envi-met pour étudier l'influence que pouvait avoir un parc urbain sur son environnement (Yu et Hien, 2006). Il a ainsi montré que la réduction des

températures engendrées par le parc permettait de réduire les charges de climatisation au fur et à mesure que l'on se rapprochait du parc. Ainsi les bâtiments situés à 100 m du parc ont des besoins en climatisation inférieurs de 9% par rapport aux bâtiments situés à 400 m.

En couplant le modèle de répartition du rayonnement solaire en milieu urbain développé dans l'outil SOLENE (Groleau, 2000) à un code CFD pour modéliser le comportement du microclimat urbain, Bouyer (Bouyer, 2009) a pu déterminer avec précision les champs de température et les transferts d'humidité en milieu urbain. Utilisé avec un modèle thermique dynamique de bâtiment basé sur l'analogie électrique, ce procédé permet d'identifier l'impact des aménagements urbains sur la charge thermique des bâtiments. Cette méthode permet de décrire avec précision les phénomènes physiques en jeu mais au prix de temps de calcul très élevés qui rendent difficile la réalisation de simulations annuelles.

L'utilisation des outils CFD est souvent associée à un maillage raffiné, de grandes capacités de mémoire et des calculs complexes. Plusieurs modèles ont été développés en essayant de simplifier les calculs et la représentation géométrique de l'environnement urbain. Une première approche est de rendre la géométrie plus simple, en modélisant ce qui se passe dans une rue canyon. En associant une modélisation de type zonal des écoulements thermoaérauliques, les calculs peuvent être d'avantage simplifiés (Bozonnet, 2005; De la Flor et Domínguez, 2004). Ainsi, à l'aide d'un modèle zonal de l'écoulement de l'air dans une rue canyon Bozonnet (Bozonnet, 2005) a montré dans quelles mesures, les températures de référence de l'air extérieur choisies pour le calcul des consommations énergétiques influencent les résultats. La demande énergétique peut varier de 70%, selon que l'on choisisse la température de référence de la station météorologique, les températures au niveau de la toiture ou la température calculée à l'aide d'une modélisation zonale du volume d'air dans la rue.

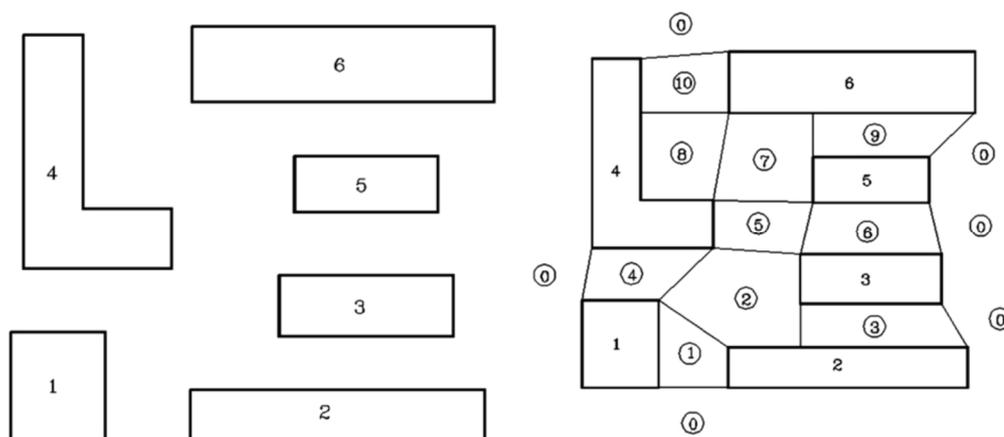


Figure 10 : Discretisation de l'air autour des bâtiments (Yao et al., 2011)

Par ailleurs, Yao (Yao et al., 2011) a pris le parti de définir des zones très grossières entre les bâtiments (Figure 10) pour pouvoir calculer les températures d'air dans chacune d'elles et les températures de surface du sol et des bâtiments. Les températures de surface sont calculées en prenant en compte les échanges par conduction, convection et radiatifs de courte et grande longueurs d'onde. Les températures d'air sont obtenues à l'aide de bilans thermique et massique sur chacune des zones. Une comparaison entre l'application de ce modèle sur le campus universitaire de Chongqing en Chine avec des mesures de températures de surface et d'air in situ a permis de valider cette approche.

I.3.3 Outils à l'échelle climatique locale

Lorsque l'on travaille à méso-échelle, le but est de modéliser les transferts de masse et d'énergie qui ont lieu dans l'atmosphère pour pouvoir définir des champs de vitesse et de température sur une région de plusieurs dizaines de kilomètres carrés. A cette échelle, il n'est pas envisageable à partir d'un modèle atmosphérique de représenter explicitement, à l'échelle d'une ville, l'ensemble des éléments de rugosité de la surface (bâtiment, arbre,...), et de considérer l'ensemble des échelles spatiale et temporelle des structures turbulentes (Dupont, 2009). Des représentations simplifiées des hétérogénéités de surface ont été développées dans les modèles d'écoulement tout en restituant correctement leurs impacts dynamiques et thermodynamiques sur les champs micrométéorologiques.

Des modèles de sols urbains sont utilisés en climatologie urbaine pour déterminer les transferts thermiques et de masse qui ont lieu entre les surfaces urbaines et l'atmosphère (Dupont 2001; Pigeon, 2007). Dans ces modèles, la géométrie du milieu urbain est extrêmement simplifiée. A l'aide d'un bilan thermique surfacique, ces modèles permettent de définir les conditions climatiques réelles présentes en milieu urbain telles que les disparités des températures d'un quartier à un autre, l'augmentation de l'intensité des températures dans les zones proches du centre-ville et les champs de vitesse.

Tous les modèles de sol urbain sont basés sur un principe commun suivant : le rayonnement net est réparti en flux de chaleur sensible et latent. Le bilan d'énergie en régime permanent d'une maille surfacique urbaine en densité surfacique de flux, s'écrit de la manière suivante (Figure 11) :

$$E_r + \varphi_S = \varphi_L + \varphi_{ST} + \varphi_c + \varphi_A \quad [I-1]$$

Où E_r est l'éclairement de courte et de grande longueurs d'onde, φ_{ST} sont les sources de chaleur de la maille dues aux systèmes de transport, de chauffage ou de climatisation. L'énergie est perdu

sous forme sensible φ_s ou latente φ_L . φ_{ST} représente l'énergie stockée dans la maille et φ_A est l'énergie transmise par advection.

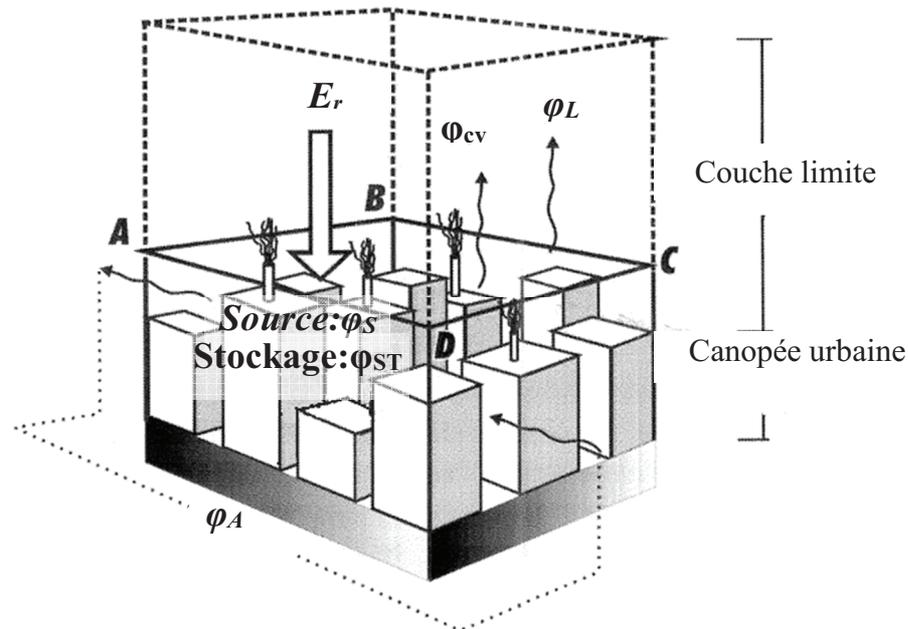


Figure 11 : Modélisation d'un élément de surface urbaine (Oke, 1987)

Les premiers modèles développés furent des modèles empiriques qui ont permis de décrire le comportement énergétique de la canopée urbaine à partir d'une relation statistique conçue à partir d'observations. Par la suite, pour améliorer la description des phénomènes physiques mis en jeu, de nouveaux concepts ont été introduits pour pouvoir prendre en compte la géométrie tridimensionnelle de la canopée urbaine. Les bilans thermiques sont différenciés pour les murs, les toits et les rues, et les échanges radiatifs entre les murs et les rues sont explicitement traités. (Masson, 2006)

Divers modèles de canopée urbaine ont été développés à partir de ce principe. Les différents modèles existants se distinguant notamment par la manière de traiter l'impact du tissu urbain sur les écoulements aérodynamiques de l'atmosphère. Il est possible de traiter deux types de modèle les monocouches et les multicouches.

Les modèles monocouches de Masson (2000) et Kusaka et al. (2001) utilisent une approche rugosité où l'influence intégrale de la canopée est modélisée. Ces modèles ont été pour l'essentiel développés pour fournir les flux de chaleur issus de la canopée au niveau inférieur des modèles atmosphériques méso-échelles. Afin de garder des temps de calcul raisonnables et un nombre réduit de paramètres des modèles, ces modèles monocouches doivent rester le plus simple

possible tout en traitant correctement les processus clés. Ainsi, dans le modèle Town Energy Budget (TEB) de Masson (2000), la canopée urbaine est représentée par un ensemble de rues canyons identiques, infinies, et dont toutes les orientations ont la même probabilité. Chacune de ces rues est composée de trois types de surface (toit, mur et rue), où les transferts de chaleur sont calculés au travers de plusieurs couches de matériaux caractérisant les surfaces. Les flux de chaleur des rues et leurs bilans radiatifs sont obtenus en calculant les bilans séparés des murs et des rues, incluant les réflexions multiples à l'intérieur des rues. La température et l'humidité de l'air sont alors considérées comme homogènes dans la rue canyon. Ainsi, lors du couplage de ce modèle avec un modèle atmosphérique, la base du modèle atmosphérique est située au niveau des toits. À l'aide du modèle TEB (Masson, 2000), Pigeon a calculé les besoins énergétiques d'un quartier de la ville de Toulouse (Pigeon et al., 2007). Il a ensuite pu valider le modèle grâce à la campagne de mesure CAPITOUL. L'intérêt de ce procédé est de pouvoir décrire les conditions climatiques urbaines et notamment la disparité des températures que l'on retrouve avec le phénomène d'îlot de chaleur urbain. Actuellement, le calcul des charges thermiques reste très simplifié, par exemple, il ne prend pas en compte les apports gratuits, comme le rayonnement solaire entrant dans le local ou les charges internes. Les dernières modifications apportées ont pour but de prendre en compte ces phénomènes en décrivant avec plus de précision le modèle énergétique du bâtiment (Bueno et al., 2012). Le modèle de sol urbain SM2U développé à l'École Centrale de Nantes, évalue le flux turbulent, l'humidité et les flux radiatifs à l'interface canopée urbaine et atmosphère (Dupont et Mestayer, 2006).

Les modèles multicouches de Martilli et al. (2002) et Kondo et al. (2005) utilisent une approche de traînée. Dans ces modèles, les premières couches du maillage sont situées à l'intérieur de la canopée et les équations du mouvement, de la température, de l'humidité et de l'énergie cinétique turbulente sont modifiées pour inclure des termes sources ou puits provenant des bâtiments. Ces modèles nécessitent en entrée les flux de chaleur à plusieurs niveaux à l'intérieur de la canopée. Ainsi Salamanca et Martilli (2010) ont pu montrer avec leur modèle qu'en augmentant l'isolation des bâtiments, les consommations énergétiques des bâtiments dues aux besoins en climatisation sont réduits de 7% à 11%.

Kikegawa et al. (2003) ont couplé 3 modèles, à savoir un modèle météorologique régional représentant l'ensemble du Japon, un modèle de canopée urbaine pour calculer les conditions météorologiques au niveau du quartier d'affaire de Tokyo et un modèle thermique de bâtiment (Figure 12). Dans ce modèle, les bâtiments sont représentés comme un ensemble de cubes espacés régulièrement. À l'aide de ce modèle les auteurs ont étudié l'impact des rejets de chaleur

des climatiseurs sur le microclimat urbain et les consommations énergétiques des bâtiments. Ils ont ainsi montré que de ne pas rejeter la chaleur des climatiseurs directement dans l'atmosphère, mais dans le sol ou les eaux usées, permettait de réduire les besoins énergétiques des bâtiments de 6% et la température de l'air dans la canopée de plus de 1°C.

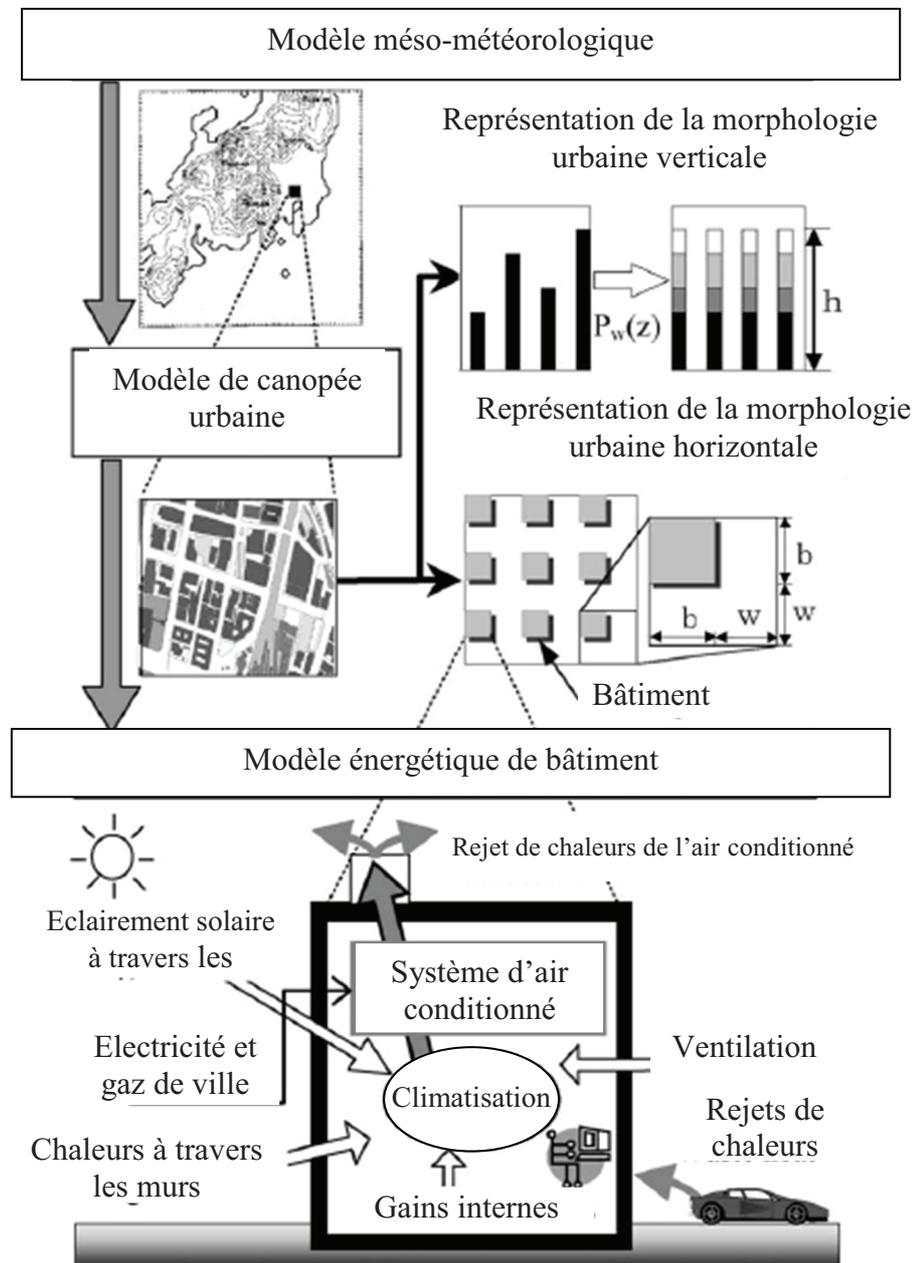


Figure 12: Représentation du couplage des 3 modèles utilisés par Kikegawa pour le calcul des besoins de climatisation d'un quartier de Tokyo (Kikegawa et al., 2003)

I.4 Présentation de la présente étude

I.4.1 Objectif

Alors que les outils de simulation thermique dynamique (STD) du bâtiment permettent d'analyser

l'impact de l'organisation intérieure du bâtiment (agencement des pièces, systèmes de chauffage et de rafraîchissement...) sur les performances énergétiques des bâtiments, un modèle thermique d'un quartier doit permettre de mettre en évidence l'interaction entre le bâtiment et son environnement pour pouvoir analyser l'impact de l'aménagement extérieur sur les performances énergétiques du quartier. Pour cela, Il est nécessaire de décrire et de modéliser les différents flux à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments. L'enjeu est donc d'une part de décrire les ambiances intérieures telles qu'elles sont modélisées traditionnellement dans les codes dynamiques du bâtiment, et d'autre part, de décrire correctement les conditions extérieures telles qu'elles sont modélisées dans les codes de micrométéorologie. À l'échelle d'un quartier, la description détaillée de tous les bâtiments n'est pas adaptée, d'où la nécessité de développer un modèle thermique des bâtiments avec une précision suffisante pour représenter l'interaction du bâtiment avec son environnement et sa demande d'énergie globale tout en intégrant des solutions techniques particulières et les scénarii d'occupation. De plus, pour simplifier d'avantage les calculs afin de pouvoir réaliser des simulations annuelles des besoins énergétiques sur tout un quartier, il est aussi nécessaire de simplifier la modélisation des conditions microclimatiques.

Pour cela, nous chercherons à simplifier le calcul en évitant d'utiliser une description détaillée des géométries et de tous les phénomènes physiques mis en jeu. Les modèles de sol urbain représentent le cadre bâti sous forme simplifiée (rue canyon ou parallélépipèdes) de façon homogène pour un quartier. La comparaison entre les modèles de sol urbain et les mesures effectuées in situ prouvent leur efficacité pour modéliser les besoins énergétiques des bâtiments à l'échelle d'une ville (Pigeon, 2007). Mais l'échelle de modélisation permet seulement d'avoir des valeurs moyennes par quartier. Si l'on cherche à déterminer ce qui se passe à l'intérieur du quartier pour pouvoir comparer différents types d'aménagement du quartier, cette échelle est encore trop large. Les outils plus précis utilisant les outils CFD permettent une description détaillée des géométries et des phénomènes mis en jeu mais au prix de temps de calcul trop grands. Nous cherchons donc à développer un modèle intermédiaire entre une description géométrique fine des bâtiments souvent utilisée dans les outils de CFD, et des modèles géométriques simplifiés tel que ceux utilisés dans les modèles micrométéorologiques locales. Nous chercherons donc à nous rapprocher des modèles thermoaérauliques simplifiés tel que ceux présentés précédemment (Bozonnet et al., 2005; De la Flor et Domínguez, 2004; Yao et al., 2011).

Les modèles développés sont présentés dans la suite de ce travail. Dans une première partie, nous présentons comment modéliser les échanges radiatifs en milieu urbain. Ensuite, nous décrivons

comment modéliser les flux aérauliques en milieu urbain pour pouvoir modéliser les conditions microclimatiques. Enfin, nous expliciterons le modèle thermique de bâtiment utilisé pour être couplé avec la modélisation du microclimat urbain. A chacune de ces étapes, nous présentons d'une part les modèles physiques retenus et, d'autres parts leur représentation géométrique. Ceci permettra de mieux expliciter le couplage des différents modèles entre eux.

I.4.2 Quartier d'étude retenu

Le quartier retenu pour pouvoir appliquer le modèle développé est le quartier Pin Sec à Nantes. Ce quartier situé au nord-est de Nantes, (Figure 13), est composé d'une zone pavillonnaire et d'un groupe d'immeuble d'habitation de type « grand ensemble ».

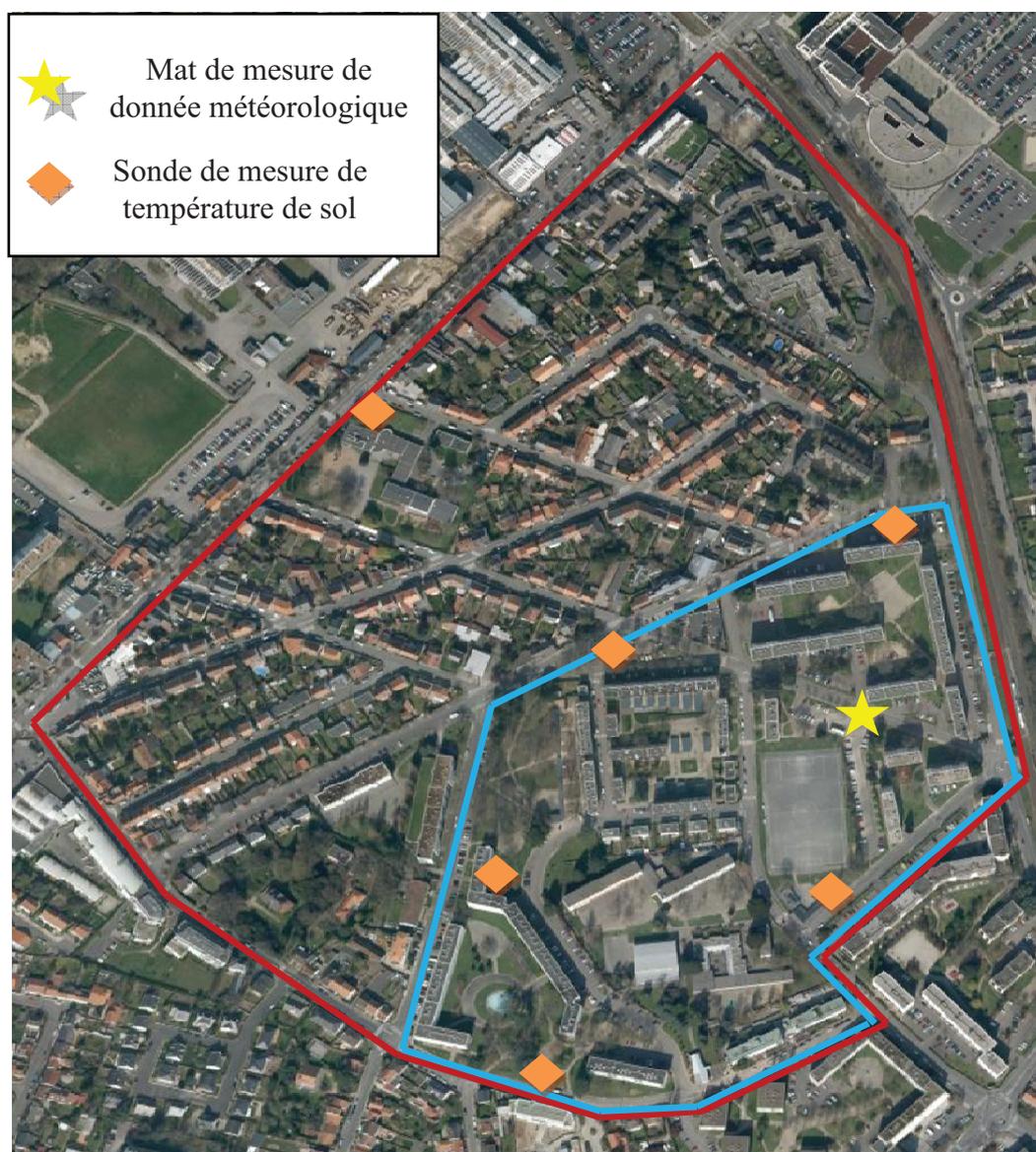


Figure 13: Vue du quartier Pin Sec à Nantes. En rouge limite du quartier, en bleu limite du quartier retenu comme cas d'étude.

Ce quartier a été instrumenté par l'Institut de Recherche en Sciences et Technique de la Ville (IRSTV) pour l'observation permanente d'hydrologie et de climatologie urbaines avec notamment des relevés de températures de sol à plusieurs profondeurs sur plusieurs sites, des températures de l'air, des vitesses de l'air, de rayonnements solaire et infrarouge sur le toit d'un immeuble (Figure 13). De plus, l'atelier de Système d'Information Géographique de l'IRSTV y a développé une importante base de données avec notamment les données géométriques des bâtiments et un référencement du type de végétation. Ces données pourront alors être utilisées pour construire la maquette géométrique de notre modèle. Nous utiliserons la zone réduite présentée en bleue sur la Figure 13 pour notre cas d'étude. Cette zone étant celle possédant les principaux sites de mesures cités précédemment et le maximum d'informations géographiques.

Chapitre II.

Modélisation des échanges radiatifs en milieu urbain

Afin d'optimiser les besoins énergétiques des bâtiments, le rayonnement solaire capté par les parois des bâtiments doit être évalué avec précision afin de favoriser les apports solaires en période de chauffage, ou les réduire pendant la période estivale. En milieu urbain le problème est d'autant plus complexe que la morphologie et les matériaux modifient fortement la répartition du rayonnement solaire. De plus, les échanges radiatifs de courte et grande longueurs d'onde ont un rôle prépondérant dans la formation de l'îlot de chaleur urbain. Pour pouvoir modéliser les besoins énergétiques des bâtiments à l'échelle d'un quartier, il est nécessaire de définir les éclairements de courte et grande longueurs d'onde reçus par chaque surface composant l'environnement urbain afin de réaliser des bilans énergétiques de surface pour calculer les températures de surface. Ainsi, la description des effets d'ombres produits entre les bâtiments et les phénomènes de multi-réflexion dans cette modélisation doit pouvoir mettre en évidence l'influence de l'aménagement urbain sur la charge thermique des bâtiments.

Nous présentons dans ce chapitre les principaux modèles développés dans la littérature permettant d'évaluer les éclairements reçus et échangés par des surfaces en milieu urbain. La première partie décrit les différents modèles de ciel permettant le calcul des éclairements de courte et grande longueurs d'onde reçus par une surface inclinée. Les modèles permettant le calcul de l'accès au rayonnement solaire en milieu urbain sont décrits dans la seconde partie et la troisième partie développe les modèles servant au calcul des multi-réflexions en milieu urbain. Ceci nous permet ensuite de présenter dans la dernière partie la méthode retenue pour notre étude.

II.1 Éclairement de la voûte céleste

II.1.1 Éclairement courte longueur d'onde

Avant que le rayonnement solaire atteigne la surface de la terre, il doit d'abord traverser l'atmosphère. Ce faisant, une partie est absorbée, réfléchiée et diffusée. Le rayonnement solaire issu de la voûte céleste se décompose alors en une partie directe et une partie diffuse. De plus, en arrivant à la surface de la terre une partie du rayonnement est réfléchi. Ainsi, une surface éclairée reçoit un éclairement direct, diffus et réfléchi par l'environnement. L'approche la plus simple qui est couramment utilisée dans les codes de thermique de bâtiment tels que EnergyPlus, TRNSYS ou ESP-r, est de définir l'éclairement total $E_{CLO,T,i}$ reçu par une surface inclinée i à partir de l'éclairement solaire direct $E_{CLO,dr,i}$, diffus $E_{CLO,df,i}$ et réfléchi par le sol et atteignant la surface inclinée $E_{CLO,s,i}$ (Figure 14).

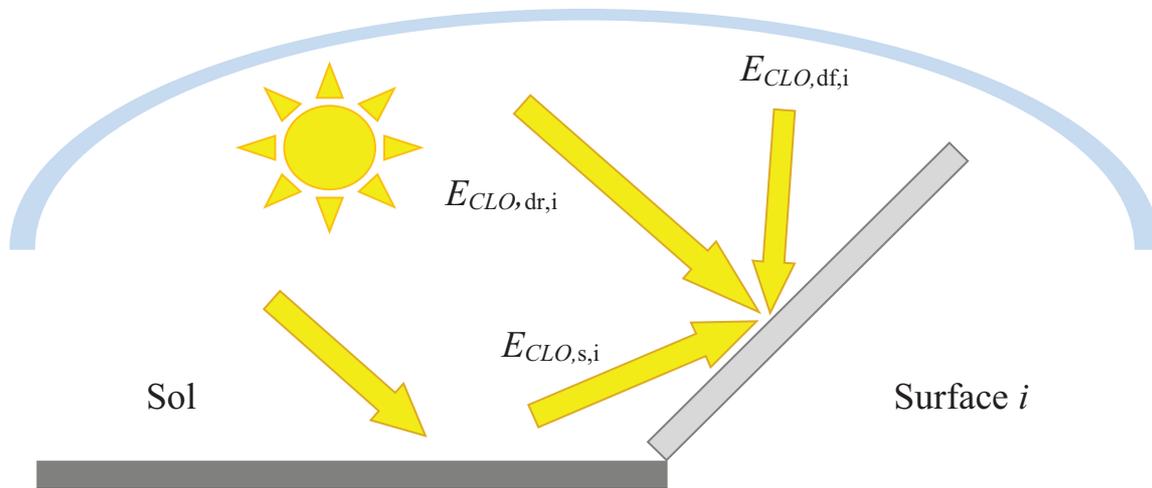


Figure 14: Les différentes composantes du rayonnement solaire reçues par une surface i

Le rayonnement solaire total reçu par une surface inclinée est alors décrit par l'équation [II-1] :

$$E_{CLO,T,i} = E_{CLO,dr,i} + E_{CLO,df,i} + E_{CLO,s,i} \quad [\text{II-1}]$$

L'éclairement solaire direct est calculé à partir de l'équation [II-2] :

$$E_{CLO,dr,i} = E_{CLO,dr,h} \frac{\cos(\xi)}{\cos(\xi_z)} \quad [\text{II-2}]$$

Où :

- $E_{CLO, dr, h}$ est l'éclairement solaire direct reçu par une surface horizontale [W/m²]
- ξ est l'angle d'incidence du rayonnement [rad]
- ξ_z est l'angle zénithal [rad]

La modélisation du rayonnement solaire diffus du ciel est la partie la plus complexe. En effet l'éclairement diffus varie considérablement d'un point à l'autre du ciel. Les différents modèles développés dans la littérature pour calculer ce rayonnement sont présentés dans ce qui suit.

II.1.1.1 *Modèle de ciel isotrope*

Dans ce modèle, l'éclairement solaire total sur une surface inclinée est calculé en assumant que tout l'éclairement diffus est uniformément repartit sur la voûte céleste (Liu et Jordan, 1960). L'éclairement solaire total est alors donné par l'équation [II-3] :

$$E_{CLO, T, i} = E_{CLO, dr, i} + E_{CLO, df, h} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) + E_{CLO, s, h} \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad [\text{II-3}]$$

Ici, $E_{CLO, df, h}$ et $E_{CLO, s, h}$ sont les éclairements diffus et réfléchi par le sol et reçus par une surface horizontale. β est l'angle de la surface inclinée avec l'horizontale.

Badescu (Badescu, 2002) a proposé un modèle de ciel isotrope tridimensionnel prenant en compte les angles azimutal et zénithal dans le calcul du rayonnement diffus et réfléchi pour une surface orientée arbitrairement.

II.1.1.2 *Le modèle de Klucher*

Le modèle de Klucher (1979) prend en compte la zone circumsolaire et la luminosité de l'horizon grâce à un indice de clarté F .

F est donné par l'équation [II-4] :

$$F = 1 - \left(\frac{E_{CLO, df, h}}{E_{CLO, dr, h} + E_{CLO, df, h}} \right)^2 \quad [\text{II-4}]$$

Ceci permet d'augmenter la précision sur la partie diffuse du rayonnement solaire, ainsi l'éclairement solaire total sur une surface inclinée est évalué à l'aide de l'équation [II-5] :

$$E_{CLO,T,i} = E_{CLO,dr,i} \quad [\text{II-5}]$$

$$+ E_{CLO,df,h} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \left[1 + F \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] [1 + F \cos^2 h \sin^3 \xi_Z]$$

$$+ E_{CLO,sh} \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$$

II.1.1.3 Le modèle de Hay

Le modèle de Hay (1980) pondère l'éclairement solaire diffus isotrope pour y inclure l'anisotropie de la zone circumsolaire qui est plus prononcée sous des conditions de ciel clair. L'éclairement solaire total sur une surface inclinée est ainsi donné par l'équation [II-6] :

$$E_{CLO,T,i} = E_{CLO,dr,i} + E_{CLO,df,h} A R_b + E_{CLO,df,h} (1 - A) \left(\frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \quad [\text{II-6}]$$

$$+ E_{CLO,sh} \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right)$$

R_b est le ratio entre l'éclairement solaire direct sur une surface inclinée d'un angle β et l'éclairement direct sur une surface horizontale.

Le coefficient A d'anisotropie dépend du rayonnement solaire direct horizontal $E_{CLO, dr, h}$ et du rayonnement extraterrestre E_o . Cet index déterminant la part du rayonnement solaire diffus horizontal qui est traité comme circumsolaire, est défini par l'équation [II-7] :

$$A = \frac{E_{CLO,df,h}}{E_o} \quad [\text{II-7}]$$

Le modèle de Hay se réduit à un ciel isotrope en absence de rayonnement direct.

II.1.1.4 Le modèle de Reindl

Le modèle de Reindl (1990a, b) améliore le modèle de Hay en considérant trois composantes pour l'éclairement solaire diffus. Les luminances circumsolaire et horizontale sont ajoutées à la composante diffuse isotrope. Pour cela une fonction de pondération f définie par l'équation [II-8] est utilisée :

$$f = \frac{E_{CLO,dr,h}}{E_{CLO,dr,h} + E_{CLO,df,h}} \quad [\text{II-8}]$$

L'éclairement solaire total sur une surface inclinée est alors calculé à l'aide de l'équation [II-9] :

$$\begin{aligned}
 E_{CLO,T,i} = & E_{CLO,dr,h} + E_{CLO,df,h}AR_b \\
 & + E_{CLO,df,h}(1-A) \left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right) \left[1 + f^{\frac{1}{2}} \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right] \\
 & + E_{CLO,s,h} \left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right)
 \end{aligned}
 \tag{II-9}$$

II.1.1.5 Le modèle de Muneer

Le modèle de Muneer (1997) distingue les surfaces à l'ombre et les surfaces ensoleillées, avec des conditions de ciel couvert ou clair pour la surface ensoleillée. Pour des surfaces à l'ombre ou ensoleillées sous condition de ciel couvert l'éclairement total est donné par :

$$E_{CLO,T,i} = E_{CLO,dr,i} + E_{CLO,df,h}T_F + E_{CLO,s,h} \left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right)
 \tag{II-10}$$

Pour des surfaces ensoleillées sous condition de ciel clair, l'éclairement total est donné par :

$$E_{CLO,T,i} = E_{CLO,dr,i} + E_{CLO,df,h}[T_F(1-A) + AR_b] + E_{CLO,s,h} \left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right)
 \tag{II-11}$$

T_F est un facteur d'inclinaison donné par l'équation [II-12].

$$T_F = \left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right) + \frac{2B}{\pi(3+2B)}
 \tag{II-12}$$

Où B est une constante qui est égale à 2,5 dans le cas de l'équation [II-10]. Dans le cas de l'équation [II-13] pour des conditions de ciel clair, ce coefficient est calculé à partir de données issues de 14 localisations à travers le monde :

$$\frac{2B}{\pi(3+2B)} = 0.04 - 0.82A - 2.026A^2
 \tag{II-13}$$

II.1.1.6 Le modèle de Perez

Le modèle de Perez fournit l'analyse la plus détaillée du rayonnement solaire diffus isotrope, circumsolaire et de la ligne d'horizon (Perez et al., 1987; Perez et al., 1990).

L'éclairement solaire total sur une surface inclinée est donné par l'équation [II-14] :

$$E_{CLO,T,i} = E_{CLO,dr,h} + E_{CLO,df,h} \left[(1 - K_1) \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) + K_1 \frac{a}{b} + K_2 \sin\beta \right] + E_{CLO,sh} \left(\frac{1 - \cos\beta}{2} \right) \quad \text{[II-14]}$$

Où :

$$a = \max(0, \cos(\xi))$$

$$b = \max(\cos(85^\circ), \cos(\xi_z))$$

K_1 et K_2 sont des coefficients pour la zone circumsolaire et la luminosité de l'horizon respectivement. Ils peuvent être déterminés en fonction de l'angle solaire zénithal ξ_z , de la clarté du ciel K_t et de la luminosité Δ .

Les paramètres K_t et Δ sont définis par les équations [II-15] et [II-16] :

$$K_t = \frac{\frac{E_{CLO,df,h} + E_n}{E_{CLO,df,h}} + 5.535 \cdot 10^{-6} \xi_z^3}{1 + 5.535 \cdot 10^{-6} \xi_z^3} \quad \text{[II-15]}$$

E_n est l'éclairement normal direct [W/m^2]

$$\Delta = m_a \frac{E_{CLO,d,h}}{E_0} \quad \text{[II-16]}$$

m_a est la masse d'air optique relative.

Les coefficients K_1 et K_2 peuvent être exprimés comme une fonction linéaire de ξ_z et de Δ de la manière suivante :

$$K_1 = \max\left(0, f_{11} + f_{12}\Delta + \frac{\pi\xi_z}{180} f_{13}\right) \quad \text{[II-17]}$$

$$K_2 = f_{21} + f_{22}\Delta + \frac{\pi\xi_z}{180} f_{23} \quad \text{[II-18]}$$

Les valeurs des coefficients f_{ij} sont données par Perez et al. (1990).

Le modèle de Perez est celui qui donne les résultats les plus précis pour différentes localisations

(Robinson et Stone, 2004).

Récemment, Torres et al. (2008) ont proposé un nouveau calcul de la luminosité au niveau de l'horizon pour le modèle de Perez. Cette méthode permet des calculs plus précis que les approximations réalisées par Perez, surtout en ce qui concerne les faibles valeurs de β .

Dernièrement, Robinson et Stone (2004) ont ajusté les termes relatifs à l'éclairement diffus de l'équation [II-14] pour prédire l'éclairement d'une surface en milieu urbain.

II.1.2 Éclairement de grande longueur d'onde

Bien que l'éclairement solaire joue un rôle prépondérant dans le bilan radiatif urbain, l'éclairement de grande longueur d'onde ne peut être négligé dans le bilan radiatif d'une surface (Sridhar, 2001; Sridhar et al., 2002). L'émittance, ou le rayonnement infrarouge M_i émis par un corps i à une température de surface $T_{s,i}$ avec une émissivité ε_i suit la loi de Stefan-Boltzmann généralisée pour les corps gris :

$$M_i = \varepsilon_i \sigma T_{s,i}^4 \quad \text{[II-19]}$$

Où σ est la constante de Stefan-Boltzmann et ε_i l'émissivité de ce corps.

La terre qui a une température moyenne de 14°C émet 390W/m². En absorbant une partie du rayonnement solaire et une partie du rayonnement de grande longueur d'onde émis par la terre, l'atmosphère s'échauffe et émet dans l'infrarouge. A la différence du rayonnement solaire diffus, le rayonnement de grande longueur d'onde en provenance de l'atmosphère peut être considéré comme isotrope. En considérant le ciel comme un corps noir idéal, le rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère peut être modélisé en définissant une température de ciel équivalente à partir de la température d'air extérieur T_e . Angström (1918) fut le premier à proposer un modèle pour estimer l'éclairement de grande longueur d'onde $E_{GLO,clr}$ sous des conditions de ciel clair :

$$E_{GLO,clr} = 0.82 - (0,25 \cdot 10^{-0,168P_{vs}}) \sigma T_e^4 \quad \text{[II-20]}$$

T_e [K] et P_{vs} [hPa] sont respectivement la température de l'air et la pression de vapeur saturante.

Ensuite, plusieurs auteurs ont proposé des modèles d'éclairement de grande longueur d'onde basés sur le même schéma :

$$E_{GLO,clr} = \varepsilon_o(T_e, P_{vs}) \sigma T_e^4 \quad \text{[II-21]}$$

Où ε_0 est l'émissivité effective d'un ciel clair.

Le Tableau 1 donne les modèles les plus couramment utilisés.

Auteur	Modèle
Brunt (1932)	$E_{GLO,clr} = 0,52 + 0,065P_{vs}^{\frac{1}{2}}\sigma T_e^4$
Anderson (1954)	$E_{GLO,clr} = (0,68 + 0,036(10P_{vs})^{\frac{1}{2}})\sigma T_e^4$
Swinbank (1963)	$E_{GLO,clr} = (9,2 \cdot 10^{-6}T_e^2)\sigma T_e^4$
Idso et Jackson (1969)	$E_{GLO,clr} = (1 - 0,261 \cdot \exp(-7,77 \cdot 10^{-4}(273 - T_e^2))\sigma T_e^4$
Brusaert (1975)	$E_{GLO,clr} = 1,24(P_{vs}/T_e)^{1/7}\sigma T_e^4$
Satterlund (1979)	$E_{GLO,clr} = 1,08 \left(1 - \exp\left(-P_{vs}^{T_{ext}/2016}\right) \right) \sigma T_e^4$
Idso (1981)	$E_{GLO,clr} = 0,7 + 5,95 \cdot 10^{-4}P_{vs} \exp\left(\frac{1500}{T_e}\right) \sigma T_e^4$
Prata (1996)	$E_{GLO,clr} = 1 - (1 + 46,5\frac{P_{vs}}{T_e}) \exp\left(-\left(1,2 + 139,5\frac{P_{vs}}{T_e}\right)^{0,5}\right) \sigma T_e^4$
Crawford et Duchon (1999)	$E_{GLO,clr} = 1,22 + 0,06\sin(m + 2)\frac{\pi}{6}\left(\frac{P_{vs}}{T_e}\right)^{1/7} \sigma T_e^4$
Iziomon et al (2003)	$E_{GLO,clr} = \left(1 - 0,35 \exp\left(\frac{-10P_{vs}}{T_e}\right)\right) \sigma T_e^4$

Tableau 1 : Modèle d'éclairement grande longueur d'onde $E_{GLO,clr}$ [W/m²] à partir de la température de l'air T_e [K] et de la pression de vapeur saturante P_{vs} [hPa], m étant le mois de l'année

L'éclairement émis par les nuages rend l'éclairement de grande longueur d'onde plus important pour des conditions nuageuses. Pour prendre en compte cet effet, $E_{GLO,clr}$ est pondéré soit par un

facteur c qui est proportionnel à l'opacité totale soit par une fonction s qui est le ratio entre l'éclairement solaire mesuré et l'éclairement sous ciel clair. Il en résulte l'éclairement de grande longueur pour tout type de ciel $E_{GLO,ciel}$ [W/m^2]. Monteith (1973) a proposé une expression pour $E_{GLO,ciel}$ donnée par :

$$E_{GLO,ciel} = (1 - c)\varepsilon_o\sigma T_e^4 + c(\sigma T_e^4 - d) \quad [II-22]$$

Où d [W/m^2] correspond à la différence de flux due à la différence entre la température radiante des nuages et la température ambiante T_e .

Korsgaard et al. ont suggéré une dépendance de $E_{GLO,ciel}$ avec s et 4 constantes (a_1 - a_4) (Korsgaard et al., 1991).

$$E_{GLO,ciel} = E_{GLO,clr} + a_1(\sigma T_e^4 - E_{GLO,clr}) + a_2(\sigma T_e^4 - E_{GLO,clr}) + a_3 + a_4 \quad [II-23]$$

Crawford et Duchon ont proposé un modèle pour tout type de ciel qui est largement utilisé depuis (Crawford et Duchon, 1999) :

$$E_{GLO,ciel} = [s + (1 - s)\varepsilon_o]\sigma T_e^4 \quad [II-24]$$

Martin et Berdahl ont développé un modèle en définissant une émittance par ciel clair ε_0 à partir de la température de rosée $T_{rosé}$ (Martin et Berdahl, 1984). Cette émittance est alors donnée par :

$$\varepsilon_0 = 0,711 + 0,005T_{rosé} + 7,3 \cdot 10^{-5}T_{rosé}^2 + 0,013 \cos \left[2\pi \frac{h}{24} \right] + 12 \cdot 10^{-5}(P_{atm} - P_0) \quad [II-25]$$

Cette expression est utilisée pour définir une température de ciel équivalente T_{ciel} :

$$T_{ciel}(t) = T_e(t)(\varepsilon_0 + 0,8(1 - \varepsilon_0)C_{couvert})^{0,25} \quad [II-26]$$

Avec $C_{couvert}$, le facteur de nébulosité qui permet de calculer la température de ciel en fonction de la couverture nuageuse grâce à l'équation [II-27](Kasten et Czeplak, 1980) :

$$C_{couvert} = \left(1,4286 \frac{E_{CLO,df}}{E_{0,CLO,T,h}} - 0,3 \right)^{0,5} \quad [II-27]$$

En définissant une température de ciel équivalente le rayonnement de grande longueur d'onde se déduit alors à l'aide de la loi de Stefan-Boltzmann (équation [II-19]).

Niemela et al. ont comparé plusieurs modèles d'éclairement de grande longueur d'onde avec des mesures (Niemelä et al., 2001). Presque tous les modèles sous-estiment les flux de grande longueur d'onde du ciel en particulier en période hivernale.

Kjaersgaard et al. ont calculé des éclairagements de grande longueur d'onde pour des jours de ciel clair à l'aide de 20 modèles largement utilisés (Kjaersgaard et al., 2007). Les auteurs ont comparé les résultats numériques avec des mesures de 32 années consécutives dans l'Est du Danemark et 7 années consécutives dans l'Ouest du Danemark. Les résultats montrent des dispersions et des incertitudes dans les valeurs prédites. En outre, aucun des modèles n'a été en mesure de prédire la plus faible des valeurs d'éclairement de grande longueur d'onde mesurée.

II.2 L'accès au rayonnement solaire en milieu urbain

Nous avons présenté comment calculer le rayonnement solaire provenant de la voûte céleste. En milieu urbain, les bâtiments forment des obstacles et des zones d'ombres qui réduisent l'accès au rayonnement solaire provenant du ciel. Nous proposons de présenter les différents modèles qui ont été développés pour calculer l'accès au rayonnement solaire en milieu urbain, soit la quantité de rayonnement solaire reçu par une surface urbaine pour une période donnée.

L'angle urbain horizontal u a été défini pour évaluer les effets des ombres créées par les bâtiments adjacents. Ainsi pour une rue canyon, l'angle u est évalué à partir de la hauteur H_u du bâtiment opposé et de la largeur de la rue W (Figure 15) :

$$\tan(u) = \frac{H_u}{W} \quad [\text{II-28}]$$

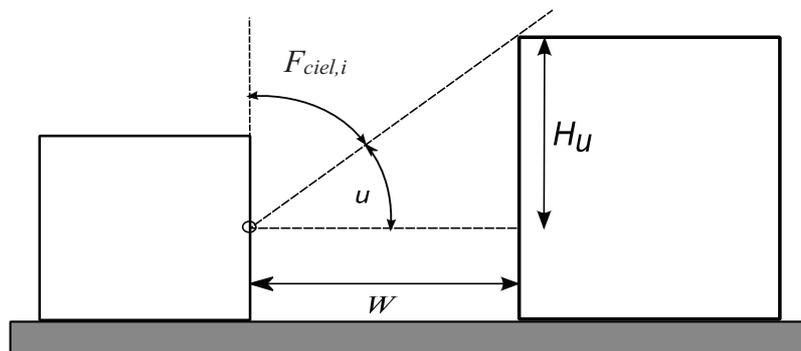


Figure 15 : Définition géométrique de H_u , W , u et $F_{ciel,i}$ pour un point i sur une surface verticale (Robinson, 2006)

Le facteur de vue du ciel $F_{ciel,i}$, soit la fraction du ciel qui est visible depuis le point i , est défini comme le complémentaire de u , (Figure 15). L'éclairement solaire reçu par une surface inclinée

est alors calculé par (Robinson, 2006; Robinson et Stone, 2004) :

$$E_{CLO,dr} = E_{CLO,dr,h} \frac{(1 + \cos(u + \beta))}{2} \quad [\text{II-29}]$$

En utilisant des modèles numériques de terrain (MNT) de villes existantes, Ratti et al. (Ratti et al., 2005) ont amélioré l'utilisation de u en milieu urbain. La valeur de u dans la direction perpendiculaire à la façade d'un bâtiment est moyennée avec six autres valeurs, correspondant à des directions allant de -67.5° à $+67.5^\circ$ par pas de 22.5° chacune (Figure 16).

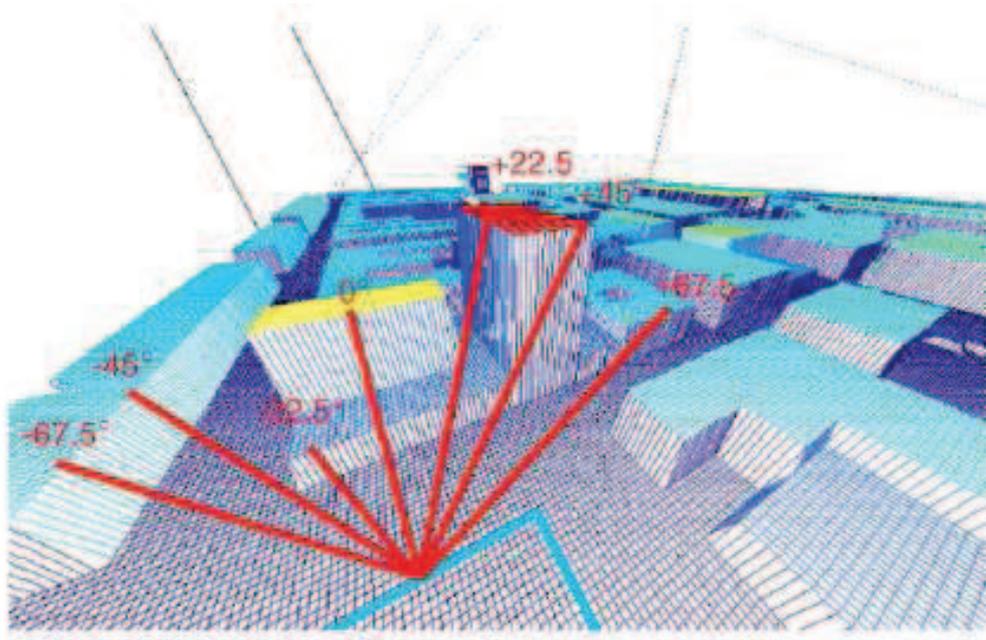


Figure 16 : Calcul de l'angle horizontal urbain (Ratti et al, 2005).

La contribution des différentes directions n'est pas la même. En effet, l'intensité du rayonnement solaire reçu sur une façade est proportionnelle au cosinus de l'angle entre la direction considérée et la normale à la façade. A l'aide des MNT de la ville, l'environnement urbain est maillé en différentes surfaces. Pour chaque surface l'angle horizontal urbain est utilisé pour le calcul du rayonnement solaire direct et un facteur de vue du ciel est évalué pour déterminer l'éclairement solaire diffus.

Les systèmes d'informations géographiques délivrent des données de plus en plus détaillées sur la géométrie des tissus urbains. Leur développement permet l'émergence de nouveaux outils pour le calcul des facteurs de vue du ciel (Brown et al., 2001; Gal et al., 2009; Wenjing et al., 2004; Yang et al., 2007).

Une autre méthode plus répandue pour déterminer l'accès au rayonnement solaire, est l'utilisation

des masques solaires. Les masques solaires définissent, pour un point d'origine donnée, pour chaque position du soleil au cours de l'année si le soleil est visible ou caché du point de vue de ce point d'origine. La détermination des masques solaires permet de déterminer les effets d'ombre créés par l'environnement urbain. En considérant un point précis dans une scène urbaine, le masque solaire peut être déterminé par projection sphérique de la scène urbaine à partir de ce point. Ainsi, l'éclairement solaire direct peut être évalué pour chaque pas de temps de l'année (Teller et Azar, 2001).

A partir d'un modèle tridimensionnel CAO d'un quartier, le logiciel SOLENE (Groleau, 2000) réalise une projection sphérique sur chaque surface discrétisée de la maquette pour déterminer le masque solaire de chaque surface. La surface est considérée comme un observateur regardant verticalement au zénith (Figure 17 (a)). La scène urbaine est alors projetée sur la trajectoire du soleil pour déterminer à chaque moment de la journée si le soleil est visible ou non depuis cette surface (Figure 17 (b)). Ainsi, si le soleil est visible et en connaissant sa position, l'éclairement de courte longueur d'onde direct peut être déterminé à partir de l'équation [II-2]. Ce procédé permet alors de calculer toutes les zones d'ombre du quartier et la distribution du rayonnement solaire direct dans ce quartier en prenant en compte la morphologie du quartier (Vinet et Groleau, 2000).

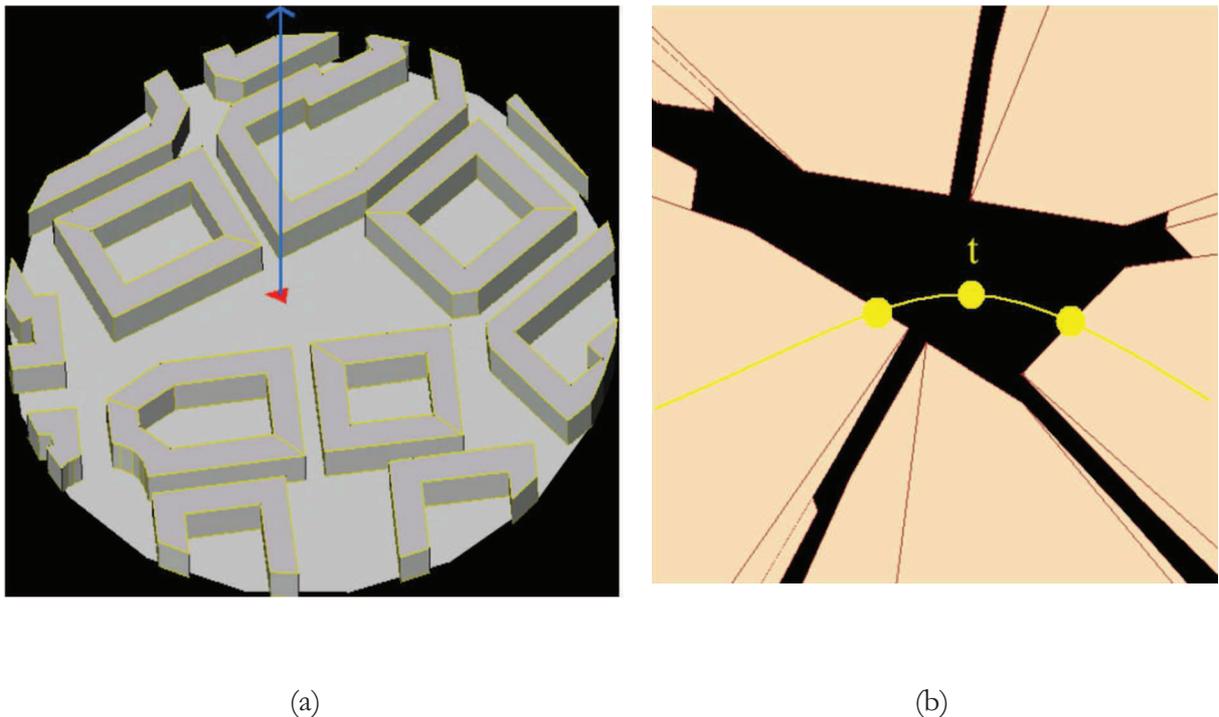


Figure 17 : Projection d'une scène urbaine à partir d'un point donné en regardant vers le haut (a) et sur la trajectoire du soleil (b)(Groleau, 2000)

Pour déterminer la répartition du rayonnement diffus dans l'environnement urbain, la maquette CAO est associée à un modèle de voûte céleste (Vinet et Groleau, 2000). Cette voûte céleste est

considérée comme un hémisphère de rayon infini discrétisé à l'aide d'une triangulation géodésique, (Figure 18), permettant l'évaluation des angles solides de chaque surface du ciel pour un point qui serait situé au centre de l'hémisphère. Chaque élément de surface de cette voûte céleste est une source de rayonnement diffus calculée à l'aide du modèle de ciel de Perez (Perez et al., 1993).

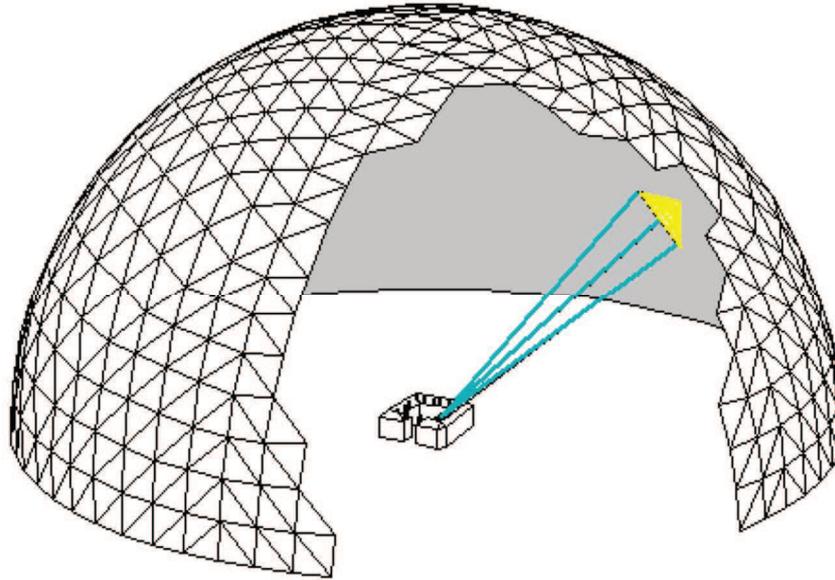


Figure 18 : Triangulation géodésique de la voûte céleste (Miguet et Groleau, 2002)

Pour déterminer si un point de la scène urbaine reçoit du rayonnement diffus, ce point est considéré comme un observateur regardant verticalement vers le haut avec un champ de vision de 180° (Figure 19 (a)), lui permettant ainsi de voir l'ensemble de la voûte céleste.

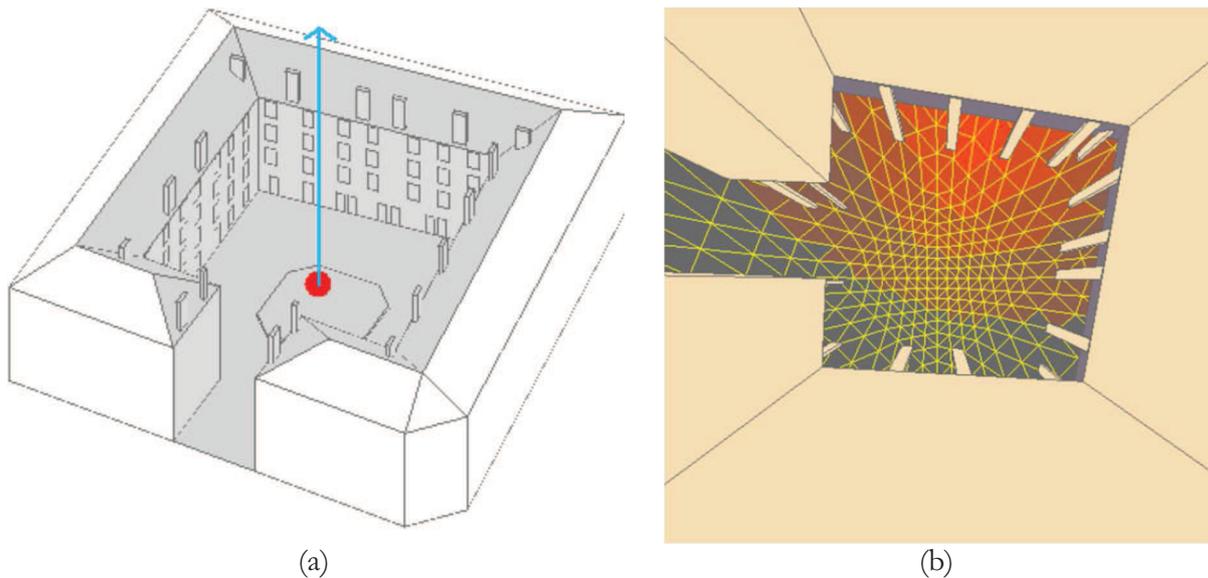


Figure 19 : Projection d'une scène urbaine à partir d'un point donné en regardant verticalement vers le haut (a) et sur le modèle de voûte céleste géodésique (b) (Groleau, 2000).

Une projection en perspective des éléments de la scène est alors réalisée, constituant ainsi dans

l'image 2D l'ensemble des occultations du ciel. Le ciel modélisé est projeté de la même manière venant ainsi se placer en second plan de l'image, les éléments du ciel étant positionnés à l'infini (Figure 19, (b)). Il reste à déterminer si les différentes surfaces du ciel, repérées par leur centre de gravité, sont contenues ou non dans le masque. Pour chaque surface de ciel visible, l'énergie incidente est évaluée en fonction du flux émis par la surface du ciel, en tenant compte des angles solides et de la normale au point considéré. La valeur obtenue est ensuite cumulée aux valeurs déjà calculées pour les autres surfaces visibles du ciel (Groleau, 2000).

Modélisation des mutli-réflexions en milieu urbain

Nous avons vu que l'éclairement total de courte longueur d'onde $E_{CLO,T}$ [W/m²] est composé de parties directe, diffuse et réfléchi. En milieu urbain, les rayonnements de courte et grande longueurs d'onde sont affectés par un accès restreint au soleil et au ciel, mais peuvent aussi être plus ou moins amplifiés localement entre les constructions en fonction des facteurs de forme et des réflectivités (Ashie et al., 1999). La partie réfléchi du rayonnement est fortement dépendante de la morphologie et des matériaux urbains. À l'échelle du bâtiment, l'albédo peut être utilisé pour déterminer la partie diffuse dans le bilan radiatif d'une paroi de bâtiment (Ineichen et al., 1990; Ineichen et al., 1987). Mais un calcul plus précis est nécessaire pour une simulation réaliste de la prise en compte du piégeage radiatif du rayonnement solaire entre les bâtiments d'un quartier. Il est donc nécessaire de détailler la géométrie et les propriétés radiatives des surfaces urbaines (sol, peintures, végétation ...).

Dans cette section, les méthodes de calcul de l'éclairement de courte et de grande longueurs d'onde, après réflexion par l'environnement, $E_{CLO,AR}$ et $E_{GLO,AR}$ [W/m²] respectivement, sont présentées. La simulation détaillée des multiples réflexions pour l'étude d'une scène urbaine peut mener à des temps de calcul prohibitifs, surtout avec des géométries CAO d'un quartier. De plus, les transferts radiatifs sont couplés avec d'autres phénomènes de transferts de chaleur, ce qui entraîne des systèmes d'équations non-linéaires de taille importante. Ces complexités numériques ont conduit à l'élaboration de différents niveaux de modélisation que nous présentons ci-après.

II.2.1 Facteur de forme

Pour résoudre les problèmes de répartition du rayonnement et des réflexions multiples en milieu urbain, la scène urbaine est d'abord divisée en N_s surfaces S_i . Les propriétés radiatives de chaque surface S_i sont généralement considérées comme homogènes et constantes dans les domaines des courtes et des grandes longueurs d'onde. De plus, les matériaux urbains sont considérés comme des émetteurs et réflecteurs diffus. Le facteur de forme F_{ji} représente la fraction du flux total

quittant S_j et qui atteint S_i (Figure 20) :

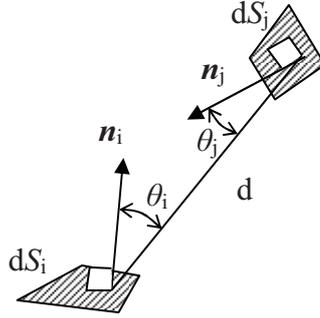


Figure 20 : Angles θ_i et θ_j entre 2 surfaces élémentaires d'aire dS_i et dS_j

Le facteur de forme peut être caractérisé par les angles θ_i et θ_j , (Figure 20), grâce à l'équation suivante :

$$F_{ij} = \frac{1}{S_i} \int_{S_i} \int_{S_j} \frac{dS_i \cos \theta_i dS_j \cos \theta_j}{\pi d^2} \quad [\text{II-30}]$$

II.2.2 Modélisation des échanges radiatifs de grande longueur d'onde

Tous les objets émettent un rayonnement infrarouge déterminé par la loi de Stefan-Boltzmann généralisée pour les corps gris. Ils absorbent et réfléchissent une partie du rayonnement infrarouge reçu. Dans le domaine de l'infrarouge, l'absorptivité d'un corps i est égale à son émissivité ε_i , et sa réflectivité est égale à $1 - \varepsilon_i$. En milieu urbain, chaque corps émet un rayonnement de grande longueur d'onde et reçoit du rayonnement infrarouge en provenance de l'atmosphère et des autres surfaces de la scène urbaine. L'environnement urbain forme un obstacle au rayonnement infrarouge émis par l'atmosphère. La part de l'éclairement de grande longueur d'onde émis par le ciel et reçu par une surface i est définie grâce au facteur de vue du ciel $F_{ciel,i}$:

$$E_{0,GLO,ciel,i} = \varepsilon_i F_{ciel,i} E_{GLO,ciel} \quad [\text{II-31}]$$

Connaissant les facteurs de forme entre une surface i et les autres surfaces j , il est alors possible de déterminer la part du rayonnement émis par la surface j et captée par la surface i . L'éclairement de grande longueur d'onde $E_{0,GLO,urb,i}$ [W/m^2], reçu par une paroi i depuis l'environnement urbain, est en négligeant les multiples réflexions défini à l'aide de l'expression [II-32] :

$$E_{0,GLO,urb,i} = \varepsilon_i \sum_{j=1}^{Ns} \varepsilon_j \sigma F_{ji} T_{se,j}(t)^4 \quad [II-32]$$

Où :

- N_s est le nombre de surfaces isothermes vu par la surface i
- $T_{se,i}$ est la température de surface de la surface isotherme j

En ajoutant le rayonnement émis par la surface i , noté négativement, l'éclairement de grande longueur d'onde émis par le ciel et celui provenant de l'environnement urbain on obtient alors l'éclairement total, ou l'éclairement net, de la surface i sans prendre en compte les réflexions (Johnson et al., 1991; Noilhan, 1981) :

$$E_{0,GLO,T,i} = \sum_{j=1}^{Ns} \varepsilon_i \sigma F_{ji} \varepsilon_j T_{se,j}(t)^4 + \varepsilon_i F_{ciel,i} E_{GLO,ciel} - \varepsilon_i \sigma T_{se,i}(t)^4 \quad [II-33]$$

II.2.3 Calcul des multi-réflexions avec la méthode des radiosités

II.2.3.1 Éclairement de courte longueur d'onde

En considérant l'air de la scène urbaine comme transparent au rayonnement, l'éclairement après réflexion $E_{CLO,AR,i}$ pour une surface S_i est la somme de l'éclairement initial de courte longueur d'onde $E_{0,CLO,T,i}$ et de l'éclairement inter-réfléchi $E^*_{CLO,i}$:

$$E_{CLO,AR,i} = E_{0,CLO,T,i} + E^*_{CLO,i} \quad [II-34]$$

L'éclairement initial est donné par l'équation [II-35] :

$$E_{0,CLO,T,i} = E_{CLO,dr,i} + E_{CLO,df,i} \quad [II-35]$$

L'ensemble des surfaces de la scène urbaine forme une enceinte fermée, incluant le ciel en tant qu'hémisphère avec un rayon infini (Bozonnet et al., 2005). La radiosité $J_{CLO,i}$ de la surface i peut être exprimée comme la somme de la part réfléchie du flux échangé $E^*_{CLO,i}$ et, de la part réfléchie de l'éclairement initial $E_{0,CLO,T,i}$:

$$J_{CLO,i} = \rho_{CLO,i} E_{0,CLO,T,i} + \rho_{CLO,i} E^*_{CLO,i} \quad [II-36]$$

Avec $\rho_{CLO,i}$ la réflectivité de courte longueur d'onde de la surface i .

$J_{CLO,i}$ peut ainsi s'exprimer à partir de la radiosité des N_S autres surfaces de la scène et des facteurs de forme F_{ij} :

$$J_{CLO,i} = \rho_{CLO,i} E_{0,CLO,T,i} + \rho_{CLO,i} \sum_{j=1}^{N_S} F_{ij} J_{CLO,j} \quad [\text{II-37}]$$

Le couplage de cet ensemble d'équations linéaires nécessite le calcul d'un grand nombre de facteurs de forme. En calculant les radiosités de courte longueur d'onde $J_{CLO,i}$, à l'aide des équations [II-34] et [II-36], l'éclairement de courte longueur d'onde $E_{CLO,AR,i}$ peut être évalué par :

$$E_{CLO,AR,i} = \frac{J_{CLO,i}}{\rho_{CLO,i}} \quad [\text{II-38}]$$

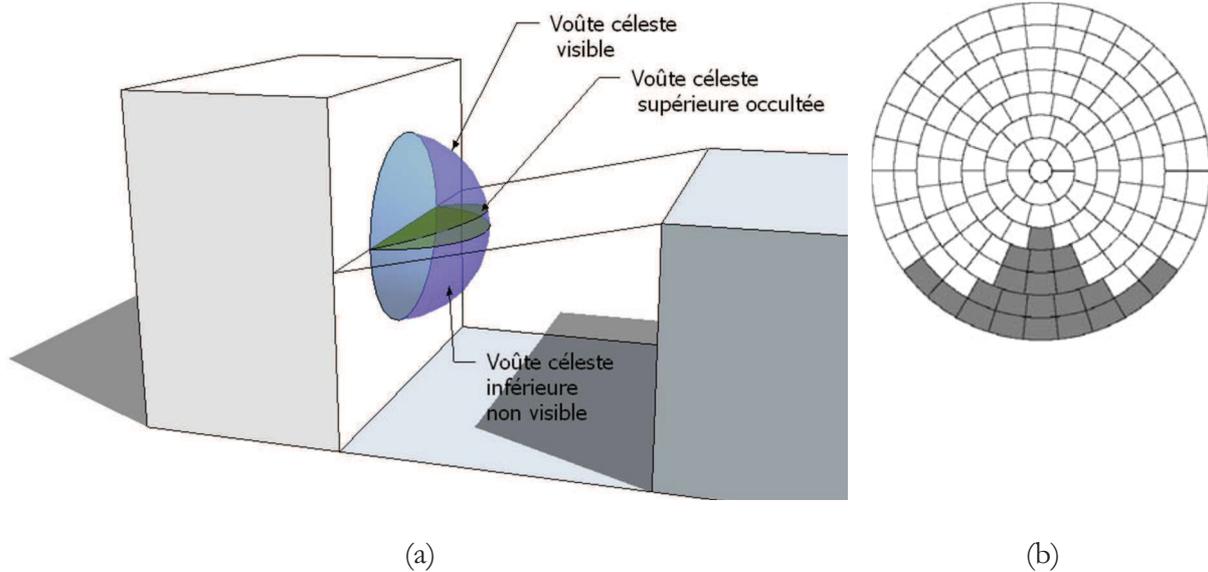


Figure 21 : Schéma des faces supérieure et inférieure d'une voûte pour une surface S_i (a). Projection de la voûte maillée en N_p éléments, et localisation de l'élément à l'ombre (b) (Robinson et Stone, 2005).

Robinson et Stone ont proposé un algorithme simplifié nommé SRA, (Simplified Radiosity Algorithm), spécialement adapté à l'environnement urbain (Robinson et Stone, 2005). L'environnement extérieur radiant est décrit par deux hémisphères, situées au-dessus et en-dessous un plan horizontal (Figure 21 (a)), et discrétisé en N_p éléments (145 pour chaque hémisphère décrit dans la méthode Figure 21 (b)), avec un angle solide Ω_{pi} depuis l'élément p vers la surface S_i .

L'obstruction de l'environnement de la luminance énergétique de courte longueur d'onde $R_{CLO,p}$ [W/ (m²Sr)] à partir de l'élément p du ciel est déterminée par les éléments du ciel pouvant être vus S_{pi} [0;1] et l'angle d'incidence ξ_{pi} entre cet élément et S_i . La luminance énergétique $R_{CLO,p}$ peut être approximée à partir de l'éclairement diffus sur un plan horizontal $E_{CLO,df,b}$ [W/m²] par une radiance hémisphérique, en considérant un modèle de ciel de type de Perez et pour tout type de temps (Robinson et Stone, 2004). L'éclairement diffus sur la surface S_i est alors calculé à partir de l'équation [III-39] :

$$E_{CLO,df,i} = \sum_{p=1}^{Np} R_{0,CLO,p} \Omega_{pi} S_{pi} \cos \xi_{pi} = \sum_{p=1}^{Np} F_{pi} J_{CLO,p} \quad [\text{II-39}]$$

L'éclairement de la part réfléchie, $E_{CLO, \rho, i}$ [W/m²], est donné par une expression similaire, en simplifiant le choix de l'élément correspondant à l'obstruction dominante avec une radiance $R_{CLO,p}^*$ et une fraction visible $(1-S_{pi})$ [0;1]. $E_{CLO,dr,i}$ [W/m²], l'éclairement de la surface S_i est alors donné par l'équation [II-40] (Robinson et Stone, 2005) :

$$R_{CLO,i} = \frac{\rho_{CLO,i}}{\pi} \left(E_{CLO,dr,i} + \sum_{p=1}^{Np} R_{0,CLO,p} \Omega_{pi} S_{pi} \cos \xi_{pi} + \sum_{p=1}^{2Np} R_{CLO,p}^* \Omega_{pi} (1 - S_{pi}) \cos \xi_{pi} \right) \quad [\text{II-40}]$$

Comme pour la méthode des radiosités, la solution de cet ensemble d'équations nécessite l'inversion d'une matrice carrée. Les facteurs de forme doivent être calculés à partir des données géométriques, ce qui donne aussi la visibilité solaire. Les propriétés radiatives des surfaces sont alors utilisées pour construire la matrice nécessaire pour résoudre le système d'équations [II-40]. L'éclairement direct incident est calculé séparément à partir de l'éclairement diffus. En supposant un nombre fini de réflexions, le système peut alors être résolu par itération. De plus, dans le but de diminuer les temps de calcul pour des simulations annuelles, la visibilité solaire horaire est extrapolée à partir de la valeur moyenne mensuelle. Cette méthode a montré sa fiabilité pour les prédictions horaires du rayonnement solaire sur les façades d'une rue canyon modélisée avec un programme de lancer de rayons de type Monte Carlo. Cette méthode est donc particulièrement adaptée à l'étude de scènes urbaines complexes où le temps de calcul augmente considérablement avec le nombre de surfaces.

L'éclairement de courte longueur d'onde $E_{CLO,AR,i}$ de S_i après les multi-réflexions est alors donné

à partir de la luminance énergétique calculé $R_{CLO,i}$:

$$E_{CLO,AR,i} = \frac{\pi R_{CLO,i}}{\rho_{CLO,i}} \quad [\text{II-41}]$$

II.2.3.2 Éclairement de grande longueur d'onde

L'éclairement de grande longueur d'onde après toutes les réflexions, $E_{GLO, AR, i}$ [W/m^2], est composé de l'éclairement primaire de grande longueur d'onde de la surface S_i , $E_{0, GLO, T, i}$, et de l'éclairement dû aux multiples réflexions $E_{GLO, i}^*$ [W/m^2] :

$$E_{GLO,AR,i} = E_{0,GLO,T,i} + E_{GLO,i}^* \quad [\text{II-42}]$$

L'éclairement de grande longueur d'onde sur la surface S_i , $E_{0,GLO,T,i}$ est la somme de l'éclairement du ciel $E_{GLO,cie,i}$ et de l'éclairement de grande longueur d'onde primaire de la scène urbaine $E_{0,GLO,urb,i}$:

$$E_{0,GLO,T,i} = E_{0,GLO,urb,i} + E_{GLO,cie,i} \quad [\text{II-43}]$$

Et $E_{0,GLO,urb,i}$ est défini par l'équation [II-44] :

$$E_{0,GLO,urb,i} = \sum_{j=1}^{N_S} F_{ij} M_j \quad [\text{II-44}]$$

Où M_j est l'émittance de la surface S_j qui dépend de l'émissivité ε_j et de la température de surface $T_{s,j}$.

La radiosité de grande longueur d'onde de la surface est définie à partir de l'exitance due à la part réfléchie des éclairnements $E_{GLO, S, i}$ et $E_{GLO, urb, i}$, et de l'émittance M_i .

$$J_{GLO,i} = M_i + \rho_{GLO,i} E_{GLO,S,i} + \rho_{GLO,i} E_{0,GLO,urb,i} + \rho_{GLO,i} E_{GLO,i}^* \quad [\text{II-45}]$$

Connaissant les températures de surface, cette radiosité peut être obtenue pour toutes les surfaces à partir du système d'équations [II-46] :

$$J_{GLO,i} = M_i + \rho_{GLO,i} E_{GLO,S,i} + \rho_{GLO,i} \sum_{j=1}^{N_S} F_{ij} J_{GLO,j} \quad [\text{II-46}]$$

Finalement, l'éclairement de grande longueur d'onde est calculé à partir des radiosités grâce à l'équation [II-47] :

$$E_{GLO,AR,i} = \frac{J_{GLO,i}}{\rho_{GLO,i}} - M_i \quad [\text{II-47}]$$

Cet ensemble d'équations, lié à d'autres phénomènes thermiques, sont très difficiles à résoudre sans certaines hypothèses et simplifications qui sont couramment utilisées. Nous nous proposons de les exposer dans ce qui suit.

II.2.4 Calcul des multi-réflexions avec la méthode des enceintes fictives

Pour le calcul de grands ensembles d'équations couplées utilisant la méthode des radiosités, les multiples réflexions peuvent être résolues avec des équations indépendantes et des procédures itératives ou simplifiées. La méthode de l'enceinte fictive de Walton initialement développée pour les transferts thermiques par rayonnement dans le bâtiment (Walton, 1980), a été réutilisée pour le cas d'une rue canyon (Bozonnet et al., 2005).

II.2.4.1 Éclairement de courte longueur d'onde après les multiples réflexions

Dans la méthode de l'enceinte fictive, chaque surface S_i de la scène est considérée face à une surface fictive S_{Fi} pour laquelle la surface est la somme des surfaces vues depuis S_i . La réflectivité fictive $\rho_{CLO,Fi}$ et la radiosité initiale fictive $J_{0,CLO,Fi}$ [W/m^2] sont définies à partir de la réflectivité $\rho_{CLO,j}$ et de la radiosité initiale $J_{0,CLO,j}$ [W/m^2] des surfaces considérées (Bozonnet et al., 2005). La radiosité initiale est définie par la part réfléchie de l'éclairement de courte longueur d'onde initial $E_{0,CLO,T,i}$ [W/m^2].

$$S_{Fi} = \sum_{j \neq i} S_j \quad [\text{II-48}]$$

$$\rho_{CLO,Fi} = \frac{\sum_{j \neq i} \rho_{CLO,j} S_j}{S_{Fi}} \quad [\text{II-49}]$$

$$J_{0,CLO,i} = \rho_{CLO,i} E_{0,CLO,T,i} \quad [\text{II-50}]$$

$$J_{0,CLO,Fi} = \frac{\sum_{j \neq i} J_{0,CLO,j} S_j}{S_{Fi}} \quad [\text{II-51}]$$

Ainsi, l'éclairement de courte longueur d'onde après réflexion $E_{CLO,AR,i}$ [W/m^2] dépend uniquement de la radiosité initiale de la surface de la scène et est donné par l'équation [II-52] :

$$E_{CLO,AR,i} = E_{CLO,dr,i} + E_{CLO,df,i} + F_{Fi,i} \times \frac{\rho_{CLO,Fi} J_{0,CLO,i} + \frac{J_{0,CLO,Fi}}{F_{Fi,i}}}{1 - \rho_{CLO,Fi}(\rho_{CLO,i} F_{Fi,i} + F_{Fi,Fi})} \quad [\text{II-52}]$$

Les facteurs de forme entre les surfaces S_i et S_{Fi} peuvent être simplement calculés par les équations [II-53] et [II-54], respectivement :

$$F_{Fi,i} = \frac{S_i}{S_{Fi}} \quad [\text{II-53}]$$

$$F_{Fi,Fi} = 1 - \frac{S_i}{S_{Fi}} \quad [\text{II-54}]$$

II.2.4.2 Éclairement de grande longueur d'onde après les multiples réflexions

Dans la méthode de l'enceinte fictive (Bozonnet et al., 2005), la réflectivité fictive $\rho_{GLO,Fi}$ et la radiosité primaire $J_{0,GLO,Fi}$ [W/m²] sont définies à partir de la réflectivité de la surface et de l'éclairement de grande longueur d'onde initial $E_{0,GLO,T,i}$ par les équations [II-55], [II-56] et [II-57] :

$$\rho_{GLO,Fi} = \frac{\sum_{j \neq i} \rho_{GLO,j} S_j}{S_{Fi}} \quad [\text{II-55}]$$

$$J_{0,GLO,i} = \varepsilon_{GLO,i} \sigma T_i^4 + \rho_{GLO,i} E_{0,GLO,T,i} \quad [\text{II-56}]$$

$$J_{0,GLO,Fi} = \frac{\sum_{j \neq i} J_{0,GLO,j} S_j}{S_{Fi}} \quad [\text{II-57}]$$

L'équation [II-52] peut également être utilisée pour les rayonnements de grande longueur d'onde, en remplaçant la radiosité initiale et la réflectivité courte longueur d'onde par celle des grandes longueurs d'onde.

L'utilisation de cette méthode pour les échanges de grande longueur d'onde est un moyen efficace pour diminuer les temps de calcul et permettre de coupler les échanges radiatifs à chaque pas de temps avec les autres phénomènes de transferts thermiques (convectif et conductif) dans le but de calculer les températures de chaque surface (Bozonnet et al., 2005).

L'utilisation d'une surface équivalente est aussi utilisée avec une température fictive T^* , équivalente aux surfaces vue d'un point p (Figure 21). L'éclairement net de grande longueur d'onde $E_{GLO,AR,i}$ [W/m²] peut être simplement calculé à partir de l'émissivité ε_i de la surface i par

l'équation [II-58] :

$$E_{GLO,AR,i} = \varepsilon_i S_i \sigma (T_i^{*4} - T_i^4) \quad \text{[II-58]}$$

La température T_i^* [K] peut être calculée à partir de la température de ciel T_{sky} [K] et les températures T_p de chaque élément composant la surface visible comme proposé dans l'algorithme SRA (Robinson et Stone, 2005):

$$T_i^{*4} = \frac{1}{\pi} \left(T_{sky}^4 \sum_{p=1}^{Np} \Omega_{pi} s_{pi} \cos \xi_{pi} + \sum_{p=1}^{2Np} \Omega_{pi} (1 - s_{pi}) \cos \xi_{pi} T_p^4 \right) \quad \text{[II-59]}$$

Robinson et Stone proposent de résoudre ce système d'équations en utilisant les résultats du pas de temps précédent (Robinson et Stone, 2005).

II.3 Développement d'une méthode de calcul radiatif adaptée

Nous avons présenté les différents modèles développés dans la littérature permettant le calcul des échanges de rayonnement solaire et infrarouge. La morphologie du milieu urbain entraîne d'une part une réduction de l'accès au rayonnement solaire mais aussi une amplification par le phénomène de multi-réflexion, d'où la nécessité de détailler la géométrie d'un quartier pour pouvoir calculer le rayonnement solaire reçu par chaque surface. Pour le calcul des échanges radiatifs de grande longueur d'onde, le calcul est d'autant plus complexe qu'il est lié au calcul des températures de surface. Pour les parois composant un bâtiment, les températures de surface dépendent de la température ambiante et des phénomènes thermiques à l'intérieur du bâtiment. Nous proposons une méthodologie simplifiée pour le calcul du rayonnement solaire et infrarouge qui puisse être utilisée avec le calcul des températures d'air extérieur et des besoins énergétiques des bâtiments.

Le calcul du rayonnement en milieu urbain se fera à l'aide du logiciel SOLENE. Ce logiciel développé par le laboratoire CERMA permet à partir d'une maquette tridimensionnelle d'un quartier de calculer pour chaque surface les éclairements solaires diffus et direct, en prenant en compte les phénomènes d'inter-réflexion, l'éclairément de grandes longueurs d'onde, les facteurs de vue du ciel et les facteurs de forme entre chaque surface.

Ce logiciel est utilisé pour calculer les éclairements solaires direct et diffus reçus par chaque surface urbaine telle que définie dans la section II.2. Nous nous proposons de présenter un modèle permettant d'utiliser des résultats pour calculer les multi-réflexions. Par la suite, nous

présentons la méthodologie développée pour le calcul des éclairements de grande longueur d'onde.

II.3.1 Modèle géométrique

La représentation de la géométrie est essentielle dans la modélisation des rayonnements solaire et infrarouge. C'est à partir d'elle que l'on détermine les effets de masque et que l'on calcule les facteurs de forme nécessaires à l'évaluation des échanges radiatifs. L'élaboration d'une maquette numérique tridimensionnelle d'un quartier permet de définir les objets physiques sur lesquels sont appliqués les différents modèles physiques. Nous nous proposons de présenter une méthodologie pour construire une maquette tridimensionnelle d'un quartier à partir de données issues de Systèmes d'Information Géographiques (SIG). Les données SIG disponibles ne permettent pas une représentation tridimensionnelle réelle de l'environnement urbain. Les ensembles bâtis sont représentés grâce au tracé au niveau du sol du contour des bâtiments pour former un polygone auquel est attribuée une hauteur pour chaque sommet (IGN, 2011). N'ayant que la hauteur pour chaque sommet du polygone, il est alors impossible d'obtenir les paramètres géométriques du toit. Le toit de chaque bâtiment est alors considéré comme plat et est associé à un polygone avec une hauteur moyenne (Figure 22).

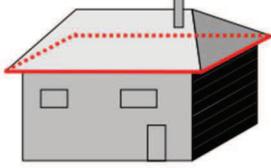
Description	Monde réel et modélisation	Modélisation géométrique
Modélisation d'une maison		

Figure 22 : Représentation géométrique des toits dans les systèmes SIG (IGN, 2011)

Ces données géométriques de chaque bâtiment sont alors utilisées pour construire une maquette tridimensionnelle du quartier à partir du mailleur par éléments finis GMSH développé par Geuzaine et Remacle (2009). La première étape consiste à utiliser les données géométriques SIG pour tracer sur un plan les empreintes des bâtiments. Le sol sur lequel sont posés les bâtiments est alors discrétisé sous la forme de quadrangles et triangles (Figure 23).

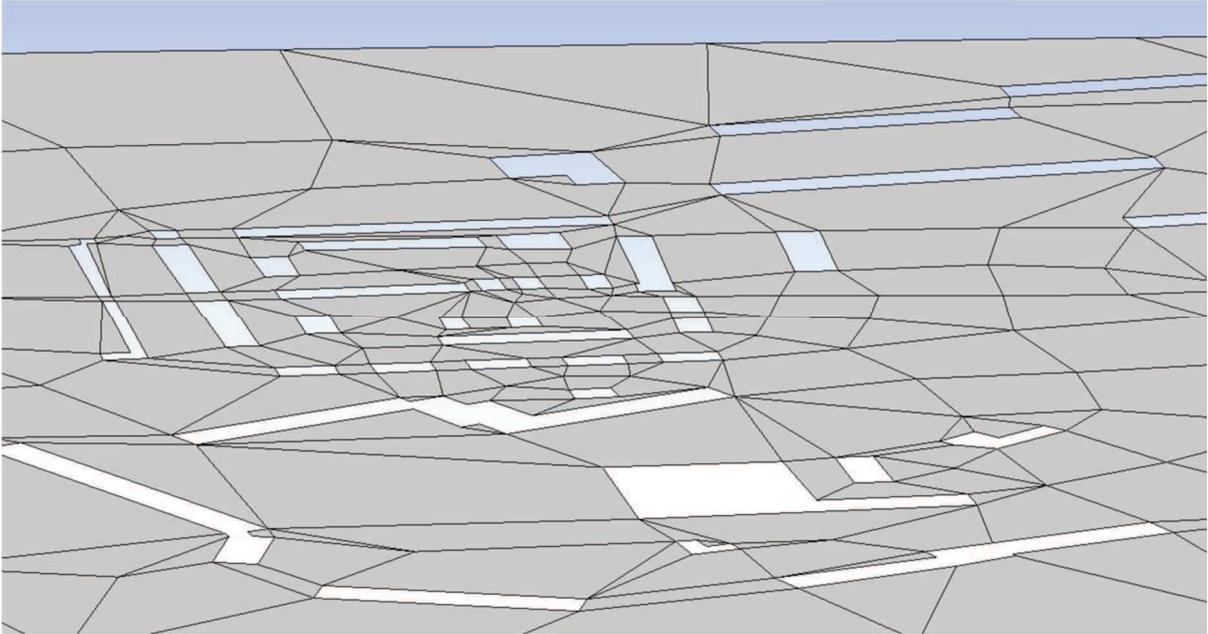


Figure 23 : Représentation du sol d'un quartier décomposé en triangles et quadrangles

En extrudant le polygone représentant l'empreinte d'un bâtiment (Figure 24 (a)), à la hauteur d'un étage, un volume est obtenu, composé de deux faces horizontales, le plancher et le plafond, et autant de faces verticales qu'il y a d'arêtes dans le polygone représentant l'empreinte du bâtiment, (Figure 24 (b)). En réalisant une extrusion pour chaque étage du bâtiment, celui-ci est alors représenté comme un ensemble de volumes superposés les uns sur les autres (Figure 24 (c)) où chaque face représente une paroi distincte. Cette opération est alors réalisée sur l'ensemble du quartier (Figure 25) pour obtenir un ensemble de bâtiments en différenciant chaque étage.

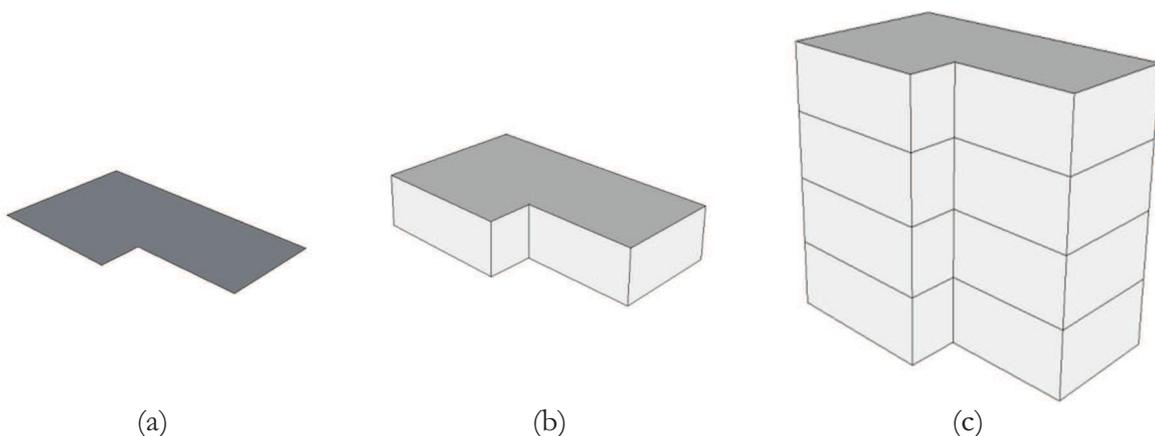


Figure 24 : Représentation de l'empreinte d'un bâtiment (a), extrusion de cette empreinte sur un étage (b) puis sur plusieurs étages (c)

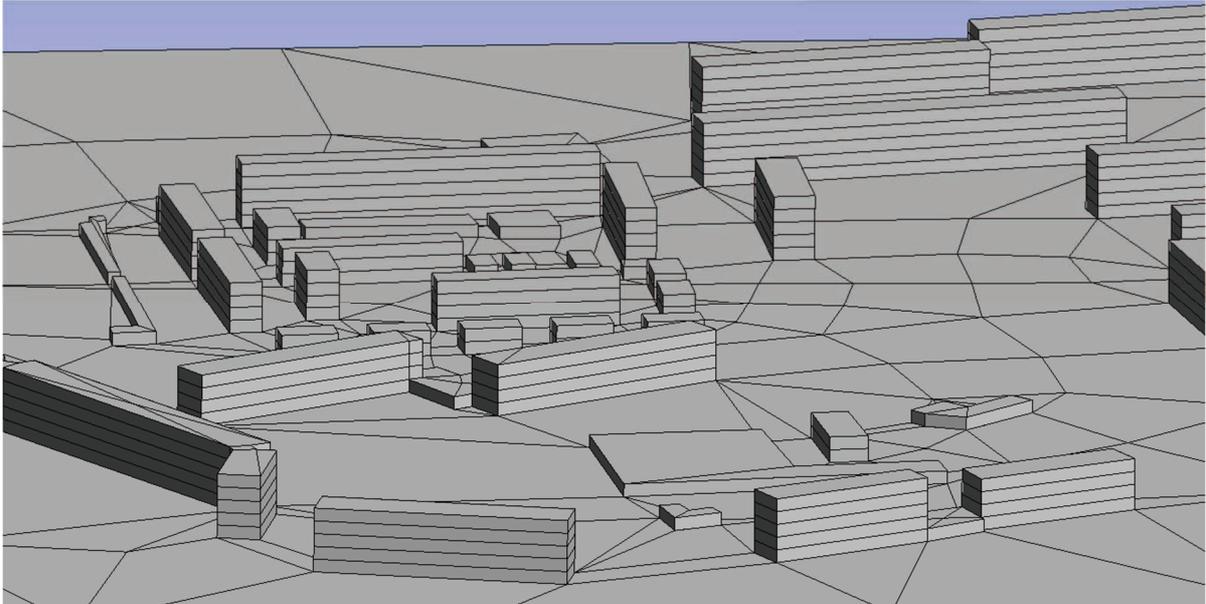


Figure 25 : Représentation de la maquette tridimensionnelle d'un quartier après extrusion des empreintes des bâtiments

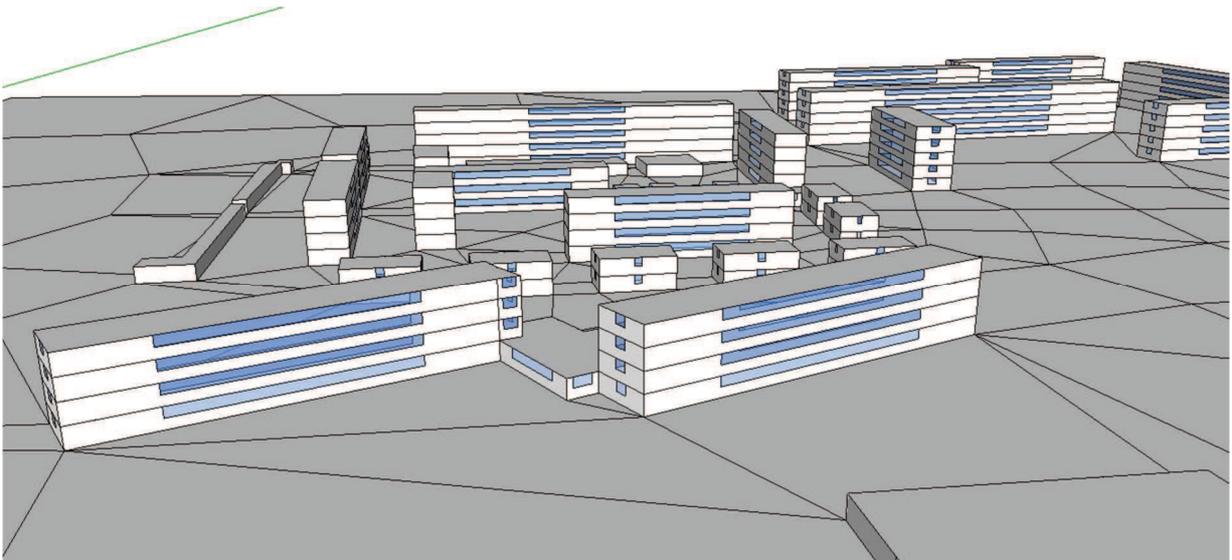


Figure 26 : Représentation de la maquette tridimensionnelle, surfaces vitrées incluses, d'un quartier

Pour pouvoir introduire les apports solaires dans le calcul des besoins énergétiques des bâtiments, il est nécessaire de distinguer les parois opaques des parois vitrées pour chaque bâtiment. Au lieu de représenter avec précision chaque paroi vitrée de chaque bâtiment, les parois vitrées sont représentées en termes de pourcentage vitré par façade. Les données de construction de chaque bâtiment sont utilisées pour pouvoir tracer sur chaque façade de chaque étage un rectangle centré dont la surface correspond au pourcentage vitré de la façade. Ce procédé permet alors de construire une maquette tridimensionnelle représentant l'ensemble des bâtiments avec les surfaces vitrées incorporées, et les sols urbains comme un ensemble de faces planes quadrangulaires ou triangulaires (Figure 26). Cette maquette géométrique tridimensionnelle

permettra de calculer les éclairagements de courte et de grande longueurs d'onde pour chacune des faces en prenant en compte les phénomènes d'ombre et de réflexion causés par l'environnement urbain. La méthodologie pour calculer ces éclairagements est expliquée dans ce qui suit.

II.3.2 Calcul du rayonnement solaire direct et diffus

Le logiciel SOLENE est utilisé pour calculer les rayonnements solaires direct et diffus reçus par chacune des surfaces composant la maquette tridimensionnelle. Pour prendre en compte correctement les effets d'ombre entre les bâtiments, un maillage plus raffiné est nécessaire. Ainsi, chaque surface de la maquette est décomposée en plusieurs facettes triangulaires (Figure 27).

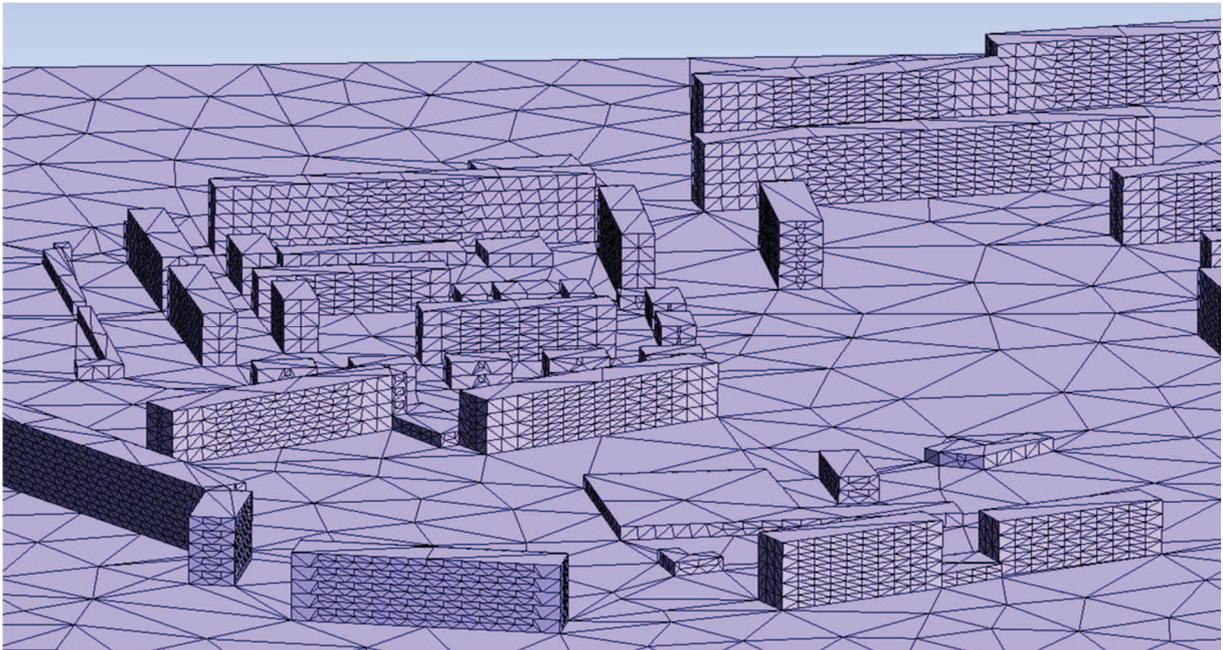


Figure 27 : Représentation de la maquette tridimensionnelle triangulée du quartier Pin Sec

Pour calculer le rayonnement solaire reçu par chaque facette de la maquette, il est nécessaire de réaliser une projection sphérique de l'environnement urbain sur chacune de ces facettes pour calculer les effets de masque et déterminer quelle partie du ciel est visible depuis chaque facette de la maquette. Cette opération de projection sphérique consiste à projeter une autre maquette, dite « masque », sur chaque facette. Cette nouvelle maquette doit comporter tous les obstacles à la vue du ciel et n'a donc pas besoin d'être très détaillée. Cette maquette du quartier est construite en supprimant toutes les surfaces horizontales (toits et sol) et en simplifiant les surfaces verticales. Dans la maquette originelle, chaque façade de bâtiment est décomposée en une surface différente pour chaque étage, elle-même décomposée pour différencier parois opaques et parois vitrées (Figure 26). Dans cette nouvelle maquette simplifiée, nommée maquette masque, chaque façade de bâtiment est représentée par une seule surface verticale (Figure 28).

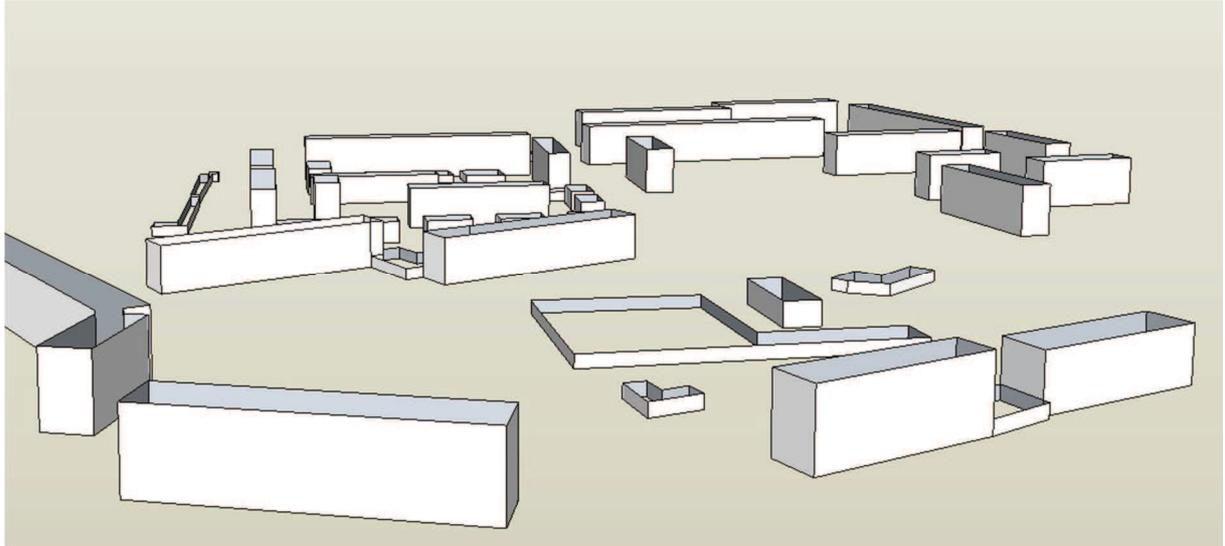


Figure 28 : Représentation de la maquette simplifiée pour déterminer les masques solaires.

En simplifiant les façades, le nombre de projection se trouve considérablement réduit. Connaissant la position du soleil à chaque instant t de l'année, le calcul du masque solaire permet alors de déterminer si le soleil est visible ou non. Si le soleil est visible, l'éclairement solaire direct est alors calculé à l'aide de l'équation [II-2]. De la même manière la géométrie masque et le modèle de voûte céleste présenté dans la section II.2, sont projetés sur chaque facette triangulaire. Ceci permet alors de déterminer quelle surface du modèle de voûte céleste est visible depuis chaque facette triangulaire pour pouvoir calculer l'éclairement diffus de courte longueur d'onde reçu.

II.3.3 Calcul du rayonnement solaire total

Afin de calculer correctement le rayonnement solaire reçu par chaque surface urbaine, il est nécessaire de prendre en compte les phénomènes de multi-réflexion. Pour simplifier le calcul, les multi-réflexions sont calculées avec la maquette non triangulée. Pour cela les rayonnements solaires direct et diffus reçus pour chaque surface de la maquette du quartier sont calculés en agrégeant le rayonnement solaire direct et diffus reçus par les facettes triangulaires associées à la surface. Les rayonnements solaires direct et diffus reçus par chaque surface forment alors l'éclairement initial de courte longueur d'onde $E_{0,CLO,T,i}$ [W/m²]. A partir des équations [II-37] et [II-38], l'éclairement après réflexion $E_{CLO,AR,i}$ [W/m²] reçu par la surface i peut alors se déduire à l'aide du système d'équations :

$$\rho_{CLO,i} E_{CLO,AR,i}(t) - \sum_{j=0}^{N_S} F_{ji} \rho_{CLO,j} E_{CLO,AR,j}(t) = E_{0,CLO,T,i}(t) \quad \text{[II-60]}$$

Pour résoudre ce système d'équations, les facteurs de forme entre chaque surface de la maquette

non triangulée sont calculés à l'aide d'un modèle développé sous SOLENE (Groleau, 2000).

La méthodologie présentée dans cette section permet de calculer l'éclairement solaire après réflexion pour un temps donné en considérant un ciel clair, ce qui ne permet pas de prendre en compte la réduction lumineuse due à la présence de nuages. Afin de prendre en compte les effets de nébulosité une méthode de calcul a été développée pour calculer $E_{CLO,AR,i}$ à partir d'un fichier de données météorologiques. Pour cela, une simulation annuelle du rayonnement solaire est réalisée pour une surface de 1 m² horizontale sur le lieu où est situé le quartier. Le but est de calculer l'éclairement initial de courte longueur d'onde sous un ciel clair $E_{0,CLO,c}(t)$ au temps t . Les fichiers de données météorologiques délivrent les éclairements solaires direct et diffus $E_{0,CLO,m}(t)$ au temps t . Il est ainsi possible de calculer à partir de l'équation [II-61] un coefficient de nébulosité $\alpha_n(t)$ représentant la part de l'éclairement sous ciel clair qui est effectivement transmise en prenant en compte les effets de nébulosité :

$$\alpha_n(t) = \frac{E_{0,CLO,c}(t)}{E_{0,CLO,m}(t)} \quad \text{[II-61]}$$

Ce coefficient est alors inclus dans l'équation [II-60] pour donner l'équation [II-62], afin de calculer l'éclairement de courte longueur d'onde $E_{CLO,e,i}(t)$ après les inter-réflexions produit par l'environnement urbain en prenant en compte la nébulosité du ciel.

$$\rho_{CLO,i} E_{CLO,e,i}(t) - \sum_{j=0}^{N_S} F_{ji} \rho_{CLO,j} E_{CLO,e,j}(t) = \alpha_n(t) E_{0,CLO,T,i}(t) \quad \text{[II-62]}$$

II.3.4 Éclairement de grande longueur d'onde

La maquette du quartier représente l'environnement urbain comme un assemblage de surfaces, chacune isotherme, formant une enceinte fermée en incluant le ciel. Afin de compléter l'évaluation du rayonnement, il est nécessaire de calculer les éclairements de grande longueur d'onde induits par les différences de température entre chacune de ces surfaces. En milieu urbain, la plupart des corps ont une émissivité très proche de 1 dans le domaine des grandes longueurs d'onde. Cette hypothèse est souvent utilisée dans les modèles de thermique du bâtiment pour assimiler le comportement radiatif dans le domaine infrarouge des parois à celui d'un corps noir (Perez Sanchez, 1989). Chaque surface de la maquette échange du rayonnement de grande longueur d'onde avec chacune des autres surfaces, ciel y compris. Nous proposons d'utiliser cette

hypothèse pour calculer l'expression de l'éclairement de grande longueur d'onde reçu par la surface i depuis l'environnement extérieur :

$$E_{GLOe,i} = \sum_{j=1}^{Ns} \sigma F_{ij} (T_{se,j}(t)^4 - T_{se,i}(t)^4) \quad [\text{II-63}]$$

Où :

- N_s est le nombre de surfaces isothermes composant l'environnement urbain
- $T_{se,i}$ est la température de surface de la surface isotherme i

En considérant des différences relativement faibles entre les températures de surface, l'approximation suivante peut être effectuée :

$$(T_{se,j}(t)^4 - T_{se,i}(t)^4) \cong 4T_{sme}^3 (T_{se,j}(t) - T_{se,i}(t)) \quad [\text{II-64}]$$

Où T_{sme} peut être approximée par la température de l'air extérieur. L'équation [II-63] peut alors être linéarisée sous la forme suivante :

$$E_{GLOe,i} = \sum_{j=1}^{Ns} \sigma 4T_{sme}^3 F_{ij} (T_{se,j}(t) - T_{se,i}(t)) \quad [\text{II-65}]$$

Ou encore :

$$E_{GLOe,i} = \sum_{j=1}^{Ns} h_{re} F_{ij} (T_{se,j}(t) - T_{se,i}(t)) \quad [\text{II-66}]$$

Avec $h_{re} = 4\sigma T_{sme}^3$

Dans le cas où j représente le ciel, F_{ij} représente la part de l'énergie quittant i et qui est perdue dans le ciel, et $T_{se,j}$ est la température du ciel qui est calculée grâce à l'équation [II-26].

Les différents modèles présentés permettent de modéliser les échanges radiatifs de courtes et de grandes longueurs d'onde en prenant en compte l'influence du milieu urbain. Cette modélisation est essentielle pour déterminer les formes urbaines permettant de maintenir les conditions de confort des occupants en favorisant les apports solaires. Pour modéliser les besoins énergétiques des bâtiments, il est nécessaire de coupler tout les modes de transferts thermiques, soit par

convection, conduction et rayonnement. En milieu urbain, les différences d'échelles des différents processus physiques intervenant et les nombreux paramètres intervenant, rendent ce couplage complexe. La modélisation de ce couplage peut donc nécessiter des temps de calcul importants, nous présentons dans la section suivante comment le réaliser à l'aide d'un modèle numérique simplifié.

Chapitre III. Modélisation couplée du microclimat urbain et des besoins énergétiques des bâtiments

La simulation des besoins énergétiques d'un ensemble de bâtiments au niveau d'un quartier nécessite d'une part de modéliser le comportement thermique des bâtiments, et d'autre part de modéliser les conditions microclimatiques extérieures résultant de l'interaction entre ces bâtiments et leur environnement. Il en découle un couplage complexe faisant intervenir des échelles spatiales différentes, allant des processus thermiques internes aux bâtiments aux phénomènes microclimatiques se produisant à l'échelle du quartier. Nous présentons dans ce chapitre la méthodologie et les modèles retenus pour pouvoir coupler la modélisation des différents flux à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments formant un quartier.

III.1 Modélisation thermoaéraulique du microclimat urbain

La modélisation du microclimat au niveau d'un quartier se traduit par le calcul des champs de température et des champs de vitesse d'air en milieu urbain. Pour l'étude des différents modes de transferts dans un volume d'air, la résolution des équations de la mécanique des fluides par la technique de Dynamique des Fluides Numérique (CFD) est sans doute la technique la plus précise. En résolvant les équations de conservation de la masse, de l'énergie et de la quantité de mouvement, cette technique permet de modéliser avec précision la température, la vitesse ou l'humidité d'un fluide en mouvement. Dans le cadre de la modélisation du microclimat urbain, cette technique a permis de modéliser avec précision les champs de vitesse (Chen, 2004) et de température (Li et al., 2005) autour d'un ou plusieurs bâtiments. Elle a permis ainsi d'évaluer le confort des piétons en milieu urbain (Mochida et Lun, 2008; Chen et al., 2004), d'étudier l'impact de l'espace végétal sur la température de l'air en ville (Yu et Hien, 2006) ou l'influence de l'environnement extérieur sur les performances énergétiques des bâtiments (He et al., 2009; Bouyer, 2009). Cependant, ces techniques nécessitent des temps de calcul importants, un maillage raffiné et une grande capacité de stockage des données. De nombreuses méthodes existent pour simplifier la modélisation des transferts thermoaérauliques. Leur utilisation permet de réaliser des simulations sur de longues périodes ou pour de grands ensembles. Des solutions basées sur la réduction de modèles, telles que la réduction spectrale, la réduction phénoménologique ou la méthode inverse sont couramment utilisées en mécanique des fluides. Ces méthodes permettant de réduire sensiblement les temps de calcul ont par exemple été utilisées pour l'étude de la ventilation naturelle d'un bâtiment en modélisant les champs de vitesse à l'intérieur et à l'extérieur (Bastide et al., 2004). En ne résolvant que les équations de la conservation de la masse et de l'énergie, les modèles zonaux ont permis de simplifier les calculs afin de prédire les conditions de confort thermique dans le bâtiment. Ces modèles initialement bidimensionnels ont été utilisés pour modéliser la stratification thermique engendrée par un système de chauffage dans un local (Inard et al., 1996). Le volume de la pièce étudiée est partitionné en sous-volumes ou zones, dans lesquels les grandeurs d'état (température et pression) sont supposées être constantes, et entre lesquels les transferts de masse et d'énergie sont déterminés à partir des lois de bilan intégrées ou de lois empiriques. Une étude comparative entre différents modèles zonaux et une résolution CFD a montré la bonne capacité qu'ont les modèles zonaux à représenter la stratification thermique dans une pièce (Inard et Buty, 1991). La méthode zonale a ensuite été enrichie pour des modèles plus complets tridimensionnels pour l'étude du confort thermique et de la qualité de l'air (Wurtz et Nataf, 1995; Musy, 1999). Plus récemment des modèles zonaux bidimensionnels ont été développés pour étudier l'impact du microclimat urbain sur la charge thermique des

bâtiments formant une rue canyon (De la Flor et Domínguez, 2004; Bozonnet, 2005). Le volume d'air de la rue canyon est divisé en sous volumes (Figure 29) où les débits massiques entre chaque zone sont déterminés à partir de lois empiriques décrivant l'écoulement de l'air dans une rue canyon à partir des caractéristiques du vent au niveau de la toiture (Kaplan et Dinar, 1996). Le champ de température est alors modélisé à partir des débits à travers chacune de ces zones.

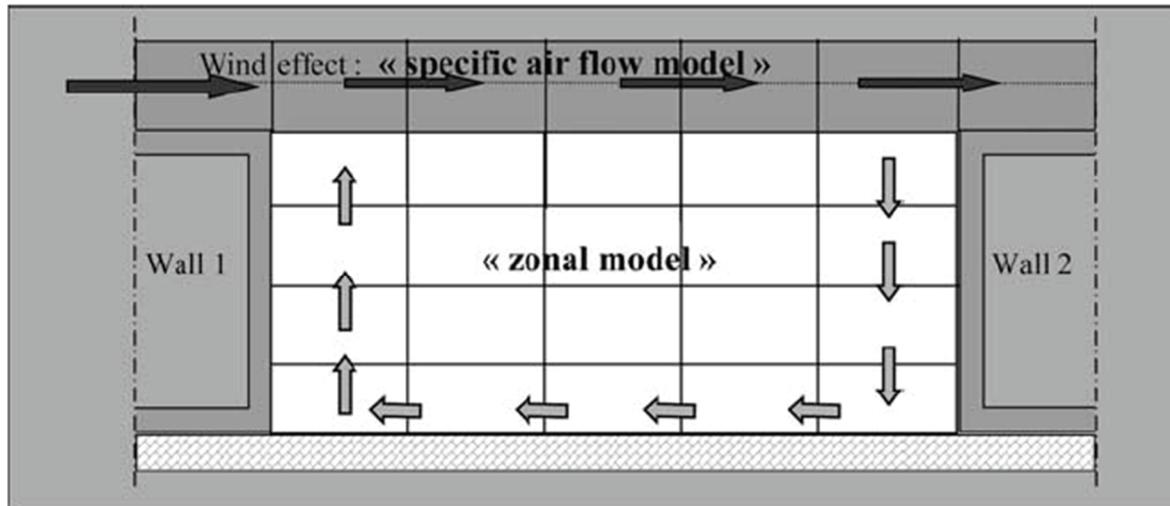


Figure 29 : Représentation d'un modèle zonal utilisé pour une rue canyon (De la Flor et Domínguez, 2004)

Cette méthodologie a permis de mettre en évidence la stratification thermique au sein de la rue canyon et l'impact qu'elle peut avoir sur les charges thermiques des bâtiments associés.

Afin de modéliser les champs de température autour de bâtiments formant une géométrie différente de la rue canyon, ce modèle bidimensionnel n'est plus applicable. Nous proposons donc de développer une méthodologie similaire en développant un modèle zonal tridimensionnel pouvant être appliqué à des espaces urbains à géométrie variée. L'objectif est de décrire convenablement les champs de température à l'intérieur de la canopée urbaine pour que ces données puissent servir comme condition limite dans la modélisation des besoins énergétiques des bâtiments. Nous décrivons dans cette section la méthodologie utilisée pour développer ce modèle.

Le logiciel QUIC (Bowker, 2004), a été développé pour calculer les champs de vitesse en milieu urbain. Ce modèle basé sur des lois empiriques, permet de considérablement simplifier les calculs. L'utilisation de la CFD, ou des modèles réduits associés, résolvant l'ensemble des équations de la mécanique des fluides pour obtenir avec précision les champs de vitesse n'est alors plus nécessaire. Après avoir présenté le fonctionnement général du modèle développé dans QUIC,

nous présenterons comment utiliser les données calculées pour pouvoir réaliser une modélisation de type zonal des champs de température au niveau de la canopée urbaine.

III.1.1 Modélisation aéraulique en milieu urbain

III.1.1.1 Champs de vitesse en milieu urbain

Traditionnellement, un profil logarithmique est utilisé pour représenter le profil moyen vertical de la vitesse d'air due au vent dominant. Du fait de la forte discontinuité du tissu urbain, l'écoulement de l'air est perturbé à l'abord des bâtiments, modifiant le profil moyen vertical de vitesse d'air dans la canopée urbaine (Figure 30). Au-delà, dans la zone de mélange, le profil de vitesse du vent peut à nouveau être considéré comme celui d'un site homogène. Nous présentons ici les divers modèles développés dans la littérature permettant le calcul d'un profil vertical de vitesse du vent suivant la hauteur z et la direction du vent dominant.

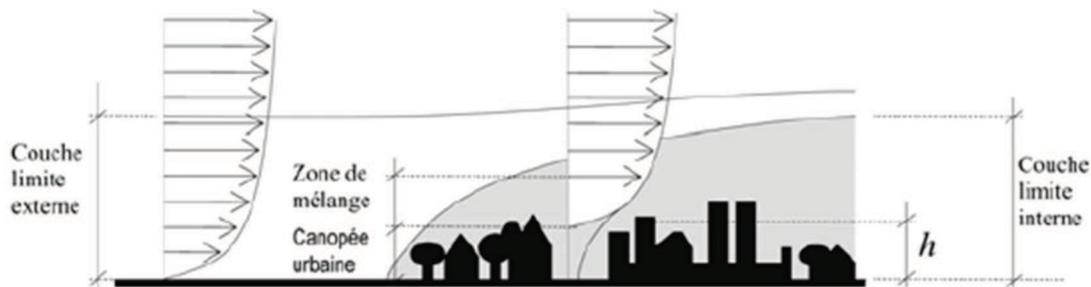


Figure 30 : Profil moyen de la vitesse horizontale du vent dominant en site homogène et en site urbain (Plate et Kiefer, 2001)

Le modèle le plus simple est construit à partir d'un profil exponentiel donnant la vitesse u_0 à l'altitude z en fonction d'une vitesse de référence d'intensité u_{ref} prise à l'altitude z_{ref} et d'un coefficient exp .

$$u_0(z) = u_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^{exp} \quad [III-1]$$

Où exp est un coefficient empirique qui dépend de la stabilité de l'atmosphère, variant entre 0,21 et 0,41 (Counihan, 1973).

Il est aussi possible de définir l'écoulement du vent à partir d'un profil logarithmique défini à partir de z_0 , la longueur de rugosité du site (Nicholson, 1975). Cette variable traduit l'effet de la rugosité des surfaces sur le profil de vitesse du vent. C'est l'altitude à laquelle la vitesse moyenne serait nulle si le profil de vitesse de vent suivait exactement la loi logarithmique :

$$u_0(z) = u_{ref} \frac{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad \text{[III-2]}$$

Un profil plus élaboré a été développé pour prendre en compte la différence entre la canopée urbaine et la zone de mélange. Dans la zone inférieure, à savoir pour z situé sous la hauteur maximale des bâtiments H_{bat} , les vitesses d'air sont calculées à l'aide de l'équation [III-3] (Macdonald, 2000).

$$u_0(z) = u(H_{bat}) \exp\left(A \left(\frac{z}{H_{bat}} - 1\right)\right) \quad \text{[III-3]}$$

Où A est un coefficient d'atténuation dépendant de la densité de construction.

Pour z au dessus de H_{bat} , tout se passe comme si du point de vue aérodynamique le niveau du sol se trouvait surélevé d'une hauteur d appelée hauteur de déplacement. Pour représenter le profil vertical de vitesse du vent, on utilise l'équation [III-2] en effectuant un changement de coordonnées soit en décalant les altitudes de d comme indiqué dans l'équation [III-4].

$$u_0(z) = u_{ref} \frac{\ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref}}{z_0}\right)} \quad \text{[III-4]}$$

Ces profils permettent de calculer un profil vertical de vitesse de vent moyen en site urbain. Leur utilisation diffère en fonction des données disponibles sur le domaine de modélisation. Les différents coefficients empiriques utilisés exp , A et z_0 , devant être évalués au préalable. Pour calculer les champs de vitesse juste autour des bâtiments d'autres lois sont nécessaires. Nous proposons de présenter les différentes lois empiriques développées à cet effet dans la section suivante.

III.1.1.2 Champs de vitesse autour de bâtiment

Lorsque le vent dominant s'écoule autour d'un bâtiment de forme parallélépipédique, perpendiculairement à une des façades, différentes zones perturbées peuvent être distinguées. Ces zones d'écoulement ont pu être décrites à l'aide de relations empiriques dépendant de la géométrie du bâtiment, de la direction et de l'intensité du vent dominant (Rockle, 1990).

III.1.1.2.1 Zone autour d'un bâtiment isolé

A partir des travaux de Rockle, 3 zones d'écoulement principales sont différenciées autour d'un

bâtiment, lorsque le vent à une incidence normale à la façade du bâtiment, Figure 31:

- une cavité frontale ;
- une cavité d'écoulement inversé ;
- une zone de cisaillement.

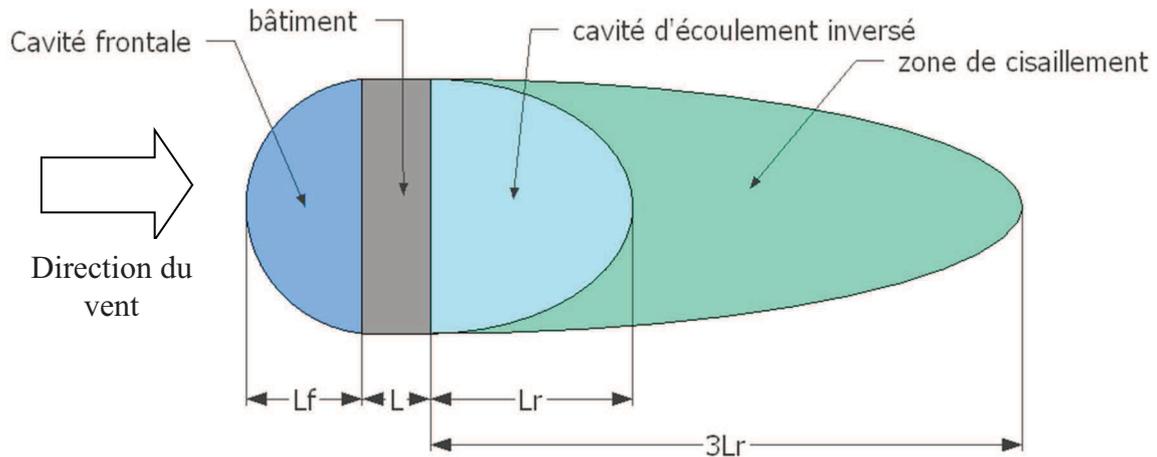


Figure 31 : Représentation des différentes zones d'écoulement autour d'un bâtiment isolé

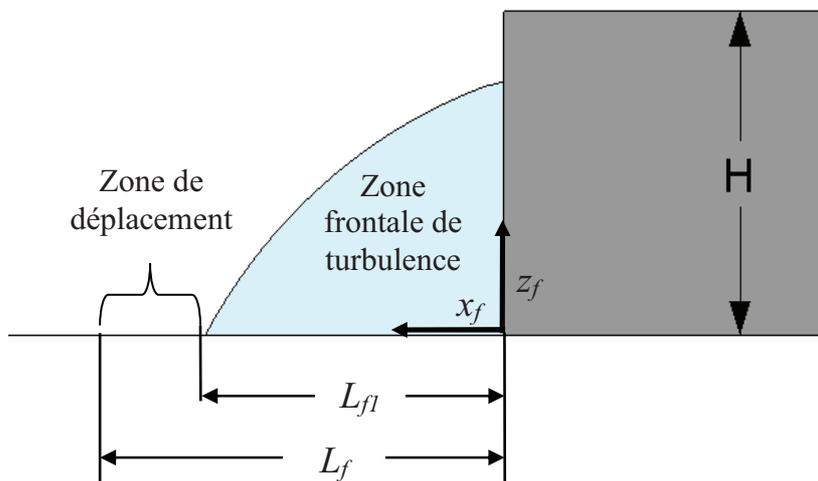


Figure 32 : Schéma des différents paramètres de la cavité frontale

Initialement dans le modèle de Rockle les vitesses étaient imposées à zéro dans la zone frontale. En comparant avec des mesures expérimentales de Snyder et Lawson (1994), cette zone a été décomposée en deux sous-zones, la zone de déplacement et la zone de turbulence comme

présenté sur la Figure 32 (Bagal et al., 2003). Ces deux sous-zones sont définies à partir des paramètres L_{f1} et L_f dont les valeurs sont calculées grâce aux équations [III-5] et [III-6].

$$L_{f1} = \frac{0,6 \frac{W}{H}}{\left(1 + 0,8 \frac{W}{H}\right)} \quad \text{[III-5]}$$

$$L_f = \frac{1,5 \frac{W}{H}}{\left(1 + 0,8 \frac{W}{H}\right)} \quad \text{[III-6]}$$

Dans la zone de déplacement, les vitesses d'air sont réduites sans subir un changement d'orientation, elles sont alors calculées grâce à l'équation [III-7].

$$u_0(z) = 0,4u_0(H) \left(\frac{z}{H}\right)^{0,16} \quad \text{[III-7]}$$

Dans la cavité frontale de turbulence, les vitesses d'air subissent un changement de direction et d'intensité. Les vitesses selon l'axe x (Figure 32) sont alors calculées par l'équation [III-8] et les vitesses selon z à l'aide de l'équation [III-9] (Bagal et al., 2003).

$$u_0 = u_0(H) \left(0,6 \cos\left(\frac{\pi z_f}{0,5H}\right) + 0,05\right) \left(-0,6 \sin\left(\frac{\pi x_f}{L_{f1}}\right)\right) \quad \text{[III-8]}$$

$$w_0 = u_0(H) \left(-0,1 \cos\left(\frac{\pi x_f}{L_{f1}}\right) - 0,05\right) \quad \text{[III-9]}$$

Où x_f et z_f sont les distances depuis la base du bâtiment selon x et z , (Figure 32).

La longueur de la cavité d'écoulement inversé L_r , (Figure 31) a été formulée par Röckle par :

$$L_r = \frac{1,8W}{\left(1 + 0,24 \frac{W}{H}\right) \left(\frac{L}{H}\right)^{0,3}} \quad \text{[III-10]}$$

Dans la cavité d'écoulement inversé les vitesses u_0 et v_0 sont alors calculées grâce aux équations [III-11] et [III-12] :

$$\frac{u_0}{u_0(H)} = - \left[1 - \left(\frac{x_r}{d(y_r, z_r)}\right)^2\right] \quad \text{[III-11]}$$

$$\frac{v_0}{v_0(H)} = - \left[1 - \left(\frac{x_r}{d(y_r, z_r)} \right)^2 \right] \quad \text{[III-12]}$$

avec :

$$d(y_r, z_r) = L_r \sqrt{\left[1 - \left(\frac{z_r}{H} \right)^2 \right] \left[1 - \left(\frac{y_r}{W} \right)^2 \right]} - \frac{L}{2} \quad \text{[III-13]}$$

où x_r , y_r et z_r sont les distances depuis la base du bâtiment selon les directions x, y et z du côté opposé à la direction du vent.

La zone de cisaillement correspond au domaine où x est compris entre L_r et $3L_r$. Dans la zone de cisaillement les vitesses u_0 et v_0 sont définies par les équations [III-14] et [III-15] :

$$\frac{u_0}{u_0(H)} = \left[1 - \left(\frac{d(y_r, z_r)}{x} \right)^{1,5} \right] \quad \text{[III-14]}$$

$$\frac{v_0}{v_0(H)} = \left[1 - \left(\frac{d(y_r, z_r)}{x} \right)^{1,5} \right] \quad \text{[III-15]}$$

III.1.1.2.2 Zone dans une rue canyon

Lorsque deux bâtiments sont proches l'un de l'autre, il y a interférence entre les différentes zones d'écoulement propre à chaque bâtiment. En fonction de la largeur de la rue S (Figure 33(b)) les zones de recirculation précédemment décrites peuvent se combiner pour former une nouvelle zone de circulation. L'écoulement est alors de type rasant.

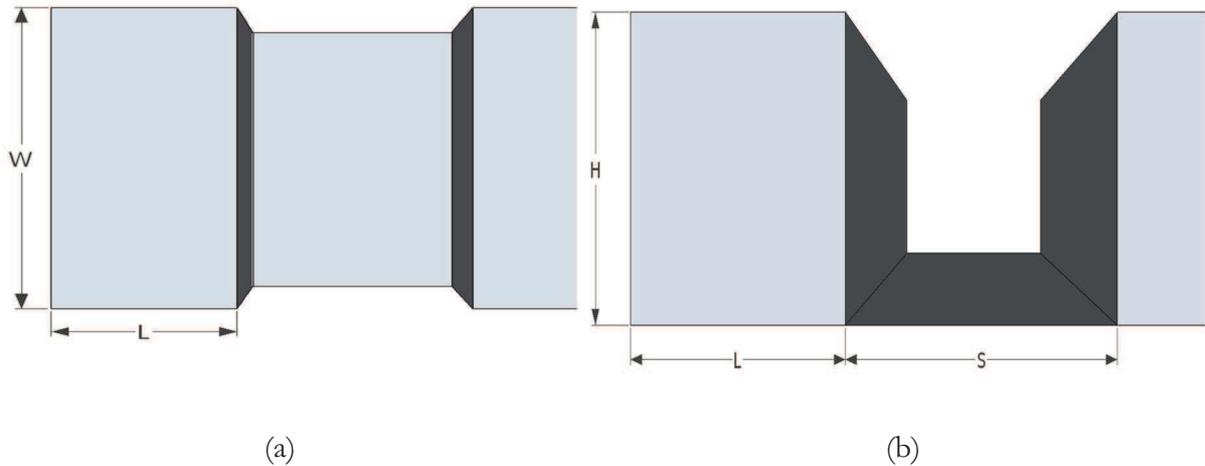


Figure 33: Paramètres géométriques caractérisant une rue canyon (vue de dessus (a), vue de profil (b))

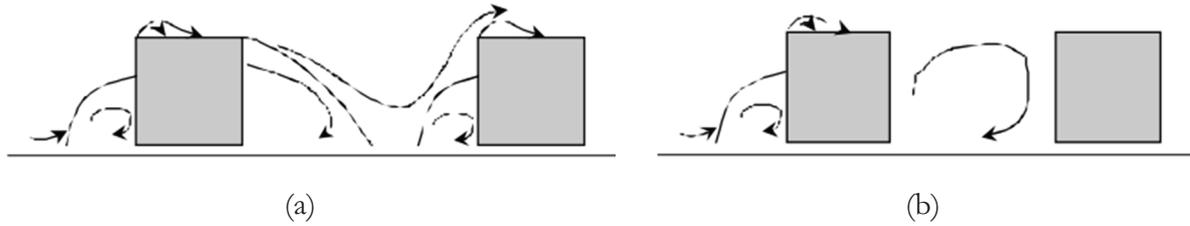


Figure 34 : Les différents types d'écoulement dans une rue canyon : rugosité isolée (a) et rasant (b) (Oke, 1987)

Lorsque l'écoulement est de type rugosité isolée (Figure 34 (a)) les vitesses de vent sont calculées à partir des lois énoncées précédemment, équations [III-5] à [III-15]. Lorsque l'écoulement est de type rasant (Figure 34 (b)), la vitesse dans la rue canyon est calculée en fonction de la position dans la rue canyon, elle-même caractérisée par la distance d (Figure 35).

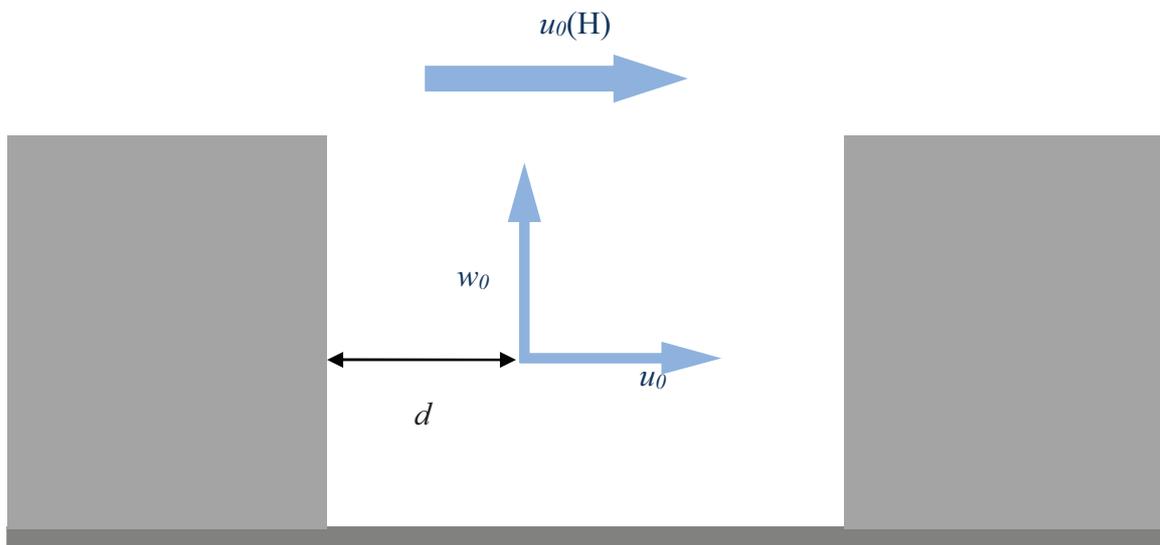


Figure 35 : Représentation des paramètres permettant le calcul des composantes u et v de la vitesse dans une rue canyon à partir des lois empiriques développées par Rockle (Rockle, 1990)

Les composantes de la vitesse d'air dans la rue canyon sont calculées à partir des équations [III-16] et [III-17] issues des travaux de Rockle (Rockle, 1990) :

$$\frac{u_0}{u_0(H)} = -\frac{d}{(0.5S)} \left(\frac{S-d}{0.5S} \right) \quad \text{[III-16]}$$

$$\frac{w_0}{u_0(H)} = -\left| \frac{1}{2} \left(1 - \frac{d}{0.5S} \right) \right| \left(1 - \frac{S-d}{0.5S} \right) \quad \text{[III-17]}$$

III.1.2 Présentation de l'outil QUIC

En ville, la majorité des bâtiments peut être représentée comme un assemblage de formes parallélépipédiques, ce qui permet d'utiliser les différentes lois empiriques présentées précédemment pour calculer des champs de vitesse continus en milieu urbain. Bien que ces modèles soient basés sur des équations assez simples, cette approche permet d'avoir une bonne précision sur les écoulements aérauliques. Ces modèles ont été utilisés et améliorés au sein du laboratoire Los Alamos au Etats-Unis pour pouvoir développer le logiciel QUIC (Quick Urban & Industrial Complex). Cet outil permet de calculer des champs de vitesse en milieu urbain autour d'un ensemble d'obstacles à partir de données météorologiques donnant la vitesse et l'orientation du vent. Pour réaliser la modélisation des écoulements aérauliques en milieu urbain, l'environnement urbain est représenté à l'aide d'un maillage hexaédrique rectangulaire.

Cet outil a été créé dans le but de pouvoir modéliser la diffusion d'agent pathogène se propageant par voie aérienne en milieu urbain et leur impact sur la population, c'est pourquoi il est formé de trois sous modules, QUIC-URB, QUIC-PLUME, et QUIC-PRESSURE dont les caractéristiques sont les suivantes.

QUIC-URB est un modèle permettant de calculer les écoulements d'air autour des bâtiments en utilisant soit des données de vent issues de fichiers météorologiques standards soit des données météorologiques mesurées in situ. En représentant le milieu urbain comme un ensemble de volumes géométriques simples, les différents modèles empiriques développés dans la littérature sont utilisés pour construire un modèle tridimensionnel d'écoulement de vent respectant la conservation de la masse. La canopée urbaine est divisée en plusieurs zones d'écoulement dépendant de la géométrie urbaine et de la direction du vent. Chaque zone est alors associée à une loi empirique permettant d'initialiser les 3 composantes de la vitesse u_0 , v_0 et w_0 . Un algorithme développé par Sherman (Sherman, 1978) est ensuite utilisé pour obtenir un champ de vitesse respectant l'équation de continuité (Kaplan et Dinar, 1996; Kastner-Klein et al., 2004). Les différents volumes sont caractérisés par un coefficient d'atténuation ce qui permet de calculer les vitesses d'air à travers différents types de végétation et donc de prendre en compte leur impact dans la modélisation des champs de vitesse (Nelson et al., 2009).

QUIC-PLUME est un modèle de dispersion lagrangien qui permet de calculer des champs de concentration de différents composants autour des bâtiments. Les champs de vitesse calculés à partir du module QUIC-URB sont utilisés pour simuler la répartition d'agents chimiques, biologiques ou radiologiques (Kastner-Klein et al., 2004).

QUIC-PRESSURE utilise les champs de vitesse issus de QUIC-URB pour calculer à partir de l'équation de Poisson des champs de pression. Ce procédé permet de calculer des champs de pression à l'intérieur et à l'extérieur des bâtiments, la pression exercée par le vent sur les parois des bâtiments ainsi que les coefficients de pression associés. Les comparaisons de ces modèles avec des mesures expérimentales et des simulations plus fines de type CFD ont permis de mettre en évidence la justesse des modèles utilisés (Gowardhan et al., 2006).

III.1.3 Développement d'un modèle thermoaéraulique urbain basé sur la méthode zonale

Afin de modéliser les champs thermiques dans la canopée au niveau du quartier, nous cherchons à partitionner le volume d'air étudié en sous volume de forme basique à l'intérieur desquels la température d'air est supposée constante. Le but est de représenter chacun de ces sous volumes, ou zone thermoaéraulique, sous la forme d'un polyèdre constitué de plusieurs faces n .

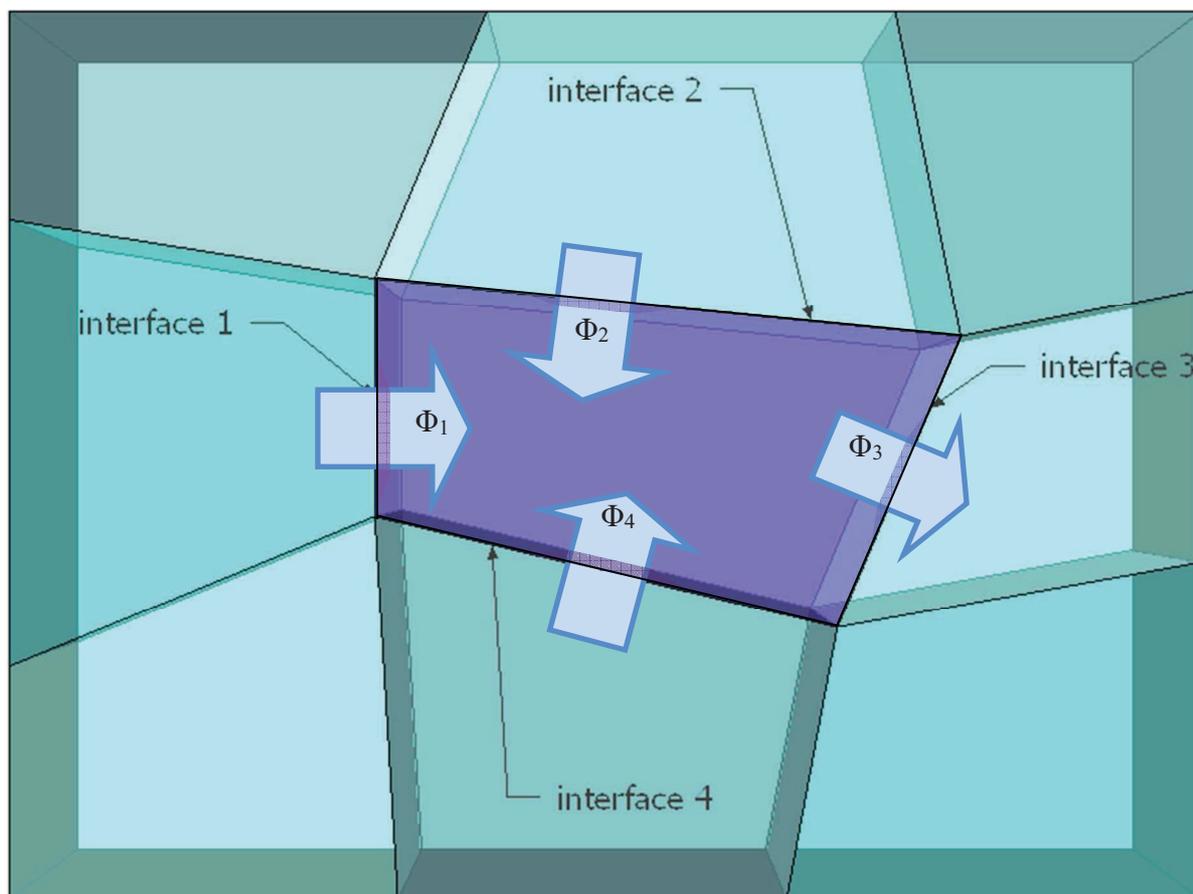


Figure 36 : Représentation des flux thermiques aux interfaces d'une zone

Chacune de ces faces n étant soit une interface avec les zones voisines (Figure 36) soit une interface entre une zone et une surface urbaine (parois constituant les bâtiments ou le sol). Des

bilans thermique et massique en considérant les flux aux interfaces (Figure 36) permettent alors de calculer la température à l'intérieur d'une zone.

III.1.3.1 Bilan thermique d'un volume d'air

Le bilan thermique de chaque zone thermoaéraulique indexée k s'écrit :

$$\rho C_p V_k \frac{dT_k}{dt} = \sum_n \phi_{k,n} + P_{conv} \quad \text{[III-18]}$$

Avec :

- ρ masse volumique de l'air [kg/m³]
- C_p capacité calorifique de l'air [J/(kg.K)]
- V_k volume de la zone k [m³]
- P_{conv} source de chaleur convective dans la zone i [W]
- $\Phi_{k,n}$ flux de chaleur entrant dans la zone k par l'interface n [W]
- T_k température de l'air dans la zone k [°C]

Si n est une interface entre deux zones d'air indicées k et j , et si le débit massique d'air Q_n [kg/s] à travers cette interface est compté positivement, entrant dans la zone k , $\Phi_{k,n}$ est alors proportionnel à la température T_j de la zone j :

$$\phi_{k,n} = C_p Q_n T_j \quad \text{[III-19]}$$

Lorsque le débit massique est compté négativement, sortant de la zone k , $\Phi_{k,n}$ est alors proportionnel à la température T_k de la zone k :

$$\phi_{k,n} = C_p Q_n T_k \quad \text{[III-20]}$$

Si n est à l'interface d'une surface matérielle, il y a alors transfert thermique par convection entre la surface et la zone d'air, ce qui se traduit par :

$$\phi_{k,n} = h_{ce,i} S_i (T_{se,i} - T_k) \quad \text{[III-21]}$$

Avec :

- S_i surface de la paroi i en contact avec la maille k [m²]
- $T_{se,i}$ température de la surface urbaine au niveau de l'interface n [°C]
- $h_{ce,i}$ coefficient d'échange superficiel convectif de la surface i [W/m²K]

III.1.3.2 Bilan massique

Pour une zone d'air composée de N_n interfaces, la conservation de la masse s'exprime par :

$$\sum_{n=0}^{N_n} Q_n = 0 \quad \text{[III-22]}$$

Pour calculer les débits à travers les interfaces, nous utilisons les données calculées avec le logiciel QUIC à savoir le champ de vitesse continu en milieu urbain. Ainsi, ces vitesses sont utilisées pour en déduire des débits entrants et sortants dans des zones de contrôle pour pouvoir y appliquer une méthode de type zonale et calculer la température d'air. Nous nous proposons de décrire la démarche suivie pour calculer les débits massiques entre chaque zone à partir des données extraites de QUIC, pour pouvoir ensuite modéliser les transferts thermoaérauliques en milieu urbain.

III.1.3.3 Définition d'un maillage adapté

En utilisant les résultats issus du logiciel QUIC pour réaliser des calculs de champs de température, il est important de distinguer la modélisation des phénomènes aérauliques et la modélisation des phénomènes thermiques. Traditionnellement en thermique du bâtiment, la discrétisation se limite à différencier les parois qui ont des orientations, des inclinaisons ou des caractéristiques thermophysiques différentes. La modélisation des phénomènes thermiques ne nécessite donc pas une discrétisation raffinée. La modélisation des vitesses d'air dépend de la géométrie des obstacles à l'écoulement aéraulique, et nécessite une discrétisation plus fine que les phénomènes radiatifs (Ma et al., 2012).

Afin de simplifier les calculs, nous proposons de garder un maillage assez large, soit une maille par paroi, pour la modélisation des phénomènes thermiques et d'utiliser un maillage plus raffiné pour la modélisation des écoulements aérauliques. Nous expliquons dans cette section comment sont définis ces deux maillages et comment ils sont couplés.

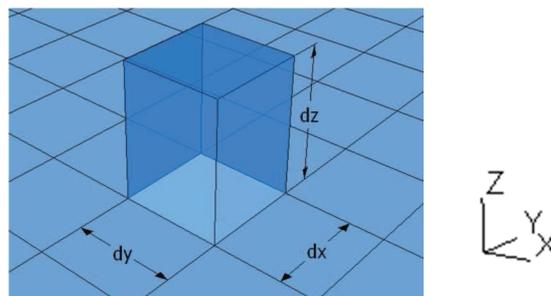


Figure 37 : Représentation des paramètres géométriques d'une maille QUIC

Le maillage aéraulique utilisé dans QUIC, est un ensemble de polyèdres réguliers à base

rectangulaire dont les dimensions sont définies par dx , selon la direction x , dy , selon la direction y , et dz la hauteur de l'hexaèdre selon la direction z (Figure 37).

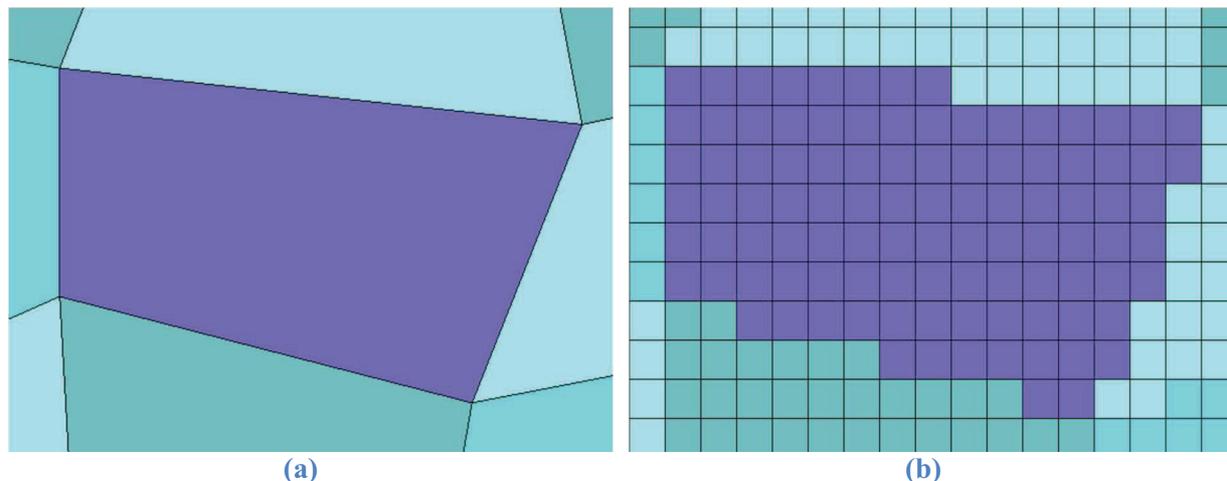


Figure 38 : Représentation d'une maille thermoaéraulique sur un plan XY (a) et décomposition en rectangles correspondant au maillage aéraulique (b)

Le maillage thermoaéraulique est représenté comme un mélange de prismes à base triangulaire et d'hexaèdre. Dans un plan XY les mailles thermoaérauliques sont représentées comme un ensemble de triangles et de quadrangles (Figure 38 (a)). Chacun des polygones composant le maillage peut être représenté comme un ensemble de rectangles dont les dimensions sont définies par le maillage aéraulique (Figure 38 (b)).

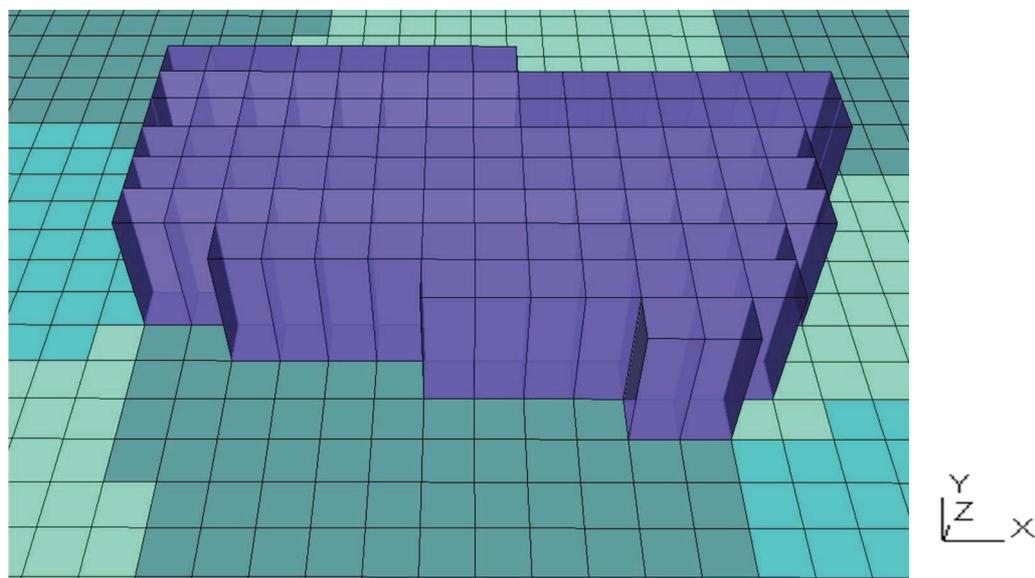


Figure 39 : Décomposition en trois dimensions d'une maille thermoaéraulique à l'aide de mailles aérauliques

En trois dimensions, la maille thermoaéraulique peut alors être représentée comme un ensemble de mailles hexaédriques accolées les unes aux autres (Figure 39).

Chaque interface d'une maille thermoaéraulique peut être décomposée en $N_{f_{qx}}$ faces x, parallèles au plan YZ, en $N_{f_{qy}}$ faces y, parallèles au plan XZ, et en $N_{f_{qz}}$ faces z, parallèles au plan XY (Figure 40). Pour calculer le débit traversant chacune de ces interfaces, il est nécessaire de calculer les débits massiques traversant chacune des faces des mailles aérauliques.

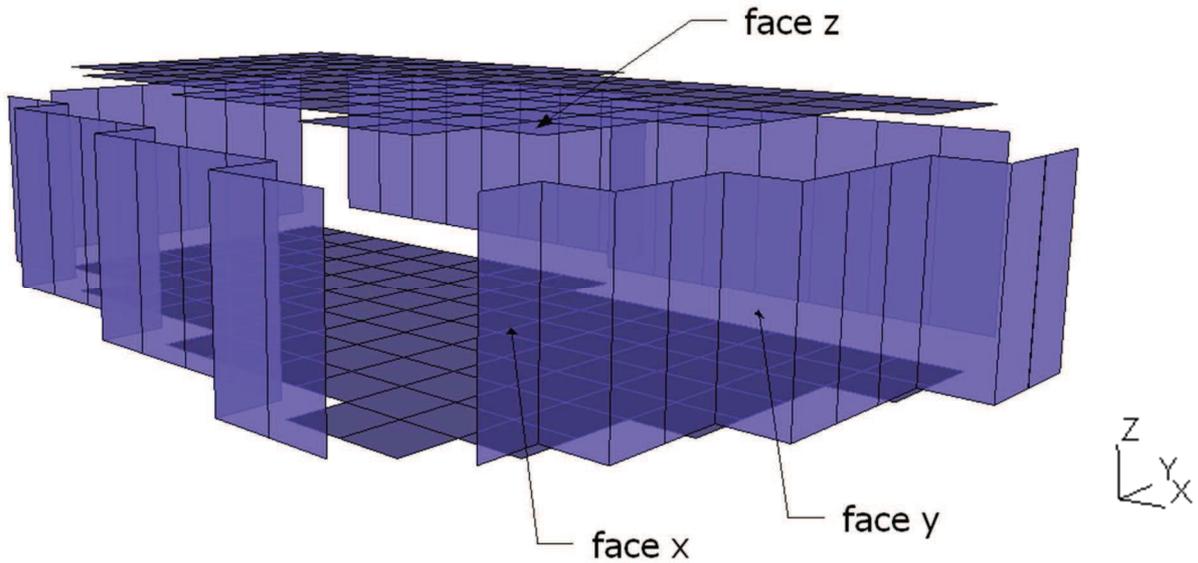


Figure 40 : Décomposition des interfaces du maillage thermoaéraulique en faces correspondant au maillage aéraulique

III.1.3.4 Calcul des débits pour une maille aéraulique

Le logiciel QUIC calcule les composantes de la vitesse u , v et w au centre de chaque maille. Afin de calculer les débits entrants et sortants dans les mailles thermoaérauliques, il est nécessaire de définir les débits traversant chaque face de chaque maille aéraulique en différenciant les débits selon les directions x, y et z. Dans un plan XY, la vitesse $u_{x,y,z}$ au centre de la maille aéraulique indexée x , y et z (selon les directions x, y et z) est utilisée pour calculer les débits $Du_{x,y,z}$ et $Du_{x+1,y,z}$ traversant chaque face parallèle au plan YZ (Figure 41).

Le débit volumique traversant la face parallèle au plan YZ, servant de frontière entre la maille $x-1, y, z$ et la maille x, y, z est calculé à l'aide de l'interpolation numérique suivante :

$$Du_{x,y,z} = \frac{(U_{x,y,z} + U_{x-1,y,z})}{2} dydz \quad \text{[III-23]}$$

Par identification, le débit volumique traversant la face parallèle au plan XZ, servant de frontière entre la maille $x, y-1, z$ et la maille x, y, z est calculé à l'aide de l'équation [III-24] et le débit volumique traversant la face parallèle au plan XY, servant de frontière entre la maille $x, y, z-1$ et la maille x, y, z est calculé à l'aide de l'équation [III-25].

$$Dv_{x,y,z} = \frac{(V_{x,y,z} + V_{x,y-1,z})}{2} dx dz \quad \text{[III-24]}$$

$$Dw_{x,y,z} = \frac{(W_{x,y,z} + W_{x,y,z-1})}{2} dx dy \quad \text{[III-25]}$$

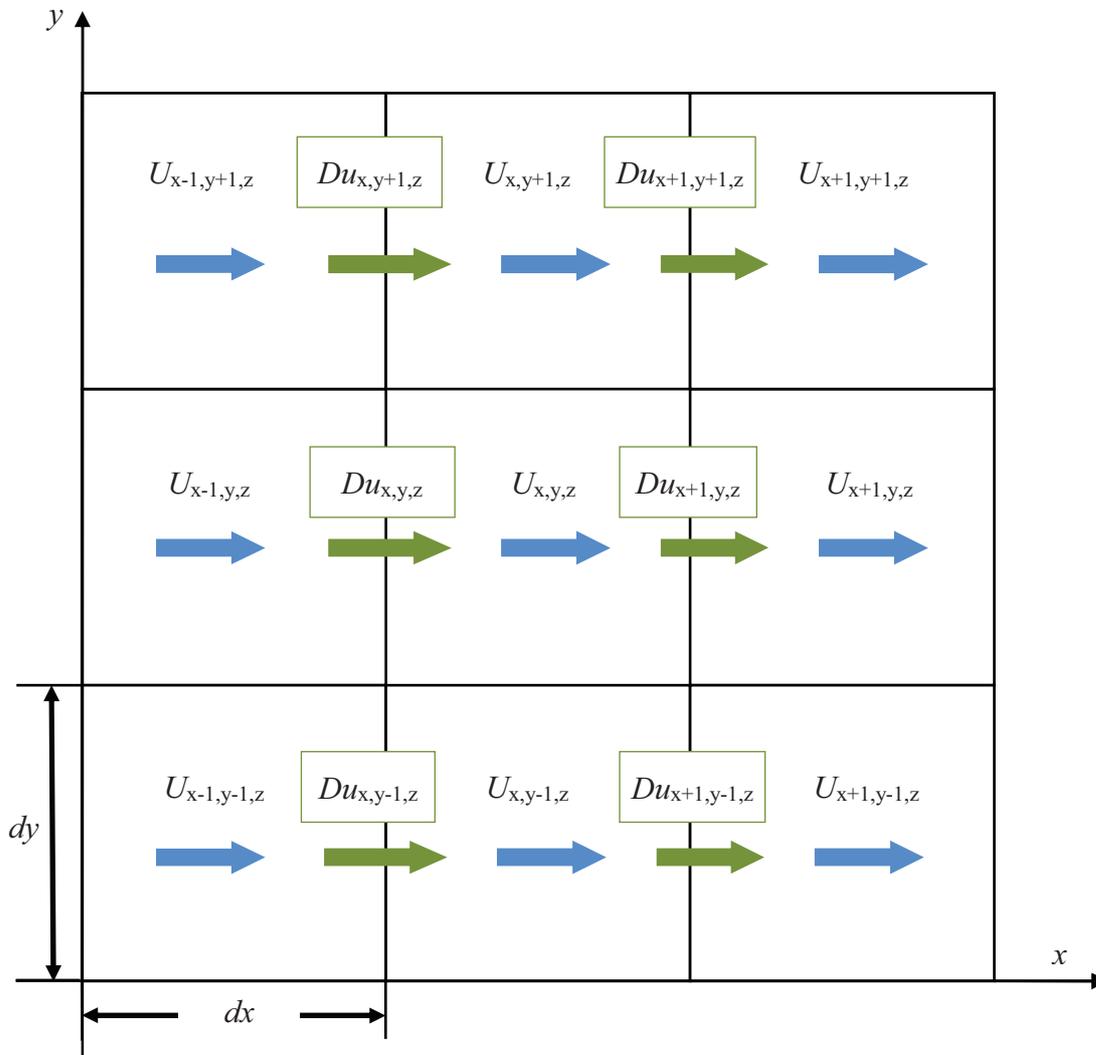


Figure 41: Composante u de la vitesse dans le maillage aéraulique selon le plan (X,Y)

La somme des débits sur chaque face de chaque maille aéraulique permet de réaliser le bilan massique $Q_{m,i}$ d'une maille aéraulique i :

$$Q_{m,i} = \rho(Du_{x,y,z} + Du_{x+1,y,z} + Dv_{x,y,z} + Dv_{x,y+1,z} + Dw_{x,y,z} + Dw_{x,y,z+1}) \quad [\text{III-26}]$$

Bien que ces interpolations numériques soit assez simples, elles permettent pour des mailles fines (dont les dimensions selon x et y sont de l'ordre de 0,5 m) d'avoir une erreur relative sur la conservation de la masse très réduite. Le bilan massique des mailles aérauliques réalisé à partir des équations [III-26] donne une erreur relative de l'ordre de 0,2% pour des vitesses de vent comprise entre 0 m/s et 10 m/s.

III.1.3.5 Calcul des débits pour les mailles thermoaérauliques

A partir de données météorologiques, le logiciel QUIC permet de calculer les composantes des vitesses u , v et w de chaque maille aéraulique. Ces résultats sont alors utilisés pour calculer les débits traversant chacune des faces de chaque maille aéraulique composant les interfaces des mailles thermoaérauliques. Le débit traversant l'interface n se calcul alors grâce à l'interpolation numérique [III-27].

$$Q_n = \rho \sum^{N_{fqx}} \frac{(U_{x,y,z} + U_{x-1,y,z})}{2} dydz + \rho \sum^{N_{fyz}} \frac{(V_{x,y,z} + V_{x,y-1,z})}{2} dx dz + \rho \sum^{N_{fyz}} \frac{(W_{x,y,z} + W_{x,y,z-1})}{2} dx dy \quad [\text{III-27}]$$

Le fait d'intégrer les vitesses issues de QUIC pour calculer les débits traversant les faces des mailles thermoaérauliques additionne les erreurs dues aux interpolations numériques et de ce fait la conservation de la masse n'est pas respectée dans les mailles thermoaérauliques. Nous proposons de présenter la méthodologie retenue pour corriger ce défaut de bilan. Cette correction est réalisée en redistribuant le résidu sur chaque interface au prorata de la surface. Une interface subit alors deux corrections de débit. Si les résidus nouvellement calculés ne sont pas nuls, le calcul précédent est réalisé jusqu'à obtenir des résidus nuls comme indiqué sur la Figure 42.

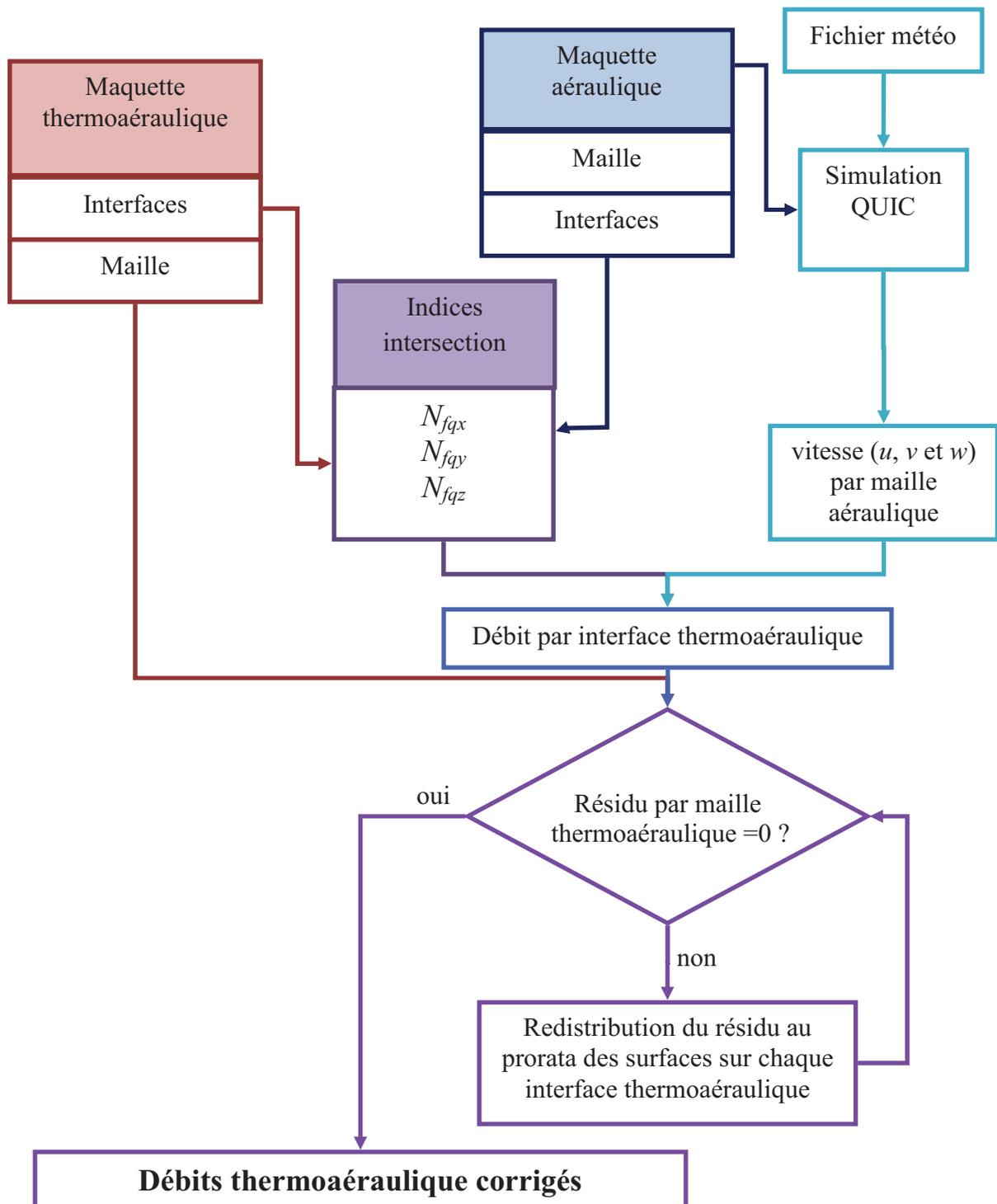


Figure 42: Processus du calcul des débits traversant les interfaces des mailles thermoaérauliques à partir des données météorologiques

III.1.4 Maquette numérique

Nous décrivons dans cette section la méthode qui permet de construire la maquette géométrique d'un quartier pour pouvoir y appliquer les modèles numériques développés. Nous avons vu qu'après avoir décomposé le sol urbain en un ensemble de triangles et de quadrangles, les empreintes des bâtiments ont été extrudées pour former un ensemble de volumes juxtaposés les uns sur les autres (Figure 25 dans la section II.3.1). Cette maquette représente le quartier comme un assemblage de faces formant le sol et les parois des bâtiments. Elle peut alors être utilisée pour calculer les températures de surface de chaque surface, et les besoins énergétiques de chaque bâtiment. Pour compléter le couplage entre le microclimat du quartier et les besoins énergétiques des bâtiments, il est nécessaire de discrétiser la canopée urbaine, soit l'air entourant les bâtiments, en sous volumes élémentaires afin d'y calculer les températures d'air extérieur. Pour construire ces sous volumes, soit les zones thermoaérauliques, la méthodologie décrite ci-après est utilisée pour construire une maquette volumique du quartier.

Les surfaces au sol, représentées sous forme de quadrangles et de triangles sont extrudées sur plusieurs couches jusqu'à atteindre la partie supérieure de la canopée comme représenté sur la Figure 43. L'air entourant les bâtiments est alors représenté comme une succession de strates identiques, chacune étant un assemblage de prismes à base triangulaire et d'hexaèdres. De la même manière, les surfaces horizontales représentant les toits des bâtiments sont extrudées jusqu'à la partie supérieure de la canopée. Ainsi, l'air au-dessus des bâtiments est aussi représenté comme une superposition de prismes et d'hexaèdres.

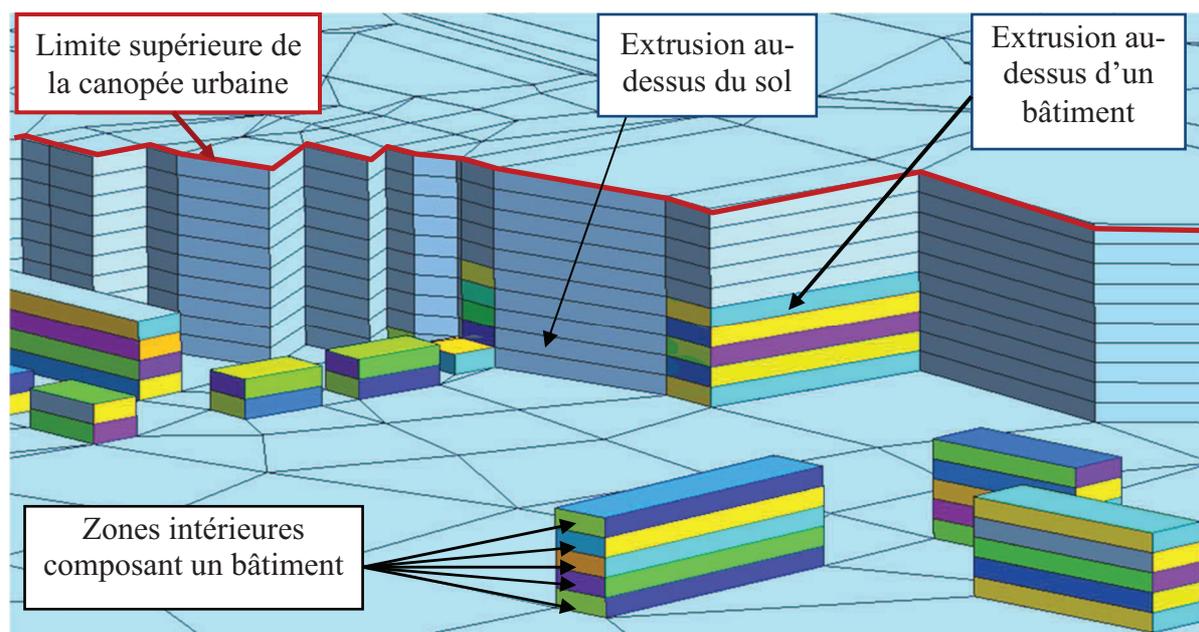


Figure 43 : Représentation du maillage utilisé pour le quartier Pin Sec

Comme on peut le voir sur la Figure 43, les bâtiments sont représentés comme un assemblage de sous volumes superposés les uns sur les autres, chacun correspondant à un étage du bâtiment. Afin d'uniformiser l'épaisseur des couches sur l'ensemble du quartier, les hauteurs des bâtiments sont uniformisées de telle sorte que les bâtiments et les sous volumes le constituant soient alignés avec les zones thermoaérauliques, avec une épaisseur e_m choisie de 3 m pour chaque couche. Ainsi, la hauteur de tous les bâtiments sera un multiple de 3. Ces adaptations géométriques permettent d'aligner tous les hexaèdres et prismes créés dans la maquette géométrique.

Le quartier est alors représenté par deux parties distinctes :

- un ensemble de couches composé de sous volumes qui sont soit des zones thermoaérauliques extérieures, soit des zones intérieures composant l'étage d'un bâtiment ;
- un ensemble de surface formant le sol et les parois des bâtiments en contact, chacune en contact avec un des sous volumes.

III.2 Bilan thermique des surfaces

Comme présenté sur la Figure 26, le quartier est représenté comme un ensemble de surfaces urbaines considérées isothermes. Afin de compléter la modélisation des différents flux au sein du milieu urbain il est nécessaire de calculer les températures de surface de chaque élément. Nous présentons le modèle développé pour réaliser ce calcul. L'ensemble des surfaces urbaines est soumis à 3 modes de transferts thermiques à savoir conduction, convection et rayonnement (solaire et infrarouge) (Figure 44).

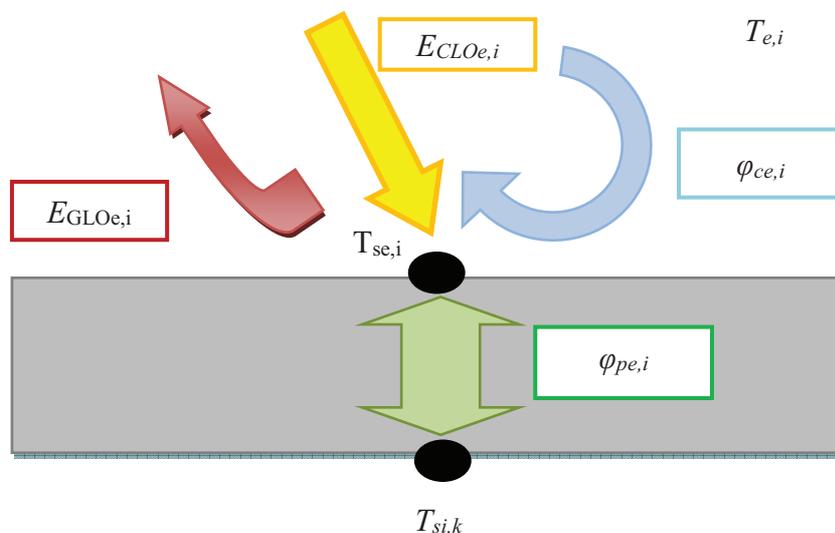


Figure 44 : Représentation des différents flux thermiques pour une surface urbaine i

L'équilibre thermique de chaque surface urbaine est décrit par l'équation :

$$\varphi_{ce,i}(t) + \varphi_{pe,i}(t) + E_{GLOe,i}(t) = E_{CLOe,i}(t) \quad [\text{III-28}]$$

$E_{CLOe,i}(t)$ est l'éclairement solaire reçu par la surface i

$E_{GLOe,i}(t)$ est l'éclairement échangé par rayonnement de grande longueur d'onde de la surface i

$\varphi_{pe,i}$ est la densité de flux échangée par conduction à travers la surface i .

$\varphi_{ce,i}$ est la densité de flux échangée par convection

III.2.1 Densité de flux convectif

La densité de flux $\varphi_{ce,i}$ est échangée par convection entre la surface i et l'air de la zone k avec laquelle la surface est en contact, elle s'exprime par :

$$\varphi_{ce,i}(t) = h_{ce,i} \left(T_{e,k}(t) - T_{se,i}(t) \right) \quad [\text{III-29}]$$

Selon la configuration géométrique de la maquette présentée précédemment, une surface peut être en contact avec plusieurs zones d'air. Dans ce cas $\varphi_{ce,i}$ est exprimée par :

$$\varphi_{ce,i}(t) = h_{ce,i} \left(\sum_{k=0}^{N_z} \frac{S_{i,k}}{S_i} T_{e,k}(t) - T_{se,i}(t) \right) \quad [\text{III-30}]$$

$S_{i,k}$ représente la surface d'échange entre la paroi i et la zone k , comme indiqué sur la Figure 45.

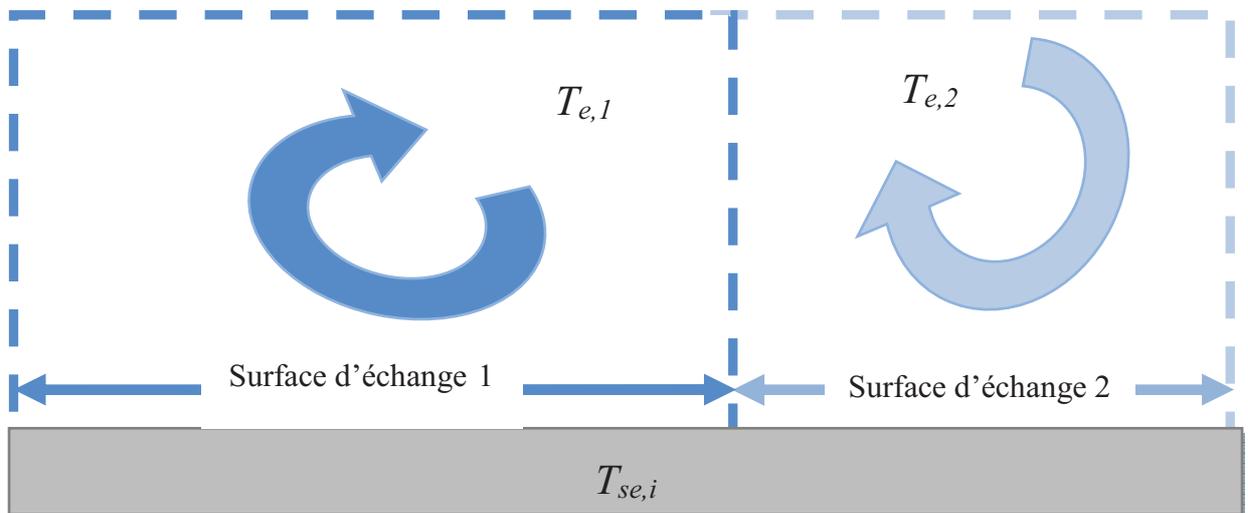


Figure 45: Représentation des surfaces d'échange entre une surface et plusieurs zones d'air

III.2.2 Densité de flux conductif

Pour déterminer la densité de flux par conduction dans la paroi, on considère que les propriétés physiques des parois sont indépendantes de la température et du temps. Les échanges thermiques à l'intérieur de la paroi sont considérés comme monodimensionnels (selon la direction de l'épaisseur de la paroi). Le comportement en régime dynamique de la paroi est régi par l'équation de la chaleur. La résolution monodimensionnelle de cette équation (équation [III-31]) permet de calculer le champ de température à l'intérieur de la paroi en considérant qu'il n'y ni puits ni source de chaleur.

$$\frac{\partial^2 T(x, t)}{\partial x^2} = \frac{\lambda}{\rho_i C_i} \frac{\partial T(x, t)}{\partial t} \quad \text{[III-31]}$$

Où :

- λ est la conductivité thermique de la paroi i [W/m .K]
- ρ_i est la masse volumique de la paroi i [kg/m³]
- C_i est la capacité calorifique de la paroi i [J/kg.K]

Divers modèles ont été développés pour résoudre l'équation de la chaleur.[III-31] Ces modèles peuvent être classés en deux catégories (Berges, 1986), les modèles d'état, ou dits directs, dans lesquels se trouvent les différences finies, les éléments finis et l'analyse modale, et les modèles de transfert, dits indirects, dans lesquels se trouvent, les facteurs de réponse, les fonctions de transfert en Z et les coordonnées normales.

Les modèles d'état sont basés sur une discrétisation spatiale de l'équation de Fourier, donnant les flux thermiques et la température en chaque point du maillage spatial choisi. Ces modèles permettent de décrire avec précision les transferts thermiques à travers une paroi. Cependant leur mise en œuvre reste très pénalisante en termes de temps de calcul.

Les modèles de transfert sont basés sur le principe de superposition. Lorsque le système physique est linéaire et invariant, l'intensité de la réponse de ce système est linéairement liée à l'intensité de l'excitation. Lorsque ce même système est invariant alors à chaque instant, des excitations identiques produisent toujours des réponses identiques. La réponse de la paroi à plusieurs sollicitations indépendantes est alors la somme des réponses dues à chacune de ces sollicitations. Le principe consiste alors à exprimer la réponse thermique de la paroi à des sollicitations quelconques en fonction des réponses à des sollicitations unitaires permettant de réduire

considérablement le temps de calcul.

Pour travailler à l'échelle du quartier, les transferts thermiques à travers les parois doivent être simplifiés. La méthode des facteurs de réponse a donc été retenue pour le calcul des transferts thermiques à travers les parois. Nous proposons d'expliquer sa mise en œuvre.

Cette méthode est basée sur l'identification des réponses discrètes d'une paroi à des sollicitations unitaires (variation de 1°C de la température de surface). La sollicitation unitaire correspond à un signal triangulaire de base $2\Delta t$, de hauteur unité et centré à l'instant initial $t=0$. Les réponses discrètes à cette sollicitation pour chaque intervalle de temps Δt sont appelées facteurs de réponse $r(i)$ (Figure 46).

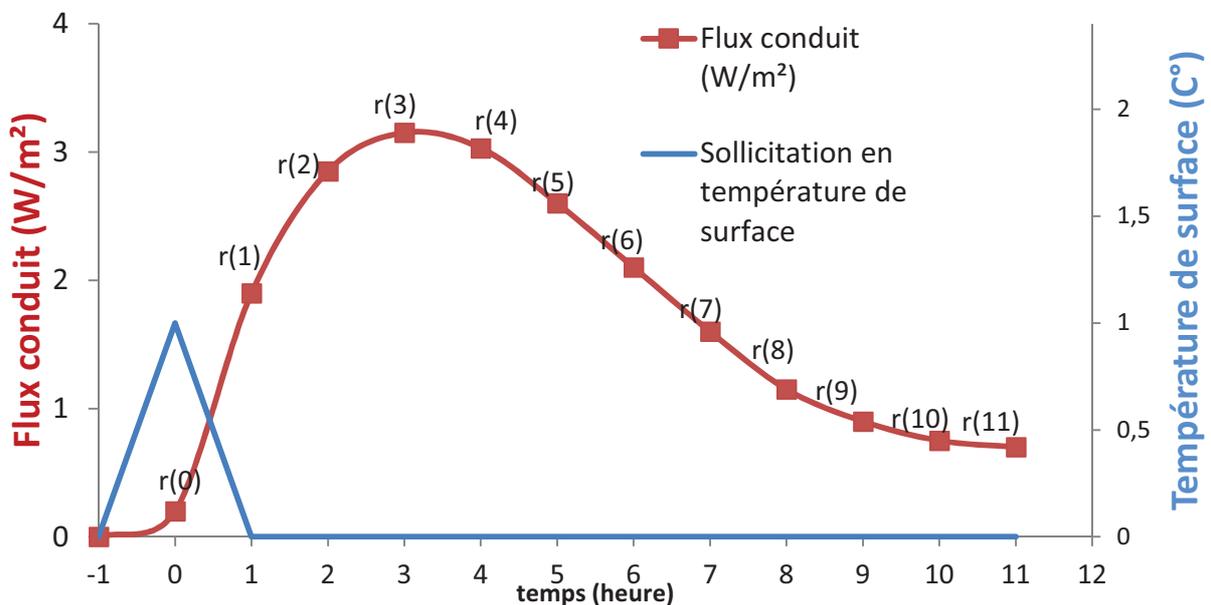


Figure 46: Réponse thermique d'une paroi à une sollicitation triangulaire unitaire en température de surface

La réponse du système étant linéaire en fonction de la sollicitation, la réponse à une sollicitation triangulaire de hauteur Γ , initié à l'instant $t=0$, est alors égale, à l'instant $n\Delta t$, à $\Gamma \times r(n)$. Ainsi pour connaître la réponse du système $R(t)$ à l'instant t il suffit de sommer les réponses de tous les instants précédents (équation [III-32]).

$$R(t) = \sum_{n=0}^{\infty} r(n)\Gamma(t - n\Delta t) \quad \text{[III-32]}$$

Lorsque une paroi subit une variation unitaire de sa température de surface intérieure, en maintenant la température de surface extérieure égale à 0°C, on peut distinguer les flux entrant X

et sortant Y_{int} de la paroi (Figure 47). Les valeurs discrètes de ces flux à chaque pas de temps Δt sont alors les facteurs de réponse liés à la variation de la température de surface intérieure de la paroi.

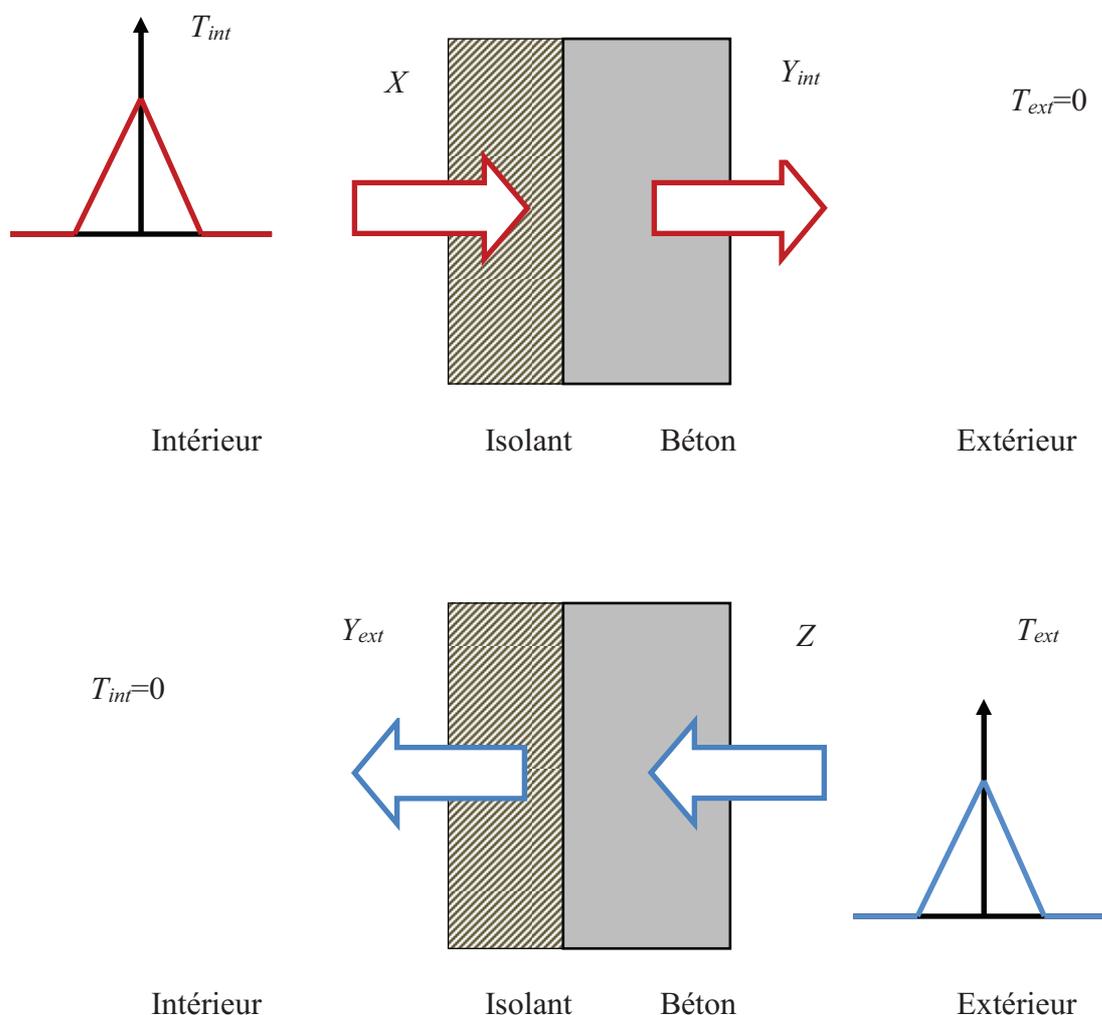


Figure 47 : Réponse en flux d'une paroi multicouche sous l'effet de la variation unitaire de la température de surface extérieure (bas) et intérieure (haut)

Lorsque une paroi subit une variation unitaire de sa température de surface extérieure, en maintenant la température de surface intérieure égale à 0°C , on peut distinguer le flux entrant Z et le flux sortant Y_{ext} de la paroi (Figure 47). Les valeurs discrètes de ces flux à chaque pas de temps Δt sont les facteurs de réponse liés à la variation de la température de surface extérieure de la paroi.

Il a été démontré analytiquement que Y_{int} et Y_{ext} sont égaux à tout instant (Rousseau, 1978). Nous

noterons alors $Y_{\text{int}}=Y_{\text{ext}}=Y$. On peut remarquer que pour des parois monocouches les facteurs de réponse X et Z sont identiques.

En appliquant le principe de superposition le flux de chaleur traversant la paroi de l'intérieur vers l'extérieur est alors défini par l'équation [III-33] et le flux de chaleur traversant la paroi de l'extérieur vers l'intérieur est défini par l'équation [III-34].

$$\varphi_{pi,i}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} Y_i(n\Delta t)T_{se,i}(t - n\Delta) - \sum_{n=0}^{\infty} X_i(n\Delta t)T_{si,i}(t - n\Delta) \quad \text{[III-33]}$$

$$\varphi_{pe,i}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} Y_i(n\Delta t)T_{si,i}(t - n\Delta) - \sum_{n=0}^{\infty} Z_i(n\Delta t)T_{se,i}(t - n\Delta) \quad \text{[III-34]}$$

On peut voir que les équations [III-33] et [III-34] utilisent une somme à l'infini. Pour pouvoir être utilisées, ces équations doivent avoir un nombre limité de facteurs de réponse.

Quelque soit la structure de la paroi, la variation de la valeur des facteurs de réponse au cours du temps devient constante. Ainsi, à partir du rang $n=kg$, il est possible d'écrire les égalités suivantes :

$$\frac{X_i(n+1)}{X_i(n)} = \frac{Y_i(n+1)}{Y_i(n)} = \frac{Z_i(n+1)}{Z_i(n)} = rg \quad \text{[III-35]}$$

En décomposant l'équation [III-33] en fonction de kg on obtient :

$$\begin{aligned} \varphi_{pi,i}(t) = & \sum_{n=0}^{n=kg} Y_i(n)T_{se,i}(t - n\Delta t) + \sum_{n=kg+1}^{\infty} Y_i(n)T_{se,i}(t - n\Delta t) \\ & - \sum_{n=0}^{n=kg} X_i(n)T_{si,i}(t - n\Delta t) - \sum_{n=kg+1}^{\infty} X_i(n)T_{si,i}(t - n\Delta t) \end{aligned} \quad \text{[III-36]}$$

En introduisant dans [III-36] les égalités présentées dans l'équation [III-35], on obtient alors :

$$\begin{aligned}
 \varphi_{pi,i}(t) = & \sum_{n=0}^{n=kg} Y_i(n)T_{se,i}(t - n\Delta t) + \sum_{n=k+1}^{\infty} r_g Y_i(n-1)T_{se,i}(t - n\Delta t) \\
 & - \sum_{n=0}^{n=kg} X_i(n)T_{si,i}(t - n\Delta t) - \sum_{n=k+1}^{\infty} r_g X_i(n-1)T_{si,i}(t - n\Delta t)
 \end{aligned}
 \tag{III-37}$$

D'autre part, le flux de chaleur traversant la paroi de l'intérieur vers l'extérieur à l'instant $t-\Delta t$ s'écrit :

$$\begin{aligned}
 \varphi_{pi,i}(t - \Delta t) = & \sum_{m=0}^{m=kg} Y_i((m)\Delta t)T_{se,i}(t - m\Delta t - \Delta t) \\
 & + \sum_{m=k+1}^{\infty} Y_i((m)\Delta t)T_{se,i}(t - m\Delta t - \Delta t) \\
 & - \sum_{m=0}^{m=kg} X_i((m)\Delta t)T_{si,i}(t - m\Delta t - \Delta t) \\
 & - \sum_{m=k+1}^{\infty} X_i((m)\Delta t)T_{si,i}(t - m\Delta t - \Delta t)
 \end{aligned}
 \tag{III-38}$$

Ou encore :

$$\begin{aligned}
 \varphi_{pi,i}(t - \Delta t) = & \sum_{m=0}^{m=kg} Y_i((m)\Delta t)T_{se,i}(t - (m+1)\Delta t) \\
 & + \sum_{m=k+1}^{\infty} Y_i((m)\Delta t)T_{se,i}(t - (m+1)\Delta t) \\
 & - \sum_{m=0}^{m=k} X_i((m)\Delta t)T_{si,i}(t - (m+1)\Delta t) \\
 & - \sum_{m=k+1}^{\infty} X_i((m)\Delta t)T_{si,i}(t - (m+1)\Delta t)
 \end{aligned}
 \tag{III-39}$$

En posant $m=n-1$, il vient alors :

$$\begin{aligned}
 \varphi_{pi,i}(t - \Delta t) &= \sum_{n=1}^{n=kg} Y_i((n-1)\Delta t) T_{se,i}(t - n\Delta t) \\
 &+ \sum_{n=k+1}^{\infty} Y_i((n-1)\Delta t) T_{se,i}(t - n\Delta t) \\
 &- \sum_{n=1}^{n=k} X_i((n-1)\Delta t) T_{si,i}(t - n\Delta t) \\
 &- \sum_{n=k+1}^{\infty} X_i((n-1)\Delta t) T_{si,i}(t - n\Delta t)
 \end{aligned} \tag{III-40}$$

d'où :

$$\begin{aligned}
 \sum_{n=k+1}^{\infty} Y_i((n-1)\Delta t) T_{se,i}(t - n\Delta t) - \sum_{n=k+1}^{\infty} X_i((n-1)\Delta t) T_{si,i}(t - n\Delta t) \\
 = \varphi_{pi,i}(t - \Delta t) - \sum_{n=1}^{n=k} Y_i((n-1)\Delta t) T_{se,i}(t - n\Delta t) \\
 + \sum_{n=1}^{n=kg} X_i((n-1)\Delta t) T_{si,i}(t - n\Delta t)
 \end{aligned} \tag{III-41}$$

En injectant l'équation [III-41] dans l'équation [III-37] on obtient :

$$\begin{aligned}
 \varphi_{pi,i}(t) &= \sum_{n=0}^{n=kg} Y_i(n) T_{se,i}(t - n\Delta t) - \sum_{n=0}^{n=kg} X_i(n) T_{si,i}(t - n\Delta t) \\
 &+ r_g \left(\varphi_{pi,i}(t - \Delta t) - \sum_{n=1}^{n=kg} Y_i((n-1)) T_{se,i}(t - n\Delta t) \right. \\
 &\left. + \sum_{n=1}^{n=kg} X_i((n-1)) T_{si,i}(t - n\Delta t) \right)
 \end{aligned} \tag{III-42}$$

Ce qui peut aussi s'écrire sous la forme :

$$\begin{aligned}
 \varphi_{pi,i}(t) &= Y_i(0)T_{se,i}(t) - X_i(0)T_{si,i}(t) \\
 &+ \sum_{n=1}^{n=kg} \left(Y_i(n) - r_g Y_i(n-1) \right) T_{se,i}(t - n\Delta t) \\
 &- \sum_{n=1}^{n=kg} \left(X_i(n) - r_g X_i(n-1) \right) T_{si,i}(t - n\Delta t) + r_g \varphi_{pi,i}(t - \Delta t)
 \end{aligned}
 \tag{III-43}$$

Par identification, on peut alors réaliser la même simplification pour l'équation [III-34] ce qui donne :

$$\begin{aligned}
 \varphi_{pe,i}(t) &= Y_i(0)T_{si,i}(t) - Z_i(0)T_{se,i}(t) \\
 &+ \sum_{n=1}^{n=kg} \left(Y_i(n) - r_g Y_i(n-1) \right) T_{si,i}(t - n\Delta t) \\
 &- \sum_{n=1}^{n=kg} \left(Z_i(n) - r_g Z_i(n-1) \right) T_{se,i}(t - n\Delta t) + r_g \varphi_{pe,i}(t - \Delta t)
 \end{aligned}
 \tag{III-44}$$

Cette formulation va alors permettre de calculer le flux conductif à travers une paroi. Afin de conserver une certaine simplicité dans la lecture de la suite du manuscrit les notations de somme à l'infini seront conservées.

La méthode des facteurs de réponse étant une méthode indirecte, la réponse exacte d'une paroi quelconque à une sollicitation unitaire de température de surface doit donc être calculée au préalable par une méthode directe. Pour cela, l'équation de la chaleur est résolue par un modèle de différence finie avec un schéma de Crank-Nicholson pour calculer les kg premiers facteurs de réponse suite à une variation de 1°C de la température de surface .

III.2.3 Modèle de sol

Dans le cas où la surface considérée est une partie du sol du quartier, il est nécessaire de spécifier certain termes. Le comportement thermique de chaque surface associée à un sol est modélisé pour une épaisseur donnée à l'aide des facteurs de réponse et du bilan thermique décrit par l'équation III-28. Pour modéliser les températures de surfaces du sol à partir des facteurs de réponse, il est donc nécessaire de définir la température de sous-sol T_z , à la profondeur z , qui servira de condition limite. La densité de flux échangée par conduction à travers la surface i est alors défini par :

$$\varphi_{pe,i}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} Y_i(n\Delta t)T_z(t - n\Delta) - \sum_{n=0}^{\infty} Z_i(n\Delta t)T_{se,i}(t - n\Delta) \quad [\text{III-45}]$$

A grande profondeur, la température du sol est principalement conditionnée par les transferts d'humidité et de chaleur par conduction à travers les différentes couches de matériaux composant le sol, et par le flux de chaleur émis par le noyau terrestre. Ces phénomènes entraînent une température du sous-sol qui varie très faiblement à partir d'une certaine profondeur, de l'ordre d'un degré supplémentaire tous les 50 m du fait de la chaleur géothermique.

De ce fait, au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface, l'amplitude des variations de la température mensuelle, due au cycle des saisons, et quotidienne, due à l'alternance jours-nuit, diminue de façon exponentielle, jusqu'à tendre vers une température moyenne annuelle constante à partir de 5 à 6 mètres (Figure 48).

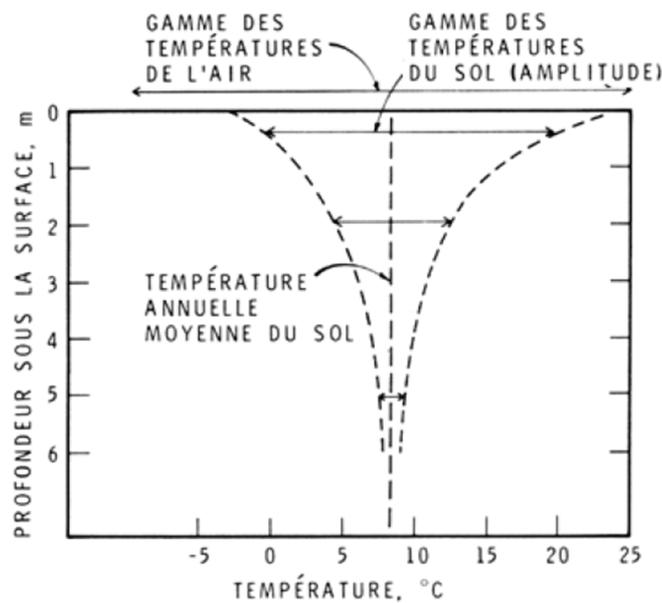


Figure 48 : Représentation de la variation annuelle de température du sol en fonction de la profondeur à Ottawa (Canada), d'après (William et Gold, 1977).

De plus, en s'éloignant de la surface, les valeurs maximales et minimales des températures dans le sol sont déphasées par rapport à la surface.

Pour prendre en compte ces phénomènes nous proposons d'utiliser le modèle présenté par William et Gold (1977). Ainsi, l'évolution cyclique de la température T_z du sous-sol, à la profondeur z , s'exprime en fonction de la température moyenne de surface $T_{su, moy}$ pour la période étudiée par la relation suivante :

$$T_z(z, t) = T_{su, moy} + \Delta T_{su} e^{-z \sqrt{\frac{\pi}{a_{sol} \Delta t}}} \cos\left(\frac{2\pi t}{\Delta t} - z \sqrt{\frac{\pi}{a_{sol} \Delta t}}\right) \quad [III-46]$$

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

On peut noter que plus l'épaisseur du sol à modéliser est importante, plus un nombre important de facteurs de réponse sont nécessaires pour calculer les flux thermique par conduction. Une profondeur de l'ordre de 50 cm a donc été choisie pour limiter le nombre de facteurs de réponse à prendre en compte dans les simulations afin de correspondre aux capacités de stockage de l'environnement de programmation.

III.3 Modèle thermique de bâtiment

Un bâtiment peut être considéré comme un assemblage de parois entourant un ou plusieurs volumes d'air. Dans la maquette numérique, les bâtiments sont présentés comme un assemblage de sous-volumes empilés les uns sur les autres, chacun étant un volume d'air entouré de plusieurs parois. Un bâtiment peut alors être composé de plusieurs locaux élémentaires. Pour calculer les besoins énergétiques de notre quartier nous décidons de calculer les besoins énergétiques de chacun de ces locaux, permettant ainsi de différencier les besoins énergétiques de chaque étage. Pour calculer la charge thermique d'un local, il est nécessaire de réaliser un bilan thermique sur chacun de ses composants.

III.3.1 Bilan thermique d'un local

Le bâtiment est un système complexe où interviennent de nombreux phénomènes de transferts thermiques provenant de l'extérieur et de l'intérieur comme représenté sur la Figure 49. A l'extérieur, les sollicitations climatiques (ensoleillement $E_{clo, i}$ et températures T_e) vont influencer sur l'état thermique du bâtiment. L'intérieur est conditionné pour répondre aux besoins des occupants se traduisant par l'imposition d'une température de consigne T_c entraînant une charge thermique P pour maintenir leur confort thermique, et un débit de ventilation D_v pour maintenir une bonne qualité d'air. De plus, la présence et l'usage des occupants entraînent des gains internes Q_{int} (appareil électrique, éclairage...). L'enveloppe du bâtiment servant d'interface entre ces deux milieux est alors le siège de transferts thermiques par convection, conduction et rayonnement. Pour pouvoir calculer les besoins énergétiques des bâtiments, il est donc nécessaire de prendre en compte ces différents processus afin de caractériser correctement l'ambiance intérieure et les besoins énergétiques qui en découlent. Nous décrivons ci après les modèles

physiques utilisés pour réaliser le bilan thermique d'un local.

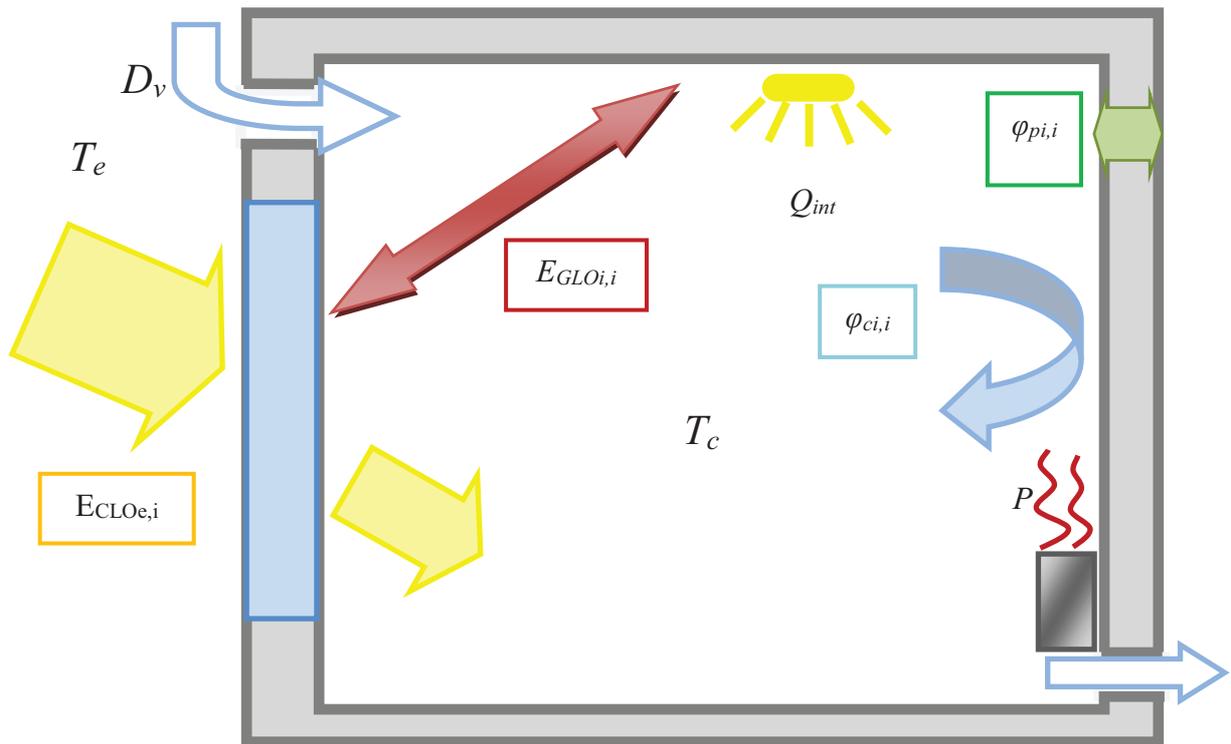


Figure 49 : Représentation des différents transferts thermiques dans un local

III.3.1.1 Bilan convectif du local

La température intérieure d'un local est supposée homogène dans l'ensemble du local. Les apports convectifs qui contribuent au bilan thermique de la masse d'air du local peuvent être regroupés en plusieurs types.

Les apports convectifs $Q_p(t)$ en provenance des parois du local qui peuvent être déterminés par l'équation [III-47]:

$$Q_p(t) = \sum_{i=1}^{N_p} S_i h_{ci,i} (T_{si,i}(t) - T_a(t)) \quad \text{[III-47]}$$

Où:

- S_i est la surface de la paroi i [m^2]
- $T_{si,i}$ est la température de surface intérieure de la paroi i [$^{\circ}C$]
- T_a est la température d'air intérieur du local [$^{\circ}C$]
- N_p est le nombre de parois dans le local
- $h_{ci,i}$ est le coefficient d'échange convectif superficiel de la paroi i [W/m^2K]

- ❖ Les apports convectifs $Q_v(t)$ dus à la ventilation par introduction de l'air provenant de l'extérieur. Dans la maquette numérique, la température de l'air extérieur est représentée par les températures d'air des zones thermoaérauliques en contact avec les parois du local. Un système de ventilation extrait de l'air en un point donné du bâtiment. On choisit alors arbitrairement une zone thermoaéraulique k , à la température d'air $T_{e,k}$ en contact avec l'une des parois du local pour déterminer le lieu d'introduction d'air dû au système de ventilation. Ainsi, les apports convectifs sont calculés grâce à l'équation [III-48] .

$$Q_v(t) = \rho C_p D_v (T_{e,k} - T_{a,n}) \quad \text{[III-48]}$$

Où:

D_v est le débit volumique de l'air pénétrant dans le local [m^3 / s]

On peut noter que si l'on souhaite calculer les apports convectifs dus à l'infiltration d'air, nous pourrions appliquer l'équation [III-48] avec chaque température d'air de chaque zone thermoaéraulique en contact avec le local. Il suffit alors de déterminer un débit d'infiltration à travers chaque surface.

- ❖ Les apports convectifs internes $Q_{int}(t)$ dus à l'utilisation du local (énergie dissipée par les occupants, par l'électroménager ou l'éclairage)
- ❖ Les apports convectifs $P(t)$ dus à la puissance convective du système de chauffage ou de climatisation.

L'évolution de la charge thermique convective totale du local peut alors être décrite par l'équation [III-49]:

$$\rho C_p V \frac{dT_a}{dt} = \sum_{i=1}^{N_p} S_i h_{ci,i} (T_{si,i}(t) - T_a(t)) + \rho C_p D_v (T_{e,k}(t) - T_a(t)) + Q_{int}(t) + P(t) \quad \text{[III-49]}$$

Avec V le volume du local [m^3]

En discrétisant la dérivée temporelle de la température, il vient :

$$\frac{dT_a}{dt} = \frac{T_a(t) - T_a(t - \Delta t)}{\Delta t} \quad \text{[III-50]}$$

Avec Δt le pas de temps choisi pour la simulation.

La puissance thermique nécessaire pour maintenir le local à la température de consigne T_c est alors déterminée par :

$$P(t) = \rho C_p V \frac{T_c(t) - T_c(t - \Delta t)}{\Delta t} - \rho C_p D_v (T_{e,k}(t) - T_c(t)) - Q_{int}(t) \quad \text{[III-51]}$$

$$- \sum_{i=1}^{N_p} S_i h_{ci,i} (T_{si,i}(t) - T_c(t))$$

La puissance pour chauffer est alors compté comme positive, et la puissance pour rafraîchir comme négative.

Afin de résoudre l'équation [III-51], il est nécessaire de calculer les températures de surface intérieures du local.

III.3.1.2 Bilan thermique des parois

L'équilibre thermique des parois déterminé grâce à l'équation [III-28] permet de calculer les températures de surface extérieure. Les termes de cette équation sont redéfinis dans l'équation [III-52] pour permettre le calcul des températures de surface intérieure.

$$E_{CLOi,i}(t) + E_{GLOi,i}(t) + \varphi_{ci,i}(t) + \varphi_{pi,i}(t) = 0 \quad \text{[III-52]}$$

$\varphi_{pi,i}$ est la densité de flux échangée par conduction à travers la paroi i qui s'exprime grâce aux équations [III-33] et [III-34].

$\varphi_{ci,i}$ est la densité de flux échangée par convection entre la surface i et l'air intérieur avec laquelle la surface est en contact [W/m^2], elle s'exprime par :

$$\varphi_{ci,i}(t) = h_{ci,i} (T_a(t) - T_{si,i}(t)) \quad \text{[III-53]}$$

$E_{CLOi,i}$ est l'éclairement de courte longueur d'onde reçu par la surface intérieure i .

$E_{GLOi,i}$ est l'éclairement échangé par rayonnement de grande longueur d'onde entre la paroi i et les autres parois du local [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]

III.3.1.3 Calcul de l'éclairement

Les densités de flux radiatif de grande et courte longueurs d'onde reçues par chaque paroi du local dépendent des densités de flux reçues et réfléchies par chacune des autres parois. Ces

densités de flux ne peuvent donc être traitées isolément.

Soit $E_{CLOe,i}$ l'éclairement solaire reçu par la paroi vitrée i [W/m^2] d'un local sur sa face extérieure. L'éclairement solaire E_{CLO} [W], transmis au local s'écrit :

$$E_{CLO} = S_{v,i} \tau_i E_{CLOe,i} \quad \text{[III-54]}$$

Avec τ_i le facteur de transmission de courte longueur d'onde du vitrage et $S_{v,i}$ la surface du vitrage i .

Lorsque le rayonnement solaire pénètre dans le local à travers une paroi vitrée, nous supposons que le rayonnement est uniformément réparti sur le plancher de surface S_p . La partie réfléchi est ensuite redistribuée sous forme diffuse aux autres parois comme indiqué sur la Figure 50.

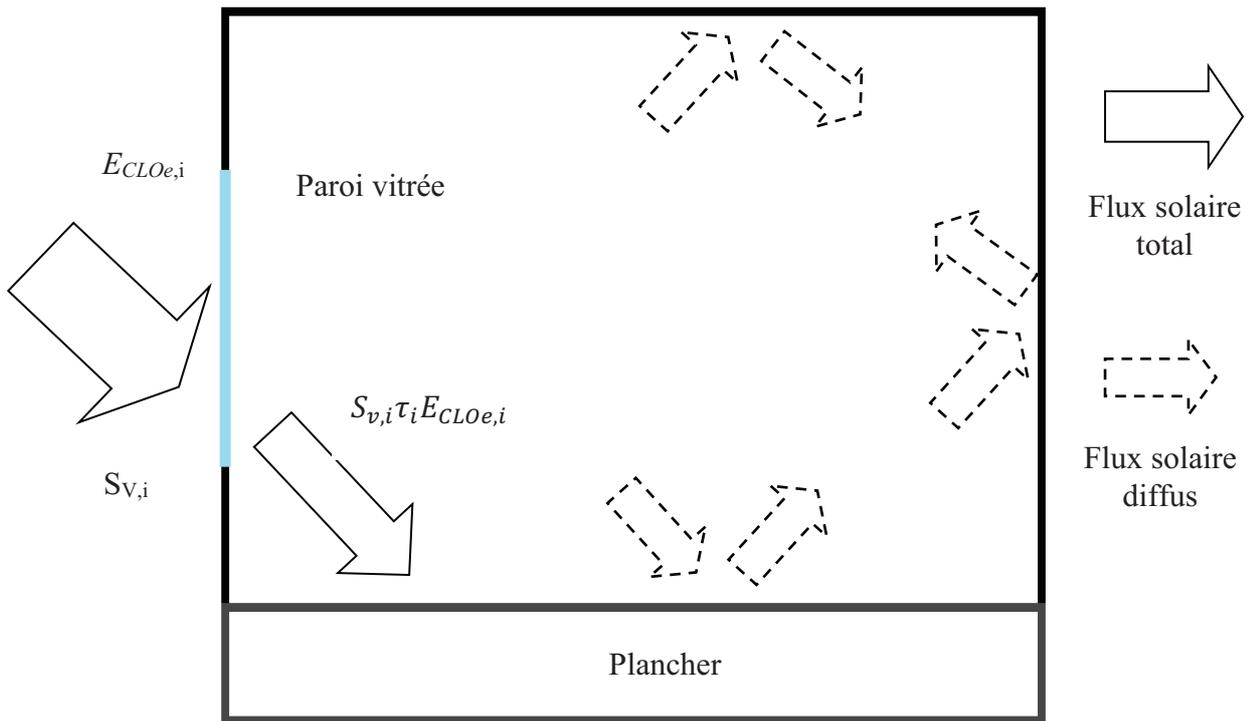


Figure 50 : Représentation des échanges radiatifs de courte longueur d'onde dans un local

L'éclairement solaire reçu par le plancher du local $E_{s,p}$ est alors donné par l'équation [III-55] :

$$E_{s,p} = \frac{S_{v,i} \tau_i E_{CLOe,i}}{S_p} \quad \text{[III-55]}$$

Dans le cas où le local est composé de N_{pv} parois vitrées, $E_{s,p}$ est alors égal à la somme des

rayonnements solaires transmis par chaque paroi vitrée comme indiqué par l'équation [III-56]

$$E_{s,p} = \frac{1}{S_p} \sum_{i=0}^{N_{pv}} S_{v,i} \tau_i E_{CLO,i} \quad [III-56]$$

L'éclairement reçu par chacune des parois est alors calculé à l'aide de la méthode des exitances :

$$\rho_{CLO,i} E_{CLO,i}(t) - \sum_{j=0}^{N_p} F_{ji} \rho_{CLO,j} E_{CLO,j}(t) = E_{0,CLO,i}(t) \quad [III-57]$$

Avec

- $E_{0,CLO,i} = E_{s,p}$ pour le plancher,
- $E_{0,CLO,i} = 0$ pour les autres parois du local

Le rayonnement émis par chaque paroi est supposé se répartir uniformément sur toutes les autres surfaces et les facteurs de forme sont s'exprimés à l'aide de rapports de surface. Ainsi, les facteurs de forme F_{ij} représentant la part de l'énergie issue de la paroi i qui est intercepté par la paroi j s'exprime à l'aide de :

$$F_{ij} = \frac{S_j}{S_t - S_i} \quad [III-58]$$

Avec :

- $F_{ii} = 0$
- S_t surface intérieure totale du local

Ces facteurs de forme sont aussi utilisés pour le calcul de $E_{GLO,i}$, les éclairements de grande longueur d'onde échangés entre la surface i à la température $T_{si,i}$ avec les N_p autres parois du local à la température de surface $T_{si,j}$. En première approximation, en ne considérant que des surfaces noires, cette densité de flux est définie par l'expression :

$$E_{GLO,i} = \sum_{j=1}^{N_p} \sigma F_{ij} (T_{si,j}(t)^4 - T_{si,i}(t)^4) \quad [III-59]$$

En réutilisant les approximations exprimées dans les équations [II-63] et [II-64], il vient :

$$a_i = X_i(0) + h_{ci,i} \quad \text{[III-63]}$$

$$B_i = h_{ci,i}T_c(t) + \alpha_i E_{CLOi,i}(t) - \sum_{n=1}^{\infty} X_i(n\Delta t)T_{si,i}(t - n\Delta t) \quad \text{[III-64]}$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} Y_i(n\Delta t)T_{se,i}(t - n\Delta t) + E_{GLOi,i}(t)$$

pour $i > N_p + 1$:

$$a_i = Z_i(0) + h_{ce,i} \quad \text{[III-65]}$$

$$B_i = h_{ce,i}T_{e,k}(t) + \alpha_i E_{CLOe,i}(t) - \sum_{n=1}^{\infty} Z_i(n\Delta t)T_{se,i}(t - n\Delta t) \quad \text{[III-66]}$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} Y_i(n\Delta t)T_{si,i}(t - n\Delta t) + E_{GLOe,i}(t)$$

III.3.2 Méthode des facteurs de pondération

Nous avons présenté comment utiliser le principe de superposition pour pouvoir calculer les facteurs de réponse d'une paroi. Ainsi, ces facteurs permettent de simplifier les calculs des flux et des températures de surface. Les échanges thermiques dans les bâtiments étant supposés linéaires, le principe de superposition peut être appliqué à un local formé de plusieurs parois. En utilisant cette méthodologie, Rousseau (1978) et Depecker (1986,2001) ont calculé des facteurs de pondération afin d'évaluer les besoins thermiques d'un local. Par identification avec les facteurs de réponse, les facteurs de pondération sont les réponses thermiques discrètes d'un local sous l'effet d'une sollicitation unitaire. Ces facteurs de pondération peuvent alors être utilisés pour calculer la charge thermique des bâtiments et les températures de surface des bâtiments. Nous expliquons ci-après la méthodologie utilisée pour obtenir les facteurs de pondération et comment ils permettront une simplification des calculs.

III.3.2.1 Détermination des facteurs de pondération

Soit un local composé de N_p surfaces extérieures. On cherche à déterminer la réponse thermique de ce local à 3 sollicitations en flux ou en température qui sont :

- Le rayonnement solaire entrant dans le local : E_{clo}
- La température de surface extérieure de chaque paroi i : $T_{se,i}$
- La température intérieure du local : T_a

Si on considère un système thermique linéaire, on peut appliquer le principe de superposition. La température de surface intérieure de la paroi i , $T_{si,i}$, induite par K sollicitations peut donc être décrite comme la somme de toutes les températures induites par chaque sollicitation :

$$T_{si,i}(t) = \sum_{k=1}^K T_{sk,i}(t) \quad [\text{III-67}]$$

On détermine $T_{sk,i}$ la température induite à la surface i par la sollicitation k d'intensité S_k , grâce aux facteurs de pondération $FP_k^i(n\Delta t)$. Ces facteurs représentent la valeur de la température de surface de la paroi i générée par une sollicitation unitaire k à chaque pas de temps Δt (Figure 51).

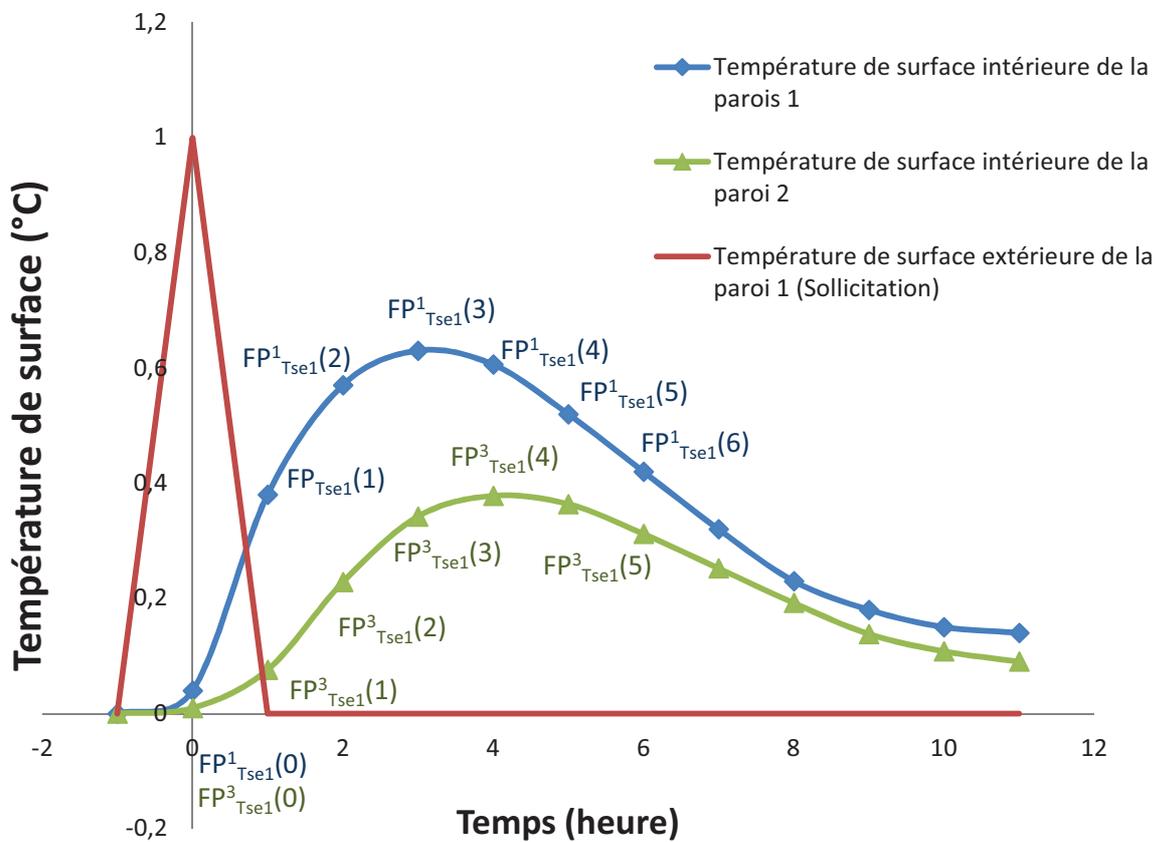


Figure 51 : Températures de surface intérieure des parois d'un local générées par une sollicitation triangulaire unitaire de la température de surface extérieure de la paroi 1.

$T_{sk,i}$ s'exprime alors grâce au produit de convolution :

$$T_{sk,i} = FP_k^i * S_k = \sum_{n=0}^{\infty} FP_k^i(n\Delta t) S_k(t - n\Delta t) \quad [\text{III-68}]$$

On obtient ainsi la valeur de $T_{si,i}$:

$$T_{si,i}(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{n=0}^{\infty} FP_k^i(n\Delta t) S_k(t - n\Delta t) \quad [\text{III-69}]$$

Les produits de convolution utilisent des sommes à l'infini, en reprenant la méthodologie utilisée pour les facteurs de réponse (équations [III-35] à [III-44]) ces sommes à l'infini sont remplacées par :

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} FP_k^i(n\Delta t) S_k(t - n\Delta t) & \quad [\text{III-70}] \\ & = FP_k^i(0) S_k(t) + \sum_{n=1}^{n=k} \left(FP_k^i(n) - r_g FP_{k_i}^i(n-1) \right) S_k(t - n\Delta t) \\ & \quad + r_g \sum_{n=0}^{\infty} FP_k^i(n\Delta t) S_k(t - (n-1)\Delta t) \end{aligned}$$

Afin de simplifier les écritures des équations, la formulation « somme à l'infini » est maintenue dans les équations.

En considérant les trois sollicitations citées précédemment, la température de surface de la paroi i se calcule de la manière suivante :

$$\begin{aligned} T_{si,i}(t) & = \sum_{n=0}^{\infty} FP_{T_{sek,i}}^i(n\Delta t) T_{se,i}(t - n\Delta t) & [\text{III-71}] \\ & \quad + \sum_{n=0}^{\infty} FP_{E_{clo}}(n\Delta t) E_{CLO}(t - n\Delta t) + \sum_{n=0}^{\infty} FP_{T_a}^i(n\Delta t) T_a(t - n\Delta t) \end{aligned}$$

Pour un local ayant N_p surfaces extérieures, on a alors une sollicitation par surface extérieure soit les doubles sommes suivantes :

$$\begin{aligned}
 T_{si,i}(t) = & \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{n=0}^{\infty} FP^i_{T_{se,j}}(n\Delta t) T_{se,j}(t - n\Delta t) \\
 & + \sum_{n=0}^{\infty} FP^i_{E_{clo}}(n\Delta t) E_{CLO}(t - n\Delta t) + \sum_{n=0}^{\infty} FP^i_{T_a}(n\Delta t) T_a(t - n\Delta t)
 \end{aligned}
 \tag{III-72}$$

III.3.2.2 Calcul des facteurs de pondération

Afin de calculer les facteurs de pondération, il faut réaliser le bilan thermique du local sous l'effet d'une sollicitation unitaire pour calculer les températures de surface intérieure induites par cette sollicitation à chaque pas de temps Δt . Pour réaliser ce bilan, nous utilisons le système d'équations [III-61] afin de calculer les températures de surface intérieure du local sous l'effet de la variation unitaire de la température d'air intérieur, du rayonnement solaire entrant dans le local ou de la température de surface extérieure de chaque paroi. Cette opération est répétée jusqu'à ce que les variations des températures de surface intérieure deviennent négligeables. Les facteurs de pondération sont alors les valeurs discrètes des températures de surface intérieure du local relevées chaque heure après la sollicitation.

Dans le cas de la première sollicitation, la température de consigne est imposée à une valeur unité au temps $t=0$ alors que toutes les autres sollicitations sont nulles. L'équation [III-64] devient alors l'équation [III-73]. Ensuite, toutes les sollicitations sont imposées à zéro pour déterminer les températures de surface intérieure générées par le changement de la température d'air.

$$B_i = h_{ci,i} T_c(t) - \sum_{n=1}^{\infty} X_i(n\Delta t) T_{si,i}(t - n\Delta t)
 \tag{III-73}$$

Dans le cas de la sollicitation « température de surface extérieure », au temps $t=0$, pour une paroi i on impose une variation unitaire de la température de surface extérieure alors que toutes les autres sont fixées à zéro, ainsi que la température d'air et le rayonnement solaire. Ensuite, toutes les sollicitations sont mises à zéro pour déterminer les températures de surface intérieure générées par le changement de la température de surface extérieure de la paroi i . Cette opération est réalisée pour l'ensemble des parois extérieures du local.

Dans le cas de la sollicitation « rayonnement solaire », à $t=0$, l'éclairement reçu par le plancher est imposé à 1 [W/m²], les densités de flux radiatif de courte longueur d'onde diffus absorbées par chaque paroi sont alors calculées à l'aide de la méthode des exitances (voir section III.3.1.3). Pour chaque paroi i du local, la valeur du vecteur B du système [III-61] est donnée par l'équation

[III-74] :

$$B_i = \alpha_i E_{CLOi,i}(t) - \sum_{n=1}^{\infty} X_i(n\Delta t) T_{si,i}(t - n\Delta t) + E_{GLOi,i}(t) \quad [III-74]$$

Pour les pas de temps suivants, l'éclairement du plancher est mis à zéro et les nouvelles températures des surfaces intérieures sont calculées avec $E_{clo,i}$ égal à zéro.

Pour cette dernière sollicitation, lorsqu'on utilise l'équation [III-68] pour calculer les températures de surface intérieure générées par la sollicitation rayonnement solaire, il est nécessaire de calculer le rayonnement solaire reçu par le plancher du local. A partir de la maquette tridimensionnelle d'un quartier, le logiciel SOLENE calcule les rayonnements solaires reçus par chaque surface. En agrégeant les différents flux ainsi calculés, il est possible d'obtenir les valeurs de l'éclairement de chaque paroi vitrée. Le rayonnement solaire reçu par le plancher dépend alors du facteur de transmission τ de chaque paroi vitrée (Equation [III-56]).

Les températures de surface intérieure i du local, sous la sollicitation rayonnement solaire se calculent grâce à l'équation :

$$T_{scl0,i}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} FP_{E_{clo}}^i(n\Delta t) E_{s,p}(t - n\Delta t) \quad [III-75]$$

L'utilisation du rayonnement solaire reçu par le plancher comme sollicitation permet d'avoir des facteurs de pondération indépendants du facteur de transmission τ . Celui-ci étant dépendant de l'angle d'incidence du rayonnement solaire, l'utilisation d'une autre sollicitation, rayonnement solaire reçu par les parois vitrées par exemple, aurait rendu les facteurs de pondération dépendant de deux paramètres : l'intensité du rayonnement solaire et l'angle d'incidence.

III.3.2.3 Calcul de la charge thermique

En introduisant l'expression de $T_{si,i}(t)$ dans l'équation [III-51] nous obtenons l'expression permettant le calcul de la charge thermique du local :

$$\begin{aligned}
 P(t) = & \rho C_p V \frac{T_c(t) - T_c(t - \Delta t)}{\Delta t} - \rho C_p D_v (T_{e,k}(t) - T_c(t)) - Q_{int}(t) \\
 & - \sum_{i=1}^{N_p} S_i h_{ci,i} \left\{ -T_c(t) + \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{n=0}^{\infty} FP^i_{T_{se,j}}(n\Delta t) T_{se,j}(t - n\Delta t) \right. \\
 & \left. + \sum_{n=0}^{\infty} FP^i_{E_{clo}}(n\Delta t) E_{s,p}(t - n\Delta t) + \sum_{n=0}^{\infty} FP^i_{T_a}(n\Delta t) T_c(t - n\Delta t) \right\}
 \end{aligned} \quad [III-76]$$

III.3.2.4 Calcul de la température d'air intérieur

En introduisant l'expression de $T_{si,i}(t)$ dans l'équation [III-51] nous obtenons l'expression permettant le calcul de la température d'air intérieur du local :

$$\begin{aligned}
 T_a(t) = & \frac{1}{(X_{Ta})} \left\{ \rho C_p V \frac{-T_a(t - \Delta t)}{\Delta t} - \rho C_p D_v (T_{e,k}(t)) - Q_{int}(t) - P(t) \right. \\
 & - \sum_{i=1}^{N_p} S_i h_{ci,i} \left[\sum_{j=1}^{N_p} \sum_{n=0}^{\infty} FP^i_{T_{se,j}}(n\Delta t) T_{se,j}(t - n\Delta t) \right. \\
 & \left. \left. + \sum_{n=0}^{\infty} FP^i_{E_{clo}}(n\Delta t) E_{sd}(t - n\Delta t) + \sum_{n=1}^{\infty} FP^i_{T_a}(n\Delta t) T_a(t - n\Delta t) \right] \right\}
 \end{aligned} \quad [III-77]$$

Avec :

$$X_{Ta} = -\frac{\rho C_p V}{\Delta t} + \rho C_p D_v + \sum_{i=1}^{N_p} S_i h_{ci,i} (1 - FP^i_{T_a}(0)) \quad [III-78]$$

III.3.2.5 Calcul des températures de surface extérieure

En linéarisant tous les transferts thermiques, le bilan thermique d'une paroi extérieure d'un bâtiment peut se déterminer à l'aide du bilan thermique [III-28]. En introduisant les facteurs de pondération permettant le calcul des températures de surface intérieure de la paroi i (équation [III-72]), dans l'équation [III-34] on obtient :

$$\varphi_{pe,i}(t) = \sum_{m=0}^{\infty} Y_i(m\Delta t) \left[\sum_{k=1}^K \sum_{n=0}^{\infty} FP_k^i(n\Delta t) S_k(t - n\Delta t - m\Delta t) \right] \quad [\text{III-79}]$$

$$- \sum_{m=0}^{\infty} Z_i(m\Delta t) T_{se,i}(t - m\Delta t)$$

En ne considérant que les trois sollicitations précédentes, il vient :

$$\varphi_{pe,i}(t) = \sum_{m=0}^{\infty} Y_i(m\Delta t) \left[\sum_{n=0}^{\infty} FP_{E_{clo}}^i(n\Delta t) E_{clo}(t - (n+m)\Delta t) \quad [\text{III-80}] \right.$$

$$+ \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{n=0}^{\infty} FP_{T_{se,j}}^i(n\Delta t) T_{se,j}(t - (n+m)\Delta t)$$

$$+ \left. \sum_{n=0}^{\infty} FP_{T_a}^i(n\Delta t) T_a(t - (n+m)\Delta t) \right]$$

$$- \sum_{m=0}^{\infty} Z_i(m\Delta t) T_{se,i}(t - m\Delta t)$$

Il est à noter que dans le cas où la paroi est vitrée, on considère une paroi sans inertie. Les facteurs de pondération sont alors remplacés par les coefficients de transmission thermique U_i et l'équation [III-80] devient :

$$\varphi_{pe,i}(t) = U_i \left[\sum_{n=0}^{\infty} FP_{E_{clo}}^i(n\Delta t) E_{clo}(t - (n+m)\Delta t) \quad [\text{III-81}] \right.$$

$$+ \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{n=0}^{\infty} FP_{T_{se,j}}^i(n\Delta t) T_{se,j}(t - (n+m)\Delta t)$$

$$+ \left. \sum_{n=0}^{\infty} FP_{T_a}^i(n\Delta t) T_a(t - (n+m)\Delta t) \right] - U_i T_{se,i}(t)$$

III.3.2.6 Système global

Il apparait que pour calculer la charge thermique d'un local composé de N_p surfaces extérieures, il est nécessaire de résoudre un système linéaire composé de N_p+1 équations (1 équation de bilan convectif [III-76] et N_p équations pour le flux conduit à travers les parois [III-80]) pour former le système matriciel [III-82]. On voit ainsi que ce modèle permet de simplifier les calculs en

s'affranchissant du calcul des températures de surface intérieure.

$$\begin{bmatrix} 1 & a_{01} & \cdots & a_{0N_p} \\ 0 & a_{11} & \cdots & a_{1N_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & a_{N_p1} & \cdots & a_{N_pN_p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ T_{se,1} \\ \vdots \\ T_{se,N_p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_{N_p} \end{bmatrix} \quad [\text{III-82}]$$

avec :

$$a_{0i} = \sum_{j=1}^{N_p} S_j h_{ci,j} FP^j_{T_{se,i}}(0) \quad [\text{III-83}]$$

$$\begin{aligned} B_0 = \rho C_p V \frac{T_c(t) - T_c(t - \Delta t)}{\Delta t} - \rho C_p D_v (T_{e,k}(t) - T_c(t)) - Q_{int}(t) \quad [\text{III-84}] \\ - \sum_{i=1}^{N_p} S_i h_{ci,i} \left\{ -T_c(t) + \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{n=1}^{\infty} FP^i_{T_{se,j}}(n\Delta t) T_{se,j}(t - n\Delta t) \right. \\ \left. + \sum_{n=0}^{\infty} FP^i_{E_{clo}}(n\Delta t) E_{s,p}(t - n\Delta t) + \sum_{n=0}^{\infty} FP^i_{T_a}(n\Delta t) T_c(t - n\Delta t) \right\} \end{aligned}$$

pour $i > 0$:

$$a_{ii} = Z_i(0) - Y_i(0) FP^i_{T_{se,i}}(0) + h_{ce,i} \quad [\text{III-85}]$$

$$a_{ij} = -Y_i(0) FP^i_{T_{se,j}}(0) \quad [\text{III-86}]$$

$$\begin{aligned} B_i = h_{ce,i} T_{e,k}(t) + \alpha_i E_{CLOe,i}(t) + E_{GLOe,i}(t) - \sum_{m=1}^{\infty} Z_i(m\Delta t) T_{se,i}(t - m\Delta t) \quad [\text{III-87}] \\ + \sum_{m=0}^{\infty} Y_i(m\Delta t) \left[\sum_{n=0}^{\infty} FP^i_{E_{clo}}(n\Delta t) E_{clo}(t - (n+m)\Delta t) \right. \\ + \sum_{j=1}^{N_p} \sum_{n=0}^{\infty} FP^i_{T_{se,j}}(n\Delta t) T_{se,j}(t - (n+m)\Delta t) \\ \left. + \sum_{n=0}^{\infty} FP^i_{T_a}(n\Delta t) T_a(t - (n+m)\Delta t) \right] - \sum_{j=1}^{N_p} Y_i(0) FP^i_{T_{se,j}}(0) T_{se,j}(t) \end{aligned}$$

A l'échelle du quartier, les bâtiments peuvent être représentés comme un assemblage de locaux élémentaire avec leurs caractéristiques thermophysiques propres. Des facteurs de pondération sont calculés pour chacun de ces locaux élémentaires pour pouvoir ensuite calculer les besoins énergétiques de l'ensemble du quartier. Dans notre étude, un local est choisi pour représenter l'étage d'un bâtiment. On peut alors noter que nous avons plusieurs locaux superposer les un sur les autres. Ainsi la température de surface extérieure du plafond du local inférieur est égale à la température de surface extérieure du plancher du local situé au dessus (Figure 52).

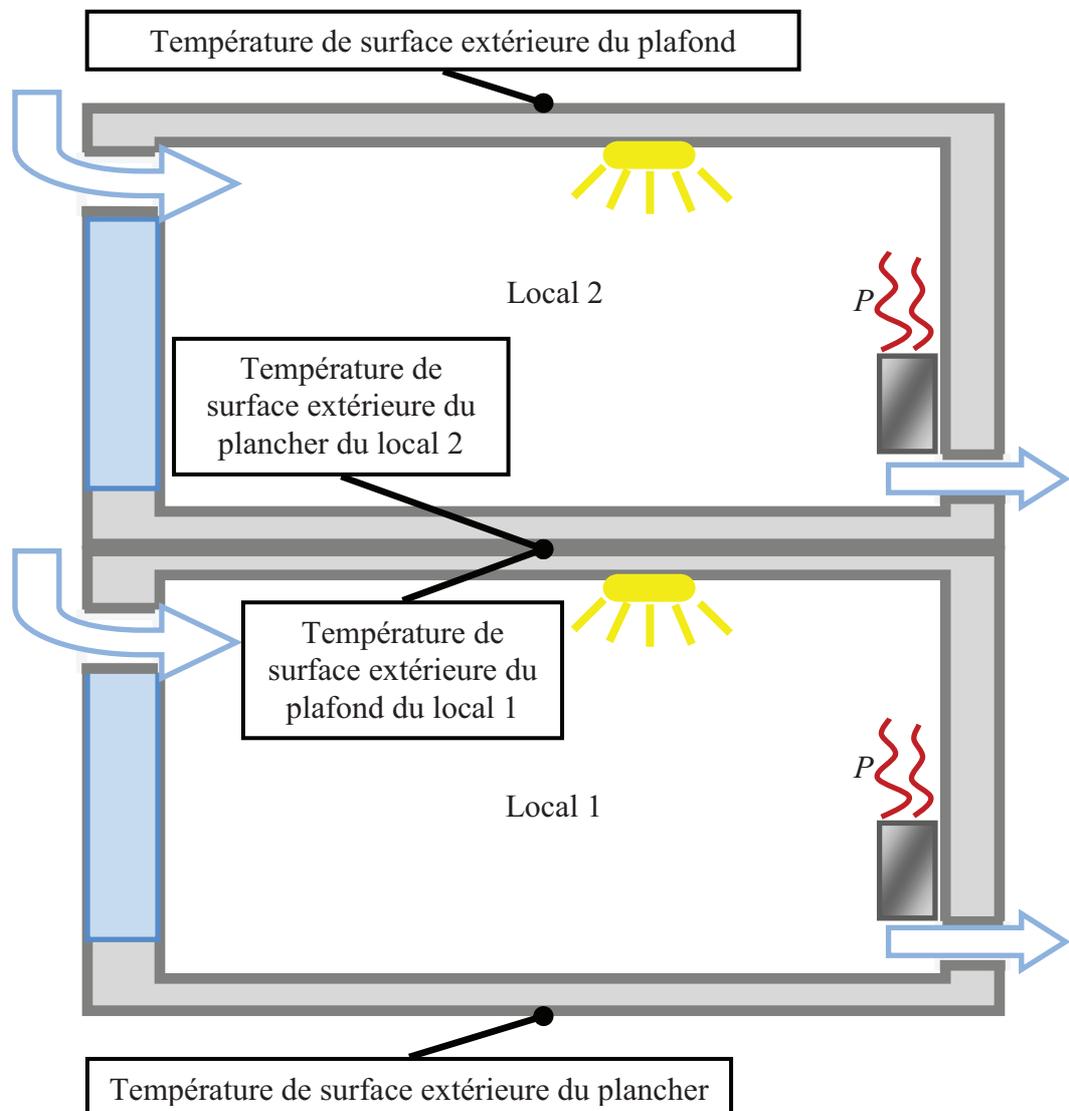


Figure 52 : Représentation des températures de surfaces extérieures correspondant au contact de deux locaux

III.4 Couplage complet

Le quartier peut être décrit comme un ensemble de 3 entités distinctes :

- les surfaces (parois des bâtiments et sols)
- les locaux
- les zones d'air

Des modèles physiques et numériques sont appliqués à chacune de ces entités. Leur couplage permet le calcul des températures de surface, des températures d'air dans les zones et de la charge thermique de chaque local.

Dans un premier temps, les données géométriques et de construction du quartier sont utilisées pour construire les différentes maquettes du quartier (Figure 53). Nous distinguons la maquette SOLENE, la maquette SOLENE triangulée, la maquette SOLENE simplifiée, les maquettes QUIC et GMSH. La construction de la maquette GMSH permet de définir les différents objets physiques que sont les locaux, les surfaces et les zones thermoaérauliques.

La seconde étape (Figure 53) consiste à réaliser tout les pré-calculs nécessaires. Les facteurs de réponse sont calculés pour chaque type de surface et les facteurs de pondération pour chaque local. De plus, pour chaque heure de la période de simulation :

- L'ensoleillement reçu par chaque surface de la maquette SOLENE, est calculé grâce à la méthodologie expliqué dans le chapitre 2.
- Les débits traversant chaque interface des mailles construites dans la maquette GMSH, sont calculés comme expliqué dans la Figure 42.
- Les températures de sol en profondeur sont définies grâce à l'équation [III-51]
- Les températures de ciel sont calculées par l'équation [II-26]

La troisième étape (Figure 53) consiste à réaliser la simulation en tant que telle. Notre système global est composé de N_l locaux, N_s surfaces et N_k zone thermoaérauliques. Pour réaliser notre simulation nous avons alors un système d'équations linéaires composé de N_l équations [III-76] , N_s équations [III-28] et N_k équations [III-18] . La résolution du système linéaire permet de calculer pour chaque heure de la période de simulation la charge thermique de chaque local, les températures de surface extérieure et les températures d'air de chaque zone thermoaéraulique

extérieure.

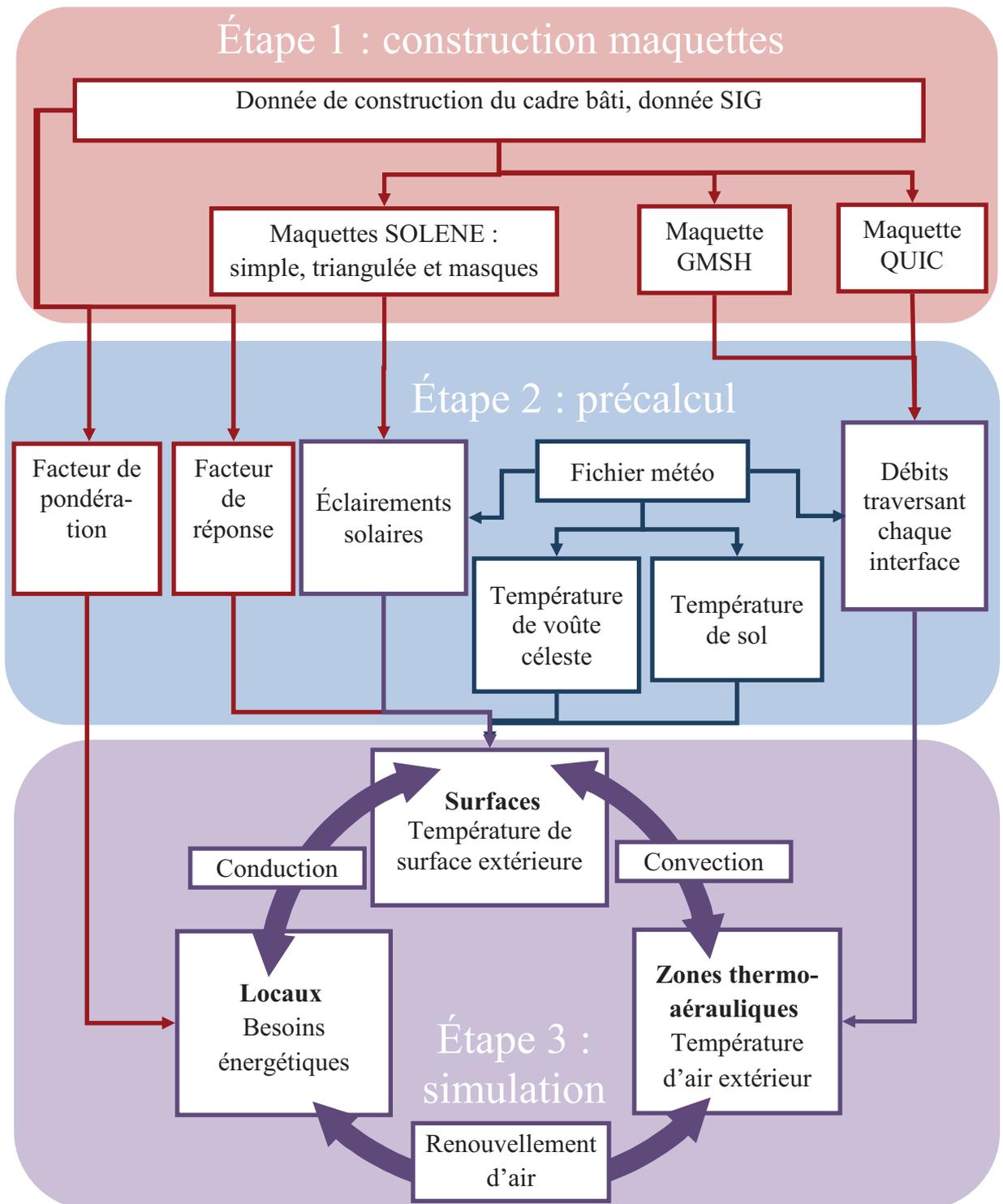


Figure 53 : Représentation des différents processus dans le couplage complet

Nous avons présenté un modèle de couplage permettant de réaliser la simulation des besoins énergétiques d'un quartier. Ce couplage permet d'évaluer les besoins énergétiques d'un ensemble de bâtiments mais aussi les températures de surface de la scène urbaine, et les températures d'air extérieur. Ce modèle couplé peut alors servir d'outil d'aide à la décision pour comparer et analyser l'impact de l'aménagement urbain ou de solutions techniques voire architecturales sur les besoins énergétiques d'un quartier. Nous présentons dans le chapitre suivant les différents résultats obtenus à partir de ce couplage en réalisant différentes simulations annuelles de différents scénarii d'aménagement urbain sur un même quartier

Chapitre IV. Étude des besoins énergétiques du quartier Pin Sec

Nous présentons dans ce chapitre, différents résultats de simulation obtenus grâce au modèle présenté dans le chapitre précédent. En modélisant l'évolution des besoins énergétiques à l'échelle d'un quartier, et surtout en prenant en compte l'interaction entre besoins énergétiques des bâtiments et microclimat urbain, les différentes solutions techniques, architecturales ou urbanistiques peuvent être étudiées par leurs effets directs et indirects. L'effet direct représente l'action d'une solution sur les besoins énergétiques du bâtiment sur lequel est appliquée la solution. L'effet indirect représente l'action d'une solution sur les autres bâtiments sur lesquels elle n'est pas directement appliquée. Cette solution ayant un effet sur le microclimat du quartier, elle va alors influencer les performances énergétiques des bâtiments sur lesquels elle n'est pas directement appliquée. Pour chaque simulation réalisée nous décrirons son impact sur les besoins énergétiques mais aussi sur le microclimat du quartier.

IV.1 Description du quartier d'étude

Le quartier Pin Sec est un quartier de Nantes se situant au Nord-est du centre-ville. La portion du quartier retenue pour l'étude, représentant 13,6 hectares, est un quartier à dominance résidentielle de type grand ensemble. Il est composée de 22 logements collectifs, avec 3 ou 4 étages chacun, et 8 habitations individuelles. Ce quartier comporte une école primaire composée de trois édifices distincts : un gymnase et des bâtiments de salles de cours. Deux autres bâtiments sont des bâtiments associatifs servant à accueillir des activités culturelles et sportives. 11 bâtiments sont des locaux techniques (garage, atelier, entrepôt...).

Pour réaliser une simulation sur le quartier nous regroupons les différents bâtiments dont les comportements thermiques sont similaires (ventilation, occupation, température de consigne...). En s'appuyant sur les différents types de bâtiments définis par la RT 2012, l'ensemble des bâtiments du quartier sont regroupés en 5 catégories :

- logements
- bâtiments scolaires
- gymnase scolaire
- bâtiments sportifs
- locaux techniques

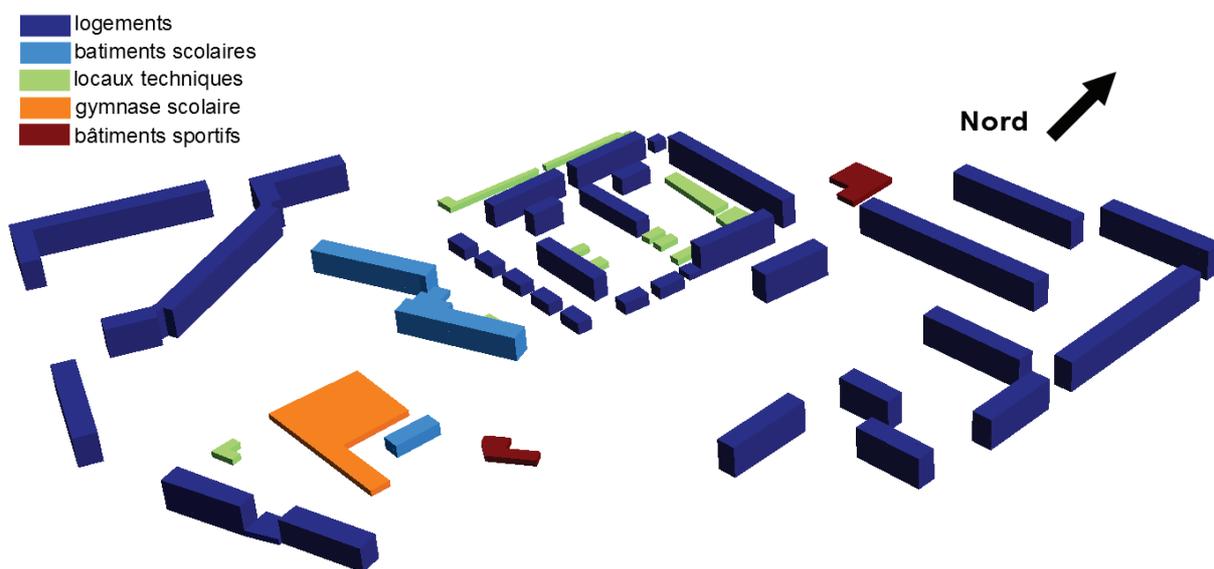


Figure 54 : Représentation des différents types de bâtiments dans le quartier Pin Sec

Le Figure 54 présente la répartition des catégories de bâtiments dans le quartier Pin-Sec. Les différents bâtiments représente 58 393 m² de plancher de logement, 5 474 m² de plancher de bâtiments scolaires, 744 m² de plancher de bâtiments sportifs, 1 214 m² de plancher de locaux

techniques et 2 114 m² de plancher de bâtiments sportifs scolaires. Ainsi, le coefficient d'occupation des sols (COS) de ce quartier est de 0,49 et le coefficient d'emprise au sol (CES) est de 0,14.

IV.2 Paramètres de simulation

IV.2.1 Description des maquettes numériques

Pour réaliser la simulation annuelle des besoins énergétiques du quartier Pin-Sec à l'aide du modèle développé dans les chapitres précédents, plusieurs maquettes numériques du quartier sont nécessaires. La limite du domaine de simulation forme un parallélépipède de 462,9m selon l'axe des x, 519,7m selon y et 30m selon z (hauteur). Le quartier qui est constitué de 40 bâtiments est alors représenté comme un assemblage de 149 zones thermiques intérieures, dont les comportements thermiques sont modélisés grâce à la méthodologie présentée dans la section III.3. Chaque zone thermique intérieure représente un volume de 3 m de haut occupant un étage entier d'un bâtiment. L'ensemble des parois des zones thermiques intérieures et les différentes parties du sol du quartier forme un ensemble de 1706 surfaces. L'air entourant les bâtiments et qui forme la canopée urbaine du quartier est divisé en 3122 zones thermoaérauliques extérieures réparties sur 10 couches de 3 mètre d'épaisseur chacune.

Pour les calculs des échanges par rayonnement, seules les surfaces qui « voient » le ciel sont intégrées. Ce qui forme une maquette de 1551 faces. Pour calculer les éclairagements solaires direct et diffus ces faces sont subdivisées en surfaces plus petites formant une maquette de 15887 facettes triangulées et la maquette servant de masque solaire est composée de 246 faces.

Pour la modélisation des écoulements d'air, les mailles sont hexaédriques avec des dimensions selon x, y et z respectivement égales à 0,5 m, 0,5 m et 3 m. Les limites du domaine de simulation des écoulements aérauliques sont prises légèrement supérieures au domaine de simulation général pour calculer les débits traversant les interfaces des zones thermoaérauliques extérieures aux conditions limites. En effet, pour calculer les débits traversant les interfaces des zones thermoaérauliques, il est nécessaire de calculer les vitesses d'air au centre des mailles hexaédriques qui sont en amont et en aval de l'interface d'où une maquette aéraulique plus large que le volume du domaine d'étude. Le parallélépipède formant la maquette aéraulique a alors une longueur de 482 m selon x, de 542 m selon y et de 39 m selon z. Ce maillage forme une maquette composée de près de 13,6 millions de nœuds.

Les différentes caractéristiques des maquettes numériques sont résumées dans le Tableau 2.

maquette générale	
nombre de bâtiments	51
nombre de zones thermiques intérieures	149
nombre de surfaces	1 706
nombre de zones thermoaérauliques extérieures	3 122
maquette aéraulique	
Δx	0,5 m
Δy	0,5 m
Δz	3 m
nombre de mailles aérauliques	13 584 688
maquette rayonnement	
nombre de faces pour la maquette simple	1 551
nombre de faces pour la maquette triangulée	15 887
nombre de faces pour la maquette masque	246

Tableau 2 : Caractéristiques des différentes maquettes numériques

IV.2.2 Définition des différents scénarios de simulation

Pour étudier les besoins énergétiques des bâtiments à l'échelle d'un quartier, et l'impact de sa conception sur ses performances énergétiques, plusieurs scénarii de simulation ont été définis. Le but est de réaliser une étude comparant un ou plusieurs scénarios pour déterminer lesquels sont les plus efficaces pour réduire les besoins énergétiques des bâtiments et l'impact de différents paramètres sur les performances énergétiques des bâtiments.

Les scénarios ont été choisis afin de permettre d'étudier l'impact à l'échelle d'un quartier des interactions entre les bâtiments et leur environnement. Nous étudions donc l'impact :

- de la composition des parois des bâtiments,
- de l'utilisation de la végétation,
- de la modification de l'albédo,
- des scénarios climatiques extrêmes.

Les 4 différents groupes de scénarii sont décrits ci-après.

IV.2.2.1 Scénarii performance des enveloppes

3 types de scénarios (M1, M2 et M3) ont été définis visant à comparer différents types d'enveloppe de bâtiments pour un environnement urbain entièrement minéral.

Scénario M1

Dans ce premier scénario nommé M1 les performances énergétiques des enveloppes des bâtiments sont très faibles. Les bâtiments sont formés de vitrages simples avec un coefficient U égal à $4,5\text{W}/\text{m}^2/^\circ\text{C}$ et les parois sont constituées de 20 cm de béton. Le sol du quartier est pavé de grès. Les caractéristiques thermophysiques de ces matériaux sont récapitulées dans les Tableaux 3 et 4.

Scénarii M2 et M3

Pour le second scénario nommé M2 les performances énergétiques des enveloppes des bâtiments sont augmentées en utilisant un double vitrage et une isolation par l'intérieur. Le troisième scénario M3 est identique mais avec une isolation par l'extérieur.

Les propriétés thermophysiques des différents vitrages et parois utilisées dans les différentes variantes de simulation sont regroupées respectivement dans les Tableaux 3 et 4.

	épaisseur [m]	conductivité thermique [W/m .K]	masse volumique [kg/m ³]	capacité calorifique [J/kg.K]	réflectivité solaire	émissivité
Revêtement de sol extérieur						
Grès	0,1	2,6	2500	880	0,3	0,9
Terre	0,5	0,7	1600	900	–	–
Parois verticales et horizontales des bâtiments						
Béton	0,2	1,75	2300	837	0,3	0,9
Isolant	0,3	0,035	80	1190	–	–
Plancher en contact avec le sol						
Béton	0,2	1,75	2300	837	–	–
Terre	0,5	0,7	1600	900	–	–

Tableau 3: Propriétés thermophysiques de différentes parois utilisées dans les différents scénarii de simulation (M1, M2 et M3)

	transmission thermique [W/m ² .K]	facteur solaire	réflectivité solaire	émissivité
Vitrage simple	4,5	0,6	0,3	0,9
Vitrage double	1,5	0,6	0,3	0,9

Tableau 4 : Propriétés thermophysiques des différents vitrages utilisés dans les différents scénarii de simulation (M1, M2 et M3)

IV.2.2.2 Scenario végétalisation des toitures et des sols

Ce scénario vise à étudier l'impact des surfaces végétales. Ainsi, tous les toits sont remplacés par des toitures végétales et l'ensemble des parois minérales formant le sol du quartier est remplacé par des pelouses. Les caractéristiques des parois sont celles utilisées dans le scénario M3. Pour décrire la végétalisation dans notre modèle nous considérons que la température de surface des végétaux est égale à la température de l'air ambiant, comme présenté dans la section I.2.5. On considère alors que le végétal absorbe le rayonnement solaire pour maintenir les températures de surface des végétaux égal à celle de l'air ambiant par évapotranspiration, ce qui a pour effet de supprimer les transferts de chaleur sensible (de la Flor and Domínguez 2004; Leuzinger et al. 2010). De ce fait nous considérons que pour chaque surface végétale, la température de surface est égale à la température de la zone thermoaéraulique en contact avec celle-ci. Ce scénario est identifié comme le scénario V3.

IV.2.2.3 Scenario modification de l'albédo

Ce scénario vise à étudier l'impact de l'augmentation de l'albédo des parois des bâtiments (utilisation de peinture blanche sur les toits et les façades de chaque bâtiment). Dans ce cas, ce sont les propriétés radiatives courte longueur d'onde qui sont modifiées, tous les murs et les toits des bâtiments ont une réflectivité égale à 0,88. Ce scénario est identifié comme le scénario P3.

IV.2.2.4 Scénarii climat extrême

Ces scénarii visent à étudier l'impact de climats extrêmes liés aux changements climatiques. Un fichier de données météorologiques constitué des températures moyennes et d'ensoleillement supérieurs aux normales saisonnières est appliqué sur les scénarii M3, V3 et P3 pour former des scénarii nommés respectivement M3max, V3max et P3max.

Nous récapitulons dans le Tableau 5 les caractéristiques des différents scénarii simulés.

	M1	M2	M3	V3	P3	M3max	V3max	P3max
Bâtiments avec parois sans isolant et simple vitrage	×	-	-	-	-	-	-	-
Bâtiments avec parois avec isolant intérieur et double vitrage	-	×	-	-	-	-	-	-
Bâtiments avec parois avec isolant extérieur et double vitrage	-	-	×	×	×	×	×	×
Sol extérieur minéral	×	×	×	-	×	×	-	×
Peinture blanche sur les murs et les toits des bâtiments	-	-	-	-	×	-	-	×
Toitures végétales et sol extérieur végétalisé	-	-	-	×	-	-	×	-

Tableau 5 : Caractéristiques des différents scénarii de simulation

IV.2.3 Les données météorologiques

Pour les différents scénarii de simulation, deux bases données météorologiques sont utilisées. La première représente une année moyenne à Nantes à partir de données standards normalisées par Meteonorm², et la seconde représente un scénario climatique extrême avec une température moyenne annuelle ayant augmenté de 1,4°C et un ensoleillement annuel augmenté de 15% (également normalisé par l'outil Meteonorm).

degrés-heures	inférieur à 19°C	supérieur à 26°C
données météorologiques standards	67929	243
données météorologiques maximales	55836	480
Différence relative (%)	-17,8%	97,5%

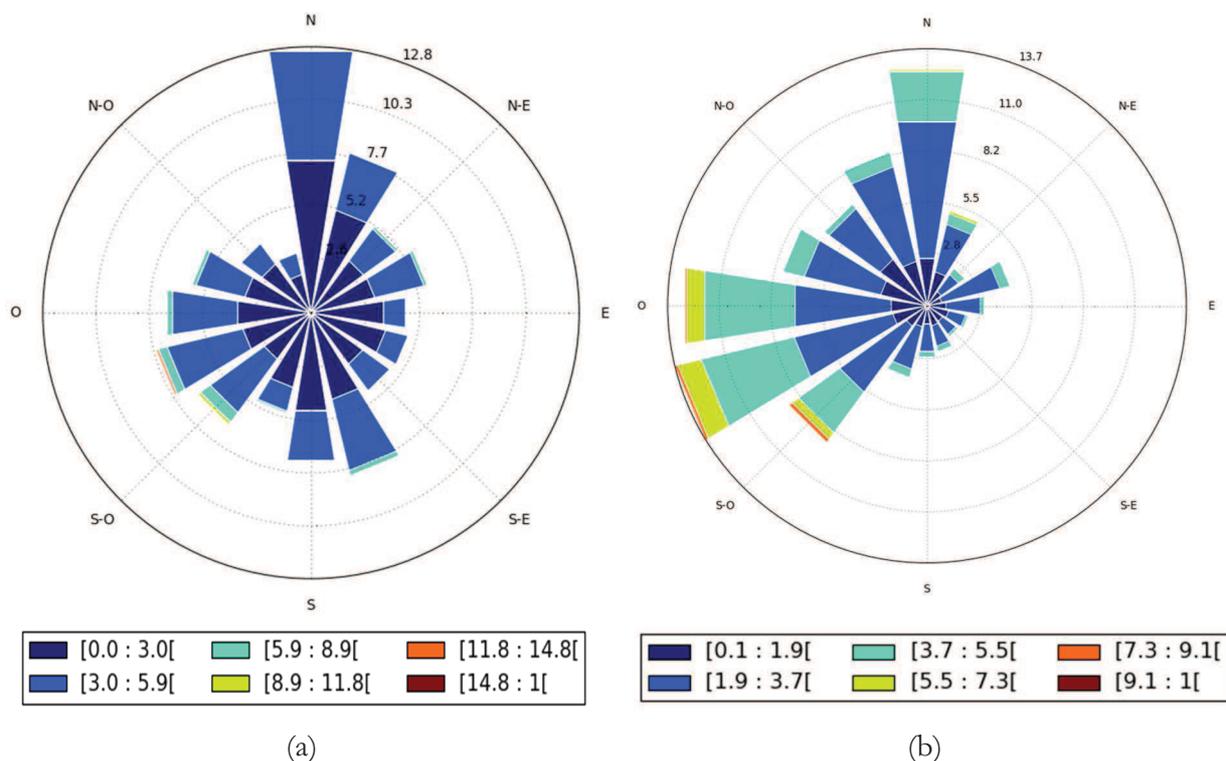
Tableau 6 : degrés-heures pour les différents scénarios climatiques

Le Tableau 6 donne le nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C (température de confort d'été) pour la période dite d'été, du 1^{er} mai au 30 septembre, et le nombre de degrés-heures inférieurs à 19°C (température de consigne de chauffage) pour la période de chauffe, du 1^{er} octobre au 30 avril. On remarque que le nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C est augmenté de 97% et le

² Meteonorm est un logiciel distribué par le CSTB et qui fournit des bases de données météorologiques sur plus de 8055 stations dans le monde

nombre de degrés-heures inférieurs à 19°C a diminué de 18% pour le scénario climatique maximal.

Les régimes de vent sont identiques pour les deux scénarii climatiques. On distingue les régimes de vent correspondant à la saison d'hiver et la saison d'été. En hiver, c'est le vent du nord qui est dominant par rapport aux autres (Figure 55 (a)), alors qu'en été trois profils de vent prédominent à savoir un vent de Nord, d'Ouest et de Sud-Ouest (Figure 55 (b)).



bâtiment et des scénarios de présence et de sommeil. On considère que le corps d'un adulte au repos dégage 90 W et celui d'un adulte en période de sommeil dégage 63 W. Le nombre d'occupants est défini à partir du nombre d'adultes équivalent par m² tel que donné dans la RT 2012. Les apports internes de chaleur dus aux équipements représentent la chaleur dégagée par l'ensemble des équipements « mobiliers » (électroménagers, ordinateurs ...). Ces apports internes dépendent du taux d'équipement des bâtiments. La méthode de calcul développée dans la RT 2012 distingue les apports internes de chaleur liés aux équipements en fonctionnement permanent et ceux liés aux équipements qui fonctionnent uniquement lors des périodes de présence des occupants. En ce qui concerne les logements collectifs, conventionnellement, la puissance de chaleur dégagée par l'ensemble des équipements en occupation est prise égale à 5,7 W/m² et celle dégagée par les équipements en période de sommeil et en inoccupation est prise égale à 1,1 W/m². Pour définir les apports internes de chaleur dus à l'éclairage on considère 1,4W/m² de puissance d'éclairage lors des périodes d'occupation et en dehors des périodes de sommeil. La Figure 56 permet de visualiser la somme des gains internes sur l'année selon chaque type de bâtiments.

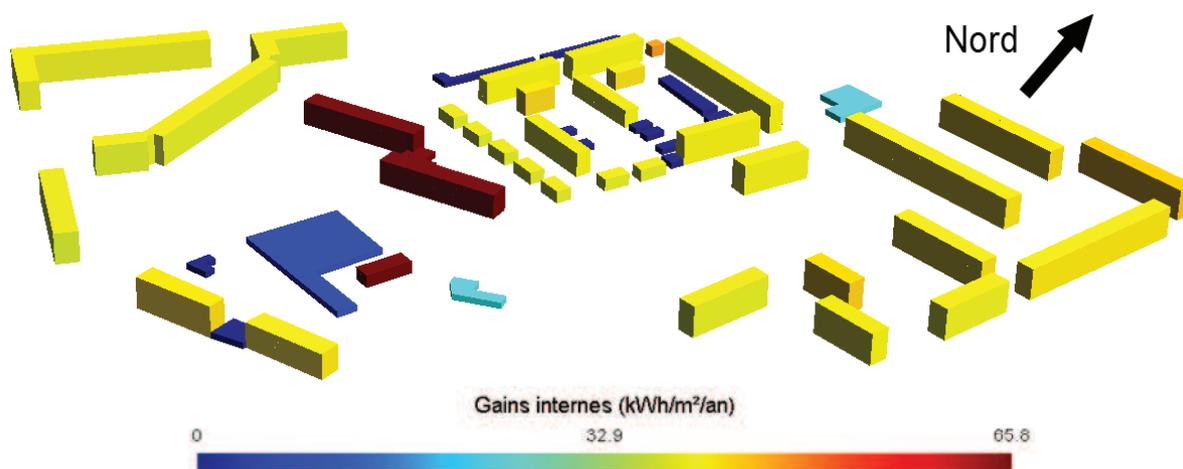


Figure 56 : Représentation des gains internes par bâtiments

En ce qui concerne la ventilation hygiénique on distingue les bâtiments d'habitation et bâtiments tertiaires. Pour les premiers on utilise un taux de ventilation hygiénique réglementaire correspondant à l'arrêté du 24 mars 1982 relatif à l'aération des logements. Pour les logements de type T3, un taux de 75 m³/h est appliqué lors de la présence des occupants et un taux de 135 m³/h est appliqué 14 heures par semaine lors de la préparation des repas. Pour les bâtiments tertiaires (écoles et bâtiments sportifs) on utilise les taux de ventilation préconisés dans le Règlement Sanitaire Départemental Type du 09 août 1978. Soit 15 m³/h et par occupant pour les bâtiments scolaire, et 25m³/h et par occupant pour les bâtiments sportifs et le gymnase scolaire.

Pour tous les bâtiments, en dehors des locaux techniques, la température de consigne est définie de manière très simplifiée afin de pouvoir mettre en évidence dans cette étude le couplage entre besoins énergétiques des bâtiments et microclimat urbain. En hiver, la température d'air intérieur ne doit pas être inférieure à 19°C et en été la température d'air intérieur ne doit pas dépasser 26°C. Pour les locaux techniques, dont les ambiances ne sont pas contrôlées, on simule en première approche l'absence de système en imposant une température de consigne égale à la température d'air extérieur fournie par les données météorologiques.

IV.3 Analyse des résultats

Les résultats obtenus par les différents scénarii de simulation sont regroupés en plusieurs classes pour être comparés les uns avec les autres. La première classe regroupe les scénarii M1, M2 et M3, le but étant d'étudier l'impact des performances thermiques des enveloppes des bâtiments. La deuxième classe regroupe les scénarii M3, P3 et V3, le but étant d'étudier l'impact de la modification de l'albédo ou de surfaces végétales sur les besoins énergétiques des bâtiments. La troisième classe regroupe les scénarii M3max, P3max et V3max, le but étant d'étudier l'impact du changement climatique sur les besoins énergétiques des bâtiments. Pour chaque type de scénario, l'analyse de l'effet direct sur les besoins énergétiques se fera en calculant les besoins en climatisation et en chauffage, les puissances maximales de climatisation et de chauffage ou le nombre d'heures sur l'année où la climatisation est nécessaire. Pour analyser l'effet indirect, nous étudierons l'impact du scénario sur le microclimat du quartier en calculant pour chaque zone thermoaéroulque extérieure, soit pour les températures extérieures, le nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C pour la période dite d'été et le nombre de degrés-heures inférieurs à 19°C pour la période de chauffe.

IV.3.1 Résultats préliminaires

Nous présentons dans cette première partie différents résultats obtenus pour le scénario M1 afin d'explorer les possibilités du modèle développé.

IV.3.1.1 Impacts énergétiques

Nous représentons sur la Figure 57 les fréquences cumulées des besoins énergétiques en chauffage de l'ensemble des zones thermiques intérieures formant les bâtiments du quartier. En excluant les 11 locaux techniques où la température de consigne imposée est celle de la température extérieure. Les besoins énergétiques minima sont de 85,7 kWh/m² an et les besoins énergétiques maxima sont de 368,5 kWh/m² an.

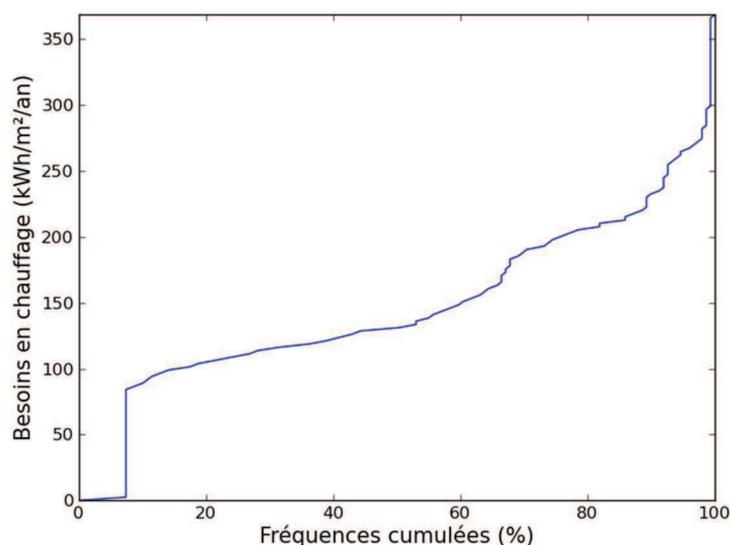


Figure 57 : Représentation des besoins annuels de chauffage en fréquence cumulée pour le scénario M1

La Figure 58 permet de visualiser comment sont réparties ces valeurs dans le quartier. On peut ainsi voir que dans un bâtiment composé de plusieurs zones thermiques intérieures, c'est toujours la zone thermique située à l'étage supérieur qui a les besoins les plus importants. Ceci est dû au fait que le toit présente une surface d'échange avec l'extérieur plus importante, augmentant de ce fait les déperditions thermiques.

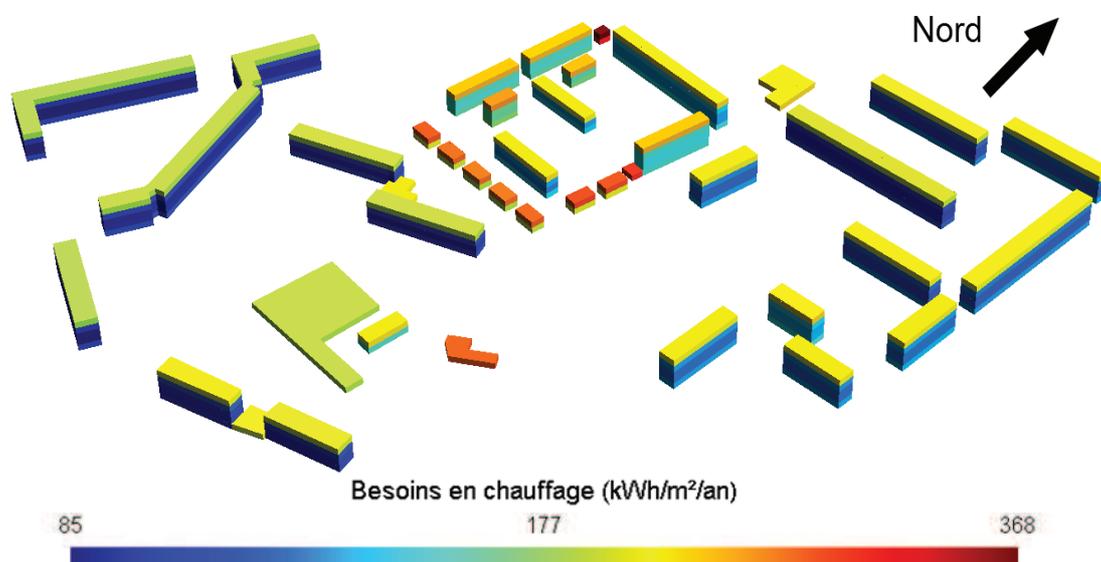


Figure 58: Représentation tridimensionnelle des besoins en chauffage du quartier (scénario M1)

Nous donnons sur la Figure 59 les fréquences cumulées des besoins énergétiques en climatisation de l'ensemble des zones thermiques intérieures formant le quartier. Il faut noter que ces besoins énergétiques correspondent uniquement aux besoins en énergie sensible. En excluant les 11 locaux techniques où il n'y a pas de système de climatisation, les besoins énergétiques minima sont de 7,6 kWh/m²/an et les besoins énergétiques maxima sont de 31,6 kWh/m²/an. La Figure

60 permet de visualiser la répartition spatiale de ses valeurs dans le quartier.

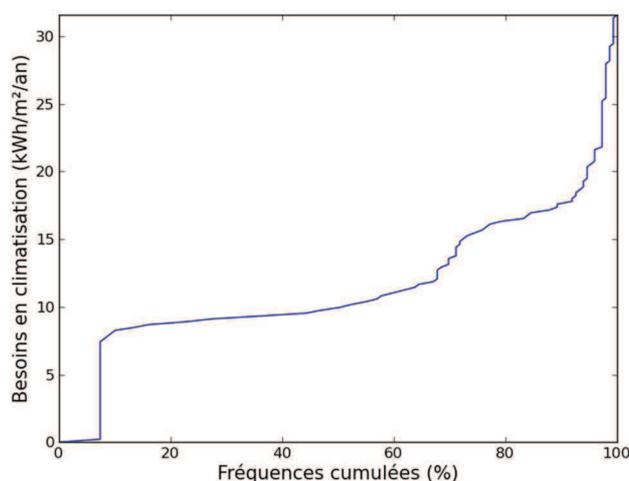


Figure 59: Répartition des besoins de climatisation (scénario M1)

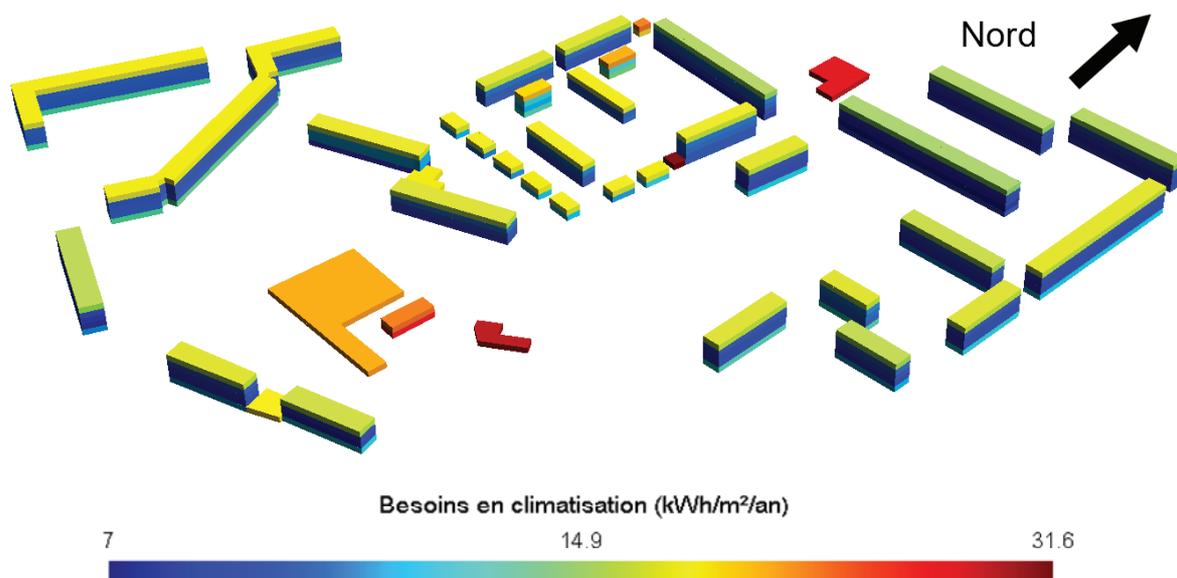


Figure 60 : Représentation tridimensionnelle des besoins en climatisation du quartier (scénario M1)

De même que pour les besoins de chauffage, ce sont les zones thermiques intérieures du dernier étage des bâtiments qui ont les besoins en climatisation les plus importants. Le rayonnement solaire reçu étant plus conséquent, plus d'énergie est nécessaire pour maintenir des températures intérieures confortables. De plus, l'orientation du bâtiment joue un rôle prépondérant dans les besoins en climatisation. En saison d'été, le rayonnement solaire pénétrant dans les zones thermiques intérieures qui est source de surchauffe, est moins important pour les bâtiments dont la majorité des vitrages ont une orientation Sud-Nord que pour les bâtiments orientés Est-Ouest. La Figure 61 présente pour chaque local le rayonnement solaire entrant, qui est lié directement à

l'orientation et la proportion de vitrage (Figure 62). Ainsi le bâtiment n°1 orienté Est-Ouest avec un fort taux de vitrage, et peu d'obstacle créant des ombres, est le bâtiment qui reçoit le plus d'apport solaires, alors que le bâtiment n°2 qui est orienté Sud avec un faible taux de vitrage est celui pour lequel le rayonnement solaire entrant est le plus faible.

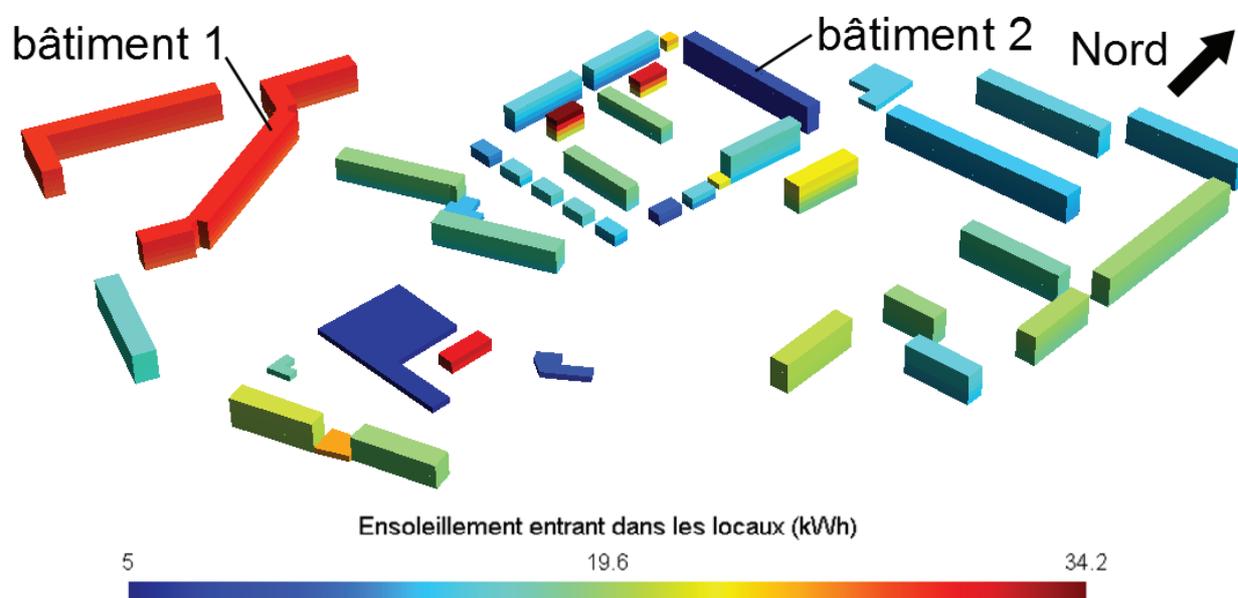


Figure 61 : Rayonnement solaire entrant dans les zones thermiques intérieures en période d'été (scénario M1)

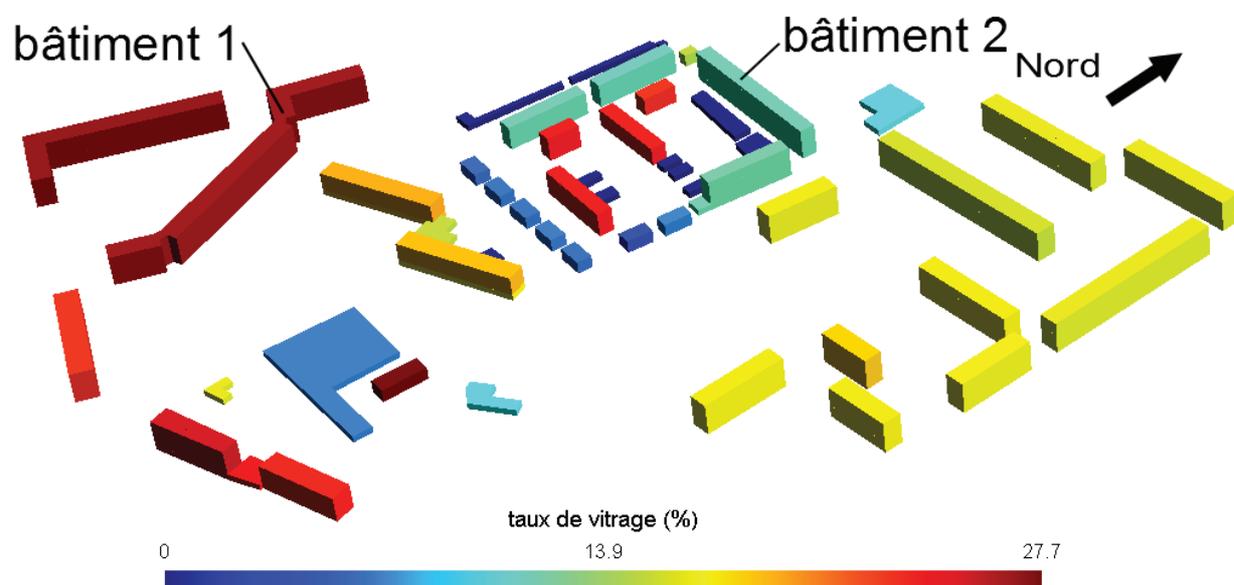


Figure 62 : Taux de vitrage (m^2 de surface vitrée par m^2 de plancher) pour les différentes zones thermiques intérieures formant le quartier Pin Sec

D'autre part on peut noter que pour certains bâtiments composés de plusieurs étages, les zones thermiques intérieures du rez-de-chaussée nécessitent plus d'énergie que les étages intermédiaires. Ceci est principalement dû aux effets du microclimat urbain que nous analysons dans la suite.

IV.3.1.2 Impact microclimatique

La Figure 63 présente le nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C pour les zones thermoaérauliques extérieures de la maquette du quartier. Il apparait une nette différence entre la couche inférieure et les couches supérieures. Cette différence s'explique par le fait que le sol et les parois composées respectivement de grès et de béton absorbent une quantité importante de rayonnement solaire ayant pour effet d'augmenter la température de surface et de l'air à proximité. Ceci explique donc en partie les besoins en climatisation plus importants observés précédemment au rez-de-chaussée.

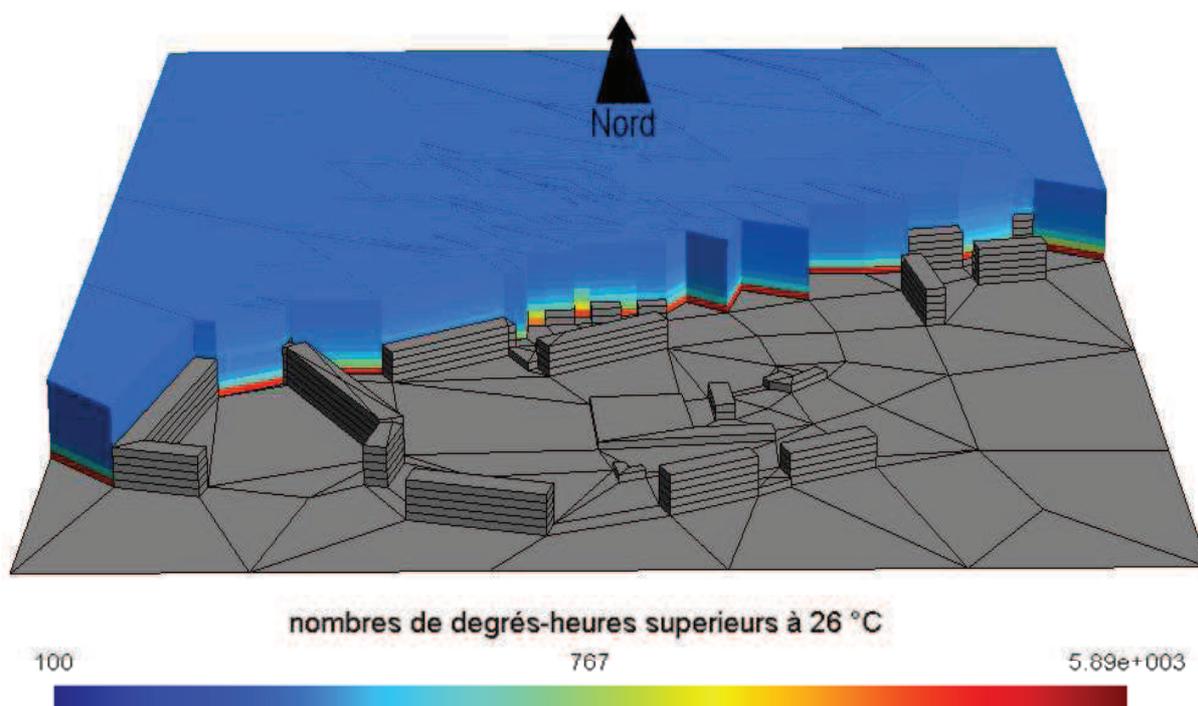


Figure 63: Représentation tridimensionnelle du nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C pour les zones thermoaérauliques extérieures (scénario M1)

La Figure 64 montre une cartographie du nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C pour toutes les zones thermoaérauliques extérieures en contact avec le sol. Elle permet de mettre en évidence les zones du quartier les plus soumises à l'îlot de chaleur urbain.

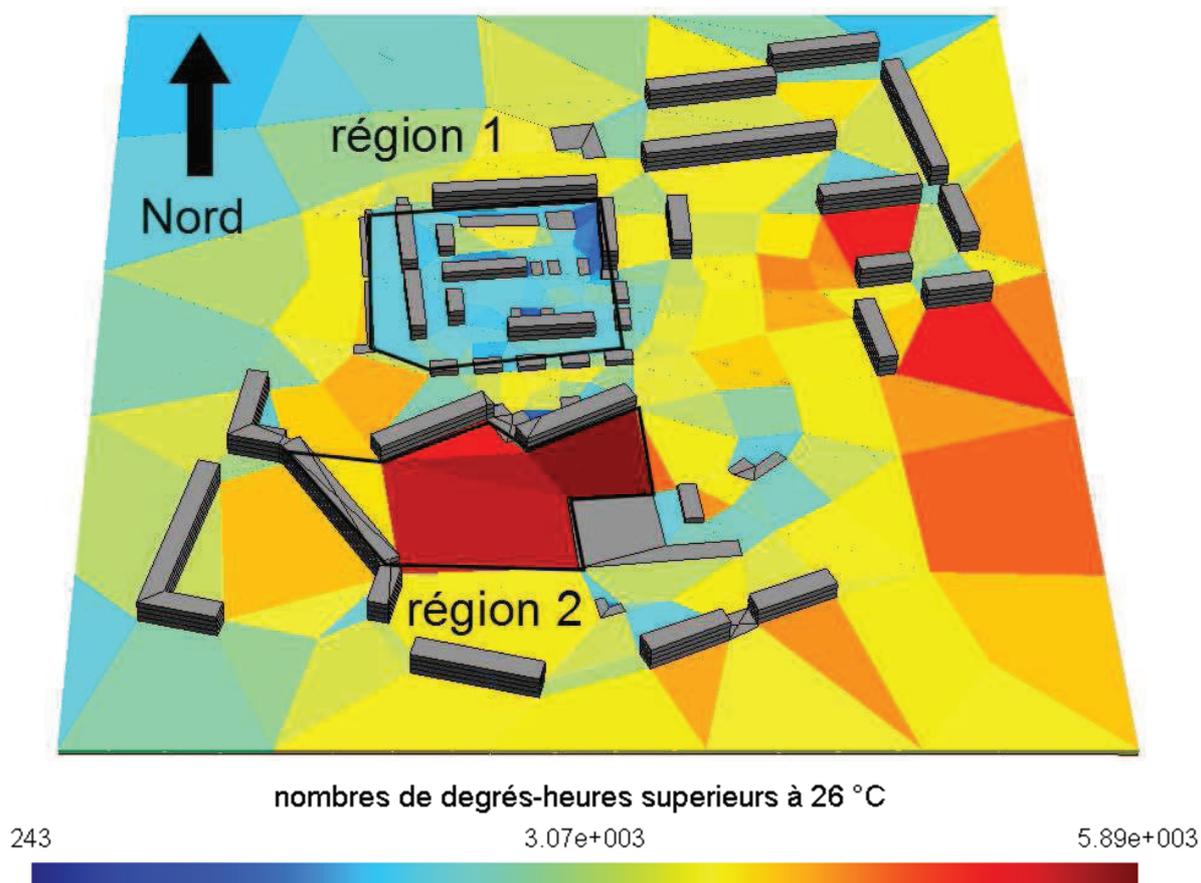


Figure 64 : Répartition horizontale du nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C pour les zones thermoaérauliques extérieures situées sur la première couche ($0 \leq z \leq 3$ m) (scénario M1)

Plusieurs phénomènes expliquent la disparité des valeurs présentées sur la Figure 64. En observant la rose des vents de la saison dite d'été (Figure 55), on s'aperçoit que les vents dominants sont orientés Ouest, Nord et Sud-Ouest. Ceci permet d'expliquer le fait que les zones thermoaérauliques extérieures situées aux limites Ouest et Nord de la maquette ont un nombre de degrés-heures inférieurs aux zones situées au Sud et à l'Est. En s'introduisant entre les bâtiments l'air a tendance à se réchauffer en partant du Nord-Ouest et en allant vers le Sud-Est. Sur la Figure 64 deux zones représentatives des phénomènes microclimatiques présents ont été distinguées. La région 1, dont le nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C varie entre 1 300 et 3 500, représente la région la plus « fraîche » du quartier, et la région 2, dont le nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C varie entre 4 000 et 5 890, représente la région la plus « chaude » du quartier. La région 1 est la région du quartier où la densité de bâtiments est la plus importante. La hauteur des bâtiments et le faible espace entre eux réduit l'accès au rayonnement solaire, comme représenté sur la Figure 65, ce qui a pour effet de moins réchauffer l'air les entourant. La région 2 qui est une zone moins dense a un accès au rayonnement solaire plus important, ce qui va avoir tendance à réchauffer d'avantage l'air.

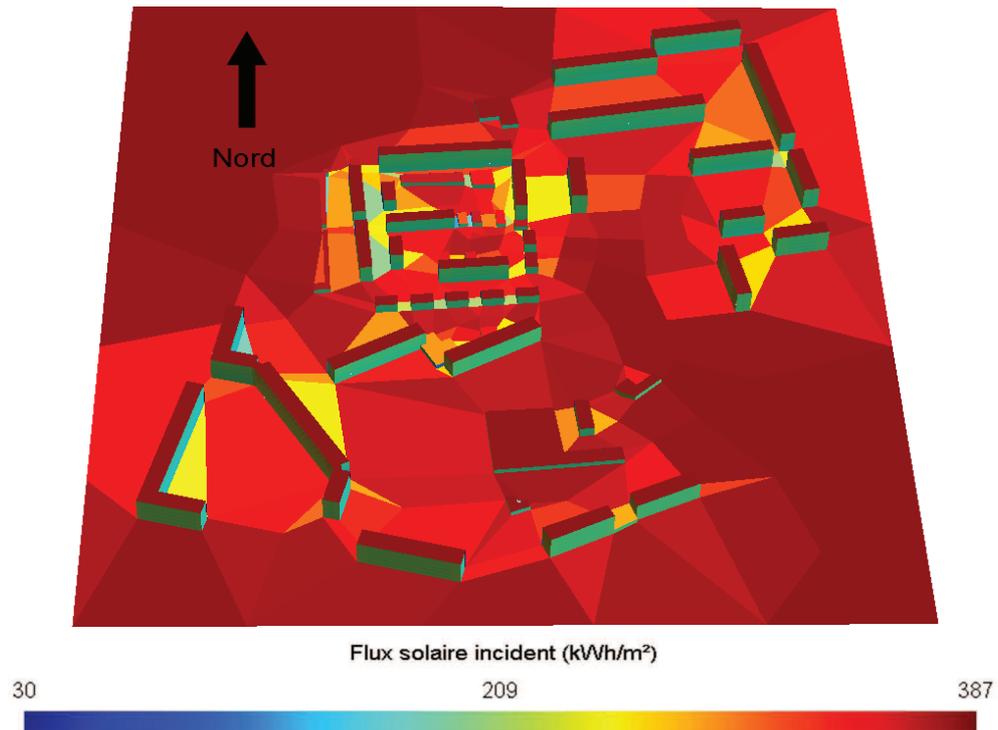


Figure 65 : Flux solaire reçu par chaque surface du quartier en période d'été (scénario M1)

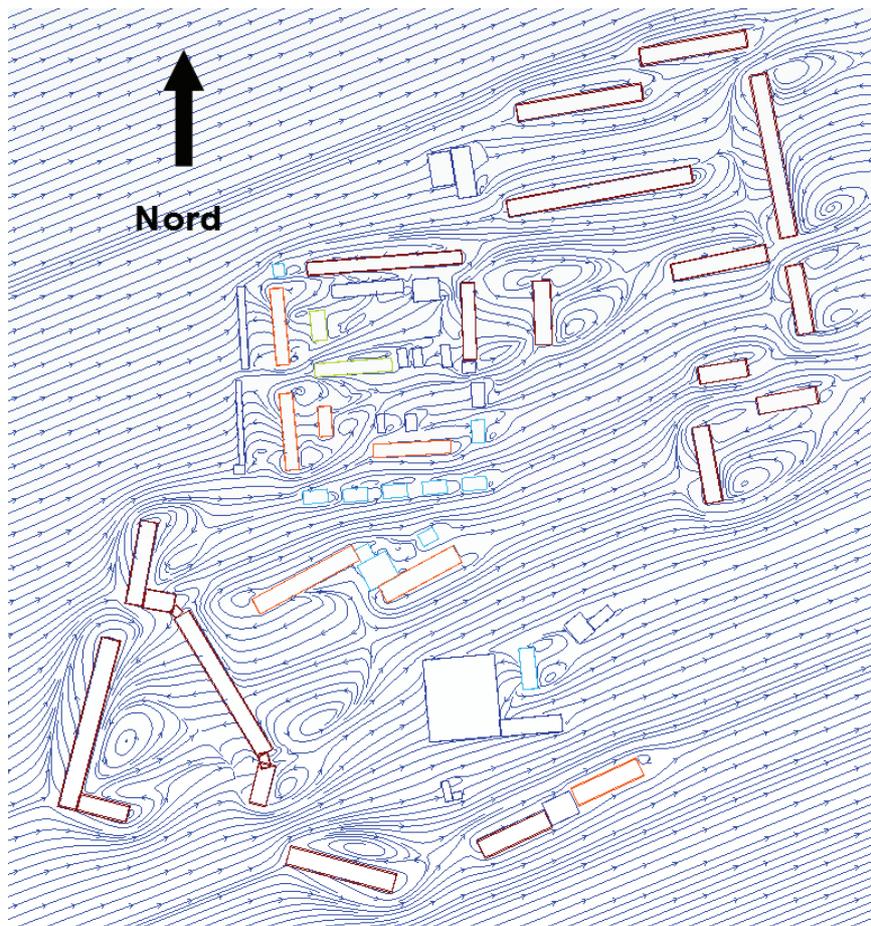


Figure 66 : Représentation des lignes de courant pour un vent orienté à -112° par rapport au nord (Sud-Ouest-Ouest) avec une vitesse de 6m/s dans le quartier Pin Sec

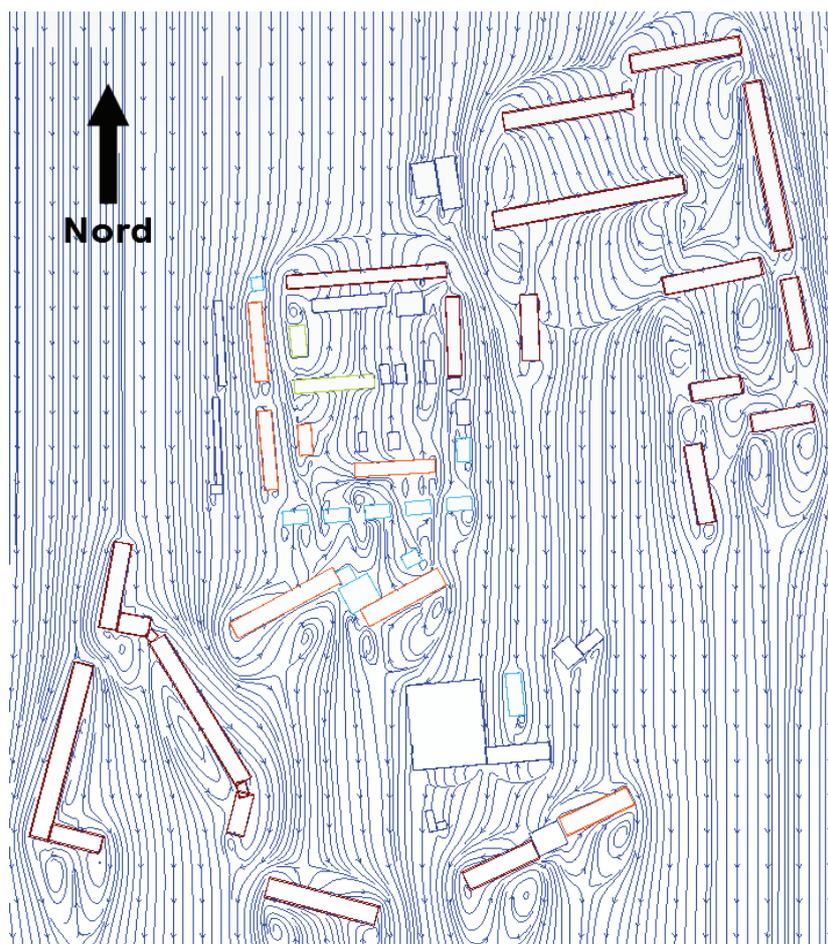


Figure 67 : Représentation des lignes de courant pour un vent orienté au nord° avec une vitesse de 4,5m/s dans le quartier Pin Sec

De plus les bâtiments situés au Nord et à l'Ouest de la région 2 forment des obstacles au vent dominant. Les régions situées sous le vent (Figure 66 pour un vent orienté Sud-Ouest et Figure 67 pour un vent orienté Nord) ont un renouvellement d'air plus faible ayant pour effet d'augmenter le nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C. Les besoins en climatisation pour les zones thermiques intérieures situées au rez-de-chaussée des bâtiments dans la région 2 sont donc plus importants que ceux dans la région 1 comme indiqué sur la Figure 60.

La Figure 68 présente le nombre de degrés-heures inférieurs à 19°C pour les zones thermoaérauliques extérieures en contact avec le sol. Nous pouvons faire les mêmes conclusions que pour la période d'été. Les surfaces au sol situées dans la région 1 à haute densité bâti, et au nord des bâtiments orientés selon l'axe Nord-Sud, reçoivent peu d'ensoleillement comme indiqué sur la Figure 69. De ce fait, le nombre de degrés-heures inférieurs à 19°C des zones thermoaérauliques correspondantes est donc élevé. Les zones thermoaérauliques situées au sud des bâtiments orientés sud sont protégées des vents dominants d'hiver et ont donc un faible nombre de degrés-heures inférieurs à 19°C.

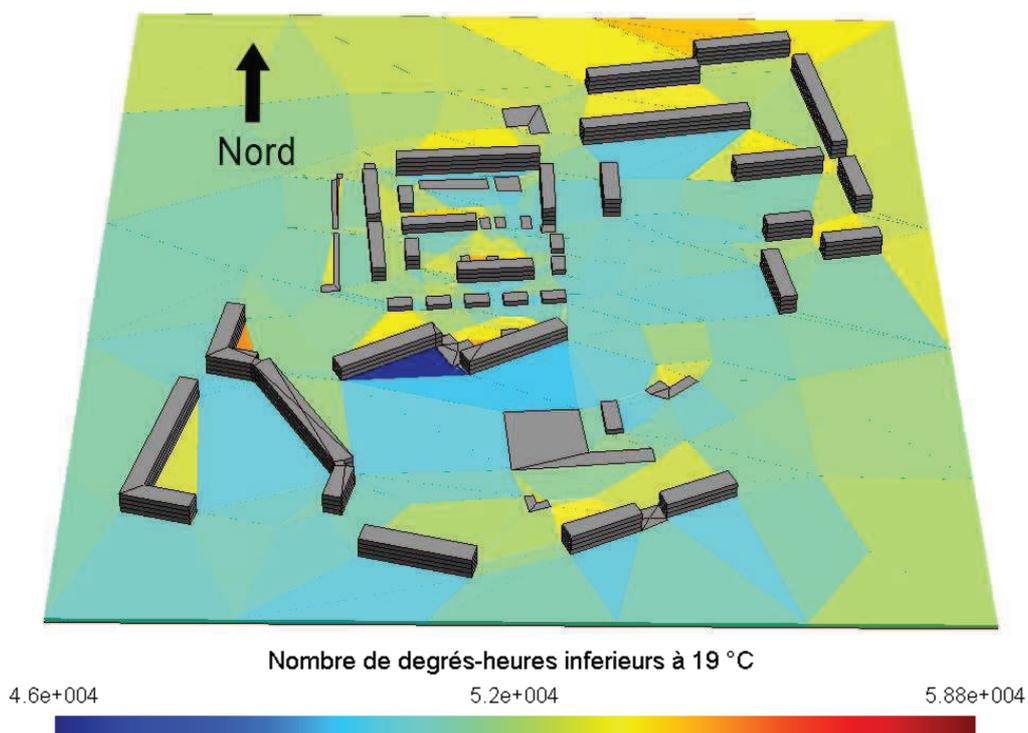


Figure 68 : Répartition horizontale du nombre de degrés-heures inférieurs à 19°C pour les zones thermoaérauliques extérieures situées sur la première couche ($0 \leq z \leq 3m$) (scénario M1)

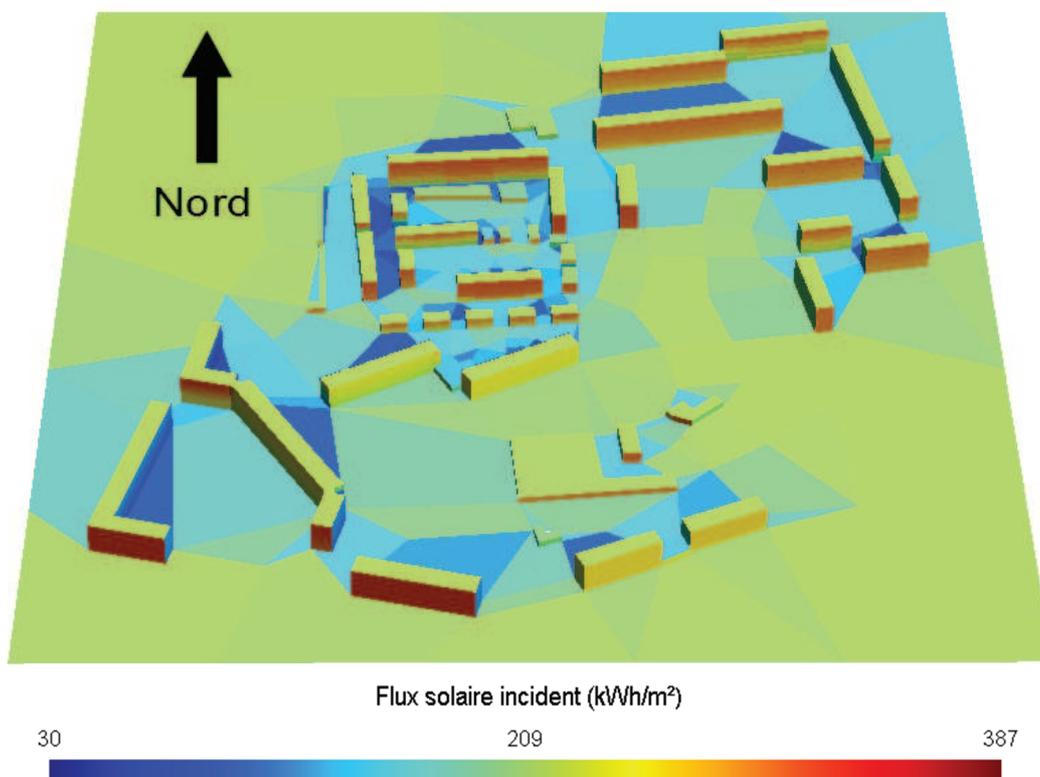


Figure 69 : Flux solaire reçue par chaque surface du quartier en période d'hiver (scénario M1)

IV.3.2 Impact des performances de l'enveloppe des bâtiments

Nous comparons dans cette section les différences des performances énergétiques liées à l'isolation thermique des bâtiments, soit les cas M1, M2 et M3.

IV.3.2.1 Impacts énergétiques

Les Figures 70 et 71 présentent respectivement la répartition en fréquences cumulées des besoins de chauffage et de climatisation dans le quartier pour les 3 cas.

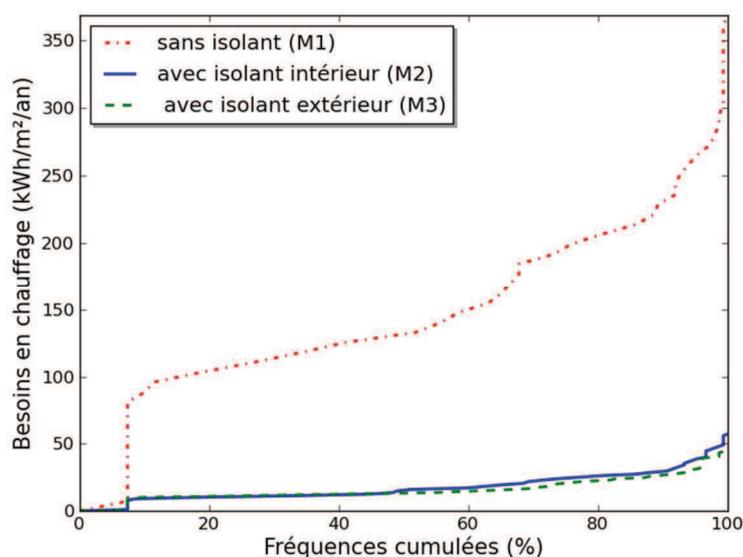


Figure 70 : Répartition des besoins en chauffage du quartier Pin Sec pour les scénarii M1, M2 et M3

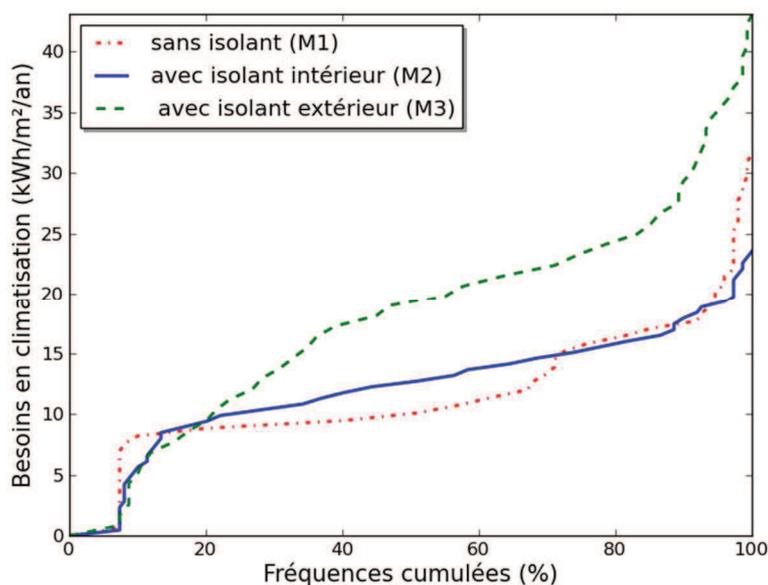


Figure 71 : Répartition des besoins en climatisation du quartier Pin Sec pour les scénarii M1, M2 et M3

Le gain sur les besoins de chauffage est très similaire dans les deux cas (Figure 70) car les ponts

thermiques ne sont pas pris en compte dans le modèle thermique de bâtiment. Il apparaît que l'ajout d'une isolation extérieure permet de diminuer les besoins de chauffage entre 70% et 96%, alors que l'utilisation d'une isolation intérieure donne une réduction entre 62% et 95%. Les résultats obtenus pour les besoins en climatisation sont beaucoup plus hétérogènes. L'isolation extérieure permet de diminuer les besoins en climatisation pour seulement 13% des zones thermiques intérieures, avec une réduction pouvant atteindre 93%, et augmentent les besoins de 80% des zones thermiques intérieures, avec une augmentation pouvant atteindre jusqu'à 286%. L'utilisation de l'isolation intérieure permet de réduire les besoins énergétiques de 39% des zones thermiques intérieures formant le quartier, mais augmentent les besoins en climatisation de 54%. L'isolation semble une solution efficace pour réduire les besoins de chauffage, mais en contrepartie cette forte capacité à isoler de l'environnement extérieur se révèle inefficace en été. En effet la chaleur absorbée par les matériaux (rayonnement solaire) transmise dans les zones thermiques intérieures ainsi que les gains internes, est mal évacuée et produit des phénomènes de surchauffe qui font augmenter les besoins en climatisation.

Les Figures 72 et 73 et donnent respectivement les différences relatives des besoins en climatisation entre le scénario M1 et M3, et entre le scénario M1 et M2. Il apparaît que c'est surtout pour les étages intermédiaires que les besoins en climatisation augmentent, alors que pour les zones thermiques intérieures situées aux derniers étages les besoins en climatisation ont tendance à diminuer.

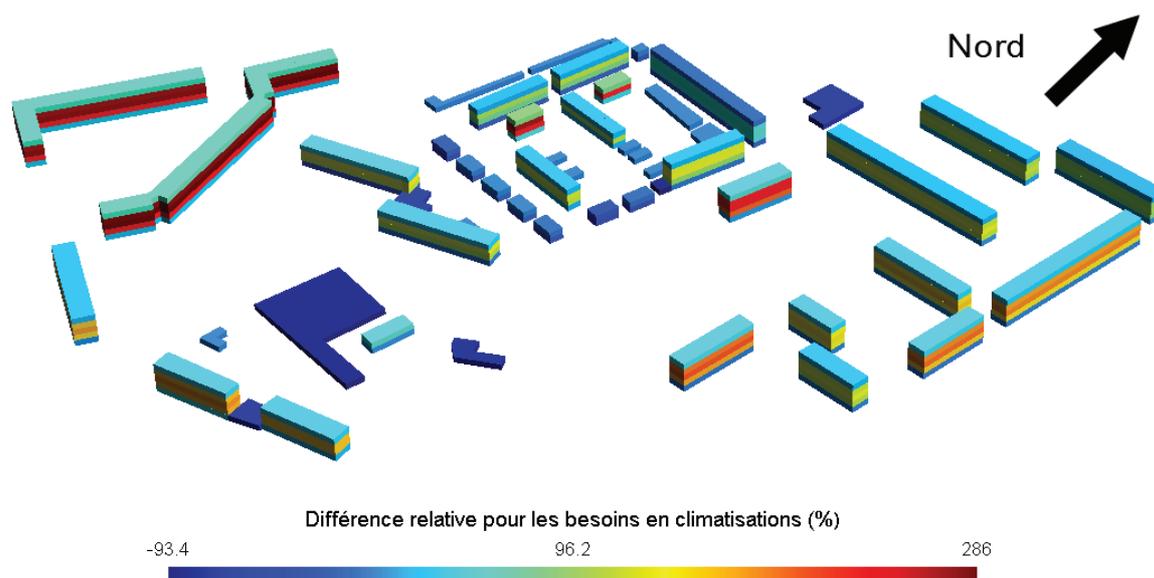


Figure 72: Représentation des différences relatives des besoins en climatisation entre le scénario M1 (sans isolant) et le scénario M3 (avec isolation extérieure)

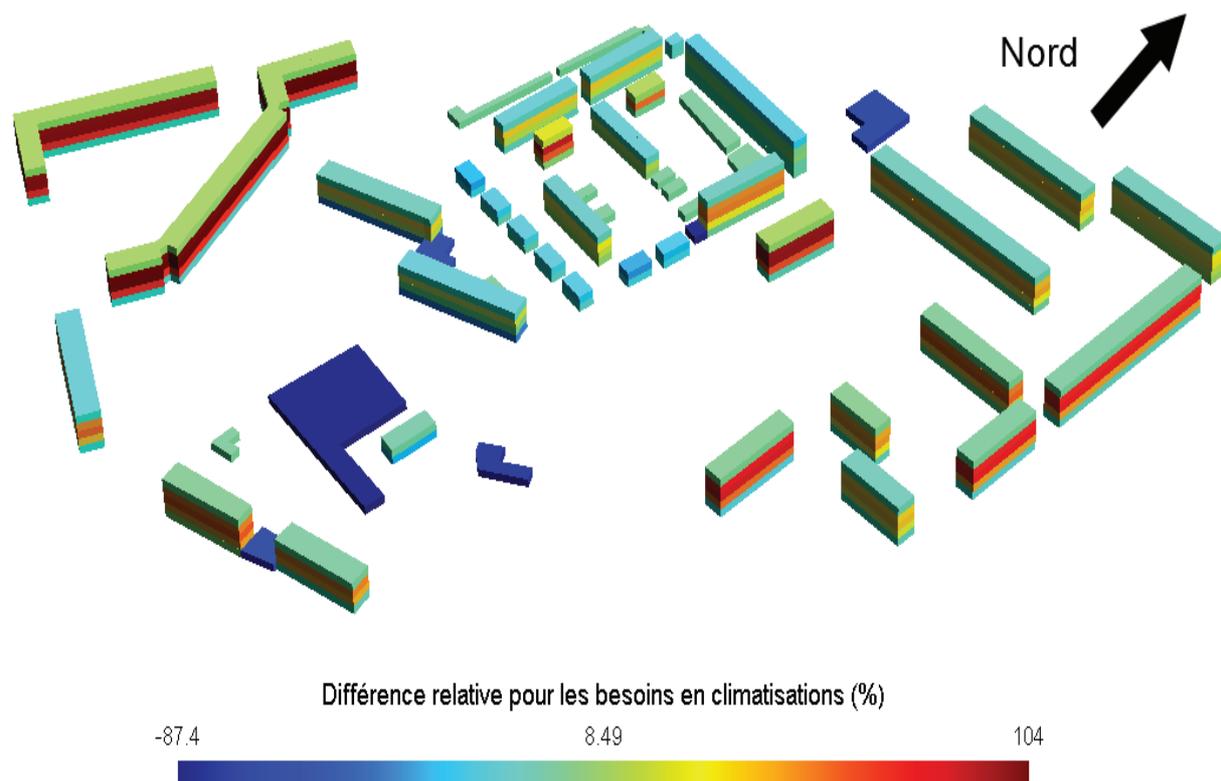


Figure 73 : Représentation des différences relatives des besoins en climatisation entre le scénario M1 (sans isolant) et le scénario M2 (avec isolation intérieure)

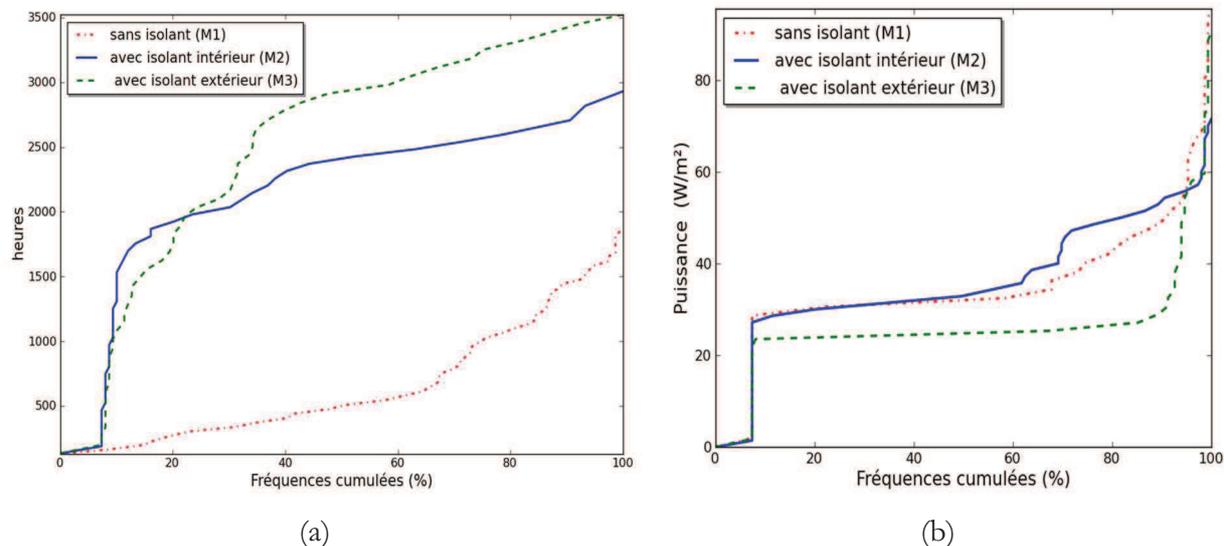


Figure 74 : Nombre d'heures dans l'année où les besoins en climatisation sont nécessaires (a) et puissances maximales nécessaires pour maintenir une température de consigne de 26°C (b)

La Figure 74 présente le nombre d'heures pendant la période d'été où les besoins en climatisation sont nécessaires (a), et la puissance maximale nécessaire pour maintenir la température de consigne de 26°C (b). Nous notons que pour l'ensemble des zones thermiques intérieures, le nombre d'heures de climatisation augmente quelque soit le type d'isolation utilisé. Les puissances maximales nécessaires pour maintenir les zones thermiques intérieures à 26°C diminuent avec

l'isolation extérieure et augmente avec l'isolation intérieure. Le cas de l'isolation extérieure est donc associé à des besoins en climatisation fréquents mais moins intense. Ceci est dû au fait que la forte inertie empêche les températures intérieures de diminuer fortement pendant les périodes nocturnes, et de ce fait en période diurne les températures atteignent très rapidement la valeur de 26°C et réactivent les besoins en climatisation. Pour le cas de l'isolation intérieure, l'inertie du bâtiment est plus faible et les températures d'air intérieur diminuent plus vite pendant les périodes nocturnes permettant de réduire le nombre d'heures d'utilisation de la climatisation.

IV.3.2.2 Impacts microclimatiques

Les répartitions des valeurs du nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C et inférieurs à 19°C sont présentées respectivement sur les Figures 75 et 76. La Figure 75 montre que l'utilisation de l'isolation extérieure augmente les degrés-heures supérieurs à 26°C de 42% des zones thermoaérauliques extérieures par rapport au cas sans isolation, alors que l'utilisation de l'isolation intérieure permet de diminuer le nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C. On en déduit que l'utilisation de l'isolation intérieure augmente l'inertie de la canopée urbaine, ce qui a pour effet d'adoucir les variations des températures extérieures et donc de limiter le nombre d'heures où les températures extérieures dépassent 26°C. Il apparaît sur la Figure 76 que le nombre de degrés-heures inférieurs à 19°C augmente quelque soit le type d'isolation utilisé pour 80% des zones thermoaérauliques. Ceci s'explique par le fait qu'en augmentant l'isolation, les déperditions thermiques des bâtiments et les sources de chaleur associées sont moins importantes ce qui réduit le réchauffement de la canopée du quartier.

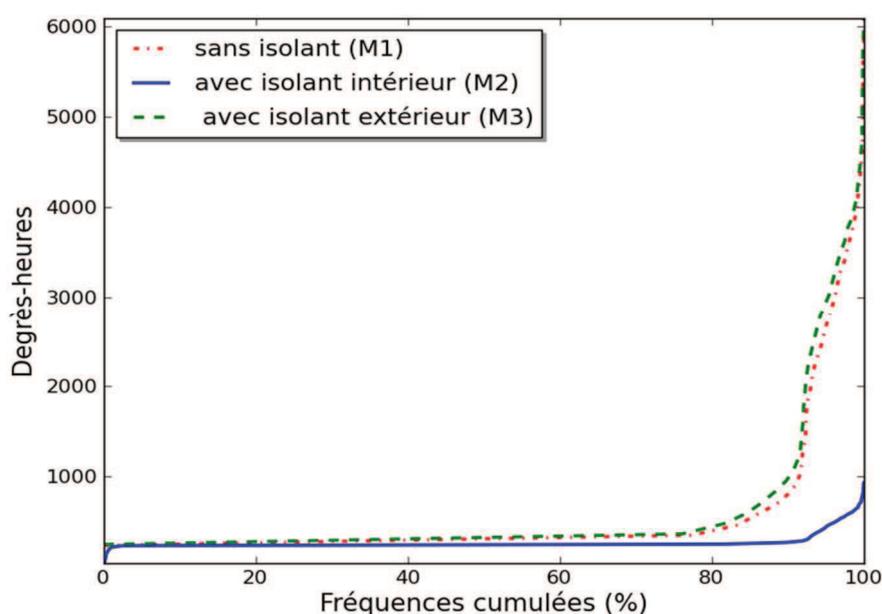


Figure 75: Répartition du nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C dans les zones thermoaérauliques extérieures

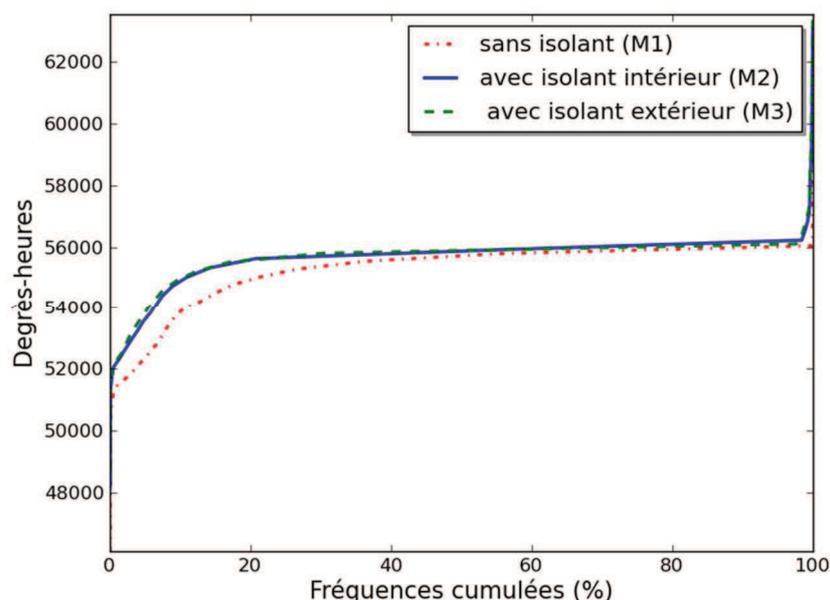


Figure 76: Répartition du nombre de degrés-heures inférieurs à 19°C dans les zones thermoaérauliques extérieures

Cette étude comparative entre l'utilisation de l'isolation intérieure et extérieure a révélé que l'utilisation de l'isolation intérieure permet de réduire les températures extérieures. Ce phénomène peut contribuer au fait que le scénario M2 présente des besoins en climatisation moins importants que le scénario M3. Mais il est à noter que les scénarios de ventilation sont identiques pour les cas M1, M2 et M3. Afin d'approfondir cette étude comparative, il serait nécessaire de réaliser d'autres simulations avec d'autres scénarii de ventilation favorisant une ventilation nocturne. Ceci permettrait de réduire les températures intérieures des bâtiments pendant la nuit lors des périodes de forte chaleur. La fraîcheur ainsi accumulée permettrait de réduire les besoins en climatisation grâce à l'utilisation optimisée de l'inertie du bâtiment.

IV.3.3 Impact des aménagements extérieurs

Nous étudions dans cette section l'impact de l'application de modification de l'albédo (par application de peinture blanche) et de l'utilisation de la végétation en comparant les résultats de simulation des scénarii M3, V3 et P3.

IV.3.3.1 Impacts énergétiques

Les Figures 77 et 78 présentent respectivement les répartitions de la modification des besoins énergétiques engendrées par l'utilisation de la peinture blanche et de la végétalisation.

L'utilisation d'un fort albédo permet de réduire les besoins en climatisation de 93% des

bâtiments, avec une diminution maximale de 20%. On peut voir que les besoins en chauffage sont quasiment inchangés. Ceci s'explique par le fait qu'en hiver l'ensoleillement est très faible

Les surfaces végétalisées permettent de réduire les besoins en climatisation de 93% des zones thermiques intérieures avec une réduction maximale de 83%. Les surfaces végétalisées empêchant les températures de surface des toits de dépasser la température de l'air ambiant, les besoins en climatisation s'en trouvent considérablement diminués. Néanmoins, l'utilisation de surfaces végétalisées entraîne une augmentation des besoins de chauffage de près de 60% des zones thermiques intérieures avec une augmentation maximale de 36%. En effet, les températures de surface des toits étant imposées à la température de l'air ambiant, elles sont plus faibles comparativement à un toit sans végétation exposé au rayonnement solaire ce qui augmente les déperditions thermiques par conduction à travers les parois. De plus, la température de surface du sol étant plus froide à cause de la végétation, les déperditions par rayonnement de grande longueur d'onde entre les parois des bâtiments et le sol sont intensifiées. Pour 35% des zones thermiques intérieures, les surfaces végétalisées permettent de réduire les besoins chauffage jusqu'à 4%.

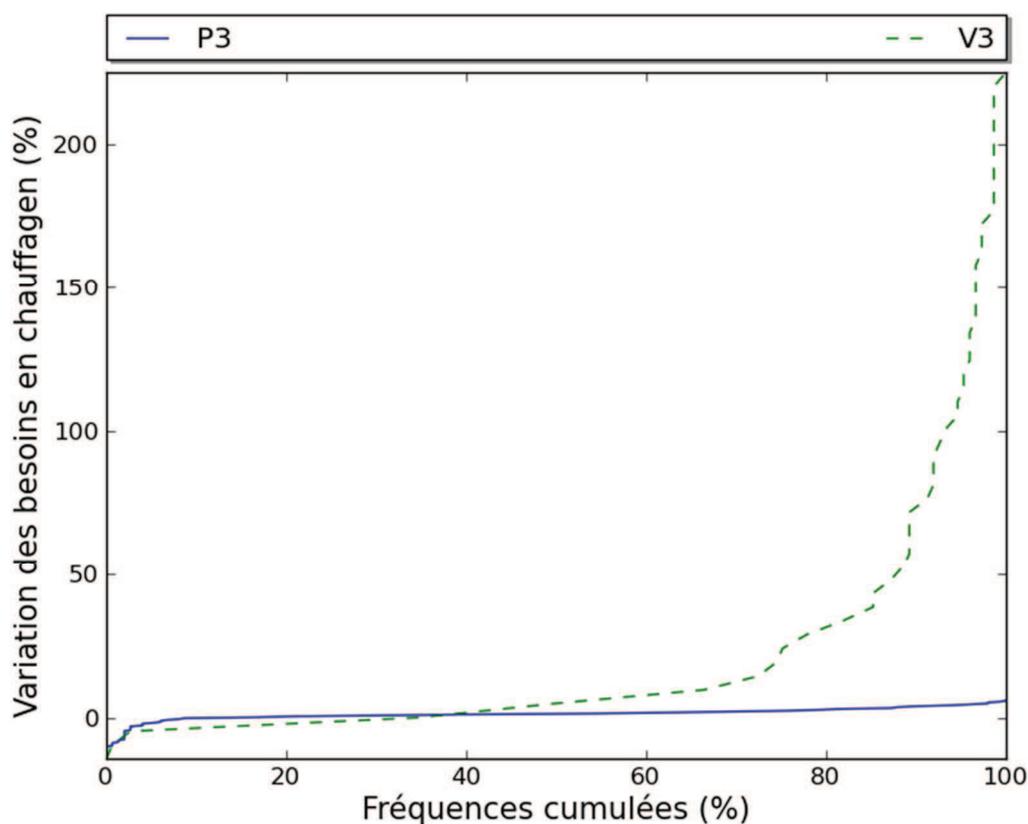


Figure 77: Variation des besoins de chauffage due à l'utilisation de la végétation (V3) et de la peinture blanche (P3) par rapport au cas M3

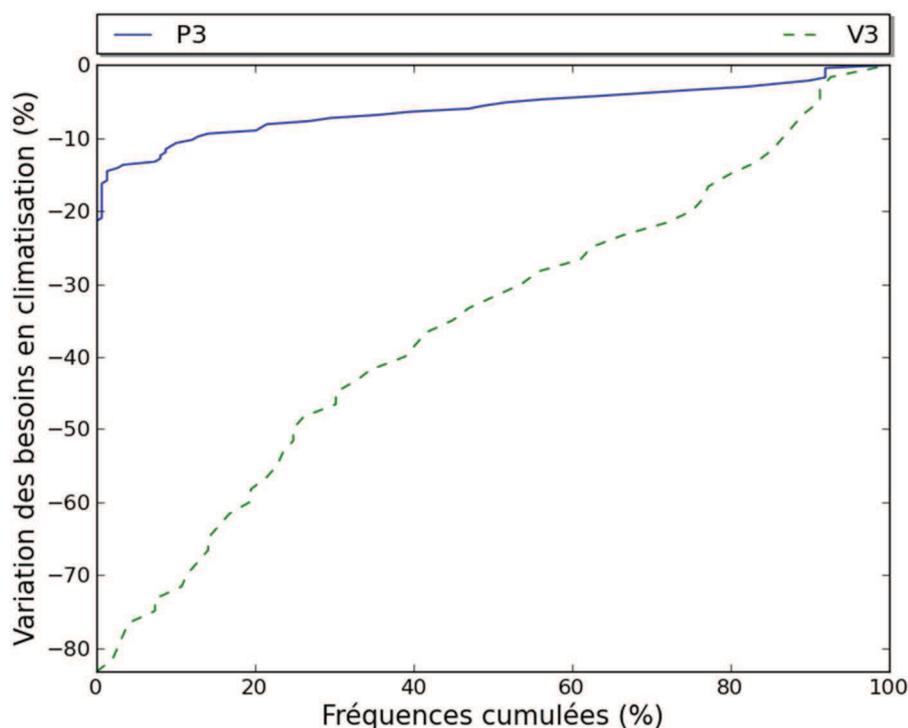


Figure 78: Variation des besoins de climatisation due à l'utilisation de la végétation (V3) et de la peinture blanche (P3) par rapport au cas M3

IV.3.3.2 Impacts microclimatiques

Pour une meilleure compréhension des phénomènes mis en jeu nous présentons respectivement sur les Figures 79 et 80, les diminutions en besoins de climatisation entre les scénarii M3 et P3 des zones thermiques intérieures et les diminutions du nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C pour les zones thermoaérauliques extérieures au niveau du sol pour le scénario P3. En premier lieu, on peut noter que les bâtiments scolaires sont ceux parmi lesquels les besoins en climatisation ont le plus diminué. Ces bâtiments étant inoccupés pendant juillet et août, les gains internes sont nuls pendant cette période ce qui facilite la réduction des besoins en climatisation. On s'aperçoit que c'est dans les zones thermoaérauliques extérieures situées dans les espaces avec une densité bâtie élevée, que le nombre de degrés-heures diminue le plus. L'application d'une peinture blanche sur les murs a pour effet de réduire les températures de surface en diminuant l'absorption du rayonnement solaire incident le jour et permettant ainsi un rafraîchissement nocturne plus efficace. L'air au contact de ces surfaces « froides » se rafraîchit plus rapidement dans les espaces à forte densité bâtie.



Figure 79: Variation des besoins en climatisation entre les scénarios M3 et P3

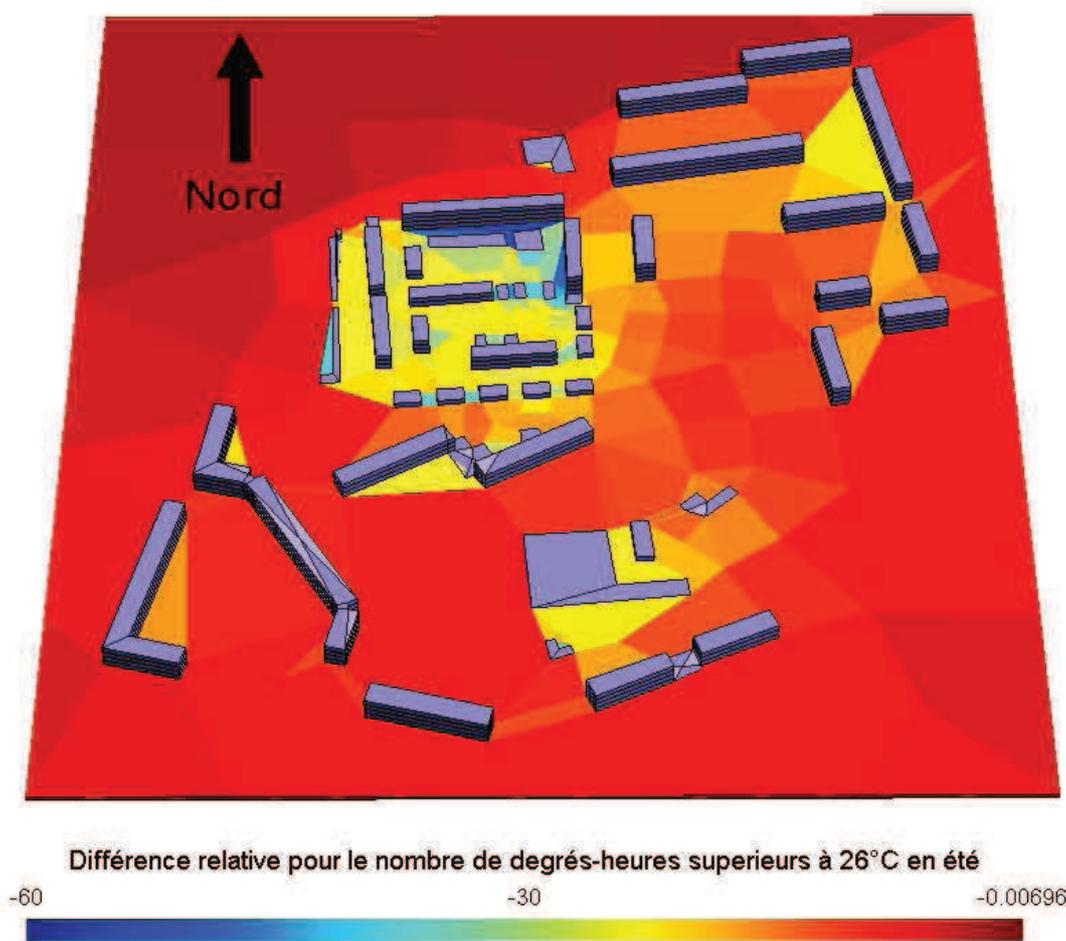


Figure 80: Variation entre les scénarios M3 et P3 du nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C au niveau du sol ($0 \leq z \leq 3\text{m}$)

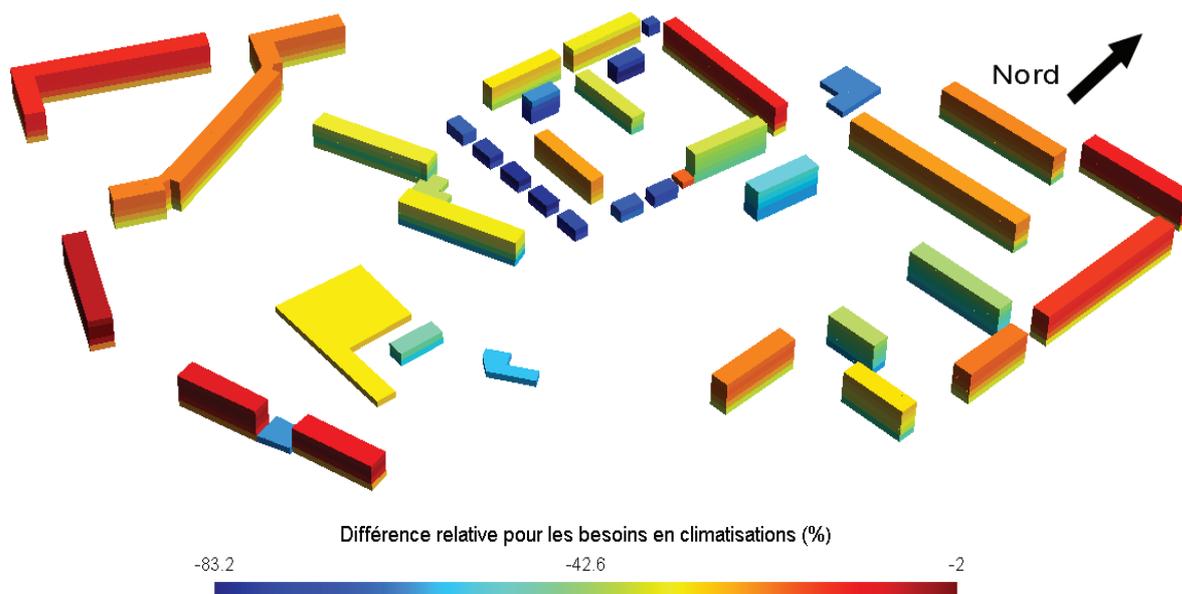


Figure 81 : Variation des besoins en climatisation entre les scénarii M3 et V3

Nous présentons sur la Figure 81 les diminutions en besoins de climatisation engendrées par les surfaces végétalisées. A première vue, on constate que, contrairement aux simulations précédentes, ce ne sont plus les derniers étages des bâtiments qui possèdent les réductions en besoins de climatisation maximales.

Si on représente les diminutions de degrés-heures supérieurs à 26°C au niveau du sol (Figure 82), on note une diminution importante des degrés-heures (entre 96% et 75%), ce qui explique le fait que les diminutions en climatisation soient les plus importantes pour les rez-de-chaussée des bâtiments. L'ajout de surfaces végétales sur l'ensemble des surfaces du sol du quartier entraîne une uniformisation des réductions du nombre de degrés-heures des zones thermoaérauliques extérieures à l'altitude $z=0$, ce qui ne permet pas d'expliquer la disparité spatiale des réductions des besoins en climatisation entre les différents bâtiments.

Si on représente les diminutions du nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C à 9 m au-dessus du sol (Figure 82), il apparaît alors des espaces plus frais que d'autres. C'est encore la région 1 décrite dans la Figure 64 qui paraît la plus rafraîchie par les surfaces végétalisées. Cet espace est composé de plusieurs bâtiments de hauteurs variables : 7 bâtiments de 3 m de haut, 8 bâtiments de 6 m de haut, 3 bâtiments de 12 m de haut et 5 bâtiments de 15 m de haut. Cette forte disparité de hauteur des bâtiments permet de rafraîchir l'air à des altitudes différentes, contribuant à une réduction des besoins en climatisation plus importante pour les bâtiments composant cet espace par rapport aux autres bâtiments du quartier.

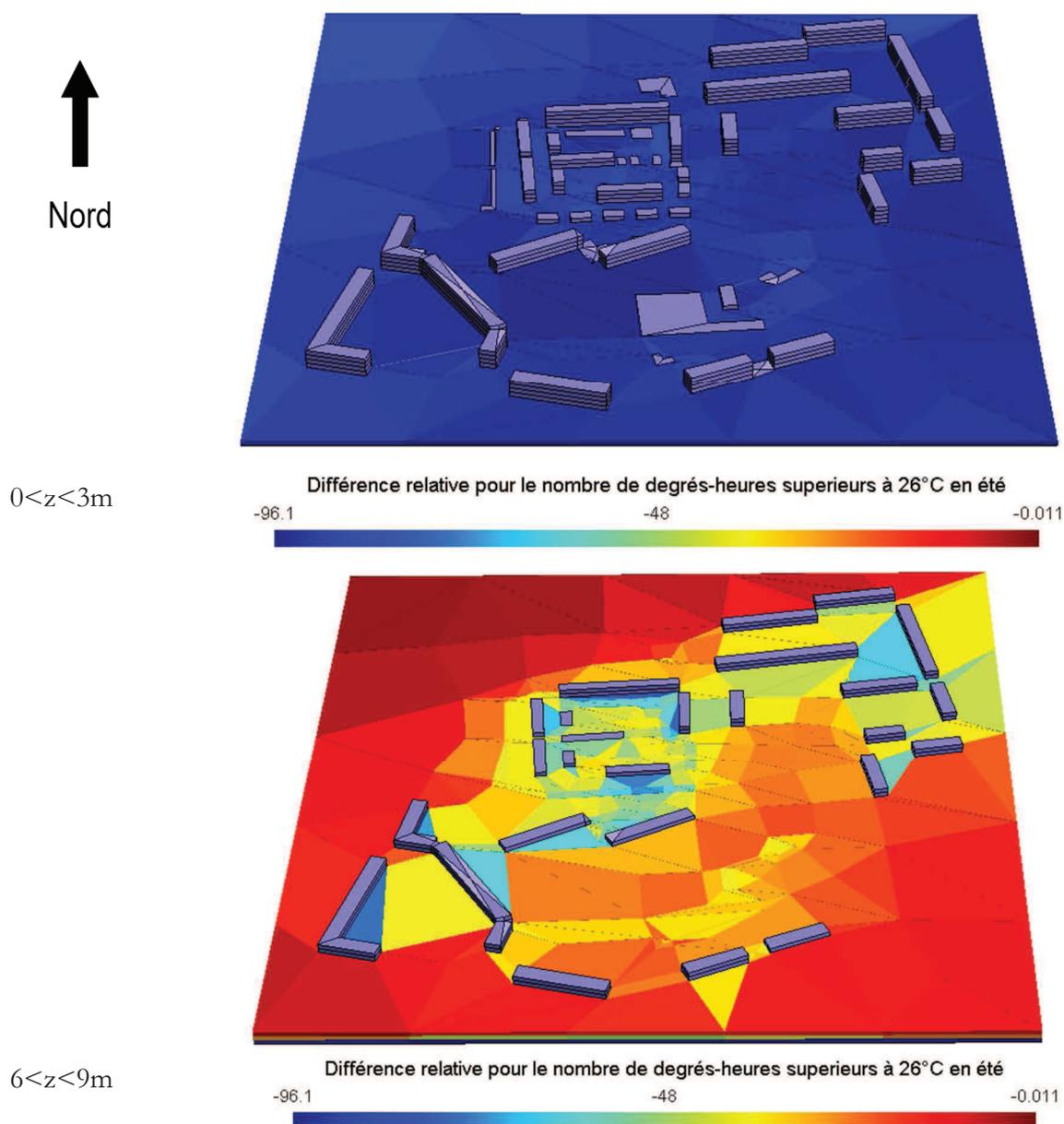


Figure 82 : Variation entre les scénarii M3 et V3, du nombre de degrés-heures des zones thermoaérauliques extérieures ($0 \leq z \leq 3\text{m}$ et $6 \text{ m} \leq z \leq 9\text{m}$).

Cette étude a permis de comparer l'impact du changement de l'albédo des parois des bâtiments ou des surfaces végétalisés sur les besoins énergétiques des bâtiments. Il apparaît que l'utilisation de la végétation semble la solution la plus pertinente pour réduire les besoins en climatisation.

Néanmoins, il semble utile de pondérer ces résultats. Nous passons avec le scénario M3 d'un environnement entièrement minéral à un environnement entièrement végétal. Dans la réalité, les contraintes d'organisation de la ville, et notamment les voies de communication, ne peuvent permettre cette hypothèse. Il serait donc intéressant d'augmenter la précision de la description de l'environnement urbain pour se rapprocher de scénarios d'aménagement urbain plus réaliste.

IV.3.4 Impact des scénarii climatiques extrêmes

Nous étudions dans cette section l'impact de scénarii climatiques extrêmes (dont la fréquence augmente avec le changement climatique) sur les besoins énergétiques des bâtiments et sur le microclimat à l'aide des scénarii de simulation M3max, P3max et V3max.

IV.3.4.1 Impacts énergétiques

Pour chaque scénario de simulation M3max, P3max et V3max, l'utilisation d'un nouveau scénario climatique entraîne des variations des besoins de chauffage et de climatisation par rapport aux scénarii de simulation M3, P3 et V3. La répartition de ces variations relatives sont données sur les Figures 83 et 84. Nous observons que les variations sont très similaires pour les scénarii M3max et P3max, à savoir 90% des zones thermiques intérieures ont leurs besoins en climatisation qui augmentent de plus de 17% pour atteindre un maximum de 46% pour P3max et 54% pour M3max. 85% des zones thermiques intérieures ont leurs besoins en chauffage qui diminuent de plus de 16% pour atteindre une réduction maximale de 35%.

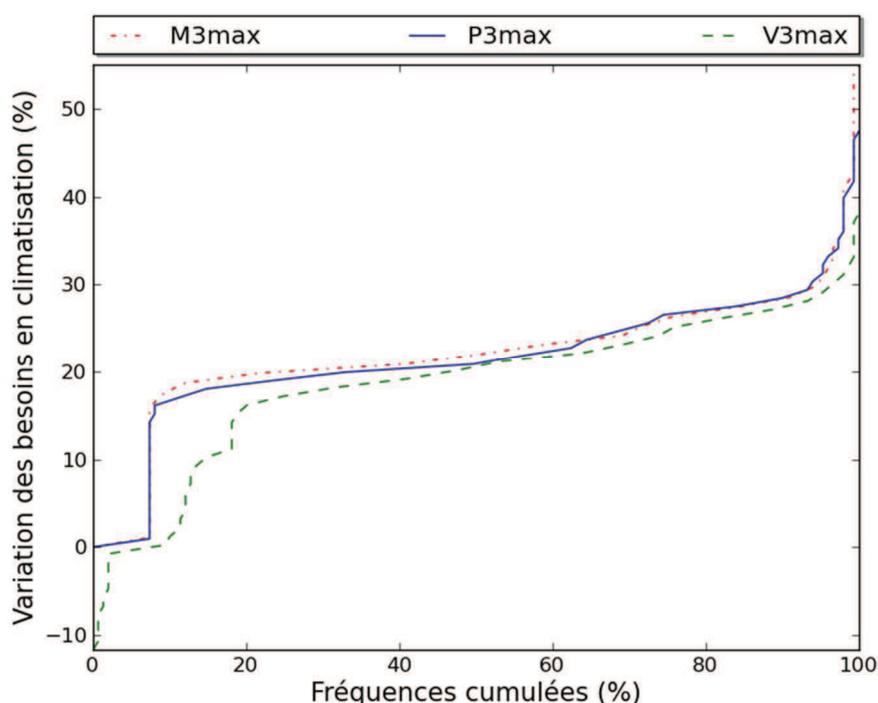


Figure 83 : Variation des besoins de chauffage due au changement de scénario climatique pour les cas M3, V3 et P3

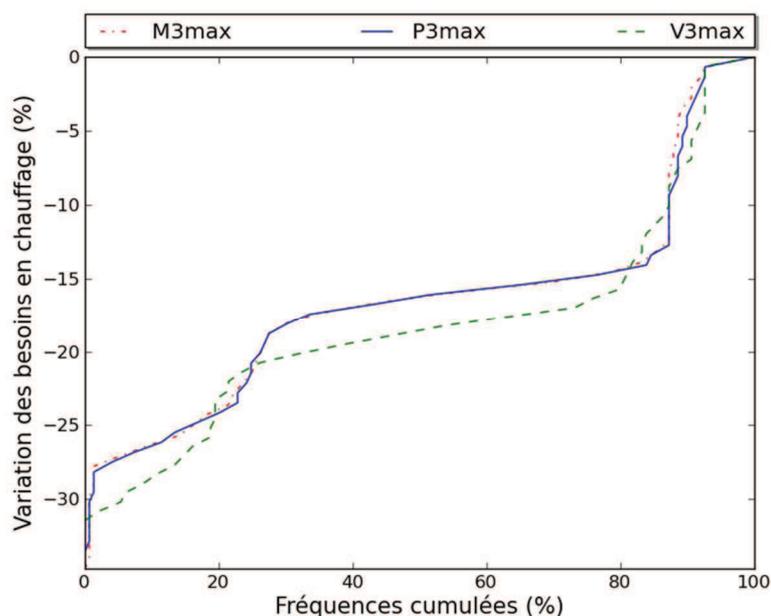


Figure 84: Variation des besoins en climatisation due au changement de scénario climatique pour les cas M3, V3 et P3

Le scénario V3max est celui qui semble répondre le mieux au changement de scénario climatique, les réductions des besoins en chauffage sont supérieures de 2 à 3% pour 75% de zones thermiques intérieures, et les augmentations des besoins en climatisation sont inférieures de 2 à 15%. Cependant, il est important de noter que tous les zones thermiques intérieures ne réagissent pas de la même manière au changement de scénario climatique. Comme on peut le voir sur la Figure 85, pour une trentaine de zones thermiques intérieures, le scénario V3max nécessite des besoins en climatisation plus importants que pour le scénario P3max.

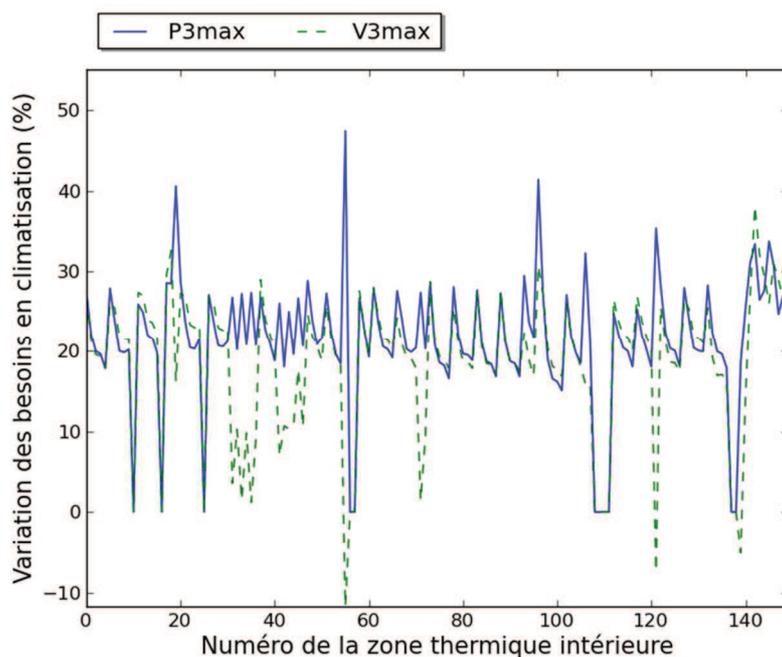


Figure 85 : Variation des besoins en climatisation pour chaque zone thermique intérieure

IV.3.4.2 Impacts microclimatiques

La Figure 86 présente les variations du nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C calculés dans les zones thermoaérauliques extérieures des scénarii M3max, P3max et V3 max par rapport aux scénarii M3, P3 et V3.

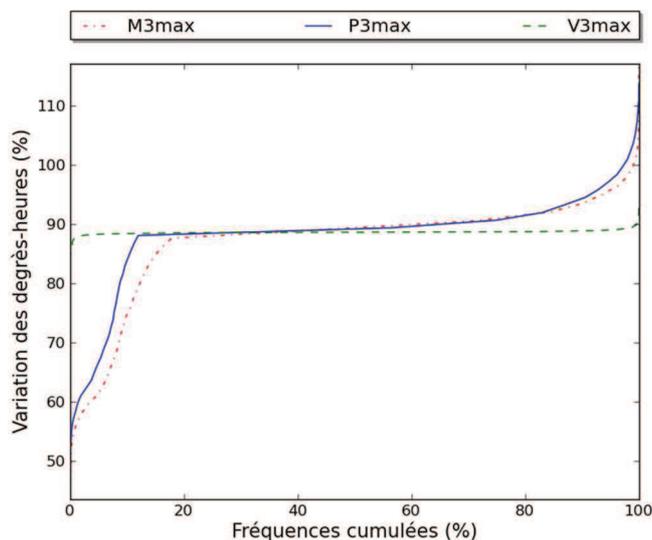


Figure 86 : Répartition de l'augmentation des degrés-heures supérieurs à 26°C due au changement de scénario climatique

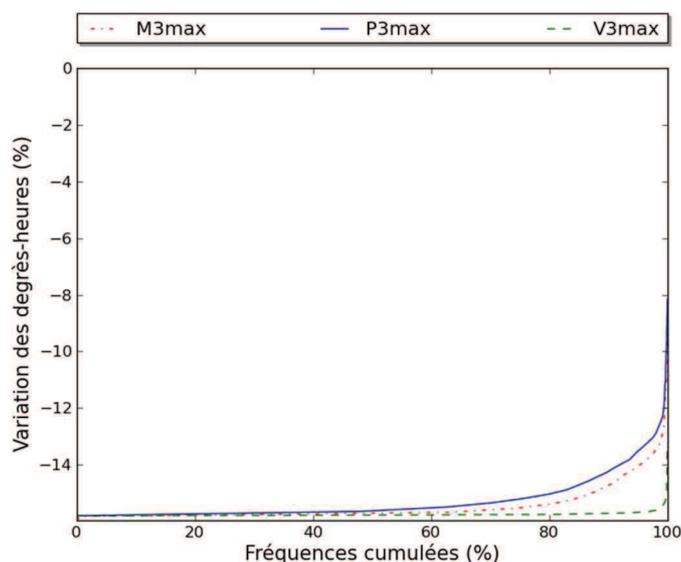


Figure 87 : Répartition de l'augmentation des degrés-heures inférieurs à 19°C due au changement de scénario climatique

La Figure 87 donne respectivement la variation du nombre de degrés-heures inférieurs à 19°C calculés dans les zones thermoaérauliques extérieures des scénarii M3max, P3max et V3max par rapport aux scénarii M3, P3 et V3. Pour les scénarii M3max et P3max, les variations du nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C peuvent être classées en 3 catégories. La première classe regroupe 15% des zones thermoaérauliques extérieures correspondant à une augmentation

comprise entre 43% et 88%, la seconde classe regroupe 55% des zones correspondant à une augmentation comprise entre 88% et 90%, et la troisième catégorie regroupe les 30% restants pour une augmentation supérieure à 90%.

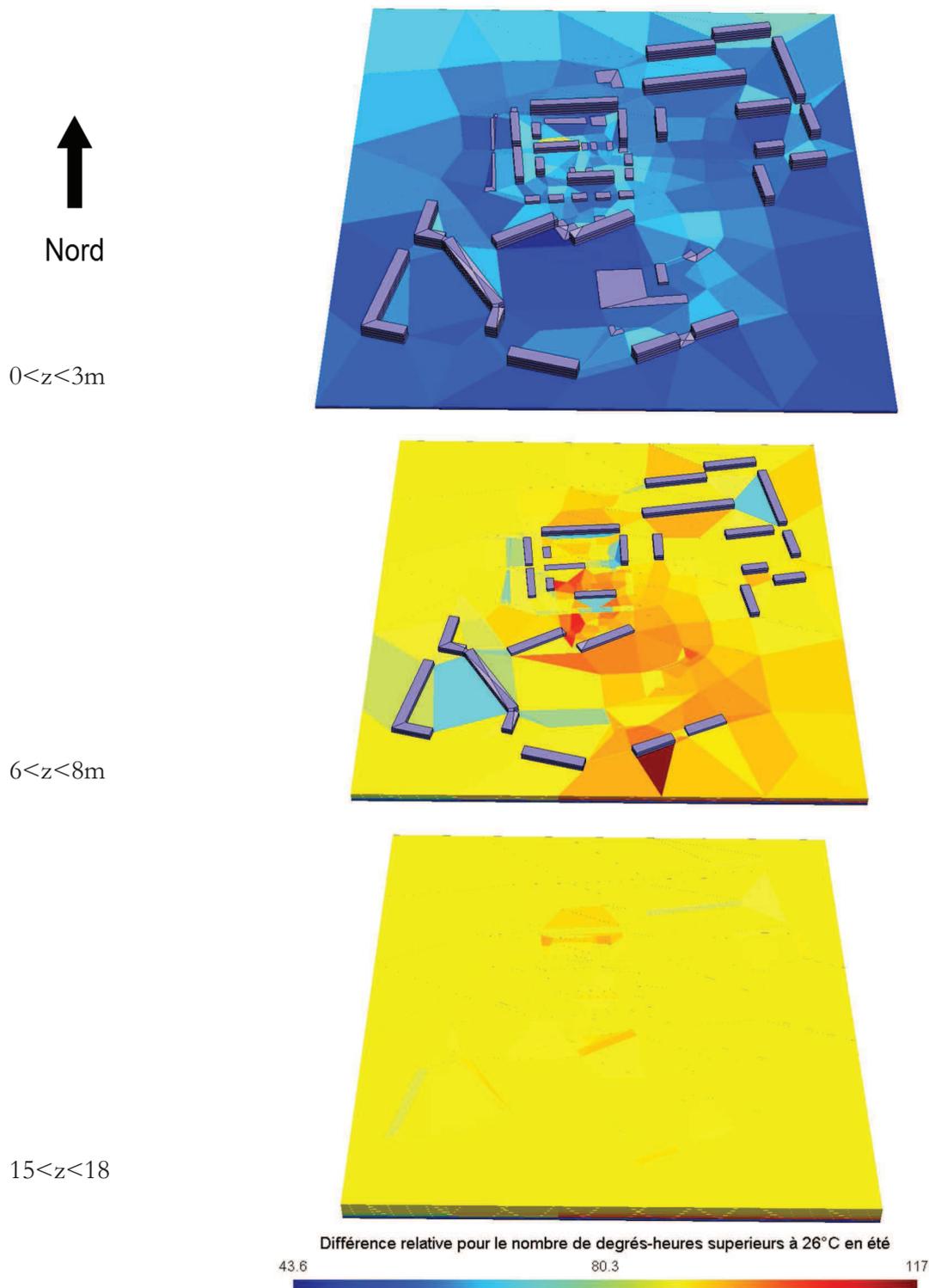


Figure 88: Variation du nombre de degrés-heures supérieur à 26°C pour les zones thermoaérauliques extérieures ($0 \leq z \leq 3\text{m}$, $6 \text{ m} \leq z \leq 9\text{m}$ et $15 \text{ m} \leq z \leq 18 \text{ m}$) pour le scénario M3max

La Figure 88 montre les variations du nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C aux altitudes $0 \leq z \leq 3\text{m}$, $6 \text{ m} \leq z \leq 9\text{m}$ et $15 \text{ m} \leq z \leq 18 \text{ m}$ respectivement pour le scénario M3max. L'analyse de ces données permet de mieux comprendre comment se répartissent les différentes classes. La première classe correspond surtout aux zones thermoaérauliques extérieures situées au niveau du sol. La troisième classe est distribuée entre les zones comprises entre les altitudes $z=3 \text{ m}$ et $z=12 \text{ m}$.

Pour la première classe, il s'agit de zones thermoaérauliques extérieures qui sont en contact avec beaucoup de surfaces minérales et, de ce fait, ces zones thermoaérauliques sont surtout influencées par les variations des températures de surface. Les variations minimales apparaissent pour les zones peu denses qui reçoivent un maximum d'ensoleillement et qui sont protégées des écoulements dominants (par exemple la région 2 de la Figure 64). Pour la seconde classe, les zones sont très peu en contact avec des surfaces et leurs températures sont donc fortement liées aux écoulements aérauliques. La troisième classe est constituée de zones thermoaérauliques extérieures qui sont à la fois influencées par des phénomènes aérauliques et thermiques. Ce sont le plus souvent des zones correspondant aux zones de cavité d'écoulement inversées qui sont proches des parois des bâtiments, et donc influencées par les phénomènes thermiques, mais où les vitesses d'air importantes favorisent le renouvellement d'air.

D'autre part, il apparaît que le scénario V3max a un comportement très différent des deux autres. Pour l'ensemble des zones thermoaérauliques, le nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C augmente de 88% et le nombre de degrés-heures inférieurs à 19°C diminue de 15,5%. Cette différence s'explique par le fait que les températures des surfaces végétalisées sont imposées comme étant égales à la température d'air des zones thermoaérauliques avec lesquelles elles sont en contact. De ce fait, les phénomènes thermiques par rayonnement et conduction n'interviennent pas dans le bilan thermique des parois végétalisées, et le bilan thermique des zones thermoaérauliques est seulement influencé par les phénomènes aérauliques. On retrouve alors la même gamme de variation du nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C que pour la troisième classe citée précédemment.

IV.3.5 Synthèse des résultats

Nous résumons dans le Tableau 7 et la Figure 89 les différentes caractéristiques énergétiques et microclimatiques globales du quartier pour chaque scénario. Les besoins en climatisation et en chauffage sont respectivement la somme des besoins en climatisation et en chauffage de chacune

des zones thermiques intérieures. Les degrés-heures hiver et les degrés-heures été sont respectivement la moyenne du nombre de degrés-heures inférieurs à 19°C en saison de chauffage et la moyenne du nombre de degrés-heures supérieurs à 26°C en période d'été des zones thermoaérauliques extérieures.

On peut remarquer que si la diminution des besoins en chauffage est relativement simple à mettre en œuvre grâce à l'isolation des bâtiments, la maîtrise des besoins en climatisation devient beaucoup plus complexe au fur et à mesure qu'on augmente l'isolation. Les besoins en climatisation prennent alors la part la plus importante dans les besoins énergétiques globaux, et deviennent alors le paramètre le plus important dans l'étude des besoins énergétiques des bâtiments. On peut noter que les conditions d'été sont celles qui sont le plus influencé par le microclimat urbain, le nombre de degrés-heures été peut être augmenté de 88% (différence entre M3max et M1) alors que le nombre de degrés-heures hiver diminue de 15%. C'est donc pour la saison d'été que l'étude présente le plus d'intérêt pour montrer l'efficacité de solutions d'aménagement extérieur. Cette démarche présente d'autant plus d'intérêt qu'avec les problématiques de réchauffement climatique les étés risquent d'être de plus en plus caniculaires.

	M1	M2	M3	V3	P3	M3max	V3max	P3max
Besoins en climatisation (kWh/m ²)	1 714	1 810	2 675	1 685	2 506	3 277	2 053	3 063
Besoins en chauffage (kWh/m ²)	21 798	2 606	2 360	2 882	2 393	1 908	2 293	1 930
Degrés-heures été	525	263	565	241	482	990	455	859
Degrés-heures hiver	55 267	55 624	55 654	56 014	56 054	47 032	47 177	47 476

Tableau 7 : Caractéristiques énergétiques et microclimatiques des différents scénarii de simulation

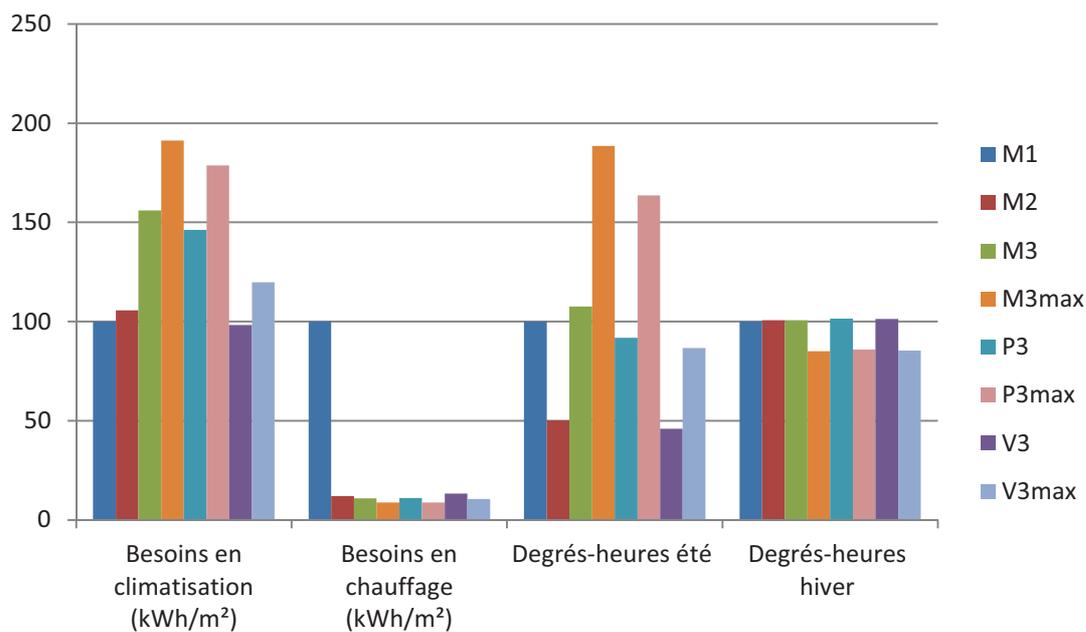


Figure 89 : Comparaison des différentes caractéristiques énergétiques et microclimatiques des différents scénarii de simulation

Conclusion et perspectives

L'étude des besoins énergétiques des bâtiments est devenue essentielle pour maîtriser les dépenses énergétiques associées. L'augmentation des performances thermiques des enveloppes des bâtiments et l'amélioration des systèmes de production de chaleur ont permis de réduire de manière importante les besoins en chauffage.

Cependant, les techniques utilisées, consistant surtout à augmenter l'isolation et l'étanchéité du bâtiment, peuvent augmenter les phénomènes de surchauffe. Si en hiver ces solutions sont un atout pour diminuer les consommations énergétiques, en été elles deviennent une faiblesse en induisant une augmentation des besoins en climatisation. Ces dernières prennent donc une part de plus en plus importante dans la demande énergétique globale des bâtiment et deviendront sûrement la principale difficulté pour maîtriser les consommations énergétiques de ces derniers.

La conception des bâtiments en ville, du fait de l'îlot de chaleur urbain devient particulièrement complexe pour réduire les besoins en climatisation. Il est alors nécessaire d'organiser et concevoir des espaces urbains permettant de réduire les effets d'îlots de chaleur urbains.

Nous avons proposé dans ce travail un modèle numérique pouvant servir d'aide à la conception pour quantifier et analyser l'impact des aménagements urbains sur les performances énergétiques des bâtiments implémentés dans leur environnement.

En préambule, dans le premier chapitre nous avons présenté les paramètres de l'environnement urbain pouvant influencer les consommations énergétiques du cadre bâti. Après avoir décrit les différents outils existant permettant de modéliser les besoins énergétiques des bâtiments, nous nous sommes positionnés par rapport à eux pour construire notre modèle.

L'objectif de ce travail était de développer un modèle couplant la simulation des besoins énergétiques des bâtiments avec celle du microclimat urbain. Pour cela nous avons :

- développé un modèle thermique de bâtiment adapté au couplage avec le microclimat urbain, basé sur la méthode des facteurs de pondération,
- mis en œuvre une modélisation de type zonal des champs de température en milieu urbain par un bilan thermoaéraulique couplé au calcul du champ de vitesse calculé à partir du logiciel de simulation des écoulements aérauliques en milieu urbain QUIC,
- développé un modèle de calcul des échanges radiatifs de courte et grande longueurs d'onde couplé aux données d'ensoleillement calculées par le logiciel de simulation solaire en milieu urbain SOLENE,
- construit un modèle numérique et géométrique tridimensionnel permettant le couplage des trois modèles précédents.

Pour finir, dans le dernier chapitre, nous avons présenté l'application du modèle élaboré dans cette thèse sur le quartier Pin-Sec à Nantes. Différentes simulations annuelles ont été réalisées, en modifiant les caractéristiques thermiques internes des bâtiments (isolation et vitrage), les caractéristiques de l'environnement urbain (végétation ou albédo) et les caractéristiques du climat (normales saisonnières ou scénario climatique extrême). L'analyse des résultats a permis de mettre en évidence les différents phénomènes qui ont une influence sur les comportements thermiques des bâtiments à l'échelle du quartier. L'inertie de l'environnement extérieur peut être augmentée par la mise en place d'une isolation intérieure des bâtiments contribuant à adoucir les pics des températures extrêmes et à réduire de ce fait les besoins en climatisation. L'augmentation de l'albédo des parois des bâtiments permet de réduire jusqu'à 20% les besoins en climatisation et l'utilisation de parois végétalisées permet une réduction pouvant aller jusqu'à 80%.

Les modèles développés au cours de cette thèse ouvrent de nombreuses perspectives tant au niveau de son amélioration technique, que de son application ou de sa validation.

Au niveau de l'amélioration technique plusieurs aspects peuvent être traités. Le mailleur GMSH (Geuzaine et Remacle, 2009) qui a été utilisé pour construire les maquettes thermoaérauliques et solaires du quartier est en perpétuelle évolution. Les nouvelles versions sont de plus en plus élaborées et permettent d'améliorer la précision du maillage. Un maillage plus fin permettrait notamment de décrire avec plus de précisions les différents matériaux composant le sol de l'environnement urbain, tel que les sols végétalisés ou les routes, en respectant les géométries des aménagements urbains plutôt que de définir un sol homogène n'existant pas dans la réalité. Des études pourraient aussi être menées pour analyser l'effet de la discrétisation utilisée sur la qualité des résultats obtenus.

Au niveau du modèle thermique du bâtiment, on peut noter que les ponts thermiques ne sont pas pris en compte. Or ces singularités thermiques jouent un rôle prépondérant dans le comportement thermique des bâtiments. Le calcul des ponts thermiques pourrait être rajouté en s'appuyant sur la méthodologie de Depecker (1986, 2001), développée pour introduire les singularités thermiques dans la méthode des facteurs de pondération.

Il serait intéressant et assez simple d'ajouter les transferts d'humidité au sein de la canopée urbaine. Ceci améliorerait la précision et les champs de possibilité du modèle présenté. Dans le modèle retenu, seuls les transferts d'énergie sensibles ont été traités. L'ajout des transferts hydriques donnerait la possibilité de prendre en compte les phénomènes de transfert d'énergie latente qui ont une part importante dans les calculs des charges de climatisation. De plus, la description des phénomènes de transport d'humidité sont essentiels pour décrire le comportement thermique des systèmes végétaux. La modélisation des transferts d'humidité permettrait ainsi de construire des modèles de végétation et de parois végétalisées plus précis que celui utilisé dans ce manuscrit.

Le modèle de sol mériterait d'être plus développé. La profondeur utilisée pour imposer les conditions limites a été choisie pour limiter le nombre de facteurs de réponse à prendre en compte dans les simulations afin de correspondre aux capacités de stockage de l'environnement de programmation. Cette profondeur, de l'ordre de 50 cm, est trop faible pour prendre en compte convenablement l'inertie thermique du sol. Il est donc nécessaire développer un modèle de sol permettant de choisir une profondeur de quelque mètre pour imposer les conditions limites en température. De plus, l'amélioration du modèle de sol ainsi que l'ajout des phénomènes de transfert d'humidité permettrait alors de modéliser les phénomènes d'évapotranspiration des sols naturels et perméables.

Nous avons vu dans le chapitre 3, que le logiciel de simulation des écoulements aérauliques en milieu urbain QUIC, était apte au calcul des champs de pression en milieu urbain. L'utilisation de ces données permettrait d'étudier avec plus de précision les potentiels de ventilation naturelle dans les bâtiments et favoriserait ainsi la réduction des besoins en climatisation grâce à l'utilisation d'une ventilation nocturne adaptée. La prise en compte des champs de pression pourrait aussi mener à développer le calcul des écoulements thermoaérauliques liées à la convection naturelle (Bozonnet, 2005), qui sont essentiels lorsque les vitesses d'air dues au vent sont faibles.

Au niveau de l'application, de nombreuses études paramétriques peuvent être réalisées pour

optimiser les performances énergétiques des bâtiments et améliorer les conditions microclimatiques locales. On citera notamment :

- l'étude de plusieurs scénarii d'utilisation de ventilation naturelle,
- l'analyse de l'impact de l'utilisation des systèmes de climatisation (Bozonnet, 2005) et de l'impact de la position des rejets de chaleur associés (Kikegawa et al., 2003)
- l'étude de différents types de morphologies urbaines (Kämpf et Robinson, 2010; Kämpf et al., 2010).

Les différents modèles développés dans le couplage ont été choisis pour permettre de simplifier les calculs pour avoir un système d'équations linéaires à résoudre à chaque pas de temps de la simulation. Sans prendre en compte toutes les étapes des près-calculs d'ensoleillement et d'écoulements aérauliques, la simulation sur une année des besoins énergétiques des bâtiments nécessite 48 heures de calcul sur un ordinateur de bureau standard. Au cours de cette thèse, différents ordinateurs ont été utilisés, faisant passer les temps de calcul nécessaire pour réaliser une simulation annuelle, de plus de 6 jours pour l'ordinateur le plus ancien, à 48h pour le plus récent. Le développement continu des performances des processeurs de calcul ainsi que la mise en œuvre de la parallélisation des calculs devraient donc permettre de réduire fortement les temps de simulation. Ces faibles temps de calcul devraient alors permettent de réaliser de nombreuses analyses paramétriques pour comparer différentes solutions techniques, architecturales ou d'aménagement urbain sur un quartier.

Du point de vue de la validation du modèle développé, il peut être intéressant d'appliquer ce modèle sur les différentes campagnes de mesures expérimentales réalisées en milieu urbain telle que CAPITOU (Pigeon, 2007). De plus, il serait possible d'utiliser la plateforme expérimentale CLIMABAT développé au LaSIE. Cette plateforme représente une maquette à l'échelle 1/10^{ème} d'une scène urbaine conçue sur la base de 5 rangées de cuves de béton creux (Doya, 2010). L'utilisation des températures de surface, des vitesses d'air et des flux radiatifs de cette maquette permettraient alors de valider ou de calibrer le modèle développé.

Références bibliographiques

- Akbari, H., Bretz, S., Kurn, D. M., and Hanford, J. (1997a). “Peak power and cooling energy savings of high-albedo roofs.” *Energy and Buildings*, 25(2), 117–126.
- Akbari, H., Kurn, D. M., Bretz, S. E., and Hanford, J. W. (1997b). “Peak power and cooling energy savings of shade trees.” *Energy and Buildings*, 25(2), 139–148.
- Akbari, H., Pomerantz, M., and Taha, H. (2001). “Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas.” *Solar Energy*, 70(3), 295–310.
- Anderson, E. (1954). “Energy-budget studies, water-loss investigations: Lake Hefner studies.” *US Geological Survey Professional Paper*, (269), 71-119.
- Angström, A. (1918). “A study of the radiation of the atmosphere.” *Smith. Inst. Misc. Collect*, 65, 159-161.
- Arnfield, A. J. (2003). “Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island.” *International Journal of Climatology*, 23(1), 1–26.
- Asawa, T., Hoyano, A., and Nakaohkubo, K. (2008). “Thermal design tool for outdoor spaces based on heat balance simulation using a 3D-CAD system.” *Building and Environment*, 43(12), 2112–2123.
- Ashie, Y., Thanh Ca, V., et Asaeda, T. (1999). “Building canopy model for the analysis of urban climate.” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 81(1-3), 237-248.
- Badescu, V. (2002). “3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces.” *Renewable Energy*, 26(2), 221-233.
- Bagal, N., Pardyjak, E. R., and Brown, M. J. (2003). “Improved upwind cavity parameterization for a fast response urban wind model.” *AMS Conf. on Urban Zone, Seattle, WA*.
- Baker, N., and Steemers, K. (1996). “LT Method 3.0 -- a strategic energy-design tool for Southern Europe.” *Energy and Buildings*, 23(3), 251–256.
- Bastide, A., Garde, F., Adelard, L., and Boyer, H. (2004). “Étude de la ventilation d’un bâtiment à l’aide de modèles simplifiés.” *The bi-annual conference of IBPSA-Canada: ESIM*, Vancouver, Canada, 1–8.
- Berges, B. (1986). “Analyse d’un Comportement Conductif de l’Enveloppe d’un Bâtiment-Recherche de Modèles de Transfert Adaptés au Couplage Enveloppe–Équipement Régulation’.” Thèse de Doctorat, Université de Nice.
- Bertolo, L., and Bourges, B. (2002). *Données climatiques utilisées dans le bâtiment*. Ed. Techniques Ingénieur.
- Birdsall, B., Buhl, W. F., Ellington, K. L., Erdem, A. E., and Winkelmann, F. C. (1990). “Overview of the DOE-2 building energy analysis program.” *Report LBL-19735m rev. w*, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA.
- Bouyer, J. (2009). “Modélisation et simulation des microclimats urbains - Étude de l’impact de l’aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments.” Thèse de Doctorat, Université de Nantes, École polytechnique de l’Université de Nantes.
- Bowker, G. E. (2004). “A comparison of airflow patterns from the QUIC model and an atmospheric wind tunnel for a two-dimensional building array and a multi-city block region near the World Trade Center site.” *13th Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the Air and Waste Management Assoc.*
- Bozonnet, E. (2005). « Impact des microclimats urbains sur la demande énergétique des bâtiments - Cas de la rue canyon ». Thèse de Doctorat, Université de La Rochelle.

- Bozonnet, E., Belarbi, R., and Allard, F. (2005). "Modelling solar effects on the heat and mass transfer in a street canyon, a simplified approach." *Solar Energy*, 79(1), 10-24.
- Brown, M. J., Grimmond, S., and Ratti, C. (2001). "Comparison of methodologies for computing sky view factor in urban environments." *International Society of Environmental Hydraulics Conference*, 01-4107.
- Brunt, D. (1932). "Notes on radiation in the atmosphere." *Quart. J. R. Meteorol. Soc.*, 58, 389-418.
- Bruse, M. (2006). "ENVI-met 3.0: Updated model overview." *Bochum, Germany* (<http://www.envi-met.com>) accessed on, 8.
- Brutsaert, W. (1975). "On a derivable formula for long-wave radiation from clear skies.." *Water Resources Research*, 11(5), 742-744.
- Bueno, B., Pigeon, G., Norford, L. K., Zibouche, K., and Marchadier, C. (2012). "Development and evaluation of a building energy model integrated in the TEB scheme."
- Calvet, M. (2010). *Coûts et avantages des différentes formes urbaines : Synthèse de la littérature économique*. Etudes & Documents, Commissariat Général au Développement Durable.
- Capeluto, I. G., Yezioro, A., and Shaviv, E. (2003). "Climatic aspects in urban design--a case study." *Building and Environment*, 38(6), 827-835.
- Chen, H., Ooka, R., Harayama, K., Kato, S., and Li, X. (2004). "Study on outdoor thermal environment of apartment block in Shenzhen, China with coupled simulation of convection, radiation and conduction." *Energy and buildings*, 36(12), 1247-1258.
- Chen, Q. Y. (2004). "Using computational tools to factor wind into architectural environment design." *Energy and buildings*, 36(12), 1197-1209.
- Commissariat général au développement durable. (2012a). "La demande potentielle de logements à l'horizon 2030 : une estimation par la croissance attendue du nombre des ménages." le point sur, 135.
- Commissariat général au développement durable. (2012b). "Chiffres clés de l'énergie Édition 2012." Repères.
- Counihan, J. (1973). "Simulation of an adiabatic urban boundary layer in a wind tunnel." *Atmospheric Environment* (1967), 7(7), 673-689.
- Crawford, T., and Duchon, C. (1999). "An improved parameterization for estimating effective atmospheric emissivity for use in calculating daytime downwelling longwave radiation." *Journal of Applied Meteorology*, 38(4), 474-480.
- Depecker, P. (1986). « Constitution et modes de transfert d'un savoir scientifique dans le champ de l'architecture. Le cas de la thermique ». Thèse d'Etat, INSA de Lyon.
- Depecker, P., Menezo, C., Virgone, J., and Lepers, S. (2001). "Design of buildings shape and energetic consumption." *Building and Environment*, 36(5), 627-635.
- Doulos, L., Santamouris, M., and Livada, I. (2004). "Passive cooling of outdoor urban spaces. The role of materials." *Solar energy*, 77(2), 231-249.
- Doya, M. (2010). "Analyse de l'impact des propriétés radiatives de façades pour la performance énergétique de bâtiments d'un environnement urbain dense."
- Dupont, S. (2001). "Modélisation dynamique et thermodynamique de la canopée urbaine : réalisation du modèle de sols urbains pour SUBMESO." Université de Nantes.
- Dupont, Sylvain. 2009. « Modélisation de la micrométéorologie à l'échelle de paysages complexes ». Université Paul Sabatier - Toulouse III. <http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00443770>.
- Dupont, S., and Mestayer, P. G. (2006). "Parameterization of the urban energy budget with the submesoscale soil model." *Journal of applied meteorology and climatology*, 45(12), 1744-1765.

- De la Flor, F. S., and Domínguez, S. A. (2004). “Modelling microclimate in urban environments and assessing its influence on the performance of surrounding buildings.” *Energy and Buildings*, 36(5), 403–413.
- Gal, T., Lindberg, F., and Unger, J. (2009). “Computing continuous sky view factors using 3D urban raster and vector databases: comparison and application to urban climate.” *Theoretical and applied climatology*, 95(1), 111–123.
- Geuzaine, C., and Remacle, J. F. (2009). “Gmsh: A 3-D finite element mesh generator with built-in pre-and post-processing facilities.” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 79(11), 1309–1331.
- Gowardhan, A. A., Brown, M. J., Decroix, D. S., Pardyjak, E. R., and Nelson, M. A. (2006). “Evaluation of the QUIC Pressure Solver using wind-tunnel data from single and multi-building experiments.” *6th AMS Urban Environmental Symposium, Atlanta, GA*.
- Groleau, D. (2000). “SOLENE, un outil de simulation des éclairagements solaires et lumineux dans les projets architecturaux et urbains.” Rouen, 8.
- Groleau, D., Fragnaud, F., and Rosant, J.-M. (2003). “Simulation of the Radiative Behaviour of an Urban Quarter of Marseille with the SOLENE Model’.” *CD Proceedings, 5th International Conference on Urban Climate*.
- Guignard, S. (2010). *Histoire de la recherche sur l’enveloppe du bâtiment*. ADEME, France.
- Hay, J.E., et J.A. Davies. 1980. Calculations of the solar radiation incident on an inclined surface. Dans *Proc. Of First Canadian Solar Radiation data Workshop, 59*. Ministry of Supply and Services. Canada.
- He, J., Hoyano, A., and Asawa, T. (2009). “A numerical simulation tool for predicting the impact of outdoor thermal environment on building energy performance.” *Applied Energy*, 86(9), 1596–1605.
- Hénon, A., Mestayer, P. G., Lagouarde, J.-P., and Voogt, J. A. (2011). “An urban neighborhood temperature and energy study from the CAPITOUL experiment with the SOLENE model.” *Theoretical and Applied Climatology*, 1–20.
- Hoyano, A. (1988). “Climatological uses of plants for solar control and the effects on the thermal environment of a building.” *Energy and Buildings*, 11(1–3), 181–199.
- Idso, S. (1981). “A set of equations for full spectrum and 8- to 14-micrometre and 10.5- to 12.5-micrometre thermal radiation from cloudless skies (Phoenix, Arizona).” *Water Resources Research*, 17(2), 295-304.
- Idso, S., and Jackson, R. (1969). “Thermal radiation from the atmosphere.” *J Geophys Res*, 74(23), 5397-5403.
- IGN. (2011). “BD TOPO® V2.1- Descriptif de contenu.”
- Inard, C., Bouia, H., and Dalicieux, P. (1996). “Prediction of air temperature distribution in buildings with a zonal model.” *Energy and Buildings*, 24(2), 125–132.
- Inard, C., and Buty, D. (1991). *Simulation of testcase D with zonal models: approach with simplified models*. IEA Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme (ECBCS), Annex 20.
- Ineichen, P., O. Guisan, et R. Perez. 1990. Ground-reflected radiation and albedo. *Solar Energy* 44, n°. 4: 207-214.
- Ineichen, P., R. Perez, et R. Seals. 1987. The importance of correct albedo determination for adequately modeling energy received by tilted surfaces. *Solar Energy* 39, n°. 4: 301-305.
- Iziomon, M., Mayer, H., and Matzarakis, A. (2003). “Downward atmospheric longwave irradiance under clear and cloudy skies: Measurement and parameterization.” *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 65(10), 1107-1116.
- Johansson, E. (2006). “Influence of urban geometry on outdoor thermal comfort in a hot dry climate: A study in Fez, Morocco.” *Building and Environment*, 41(10), 1326–1338.

- Johnson, G. T., Oke, T. R., Lyons, T. J., Steyn, D. G., Watson, I. D., and Voogt, J. A. (1991). "Simulation of surface urban heat islands under 'IDEAL' conditions at night part 1: Theory and tests against field data." *Boundary-Layer Meteorology*, 56(3), 275–294.
- Kamal-Chaoui, L., and Robert, A. (2009). "Competitive cities and climate change." *OECD Regional Development Working Papers N° 2*.
- Kämpf, J. H., Montavon, M., Bunyesc, J., Bolliger, R., and Robinson, D. (2010). "Optimisation of buildings' solar irradiation availability." *Solar Energy*, 84(4), 596–603.
- Kämpf, J. H., and Robinson, D. (2010). "Optimisation of building form for solar energy utilisation using constrained evolutionary algorithms." *Energy and Buildings*, 42(6), 807–814.
- Kaplan, H., and Dinar, N. (1996). "A lagrangian dispersion model for calculating concentration distribution within a built-up domain." *Atmospheric Environment*, 30(24), 4197–4207.
- Kasten, F., and Czeplak, G. (1980). "Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud." *Solar energy*, 24(2), 177–189.
- Kastner-Klein, P., Norman, O. K., and Clark, J. V. (2004). "Modeling of flow and dispersion characteristics in typical urban building configurations with the fast-response model QUIC." *13th Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the Air and Waste Management Assoc.*
- Kikegawa, Y., Genchi, Y., Yoshikado, H., and Kondo, H. (2003). "Development of a numerical simulation system toward comprehensive assessments of urban warming countermeasures including their impacts upon the urban buildings' energy-demands." *Applied Energy*, 76(4), 449–466.
- Kjaersgaard, J. H., Plauborg, F. L., and Hansen, S. (2007). "Comparison of models for calculating daytime long-wave irradiance using long term data set." *Agricultural and Forest Meteorology*, 143(1-2), 49–63.
- Klein, S. A., and et al. (2010). *TRNSYS 17: A Transient System Simulation Program*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA,.
- Klucher, T. (1979). "Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces." *Solar Energy*, 23(2), 111-114.
- Kondo, H., Genchi, Y., Kikegawa, Y., Ohashi, Y., Yoshikado, H., and Komiyama, H. (2005). "Development of a Multi-Layer Urban Canopy Model for the Analysis of Energy Consumption in a Big City: Structure of the Urban Canopy Model and its Basic Performance." *Boundary-Layer Meteorology*, 116(3), 395–421.
- Korsgaard, I., Mikkelsen, H., and Olesen, J. (1991). "Langbolget indstraling." *AJMET research note 26, Danish Institute of Agricultural Sciences (in Danish with English summary)*.
- Kusaka, H., Kondo, H., Kikegawa, Y., and Kimura, F. (2001). "A simple single-layer urban canopy model for atmospheric models: Comparison with multi-layer and slab models." *Boundary-Layer Meteorology*, 101(3), 329–358.
- De La Torre, J. M. O., and Serra, R. (1998). "Microclimatic analysis of some urban scenarios." *In proceedings of PLEA*, London: James&James, Lisbon, Portugal, 159–162.
- Leuzinger, S., Vogt, R., and Körner, C. (2010). "Tree surface temperature in an urban environment." *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 56–62.
- Li, X., Yu, Z., Zhao, B., and Li, Y. (2005). "Numerical analysis of outdoor thermal environment around buildings." *Building and Environment*, 40(6), 853–866.
- Liu, B., and Jordan, R. (1960). "The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation." *Solar Energy*, 4(3), 1-19.

- Ma, J., Li, X., and Zhu, Y. (2012). "A simplified method to predict the outdoor thermal environment in residential district." *Building Simulation*, 5(2), 157–167.
- Macdonald, R. W. (2000). "Modelling The Mean Velocity Profile In The Urban Canopy Layer." *Boundary-Layer Meteorology*, 97(1), 25–45.
- Marry, S. (2008). "Représentations et perceptions de la densité urbaine." Mémoire de fin d'études, IUG, grenoble.
- Martilli, A., Clappier, A., and Rotach, M. W. (2002). "An urban surface exchange parameterisation for mesoscale models." *Boundary-Layer Meteorology*, 104(2), 261–304.
- Martin, M., and Berdahl, P. (1984). "Characteristics of infrared sky radiation in the United States." *Solar Energy*, 33(3), 321–336.
- Masson, V. (2000). "A Physically-Based Scheme For The Urban Energy Budget In Atmospheric Models." *Boundary-Layer Meteorology*, 94(3), 357–397.
- Masson, V. (2006). "Urban surface modeling and the meso-scale impact of cities." *Theoretical and Applied Climatology*, 84(1), 35–45.
- Miguet, F., et Groleau, D. (2002). "A daylight simulation tool for urban and architectural spaces—application to transmitted direct and diffuse light through glazing." *Building and Environment*, 37(8-9), 833–843.
- Miguet, F., and Groleau, D. (2007). "Urban bioclimatic indicators for urban planners with the software tool SOLENE." *Portugal SB07 Sustainable Construction, materials and practices: challenges of the industry for the new millennium, Lisbon, Portugal*, 348–355.
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement. (2011). "Réglementation thermique 2012 : un saut énergétique pour les bâtiments neufs." MEDDTL/ADEME.
- Mochida, A., and Lun, I. Y. F. (2008). "Prediction of wind environment and thermal comfort at pedestrian level in urban area." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(10-11), 1498–1527.
- Monteith, J. L. (1973). "Principles of environmental physics." *Edward Arnold, London*.
- De Munck, C., Pigeon, G., Meunier, F.-E., and Tréméac, B. (2010). *Projet CLIM2 Climat urbain et climatisation*.
- Muneer, T., and Kambezidis, H. (1997). *Solar radiation and daylight models for energy efficient design of buildings*. Architectural Press, Oxford.
- Musy, M. (1999). "Génération automatique de modèles zonaux pour l'étude du comportement thermo-aéraulique des bâtiments." La Rochelle.
- Musy, M. (2009). "Le végétal dans la ville, un régulateur de climat ?" *Jardins, environnement et santé. 11e colloque scientifique de la SNHF. Nantes, SNHF, 15 mai 2009*.
- Musy, M., Calmet, I., Bozonnet, E., and Rodriguez, F. (2011). "Modélisation des interactions ville-climat-énergie." France, 15–33.
- Nelson, M. A., Williams, M. D., Zajic, D., Brown, M. J., and Pardyjak, E. R. (2009). *Evaluation of an urban vegetative canopy scheme and impact on plume dispersion*. Los Alamos National Laboratory (LANL).
- Nicholson, S. E. (1975). "A pollution model for street-level air." *Atmospheric Environment* (1967), 9(1), 19–31.
- Niemelä, S., Räisänen, P., and Savijärvi, H. (2001). "Comparison of surface radiative flux parameterizations part I: Longwave radiation." *Atmospheric Research*, 58(1), 1-18.
- Noilhan, J. (1981). "A model for the net total radiation flux at the surfaces of a building." *Building and Environment*, 16(4), 259–266.
- Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates*. University press, Cambridge.

- Pattacini, L. (2012). "Le projet de recherche URSULA: un exemple d'approche intégrée de la modélisation urbaine." *Modélisation urbaine: de la représentation au projet*, Commissariat Général au Développement Durable, Paris.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Michalsky, J., and Stewart, R. (1990). "Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance." *Solar Energy*, 44(5), 271-289.
- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Stewart, R., and Menicucci, D. (1987). "A new simplified version of the perez diffuse irradiance model for tilted surfaces." *Solar Energy*, 39(3), 221-231.
- Perez, R., Seals, R., and Michalsky, J. (1993). "All-weather model for sky luminance distribution--Preliminary configuration and validation." *Solar Energy*, 50(3), 235-245.
- Perez, R., R. Seals, A. Zelenka, et P. Ineichen. (1990). Climatic evaluation of models that predict hourly direct irradiance from hourly global irradiance: Prospects for performance improvements. *Solar Energy* 44, n°. 2: 99-108.
- Perez Sanchez, M. (1989). "Typologie et uniformisation syntaxique des modèles de transfert de chaleur dans le contexte de la thermique du bâtiment." Institut national des sciences appliquées de Lyon, Villeurbanne.
- Peuportier, B., and Sommereux, I. B. (1990). "Simulation tool with its expert interface for the thermal design of multizone buildings." *International Journal of Solar Energy*, 8(2), 109-120.
- Pigeon, G. (2007). "Les échanges surface-atmosphère en zone urbaine - Projets CLU-ESCOMPTE et CAPITOU." Université Paul Sabatier-Toulouse III.
- Pigeon, G., Legain, D., Durand, P., and Masson, V. (2007). "Anthropogenic heat release in an old European agglomeration (Toulouse, France)." *International Journal of Climatology*, 27(14), 1969-1981.
- Piringer, M., Grimmond, C. S. B., Joffre, S. M., Mestayer, P., Middleton, D. R., Rotach, M. W., Baklanov, A., De Ridder, K., Ferreira, J., Guilloteau, E., and others. (2002). "Investigating the surface energy balance in urban areas--recent advances and future needs." *Water, Air, & Soil Pollution: Focus*, 2(5), 1-16.
- Plate, E. J., and Kiefer, H. (2001). "Wind loads in urban areas." *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 89(14-15), 1233-1256.
- Potchter, O., Cohen, P., and Bitan, A. (2006). "Climatic behavior of various urban parks during hot and humid summer in the Mediterranean city of Tel Aviv, Israel." *International journal of climatology*, 26(12), 1695-1711.
- Prata, A. (1996). "A new long-wave formula for estimating downward clear-sky radiation at the surface." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 122(533), 1127-1151.
- Ratti, C., Baker, N., et Steemers, K. (2005). "Energy consumption and urban texture." *Energy and Buildings*, 37(7), 762-776.
- Reindl, D. T., Beckman, W. A., and Duffie, J. A. (1990a). "Diffuse fraction correlations." *Solar Energy*, 45(1), 1-7.
- Reindl, D. T., Beckman, W. A., and Duffie, J. A. (1990b). "Evaluation of hourly tilted surface radiation models." *Solar Energy*, 45(1), 9-17.
- Ringebach, N. (2004). "Bilan radiatif et flux de chaleur en climatologie urbaine : Mesures, modélisation et validation sur Strasbourg." Louis Pasteur Strasbourg I.
- Robinson, D. (2006). "Urban morphology and indicators of radiation availability." *Solar Energy*, 80(12), 1643-1648.
- Robinson, D. (2009). "Citysim: comprehensive micro-simulation of resource flows for sustainable urban planning." <http://www.ibpsa.org/m_bs2009.asp> (Jul. 6, 2010).

- Robinson, D., and Stone, A. (2004). "Solar radiation modelling in the urban context." *Solar Energy*, 77(3), 295-309.
- Robinson, D., and Stone, A. (2005). "A simplified radiosity algorithm for general urban radiation exchange." *Building Services Engineering Research and Technology*, 26(4), 271.
- Rockle, R. (1990). "Bestimmung der Stomungsverhältnisse im Bereich komplexer Bauungsstrukturen." der Technischen Hochschule Darmstadt., Germany.
- Rousseau, S. (1978). "Simulation numérique du comportement thermique des locaux d'habitation. Evaluation de l'influence de la radiation solaire, des conditions climatiques et des paramètres caractéristiques du bâtiment." Thèse de Doctorat, INSA de Lyon.
- Roux, J.-J. (1984). "Proposition de modèles simplifiés pour l'étude du comportement thermique des bâtiments." Thèse de Doctorat, INSA de Lyon.
- Salamanca, F., and Martilli, A. (2010). "A new Building Energy Model coupled with an Urban Canopy Parameterization for urban climate simulations—part II. Validation with one dimension off-line simulations." *Theoretical and applied climatology*, 99(3), 345–356.
- Santamouris, M., Papanikolaou, N., Livada, I., Koronakis, I., Georgakis, C., Argiriou, A., and Assimakopoulos, D. . (2001). "On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings." *Solar Energy*, 70(3), 201–216.
- Satterlund, D. (1979). "An improved equation for estimating long-wave radiation from the atmosphere.." *Water Resources Research*, 15(6), 1649-1650.
- Sherman, C. A. (1978). "Mass-consistent model for wind fields over complex terrain." *J. Appl. Meteorol.:(United States)*, 17(3).
- Snyder, W. C., and Lawson, R. . (1994). "Wind tunnel measurements of flow fields in the vicinity of buildings." Nashville, TN.
- SOFRES. (2007). "Les Français et leur habitat – Perception de la densité et des formes d'habitat, Etude réalisée pour l'Observatoire de la Ville." <<http://www.tns-sofres.com/points-de-vue/FE0F882F24A142A298D7005A65AEE078.aspx>> (Mar. 20, 2013).
- Sridhar, V. (2001). "Land surface modelling of energy-balance components: model validation and scaling effects." Oklahoma State University, Stillwater, OK.
- Sridhar, V., R.L. Elliott, F. Chen, et J.A. Brotzge. 2002. Validation of the NOAA-OSU land surface model using surface flux measurements in Oklahoma. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres* 107, n°. 20.
- Swinbank, W. C. (1963). "Long-wave radiation from clear skies." *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 89(381), 339-348.
- Taha, H. (1997). "Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat." *Energy and buildings*, 25(2), 99–103.
- Teller, J., et S. Azar. 2001. Townscope II--A computer system to support solar access decision-making. *Solar Energy* 70, n°. 3: 187-200.
- Torres, J., García, A., De Blas, M., and De Francisco, A. (2008). "Calculation of the horizon brightness irradiance in the model of Perez using the unit-sphere method." *Renewable Energy*, 33(1), 149-154.
- Traisnel, J.-P. (2001). *Habitat et développement durable*. Les cahiers du club d'Ingénierie Prospective Energie et Environnement.
- Vinet, J. (2000). "Contribution à la modélisation thermo-aéraulique du microclimat urbain. Caractérisation de l'impact de l'eau et de la végétation sur les conditions de confort en espaces extérieurs "Thèse de Doctorat, Université de Nantes, École polytechnique de l'Université de Nantes.

- Vinet, J., and Groleau, D. (2000). "La modélisation des transferts radiatifs dans le logiciel Solene. Applications au microclimat urbain et au confort thermique en espace ouvert." IBPSA France 2000. Sophia Antipolis, France, 29-35.
- Walton, G.N. 1980. A new algorithm for radiant interchange in rooms loads calculations. Dans *ASHRAE Transactions* 86 (II), 190-208.
- Wenjing, L., Yanuar, S., and Perry, P. J. (2004). "GIS analysis for the climatic evaluation of 3d urban geometry: the development of GIS analytical tools for sky view factor." *GISDECO 2004 - Seventh International Seminar on GIS in developing countries*, Universiti Teknologi Malaysia, Skudai, Johor, Malaysia.
- William, G. ., and Gold, L. W. (1977). "CBD-180-F. Les températures du sol - IRC - CNRC-NRC." <<http://www.nrc-cnrc.gc.ca/fra/idp/irc/dcc/digest-construction-180.html>> (Sep. 26, 2011).
- Wurtz, E., and Nataf, J. M. (1995). "Modélisation tridimensionnelle des transferts thermiques et aérauliques dans le bâtiment en environnement orienté objet."
- Yang, P. P., Putra, S. Y., and Li, W. (2007). "Viewsphere: a GIS-based 3D visibility analysis for urban design evaluation." *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34(6), 971–992.
- Yang, X., Zhao, L., Bruse, M., and Meng, Q. (2012). "An integrated simulation method for building energy performance assessment in urban environments." *Energy and Buildings*.
- Yao, R., Luo, Q., and Li, B. (2011). "A simplified mathematical model for urban microclimate simulation." *Building and Environment*, 46(1), 253–265.
- Yu, C., and Hien, W. N. (2006). "Thermal benefits of city parks." *Energy and Buildings*, 38(2), 105–120.